送電鉄塔間通信に向けた 100GHz 帯無線信号の反射特性

森村 俊*，池田 研介，宮下 充史（電力中央研究所）

Reflection Characteristics of 100GHz Band Wireless Signals for Communications between Power Transmission Towers

Shun Morimura, Kensuke Ikeda, Michifumi Miyashita
(Central Research Institute of Electric Power Industry)

１．まえがき

当所では，2040 年頃のインフラ用通信の実現を目指した高信頼通信ネットワークの構想として，図 1 に示す TOWER LINK® (Transmission tower based Optical and Wireless Extremely Reliable Link) 構想を掲げている[1]。ここでは HAPS と送電鉄塔周辺の端末間や，送電鉄塔上の端末同士を無線で接続することが想定されている。このとき，図 2 のように無線伝搬路中に障害物が入り込むことが考えられ，これまでに追加損失に関する実験などを実施してきた[2], [3]。

これを踏まえ，本稿では伝搬路付近の金属構造物による電波の反射に関する実験結果について述べる。

２．実験の概要

実験は東京都小金井市にある国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の Beyond 5G 電波暗室棟で行った。図 3 はその様子である。右奥に見える送信アンテナから左側中央の反射板に 100 GHz の電波を放射し，右下に見える受信アンテナで反射波の強度を測定した。図 4 は暗室を上から見たときの実験構成である。送受信アンテナ間の距離は 13.44 m，送信アンテナおよび受信アンテナから反射板中央までの距離はそれぞれ 9.36, 9.16 m である。反射板としては単純なアルミ平板（1 m 角および 50 cm 角），アルミパイプ

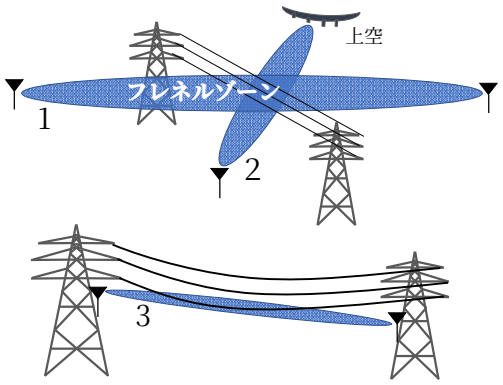


図 2 無線通信のフレネルゾーンに電線が存在する例
Fig.2. An example of a power line in the Fresnel zone of a wireless communication system

（外径 3 mm および 6 mm）を並べて周期構造を持たせたもの，およびトタン板（周期約 32 mm）を用いた。これを図 4 に示す位置で床に垂直な軸（ヨー）の周りに回転させ，受信アンテナの位置における反射波の強度を測定した。

３．反射波の干渉影響

実験結果の一例として，外径 6 mm，長さ 50 cm のアルミパイプを一様に隙間なく並べて周期構造を持たせた 50 cm 角の反射板（アルミ凹凸版）に対する反射特性について述べ

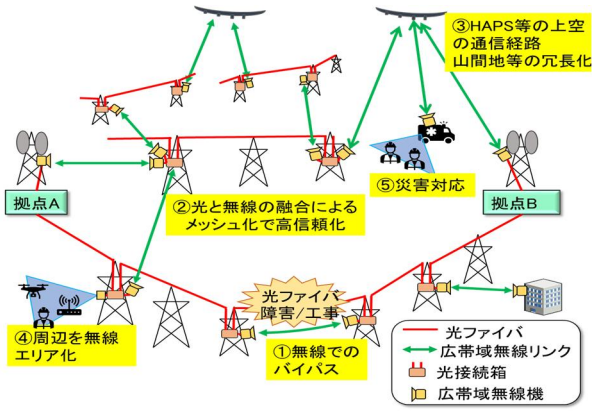


図 1 TOWER LINK® (Transmission tower based Optical and Wireless Extremely Reliable Link) 構想の概要
Fig.1. Overview of TOWER LINK concept

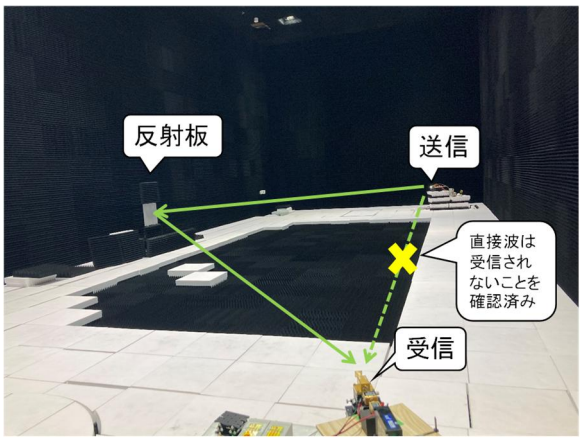


図 3 電波暗室内における実験の様子
Fig.3. Experiment in the electromagnetic anechoic chamber

©2026 IEE Japan

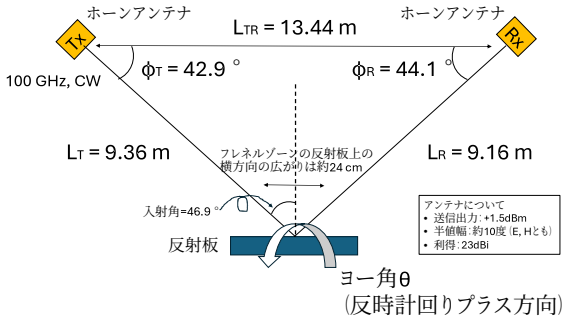


図 4 実験の構成
Fig.4. Experimental configuration

る。図 5 はアルミ凹凸版の外観写真である。ここではパイプを垂直方向に並べた状態を示している。

図 6 にアルミ凹凸版を回転させたときの受信アンテナ位置における受信電力（ただし 5 GHz にダウンコンバート後）を示す。偏波の方向は床面に垂直（アルミ凹凸版に対して TE 波）とした。0 度付近のピークは 0 次の反射によるものだが，±20 度強に 1 次のピークが見られる。この角度はヤングの干渉条件より約±21 度と算出され，凹凸の周期に応じた反射波が生じていることが分かる。

図 7 はアルミ凹凸版を 90 度回転させ，パイプを水平方向にしたときの受信強度特性である。偏波は変わらず床面に垂直としている。この構成では 1 次のピークは現れず，0 次の反射のみが観測された。このように，入反射角および周期構造の角度によっては強い干渉ピークが発生することがあるため，回線構築時には伝搬路周辺の構造物について注意する必要がある。特に、送電線にも撚り線によって数 mm 単位の周期構造が存在する。

実験では他に外径 3 mm（100 GHz 電波の波長と同一）のアルミパイプを並べた凹凸版や，トタン板（周期約 32 mm）などに対する反射特性も測定した。特にトタン板については図 7 のように多くの角度で干渉ピークが見られ，回線構

図 5 アルミ凹凸板 (50 cm 角，水平方向の周期 6 mm)
Fig.4. Aluminum uneven plate (50 cm square, horizontal period 6 mm)

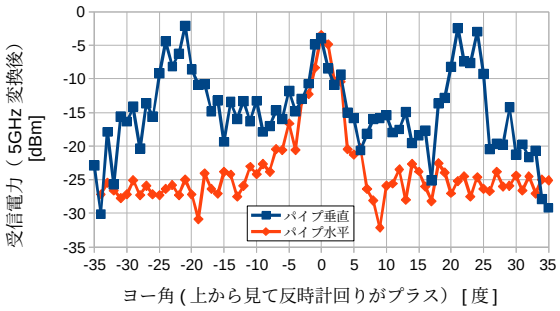


図 6 アルミ凹凸板の回転角度に対する反射波の受信強度特性
Fig.6. Received strength characteristics of reflected waves against the rotation angle of an aluminum uneven board

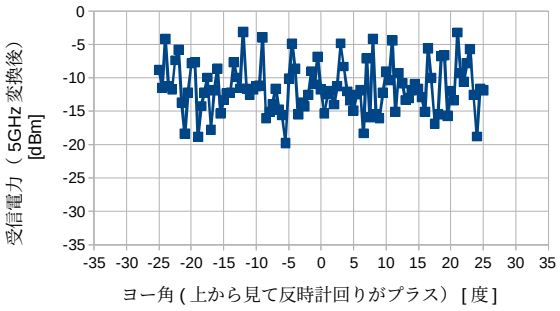


図 7 トタン板の回転角度に対する反射波の受信強度特性
Fig.7. Received strength characteristics of reflected waves against the rotation angle of a corrugated metal board

築時にはより一層の注意が必要であることが分かった。

４．あとがき

TOWER LINK 構想では電力設備の周辺で高周波無線通信を行うことを想定しているが，100 GHz オーダーになると数 mm～数 10 mm の周期を持つ構造物によって，思いがけない方向に強い反射波のピークが現れる可能性があることが示された。無線通信回線を構築する際には，この点についても注意する必要がある。

本研究成果は，国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT（エヌアイシーティー））の委託研究（JPJ012368C04901）により得られたものです。

文　献

(1) 池田研介・宮下充史：電力中央研究所報告，GD24017 (2025).
(2) 池田研介・宮下充史・田中彰浩・森村俊：信学技報，MWPTHz 2023-39, pp.173-178 (2023).
(3) 池田研介・宮下充史・森村俊・田中彰浩：信学技報，MWPTHz 2024-50, pp.182-187 (2024).

©2026 IEE Japan

５Ｇ対応分散アンテナシステムのＴＤＤタイミング検出における共通位相誤差補正手法

杉本　雅彦*，正木　克実，飯田　康隆（東芝）

Common Phase Error Correction Method for TDD Timing Detection in 5G Distributed Antenna Systems

Masahiko Sugimoto, Masaki Katsumi, Iida Yasutaka (Toshiba Corporation)

１．まえがき

分散アンテナシステム（DAS : Distributed Antenna System）を複数の携帯電話事業者で共同利用する場合、事業者ごとに、上り通信と下り通信を時間的に切り替える TDD（Time Division Duplex）タイミングの検出が必要となる。システム構成の簡素化には、TDD タイミング検出回路の小規模化が求められる。筆者らはこれまでに、5G 無線信号から同期信号（SS : Synchronization Signal）および物理報知チャネル（PBCH : Physical Broadcasting Channel）で構成される同期信号ブロック（SSB : SS/PBCH block）を復調し、TDD タイミングを検出する技術[1]や、独自のアーキテクチャで回路規模を抑制する実装手法[2]、サンプリング位相の最適化[3]、キャリア周波数誤差の補正手法[4]を提案した。

本稿では、5G 対応 DAS において、全サブキャリアに共通して位相回転を生じる共通位相誤差（CPE : Common Phase Error）の影響を最小限に抑える補正手法について述べる。

２．無線フレームでの同期信号ブロックの配置

図 1 上段は 5G 無線フレームの例で、1 フレームは 10ms、10 個のサブフレーム（各 1ms）から成る。サブキャリア間隔が 30 kHz の場合、1 サブフレームは 2 スロット、各スロットは 14 シンボルで構成される。

図 1 下段は SSB の配置パターン例で、SSB は 4 シンボルから成り、主同期信号（PSS : Primary Synchronization Signal）、副同期信号（SSS : Secondary Synchronization Signal）、および PBCH で構成される。PBCH には復号のための参照信号である DM-RS（DeModulation Reference Signal）for PBCH が埋め込まれている。各 SSB にはインデックス（国内運用では 0～7）が付与され、インデックスごとに固有の DM-RS が送信される。したがって、PSS、SSS、PBCH（DM-RS）から SSB インデックスを検出すれば、その SSB がフレーム内のどの位置にあるかを特定できる。さらに、TDD タイミングがフレーム内で既知であれば、受信した SSB の位置との相対関係から、次の切り替えタイミングまでの時間を推定できる。

３．共通位相誤差の存在による課題

図 2 上段は CPE の発生要因例で、送受信系の局部発振器（LO : Local Oscillator）の位相不一致により生じる。送信側と受信側の LO は起動時にランダムな初期位相を持つため、基準位相に差異が生じ、受信側ベースバンド信号に共通の位相回転として現れる。

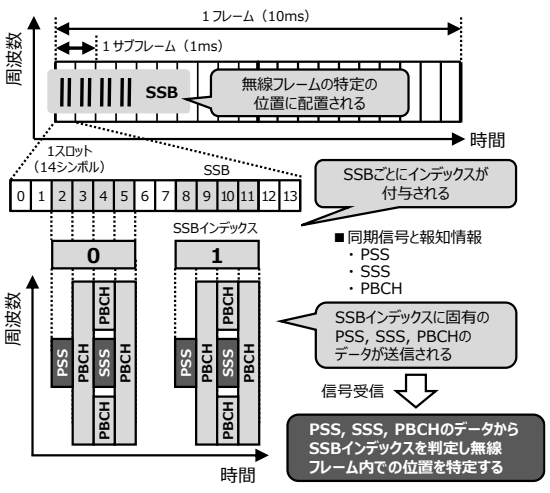


図１　同期信号ブロック配置の例
Fig.1.　Example of synchronization signal block allocation

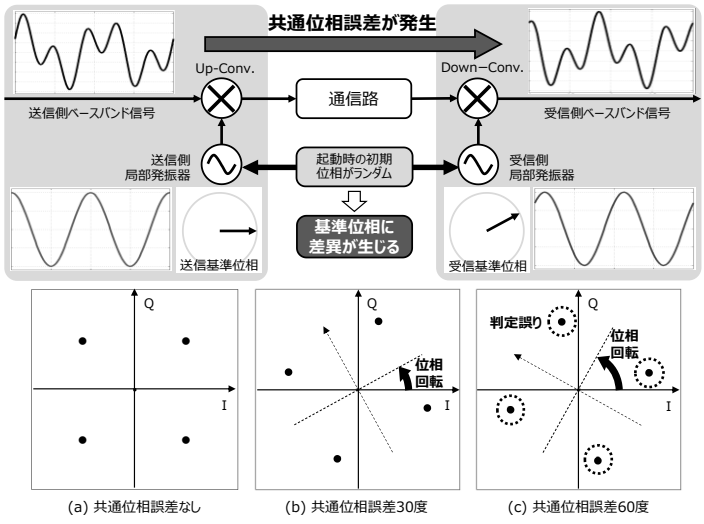


図２　共通位相誤差の発生要因と受信処理への影響
Fig.2. Causes of Common Phase Error and Its Impact on Reception Processing

©2026 IEE Japan

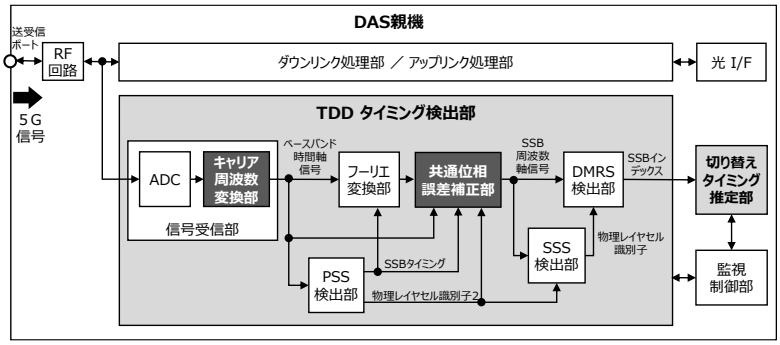


図３ DAS 親機の構成
Fig.3. Configuration of master unit of DAS system

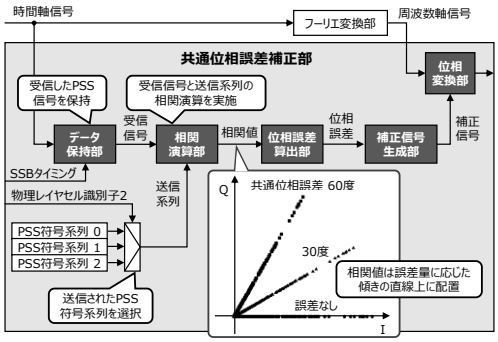


図４ 共通位相誤差補正部の構成
Fig.4. Configuration of the common phase error correction unit

図 2 下段は、四位相偏移変調（QPSK：Quadrature Phase Shift Keying）信号を例に、CPE が受信処理に与える影響を示す。左側（a）は CPE が存在しない場合で、IQ 複素平面上のシンボルは理想的な位置に収束し、誤判定は生じない。中央（b）は CPE が 30 度の場合で、コンスタレーション全体が反時計周りに 30 度回転するが、QPSK では象限を越えないため誤判定は発生しない。しかし、8PSK（8 位相偏移変調）や 16QAM（16 直交振幅変調）など高次変調では、シンボル間隔が狭く、30 度の回転でも誤判定が生じる可能性がある。右側(c)は CPE が 60 度の場合で、この場合は QPSK でも象限を越えてシンボルが移動し、誤判定が高確率で発生する。このため、TDD タイミング検出精度を確保するには、信号判定より前に位相補正が必要となる。しかし，位相補正には，動作クロックを精密に調整するクロック再生など演算量の多い処理が必要である。よって、CPE が存在しても演算量の多い処理を用いることなく、5G 無線信号から SSB を検出・復調し、SSB インデックスを算出することが課題である。

４．共通位相誤差補正手法

図 3 は DAS 親機の構成を示す。TDD タイミング検出部は、SSB を含む 5G 信号を受信し、信号受信部にてベースバンドの時間軸信号を生成する。PSS 検出部は、SSB 内の PSS を検出し、その検出タイミングを SSB タイミングとして出力する。加えて、検出された PSS 信号が複数の符号化系列のうちどれに該当するかを識別し、物理レイヤーセル識別子 2 として出力する。フーリエ変換部は、SSB タイミングに基づきフーリエ変換を行い、SSB の周波数軸信号を生成する。その後、SSS 検出部および DMRS 検出部で信号判定が行われ、SSB インデックスが算出される。切り替えタイミング推定部は、算出された SSB インデックスから次回の切り替えタイミングまでの時間を推定する[(1)(2)]。問題となる共通位相誤差は信号受信部のキャリア周波数変換部で生じるため、共通位相誤差補正部にて位相誤差を補正する。

図 4 は共通位相誤差補正部の構成を示す。本補正部は SSB タイミングに基づき、受信した PSS 信号を格納し、物理レイヤーセル識別子 2 に基づき、送信側 PSS 符号系列を選択する。相関演算部では、受信信号と送信系列の相関演算を実施する。算出された相関値を IQ 複素平面上にプロットすると、CPE がない場合、受信信号と送信系列との間に位相差は生じないため、相関値の複素データは偏角 0 度、すなわち I 軸上に整列する。一方、CPE が存在する場合、受信信号は送信系列に対して位相回転を伴うため、相関値の複素データはその誤差量に応じた偏角をもつ直線上に配置される。位相誤差算出部では、この直線の傾きを解析することで、位相誤差を算出する。補正信号生成部では、算出された位相誤差に基づき、所定の偏角と絶対値を持つ補正用複素信号を生成する。最後に、位相変換部にて、生成された補正用複素信号に基づき、周波数軸信号の位相を補正する。

以上のように、本手法は従来のクロック再生や高精度同期処理に比べて、演算量を大幅に削減できる点が特徴である。特に、相関演算を中心とした処理により、FPGA や DSP 等のハードウェア実装時にもリソース消費を抑えつつ、リアルタイムでの位相補正が可能となる。また、提案した補正方式は、QPSK のみならず、8PSK や 16QAM など高次変調方式にも適用可能であり、今後の 5G/6G 無線システムの高度化にも柔軟に対応できる。

５．あとがき

5G 対応 DAS において、共通位相誤差が存在する場合でも、演算量の多い処理を必要とせず、5G TDD 信号の切り替えタイミングを検出可能な手法を開発した。

本手法は、5G 信号の各周波数帯に適用でき、今後は多様な無線帯域への展開や、複数事業者による共同利用環境下での実証・開発を進める予定である。

文　献

(1) 杉本・正木・飯田，2024 年電気学会全国大会，No. 3-012
(2) 杉本・正木・飯田，東芝レビュー，Vol. 79，No. 6，2024/11
(3) 杉本・正木・飯田，2025 年電気学会全国大会，No. 3-005
(4) 杉本・正木・飯田，2025 年電気学会 C 部門大会，GS2-2

©2026 IEE Japan

２入力積和演算回路を用いた光リザバーシステムの８入力化の実装に向けた検討

小椋　道矢*、草野　圭祐、関根　かをり、和田　和千（明治大学）
砂田　哲（金沢大学）、原　伸介、田野井　聡、笠松　章史（情報通信研究機構）

Towards the Implementation of an 8-Input Photonic Reservoir System Using Multiply Two-Input MAC Circuits

Michiya Ogura, Keisuke Kusano, Kawori Sekine, Kazuyuki Wada (Meiji University)
Satoshi Sunada (Kanazawa University), Shinsuke Hara, Satoru Tanoi, Akifumi Kasamatsu (National institute of Information and Communication Technology)

１．はじめに

光リザバーコンピューティングの出力層にアナログ乗算回路を用いた光電融合光リザバーシステムが研究されている[1]。本稿で多入力化のための各出力部の整合の方法を検討し、得られた回路特性とシステムの評価をする。

２．多入力積和演算回路

TSMC65nm プロセスによる電流出力の２入力積和演算回路の設計が行われた[2]。本稿では図１のようにこの 4 基の回路出力を、整合抵抗を挿入しながらトーナメント状に結合することで、外部負荷に対して整合を保ちながら電流加算を行う 8 入力構成を検討する。

その結果、整合抵抗なしの場合は遮断周波数が 1.90 GHz、本回路では 5.01 GHz と改善が見られた。

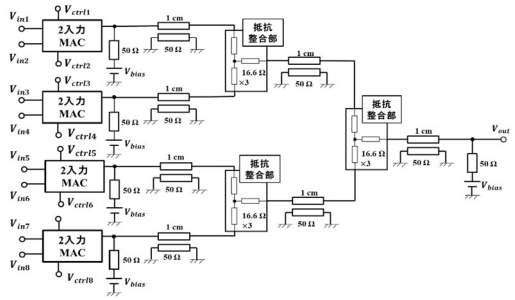


図１　8 入力積和演算回路

Fig 1. 8-input multiply accumulate circuit

３．シミュレーションによるシステムの評価

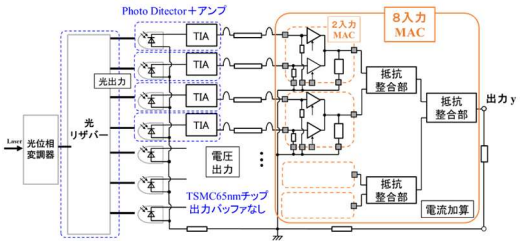


図２　光電融合光リザバーシステム

Fig 2 . Photonic-electronics reservoir system.

図 2 に光リザバーシステムの図を示す。先行研究と同じ光リザバーシステムを想定し、出力層の演算回路を本稿で構成した 8 入力積和演算回路に変更し、シミュレーションを行った。 図 3 にシミュレーションの波形を示す。

これらの結果の NMSE で評価を行う。理想演算器の場合は 0.1106、整合抵抗なしの回路の場合は 0.3818、整合抵抗ありの本回路の場合は 0.5543 であった。

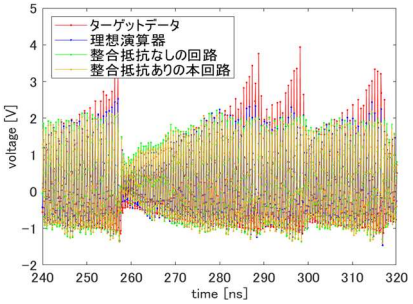


図３　光リザバー出力を用いたシミュレーション結果

Fig 3. Simulation result using photonic reservoir outputs

５．まとめ

８入力積和演算回路を、2 入力積和演算回路の整合を取る構成として、光リザバーの出力データを用いたシステムの検証を行った。この光リザバーシステムを PCB 基板上に実装し、測定評価することが今後の目標である。

文献

[1] Y. Ohtsuka, et al., “Output Estimation of Photonic Reservoir Systems Considering Characteristics of Analog MAC Circuits” ICECS2024

[2] 草野圭祐 他,” ２入力積和演算回路を複数用いた光リザバーシステムの評価”, 令和７年電気学会全国大会

謝辞

本研究の一部は、東京大学大規模集積システム設計教育センターを通し、Candence 株式会社の協力で行われたものである。また、JST、JSPS 科研費番号 JP22H05199 の支援を受けた。ここに深く感謝の意を示す。

©2026 IEE Japan

PTAT 電圧発生回路のバイアス電圧依存性についての一考察

村田　英夢*，関根　かをり（明治大学）

Emu Murata*, Kawori Sekine (Meiji University)

１．背景

PTAT 電圧発生回路は、温度に比例した電圧を生成する回路として用いられており、バイアス電圧に依存しない特性を有することが知られている［1]。一方で、実際の回路動作においては、PTAT 出力電圧がバイアス電圧に依存するという報告［2］もあり、その要因については十分に解明されていない。

本研究では、PTAT 回路を構成する MOSFET の弱反転領域動作に着目し、バイアス電圧(V_C)依存性の発生要因について検討する。

２. シミュレーション

図１に PTAT 電圧発生回路を示す。T=300 K において V_{DD}=1.8 V、V_C=0.3 V のバイアス条件で、VPTAT の出力は 0.0761 V であったため M_1 のソースおよび、M_2 のドレインに当たる電圧を 0.0761 V とし、Vc=0.3 V 近傍において単体 MOSFET の V_C-I_D 特性のシミュレーションを行った。図２に示すシミュレーション結果より、V_C-I_D 特性の片対数グラフにおける傾きに差異がみられた。近似直線は測定結果のプロットから最小二乗法により算出した。

３．考察

MOSFET のドレイン電流は 4 端子のバイアス電圧の値を用いた式（１）で表される[1]。方対数グラフ表示した V_C-I_D 特性の傾きはゲート電圧に対する相対感度（qr/kT）を示し r(ゲート電圧減衰係数)に比例している。r の値の違いを生んだ原因として、2 つの MOSFET のドレイン電圧の違いが挙げられる。M_1 は M_2 に比べてドレイン電圧の値が大きい為、ドレインーバルク間の空乏層が大きくなる。それによってドレイン端からソース端までのチャネル長に比べ実際の有効チャネル長が短くなりドレインーソース間にかかる電界 E_{DS} は大きくなる。ドレインーソース間の電界が r に与える影響は式（２）で与えられ、E_{DS} が大きくなると、r の値が大きくなることが分かる。このとき、M_1 は M_2 に比べ、よりドレインーソース間の電位差が大きいため E_{DS} が大きく、r の値もより大きくなると考えられる。

次に、r の値の違いが V_{PTAT} に与える影響について考察する。PTAT 電圧発生回路の出力電圧(V_{PTAT})は、式（１）を用いて、M_1 と M_2 のドレイン電流が等しい条件から求められる。$r_1 \neq r_2$ の場合、電流一致条件から M_1 のソース電位（V_{PTAT}）はゲート電圧に対して正の依存性をもつ。$r_1 > r_2$ のため、ゲート電圧変化に対する M1 の電流感度が増大し、ＶＰＴＡＴはＶＣに対し正の感度をもつ。さらに、dI_D/dV_C はゲート電圧に対する絶対感度（I_0・qr/kT）を示し、チャネル形状比(W/L)に比例することに着目する。本回路では M1：M2＝10:1 と設計されているため、VPTAT が VC に対してより高い正の感度をもつと考えられる。

$$I_D = I_0\left(e^{\frac{q\left(r(V_G-V_B)-(V_S-V_B)\right)}{kT}} - e^{\frac{q\left(r(V_G-V_B)-(V_D-V_B)\right)}{kT}}\right) \quad -(1)$$

$$r = r' + \alpha E_{DS} \qquad (\alpha > 0) \quad -(2)$$

４．まとめ

PTAT 回路が動作するバイアス条件を与えた 2 つの MOSFET について、V_C- I_D 特性をシミュレーションにより評価した。その結果、M_1 と M_2 の r が V_{DS} の違いにより異なることが確認された。PTAT 回路では、電流一致条件を満たすために、ゲート電圧の変化に対して M_1 のソース電位(V_{PTAT})が変化して調整される。r と(W/L)はゲート電圧に対するドレイン電流の感度を示し、Ｍ１がＭ２より大きいことから、V_{PTAT} はゲート電圧 V_C に対して正の依存性をもつことが確認された。今後の課題は、この現象の物理的起源を明確化することである。

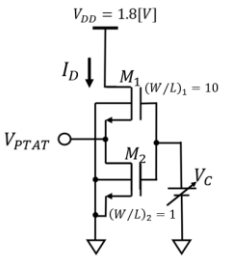


図1　PTAT電圧発生回路
Fig.1. PTAT Voltage Generator

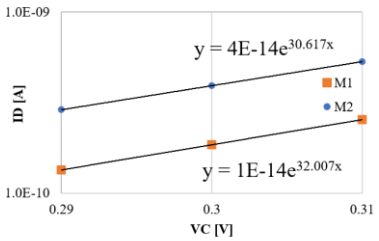


図2　$V_C - I_D$特性
Fig.1. $V_C - I_D$ characteristic

文　献

(1) Kawori TAKAKUBO et al. “PTAT voltage generator under ultra-low power supply with two subthreshold MOSFETs between rails,” IEEJ transactions on electronics, information and systems, vol. 129(8), pp.1499-1504, Aug. 2009.
(2) Emu Murata et al. “PTAT Voltage Generator-Based Voltage Reference Circuit without External Bias Voltage”, 2025 International Conference on Analog VLSI Circuits

©2026 IEE Japan

キルヒホッフの電圧則の破れと MOS-FET による信号電圧増幅

三森　基輝*（スフェリカル イメージング）

Broken Kirchhoff’s voltage low and an amplifier which amplifies signal voltage with MOS-FET

Motoki Mimori(Spherical imaging)

１．はじめに（GD 間に信号をかけるという発想）

通常 MOS-FET は、GS 間に信号をかけて動作させる。

発想の転換で、GD 間に信号をかける方法を試した結果、キルヒホッフの電圧則を破り、信号電圧を増幅することができることがわかり、理論予想通り実験にも成功した。

本稿では、この MOS-FET の GD 間特性と、その GD 間特性を利用した MOS-FET による信号増幅の独自の考え方について述べる。

２．MOS-FET の GD 間特性

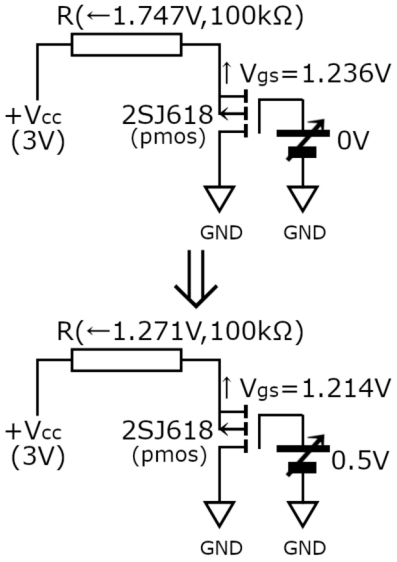


Fig.1.Gate-Drain characteristics of MOS-FET

上図が、MOS-FET の GD 間の性質を調べるための回路である。矢印は矢先が高電位、根元が低電位である。

可変電源の電圧がゼロ(V)のとき、V_{cc} の電圧は、R と V_{gs} に分散され、ドレイン電流が流れる。

ここに可変電源の電圧を上げると、その電圧は、MOS-FET の DS 間のチャネル上に電位の降下として現れる。つまり、可変電源を電圧のみの AC 信号源に置き換え、R にコンデンサと別の抵抗が直列に接続されたものを並列に接続してその抵抗の他端をグランドに接続すれば、任意波形の信号に電流を付加する電流増幅が可能になる。

３．KVL の破れと信号電圧増幅

このように、MOS-FET の GD 間を利用して、ボルテージフォロワの様な回路を構成することが可能である（実験により確認済）。

では、電流だけではなく、信号電圧を増幅することはできないのか？と疑問がわく。

結論から申し上げると、MOS-FET を二個並列に接続し、信号電圧を増幅することは可能である。実験でも動作を確認している。

この回路（Fig.2）では、ネガティブフィードバックでキルヒホッフの電圧則（KVL）を破り、回路が不安定状態から安定状態に移行しようとする性質を利用して信号電圧を増幅する。

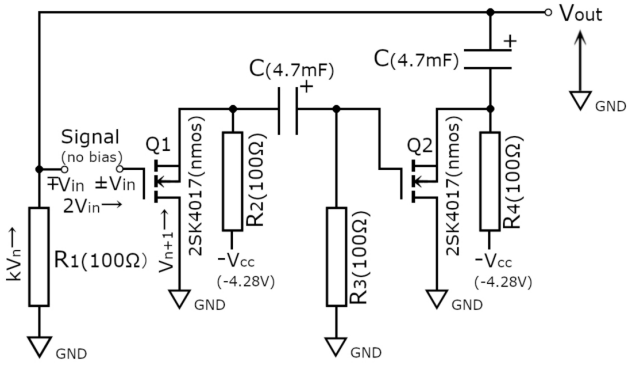


Fig.2.Voltage amplifier works with MOS-FET

具体的な動作は、次の様に説明される。

まず、シグナルの電圧がある瞬間においてゼロから $2V_{in}$ に瞬時に上昇したと仮定する。

その瞬間において、Q_1 の GD 間には $2V_{in}$ の電圧がかかる。

Fig.1 の動作に基づくと、この瞬間に R_2、R_3 上にも同じ信号電圧が現れて、それが Q_2 の GD 間に反映されて R_4 上に現れる。

©2026 IEE Japan

この信号は、減衰率を k (0<k<1)として、k 倍になってネガティブフィードバックにより R_1 上に反映されると考えるのが妥当である。

そこで、信号電圧を $2V_{in}$、R_1 上に現れる n 回目のネガティブフィードバックによる電圧を kV_n（V_0=0）、Q_1 の GD 間に現れる増幅された信号電圧を V_{n+1} として、電位の総降下量の釣り合いを示す次の漸化式が成り立つ。

$$2V_{in} + kV_n = V_{n+1}$$

これを解くと、

$$V_n = 2V_{in}(1-k^n)/(1-k)$$

が得られる。n を無限大に発散させると、

$$V_{gd} = V_\infty = 2V_{in}(1-k)^{-1}$$

となり、値が有限値に収束する。

V_{n+1} を V_n とおくことにより、ネガティブフィードバックが生じた瞬間において、GND を介した R_1、シグナル、Q_1 の GD による閉回路（以下閉回路 A と表記）において、電位がどのような状態にあるのかを知ることができる。

そこで、$2V_{in}+kV_n-V_n$ を計算すると、$2V_{in}(k^n-1)\neq 0$ となり、ネガティブフィードバックにより信号が R_1 に帰還した瞬間、閉回路 A では KVL が成り立っていないことがわかる。

この状態は不安定で、回路はすぐに V_n を V_{n+1} に増幅する対応に出ると考えられる。これで、KVL が閉回路 A で一時的に成立するのだが、最終的には、n が無限大に発散すると V_n が収束するという性質に頼らなければ、増幅が停止しないという問題に直面する。

尚、二つのコンデンサの電圧には、AC 成分が含まれない（実験により確認済）。信号 $2V_{in}$ と釣り合う AC 成分の電位の降下は、コンデンサではなく二つの Q の V_{gs} に現れることが実験からわかっている。

また、信号の減衰（k が 1 より小さいこと）が起こる原因について考えると、$2V_{in}$ は若干だが V_{gs} に影響を及ぼしていて（V_{gs} に $2V_{in}$ の何分の一かの電位の降下が含まれていて、Q_1 の V_{gd} からこれを差し引いた値が R_2 や R_3、Q_2 の V_{gd}、R_4 等に伝わっていき、最終的にネガティブフィードバック分の電圧 kV_n における信号減衰の原因 k になっていると考えられる）、この影響は n が大きくなるにつれて GS 間で無視できないほど積み重ねられて顕在化していき、この V_{gs} 中における信号の影響分が $2V_{in}$ と同じ大きさ・逆向きで互いに相殺する（打ち消しあう）と同時に、KVL がネガティブフィードバックとは無関係に閉回路 A 上で成立して増幅が停止する仕組みになっている、というのが、実験結果から予想される信号減衰の原理と増幅が停止する条件である。

４．周波数特性について

この回路（Fig.2）の周波数特性（周波数を変えた時の増幅率の変化）は、実験の結果次の通りであった。

最初に、周波数と増幅率の関係は、下記の通りであった。計測に用いた波形は、サイン波形（$0.05V_{pp}$、バイアス無し）である。

表１．周波数の変化に対する増幅率の変化

周波数；	増幅率；
100Hz	約 5 倍
10KHz	約 4 倍
1MHz	約 3.2 倍

周波数が上昇しても、増幅率はそんなに下がらない、というのが個人的な印象である。

また、矩形波やノコギリ波形のような任意波形については、10kHz 以下の周波数領域では形を保つが、ここから周波数を上げていくと徐々に形が崩れていく（角が丸くなる）様子がオシロスコープにより観察された（10kHz 以下の周波数領域での増幅率は、同じ $0.05V_{pp}$、バイアスなしという条件下で、サイン波形の時と変わらなかった）。

予想としては、増幅率がより高い回路ほど、波形を維持できる限界の周波数が下がっていく、と考えられる。その理由は、この回路における増幅の原理がネガティブフィードバックのループによるため、増幅率が高いほどループの回数が上がり、その分増幅速度が落ちる（波形の崩れが生じる周波数が低周波領域に移っていく）と考えられるためである。

５．まとめ

この回路（Fig.2）は、信号源をグランドに接続するのが困難で、現時点でそれに成功していない。

なので、実用性は低いと思われる。

また、増幅率もさほど高くなく（k=0.9 でも増幅率は 10 にしかならない）、用途があるのか疑問である。

ただ、KVL が破れているので、学術的な研究対象としては面白いかもしれない。

もし研究者諸氏に興味をお持ちいただけたら、大変光栄に存ずる。

e-mail;motoki_mimori@yahoo.co.jp

©2026 IEE Japan

自励振モデルによる抑制を用いた SNN 用 特徴検出フィルタの精度向上化に対する一検討

今村　楓也*，佐々木　芳樹（日本大学）

A Study on Improving Accuracy of Feature Extraction Filters for SNN Using Depression Based on Self-Excited Oscillation Models

Fuya Imamura, Yoshiki Sasaki (Nihon University)

１．まえがき

近年，生体と同様のスパイキング波形を再現したパルス型モデル[1]および，生体で確認されている学習則である STDP[2]を用いたネットワークの検討が行われている．

先に我々は，標準的な CMOS プロセスのみで構築可能なパルス型ハードウェアカオスニューロンモデル(P-HCNM)および非対称窓 STDP 回路を提案し，階層型ニューラルネットワーク(H-NN)のための特徴抽出可能なフィルタ構築について検討した．しかし，比較対象の画素情報との発火周波数に差がない場合にも閾値を超える電流が入力され，フィルタが応答する課題があった．

本稿では，各特徴の構成要素の色調に応じた P-HCNM の発火周波数と周囲 2 つの画素情報の P-HCNM の発火周波数を比較し両方とも差があるかという判別をより正確に動作させるためのフィルタ構築および灰色を含むテスト用の入力パターンでの検討を行ったので報告する．

２．本論

図 1 に，本検討の中で特徴として判別するフィルタパターンを示す．本稿では 3 行 3 列の画素データ内で「縦」「横」「右上がり」「右下がり」の 4 つの特徴を抽出するフィルタについて，白線および黒線についても考慮した特徴検出について検討した．さらに本稿では白黒反転しているデータにおいても検討したなお，図中の pattern A はテスト用の入力パターンであり，横線としての特徴パターンを使用した．

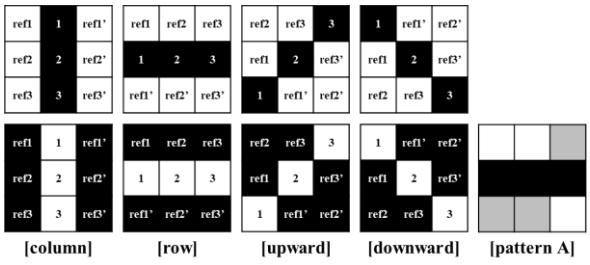


図 1 各特徴パターンおよび入力パターン

図 2 に，今回提案するフィルタの構成の一部を示す．同図において，NM は他励振 P-HCNM を示し，NM_s は自励振 P-HCNM を示す．また，(n)は図 1 に示す各特徴の配列番号を示している．図中の Potential はコンデンサと抵抗の並列接続であり，入力電流を積算したコンデンサの両端電圧をポテンシャル電圧とする．Time constant は瞬時に電源電圧まで出力電圧を上昇させ，その後緩やかに出力電圧を減少させることで，次段の OTA の出力電流をゆるやかに減少させるような時定数を発生させる．OTA は Potential，Time constant の出力電圧に応じた電流を出力し，次段の NM の発火を促す．これらの構成を，縦や横などの抽出したい特徴に合わせて 3 セット配置することでフィルタリングを行い，所望の特徴が入力されると対応する P-HCNM が発火する．同図において，上部の NM_(n)は発火の回数に応じて Potential_f1 および f2 を増加させ，NM_ref(n)および NM_ref'(n)は減少させる．下部の NM_(n)は，Potential_b1 および b2 を減少させ，NM_ref(n)および NM_ref'(n)は増加させる．これにより，(n)の画素が黒，ref(n)および ref'(n)が白の場合と(n)が白，ref(n)および ref'(n)が黒のどちらの場合においても特徴の抽出が可能となる．また，図中の自励振 P-HCNM が発火している間は，後段の NM の発火を抑制するような電流を OTA から出力する．しかし前段の NM が発火することで自励振 P-HCNM の発火が抑制されるような構成とした．これにより，前段の NM が 2 つ同時間帯に発火しなければ後段の NM の発火閾値を超える電流が入力されない．よって(n)の色調が周囲の ref(n)，ref'(n)と比べ，強調されていることがより正確に判別可能となる．この構成を 4 つの特徴毎に配置することで，それぞれの特徴に対応した P-HCNM の発火動作により特徴が抽出されたと判断する．

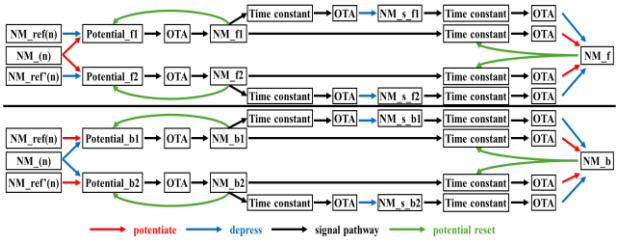


図 2 提案するフィルタ構成の一部

©2026 IEE Japan

図 3 に，図 2 中の pattern A のフィルタパターンを入力した際の入力電流および図 2 のフィルタの「右上がり」の配列番号[1]のフィルタリングの下側経路の動作波形を示す．同図において，横軸は時間[μs]，縦軸は出力電圧[V]を示している．なお，本シミュレーション条件として，図 2 に示すフィルタパターンの黒色の箇所の P-HCNM には，シミュレーション開始から 10μs 後に振幅 36μA，パルス幅 10μs の電流を入力した．また，灰色の箇所には同時間に 24μA の電流，白色の箇所には 12μA の電流を入力した．同図に示すとおり，図 1 中の[upward]の配列番号(3)を ref(3)と比較した際に黒色と灰色で初段の P-HCNM の発火周波数が約 3MHz 程度高いため NM_b1 が発火する．この発火により，NM_s_b1 の自励振発火が抑制されている．しかし，配列番号(3)を ref'(3)と比較した際には灰と黒で発火周波数が 3MHz 程度低いため，NM_b2 は発火しない．したがって，NM_s_b2 は自励振発火を続け，NM_b の発火を抑制する電流が流れ続けるため，NM_b1 からの電流のみでは NM_b の発火閾値を超えない．これにより，各特徴の構成要素が周囲 2 つの画素情報と比べ，一方が発火周波数に差がないときには次段の NM が発火しない．

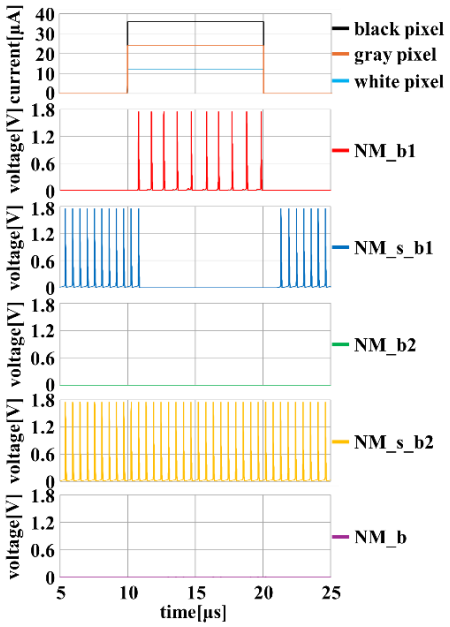


図 3 入力電流およびフィルタリングの動作波形

図 4 に，図 2 中の pattern A のフィルタパターンを従来のフィルタ構成および提案した構成に入力した際の各特徴に対応した P-HCNM の出力波形を示す．同図において，横軸は時間[μs]，縦軸は出力電圧[V]を示し，図中上部には従来のフィルタ構成に入力した際の出力波形，下部には提案するフィルタ構成に入力した際の出力波形を示している．同図に示すとおり，従来の構成では[row]に対応した P-HCNM が 10μs の間に 23 回発火し，[upward]に対応した P-HCNM が 10μs の間に 1 回発火している．これは，「横」の特徴を持つ入力パターンに対して[row]だけでなく[upward]が反応していることを示している．これに対し，今回提案した構成では[row]に対応した P-HCNM のみ 15μs の間に 15 回発火しており，それ以外の P-HCNM は 1 回も発火していないため，フィルタは入力した 3 行 3 列のパターンを「横」と判別している．これは，「横」の特徴を持つ入力パターンに対して[row]のみが反応していることを示しており，本フィルタを用いることで画像が持つ特徴のうち「線の方向」に対する特徴をより正確に抽出可能であることを示している．

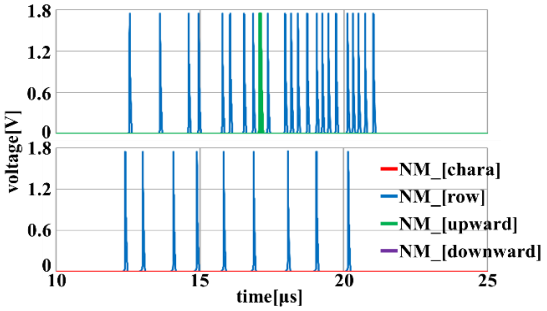


図 4 図 1 中の pattern A を入力した際の出力波形

３．まとめ

今回，3 行 3 列の画素データにおいて， 4 つの特徴を抽出する際に，各特徴を構成する画素情報と周辺の画素情報との色調の強調の判別をより正確にするためのフィルタの構成および灰色を含む入力パターンについて検討した．その結果，自励振 P-HCNM を 2 つ用いることで，各特徴の構成要素と周囲 2 つの画素情報の色調に応じた P-HCNM の発火周波数に 3MHz 以上差がある際に自励振の発火を抑制し，次段の P-HCNM の発火を促すような構成とすることで，より正確なフィルタリングおよびグレースケールでの特徴量抽出が可能であることを明らかにした．今後は，抽出した特徴をもとに 9 行 9 列内の文字画像を想起可能なネットワークを構築する予定である．

謝辞

本研究は東京大学大学院工学系研究科付属システムデザイン研究センター基板設計研究部門を通し，日本シノプシス合同会社，および日本ケイデンス・デザイン・システムズ社の協力で行われたものである．

文　献

(1)関根好文・佐伯勝敏：日本神経回路学会，Vol.15，No.1，p28~30(2008)

(2) Guo-qiang，Mu-ming:The Journal of Neuroscience，Vol.18，No.245，pp.10464-10472(1998)

©2026 IEE Japan

同報ニューロンユニットによる大域的閾値補償を用いたホップフィールドネットワークの時系列想起の検討

大沼　亮介*，佐々木　芳樹（日本大学）

Study on Time-Series Recall in Hopfield Network Using Broadcast Neuron Unit Based Threshold Compensation

Ryosuke Ohnuma, Yoshiki Sasaki (Nihon University)

１．まえがき

近年，自律配送システムの需要が高まり，周囲環境を高精度かつ長時間にわたり認識し続ける処理能力が求められている[1]．しかし，深層学習を中心としたディジタル AI 技術は高い計算資源と消費電力を必要とし，エッジ機器への搭載には制約が大きい．一方，人間の脳は極めて低消費電力で高度な時系列処理を行っており，その情報処理様式をアナログ電子回路で構成する試みは有望である．我々はこれまで，低電源電圧で動作するニューロンモデル[2]を用いたホップフィールドネットワークによる時系列想起の研究を行った[3]．先行研究では，アナログ LSI 実装において生じるスパイクタイミングの局所的ばらつきに着目し，多段遅延回路と段階的な結合荷重によりタイミングずれを吸収する手法を提案した[4]．しかし，アナログ素子のばらつきはタイミングだけでなく，膜電位や閾値の絶対値が揺らぐ大域的ばらつきとしても現れ，前回手法ではこの影響が残存していた．

そこで本研究では，ネットワーク全体の活性レベルの揺らぎを抑制するため，ニューロン全体の閾値を横断的に調整する同報ニューロンユニットを導入する．これにより，大域的な動作点の不一致を補償し，時系列パターン想起の安定化を図る．本稿では，提案手法の有効性を HSPICE シミュレーションにより検討したので報告する．

２．本論

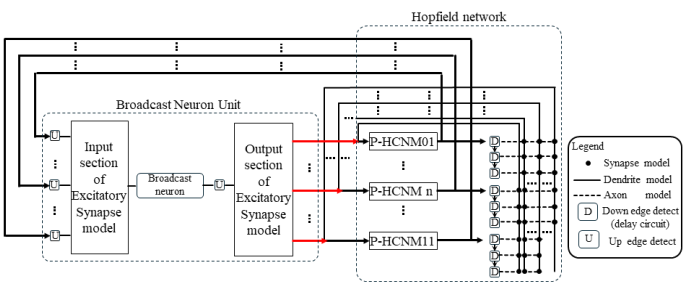


図 1 同報ニューロンユニットを接続したホップフィールドネットワーク

図 1 に，本研究で新たに構築した同報ニューロンユニットを接続したホップフィールドネットワークの構成図を示す．本ユニットは，アップエッジ検出回路，入力部の興奮性シナプスモデル，同報ニューロン，および出力部の興奮性シナプスモデルから構成される．出力部の興奮性シナプスモデルはホップフィールドネットワーク内において，先行研究で提案した低電源電圧動作可能なニューロンモデルの入力端子に直接接続される．まず，ホップフィールドネットワーク内のニューロンモデルの発火波形がアップエッジ検出回路へ入力される．アップエッジ検出回路は発火波形の立ち上がりを検出し，単パルス信号へと変換する．生成されたそれぞれのパルスは，興奮性シナプスモデルに入力され，カレントミラーにより電圧が電流へと変換される．この電流が同報ニューロンへ入力され，同報ニューロンが発火する．同報ニューロンは「基準となるタイミングのみで動作し，不要なタイミングでは発火しない」ことが要求される．そのため，不応期を十分に確保する目的で，先に提案した低電圧化ニューロンモデルと比較して，動的バイアス電圧を制御する MOSFET の素子数を 10 分の 1 にし，充放電する電流値を意図的に小さく設定している．同報ニューロンが発火すると，その波形は出力部に入力され，同様に電流信号に変換するためにカレントミラーを用いた．ただし，この出力電流はネットワーク内ニューロンモデルの閾値電流より小さい値に設定する必要がある．これにより，同報ニューロンの出力が各ニューロンの興奮を直接誘発するのではなく，「閾値電流をわずかに下げる効果」のみを与えることが可能となる．以上の構成により，同じタイミングで複数のニューロンモデルが発火すると，同報ニューロンユニットが作動し，ネットワーク全体に対して一時的な閾値低下を付与するフィードバック機構が実現される．これにより，時系列パターン想起における同期的な発火を促進する役割を果たす．新たに構成した図 1 の同報ニューロンユニットにより，ネットワーク内ニューロンの閾値を低下させて動作が安定化することを確認するため，同報ニューロンユニットの有無で時系列想起動作を比較した

図 2 にネットワークへ学習させた時系列データを示す．縦軸は 11 個のニューロンを，横軸は t_1～t_7 のタイムチャートを示しており，黒四角は当該ニューロンが発火すべきタイミングを示す．学習には，対称型 STDP 回路を用いて結合荷重

©2026 IEE Japan

値を生成し，想起時にはその値をシナプスモデルの直流電源電圧として代用した．

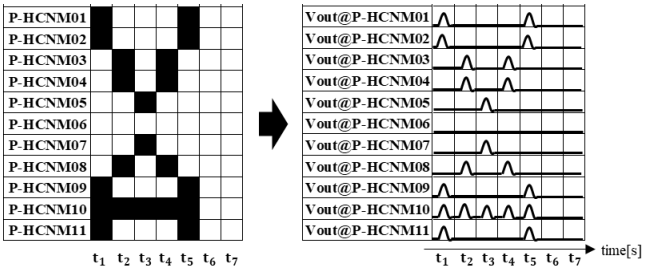


図 2 ネットワークへ学習させた時系列データ

図 3 に同報ニューロンユニットを接続したホップフィールドネットワークの時系列想起結果を，図 4 に同報ニューロンユニットを接続しない場合の想起結果を示す．解析条件として，両ネットワークとも同報ニューロンユニットおよびホップフィールドネットワーク内のニューロンモデルは電源電圧 0.4 V，その他の回路は 0.9 V で動作させた．また，シナプスモデルには両者で同一の結合荷重値を与え，比較の公平性を確保した．ただし，同報ニューロンユニットを接続しないネットワークでは，想起が不完全となる設定値を用いており，同ユニットの効果が明瞭に現れるようにしている．

図 3・図 4 の比較より，同報ニューロンユニットを接続しないネットワークでは，想起期間においてニューロン 10 の t_3, t_4 が発火していない．一方，同報ニューロンユニットを接続したネットワークでは，これらすべてのタイミングで正しく発火していることが確認できる．これは，同報ニューロンユニットがネットワーク内ニューロンの閾値電流を低下させ，発火条件を満たしやすくすることで，時系列パターンの完全想起が可能になったことを示している．

3．まとめ

今回，ネットワーク全体の閾値を横断的に調整する同報ニューロンユニットを導入し，ホップフィールドネットワークの時系列想起を安定化する手法を検討した．その結果，同ユニットを接続しない場合は特定ニューロンが発火できず想起が不完全となる一方，提案ユニットを接続することで全タイミングで正しい発火が得られ，時系列パターンを完全に想起できた．以上より，同報ニューロンユニットが想起の安定化に有効であることを明らかにした．

謝辞

本研究は東京大学大規模集積システム設計教育センターを通し，シノプシス株式会社，及び日本ケイデンス株式会社の協力で行われたものである．

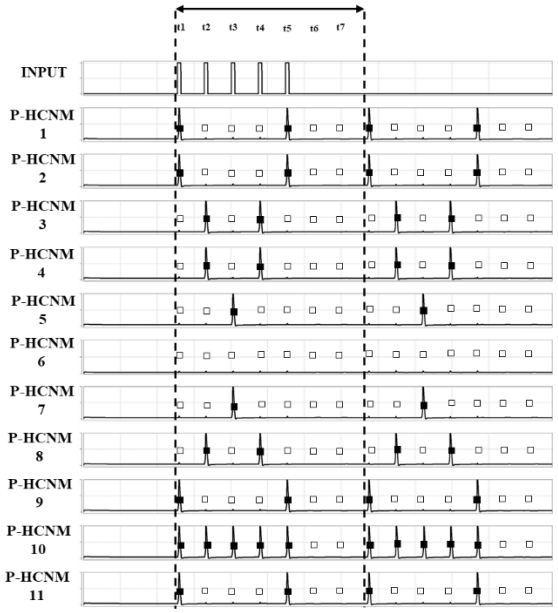


図 3 同報ニューロンユニットを接続した想起動作結果

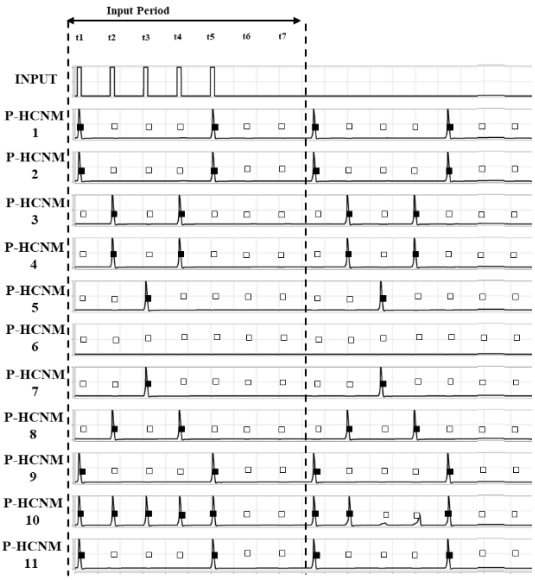


図 4 同報ニューロンユニットを接続しない想起動作結果

文　献

(1) 菅沼直樹 ： 金沢大学のおける自律型運転自動車の開発の実例」，情報処理学会研究報告，Vol.2014-CVM-192，No.3，pp.1-4(2014)

(2) 佐々木芳樹 ： 「低電源電圧で動作可能なパルス形カオスニューロンモデルに対する一検討」，令和 6 年電気学会全国大会，3-015，pp21-22(2024)

(3) 大沼亮介，佐々木芳樹：「A Symmetrical STDP Circuit Suitable for Low-Power P-HCNM and Time-Series Pattern Recall in a Fully Connected Hopfield Network」，2025 年度 AVIC（International Conference on Analog VLSI Circuits）講演論文集，pp.69–72，松江，日本，(2025)

(4) 大沼亮介，佐々木芳樹：「低電源電圧で動作可能な P-HCNM 用いたホップフィールド ネットワークのアナログ特性を考慮した時系列パターン想起の一検討，電子回路研究会，ECT-25-077

©2026 IEE Japan

リザバー計算に向けた結合荷重値制御の反転および変調可能な STDP 回路の検討

山口　明伸*，佐々木　芳樹（日本大学）

A Study on Invertible and Modulatable Synaptic Weights Control Circuit of STDP for Reservoir Computing

Akinobu Yamaguchi, Yoshiki Sasaki (Nihon University)

１．まえがき

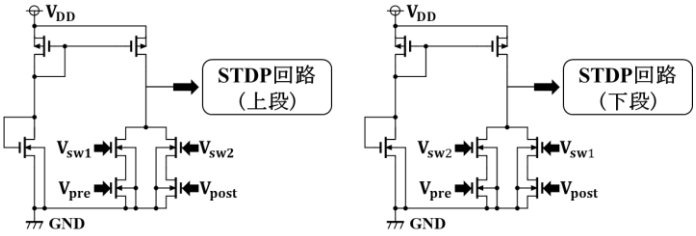
近年，自動運転の実現を目指し，時系列データの並列処理に優れているリザバーコンピューティングが研究されている[1]~[3].

先に我々は，リザバー層をスパイキングニューロンの電子回路モデルである P-HCNM[4]により構築し，さらに出力層とリザバー層間の結合荷重値を学習させるネットワークについて検討を行った[5]．しかし，時間的 XOR タスクなどの非線形な処理を実現可能な結合荷重値を Python により事前に推定した結果，生体脳で一般的に知られている学習法則である STDP では不十分であった．これは，STDP が入力と出力の発生時間差でのみ学習を行うため，教師信号に対する正答・誤答を考慮できないためであると考えられる．そこで，生体脳において報告が行われているドーパミン等の報酬信号による LTP/LTD の反転や変調を用いることで正答および誤答に応じた報酬の反転を行い，非線形学習を可能とすることが有効であると考えられる[6][7].

本稿では，報酬信号により LTP および LTD を反転または変調可能な非対称型 STDP 回路について検討を行ったので報告する．

２．本論

Fig.1 に，提案する反転型非対称 STDP 回路において長期増強 LTP および長期抑制 LTD を担う回路ブロックの入力部回路構成を示す．同図は，先に我々が提案している非対称型 STDP 回路をベースに，(a)LTP 制御ブロックおよび(b)LTD 制御ブロックのスイッチ部のみを置き換えた構成である．動作モードは，ドーパミンによる報酬信号V_{sw1}およびV_{sw2}の電圧レベルにより決定する．なお，V_{sw1}およびV_{sw2}は反転論理であることから NOT 回路を用いて実現を行う．動作としては，まず，V_{sw1}が High(V_{sw2}が Low)の際には，P-HCNM の出力であるV_{pre}とV_{post}が従来通りに入力されるため，通常の Hebbian 則(因果的 LTP/反因果的 LTD)として動作する．一方，V_{sw2}が High(V_{sw1}が Low)の際には，V_{pre}とV_{post}の接続が入れ替わることで等価的に入力順序を逆転させ，結合荷重値の極性が反転した Anti-Hebbian 則(因果的 LTD/反因果的 LTP)として動作する．これにより，通常の Hebbian 則と，その特性を強度軸に対して反転させた Anti-Hebbian 則を柔軟に切り替えることが可能となる．



(a)LTP 制御側の構成(上段)　(b)LTD 制御側の構成(下段)

Fig.1 反転型非対称STDP回路におけるスイッチ部の構成

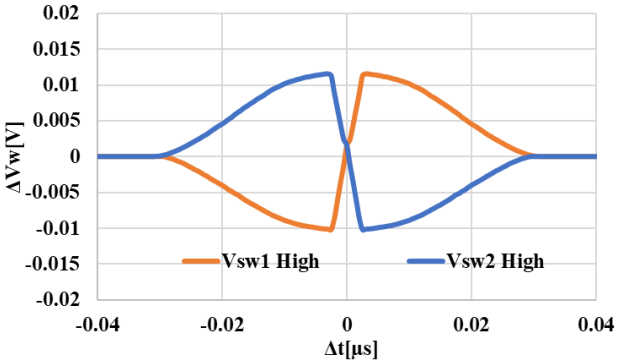


Fig.2 反転型非対称 STDP 回路の特性

Fig.2 に，Fig.1 における反転型非対称 STDP 回路の特性を示す．同図は，横軸に Pre および Post の発生時間差(Δt)を，縦軸に結合荷重値の変化量(ΔV_w)を示す．また，橙線はV_{sw1}が High の際の動作を，青線はV_{sw2}が High の際の動作を示す．同図に示すとおり，V_{sw1}が High の際には，第 1・3 象限にピークを持つ通常の非対称窓特性が得られたのに対し，V_{sw2}が High の際には，第 2・4 象限にピークを持つ，結合荷重値の極性が反転した学習窓が得られた．これは，本回路がドーパミンによる報酬信号により学習則の反転制御が可能であることを示している．

©2026 IEE Japan

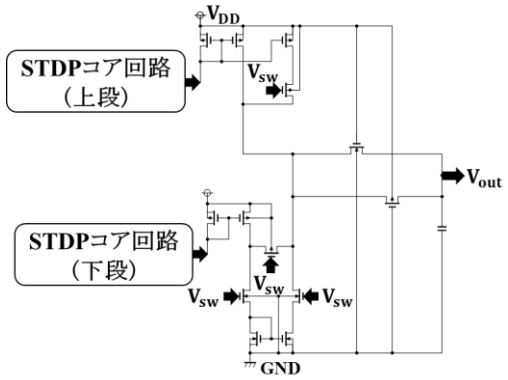


Fig.3 変調型非対称 STDP 回路

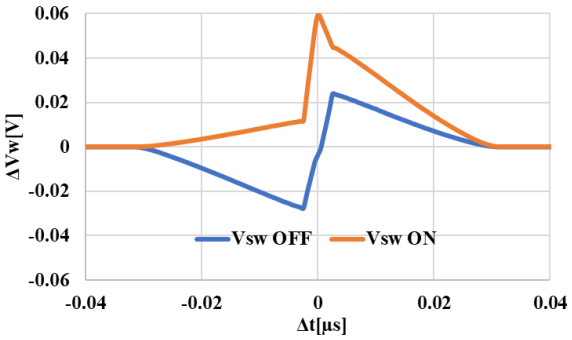


Fig.4 変調型非対称 STDP 回路の特性

Fig.3 に，変調型非対称 STDP 回路の構成を示す．同図は，時間窓用時定数波形の生成を行う STDP コア回路(上段および下段)と，サンプリングを行う出力段の変調用スイッチングに用いるトランジスタ群から構成した．これらすべてのトランジスタのゲートには，共通の制御電圧V_{sw}を入力する構成とした．動作モードは，V_{sw}のレベルにより決定する．V_{sw}が High の際には，PMOS が OFF，NMOS が ON となり，通常の非対称窓特性を生成する．V_{sw}が Low の際には，PMOS が ON，NMOS が OFF となる．これにより上段の回路ブロックでは充電パスが強化され，下段の回路ブロックでは放電パスが遮断され，充電パスが形成される．これにより，制御電圧の切り替えのみで，学習則の動的な変調が可能となる．

Fig.4 に，Fig.3 における変調型非対称 STDP 回路の特性を示す．同図は，横軸に時間差(Δt)を，縦軸に結合荷重値の変化量(ΔV_w)を示す．また，青線は制御電圧が Low の際の動作を，橙線は制御電圧V_{sw}が High の際の動作を示す．同図に示すとおり，V_{sw}が Low の際には，第 4 象限に LTD 領域を持つ通常の非対称窓特性が得られていることがわかる．それに対し，V_{sw}が High の際には，本来の LTD 領域が LTP 領域へとシフトしていることがわかる．また，本来の LTP 領域においてもV_wが増大していることがわかる．これは，本回路がドーパミンによる報酬信号により，学習則の変調制御が可能であることを示している．

３．まとめ

今回，報酬信号により LTP および LTD を反転または変調可能な非対称型 STDP 回路について検討を行った．その結果，反転型非対称 STDP 回路および変調型非対称 STDP 回路において，ドーパミンによる報酬信号により，学習則の反転・変調制御が可能であることを明らかにした．

今後は，本回路を用いたネットワークを構築し，実際の XOR タスク等の時系列パターン認識における学習性能の評価を行う予定である．

謝辞

本研究は東京大学大学院工学系研究科付属システムデザイン研究センター基板設計研究部門を通して，ローム(株)，TOPPAN(株)，日本シノプシス合同会社および日本ケイデンス・デザイン・システムズ社の協力で行われたものである．

文　献

[1] 田中剛平・中根了昌・廣瀬明：「リザバーコンピューティング～時系列パターン認識のための高速機械学習の理論とハードウェア～」，森北出版株式会社，2022

[2] 犬伏正信・吉村和之：“リザバーコンピューティングに適した力学系の特性と構造”，電子情報通信学会誌，Vol.102，No.2，pp114-120，2019

[3] 堀尾喜彦「脳型コンピュータハードウェア：進展・停滞と期待」，日本神経回路学会誌，Vol.22，No.4，pp149-151，2015

[4] 佐々木芳樹・佐伯勝敏：“自動補正機構を有するパルス形カオスニューロンモデル”，電子情報通信学会論文誌エレクトロニクス，VoL.J104-C，No.8，pp.233-239，2021

[5] 山口明伸，佐々木芳樹：＂発火頻度変動を利用したリザバー層における 履歴保持に対する一検討”，令和 7 年度電気学会全国大会，3-014

[6] Gaëtan Vignoud, Laurent Venance, and Jonathan D. Touboul：“Anti-Hebbian plasticity drives sequence learning in striatum”,Communications Biology，Vol.7，555，2024

[7] Ji-Chuan Zhang, Pak-Ming Lau, and Guo-Qiang Bi：“Gain in sensitivity and loss in temporal contrast of STDP by dopaminergic modulation at hippocampal synapses”，PNAS，Vol.106，No.31，pp.13028-13033，2009

©2026 IEE Japan

パルス型ハードウェアカオスニューロンモデルを用いた自己組織化マップのための近傍更新回路に対する一検討

中山　和樹*，佐々木　芳樹（日本大学）

Preparation of Papers for National Convention of I.E.E JAPAN

Kazuki Nakayama, Yoshiki Sasaki (Nihon University)

１．まえがき

近年，脳が持つ優れた処理能力および低消費電力性を，スパイキングニューラルネットワークで再現する研究が行われている[1]．先に我々は，パルス形ハードウェアカオスニューロンモデル（以下，P-HCNM）で構築したホップフィールドネットワークで学習を実現させるため，教師なし学習の一種である Self-Organizing Map(以下，SOM)をスパイキングニューラルネットワークとして実装に向けて，勝者ユニットを決定可能な参照電圧比較回路[2]，参照電圧を更新する参照電圧更新回路[3]を提案した．しかし SOM の構築には勝者ユニットの更新に加え，近傍ユニットも同時に更新する近傍学習が必要である．

本稿では，勝者ユニットの近傍セル更新のための近傍更新回路を提案する．また提案回路を用い，グレースケールデータを持つ SOM を検討したので報告する．

２．本論

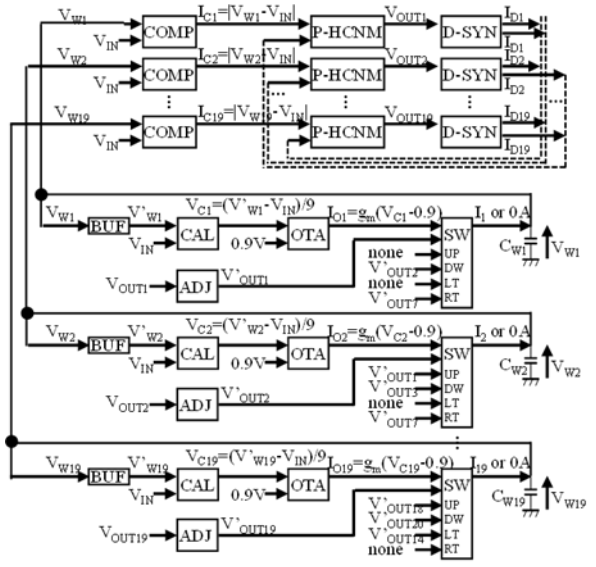


Fig1　Block diagram of the proposed learning circuit for a SOM

Fig.1 に，本稿で検討した回路のブロック図を示す．同図において，COMP は参照電圧比較回路群を，P-HCNM はニューロンモデル，D-SYN は抑制性シナプスモデル，BUF はバッファ回路，CAL は加減算回路，OTA は演算トランスコンダクタンス増幅器，SW は電流制御回路を示す．COMP を含む構成は勝者ユニットを決定するネットワークであり，SW を含む構成は結合荷重値を更新するネットワークである．今回，勝者ユニットの出力電圧 V_{OUTx} を ADJ で調整した電圧である V'_{OUTx} を，結合荷重値更新ネットワーク内の上下左右に接する近傍ノード内の SW に対しても入力することで近傍学習を再現する構成とした．なお，OTA の負極に入力している 0.9V は今回用いた電源電圧 1.8V の半値であり，CAL の出力電圧 V_{Cx} が 0.9V を上回れば興奮制シナプスとして動作し，下回れば抑制性シナプスとして動作するよう設計した．なお，D-SYN については OTA 構造を用いておらず，常に抑制性シナプスとして動作するように設計を行っている．

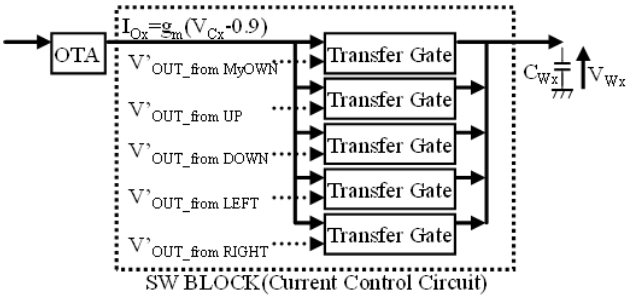


Fig2　Block diagram of the current control circuit

Fig2 に，Fig.1 内の SW として示した電流制御回路のブロック図を示す．同図に示すとおり，電流制御回路 SW は 5 個の Transfer Gate により構成している．Transfer Gate には Switch を内蔵しており，ADJ の出力が HIGH になった場合にのみ導通する．それぞれの Transfer Gate 入力端子および出力端子はすべて共通であり，Transfer Gate の開閉を行う

©2026 IEE Japan

Switch 端子のみ異なる電位を参照する構成としている．Transfer Gate の Switch は，自身が勝者ユニットであった場合の出力 V'_{OUTx} の他に，自身と接する上段セル UP，下段セル DOWN，左段セル LEFT，右段セル RIGHT により ON の制御を行う構成とした．一例として，Fig.3 のとおり配置した場合, 勝者ユニットがセル 7 であった場合, UP はセル 2, DOWN はセル 12，LEFT はセル 6，RIGHT はセル 8 である.

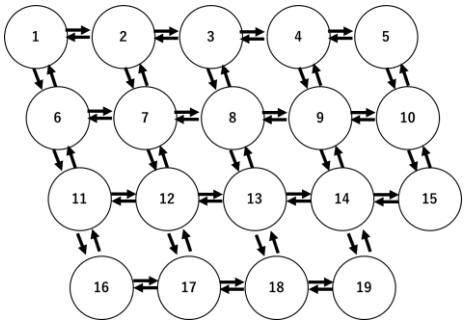


Fig3　Conceptual diagram of reference voltage allocation and neighborhood learning

Fig3 に本研究で用いた参照電圧配置の概略を示す．本稿では，2 次元平面の MAP を想定し，更に上下左右の接続のみが行われる状況とした．使用したユニット数は 19 個とした．各ユニットは，Fig.1 で示した COMP を含む勝者決定用ユニットおよび CAL を含むユニットを 1 つの単位として構成している．そのため，Fig.1 に示すとおり，それぞれのユニットは異なる参照電圧 V_{Wx} を保持する．図中の番号は各ユニットの識別番号である. また, 矢印は勝者ユニットを中心として近傍学習が及ぶ範囲を示しており，勝者ユニットのみならず，その近傍に位置するユニットの参照電圧も入力電圧に応じて更新される.

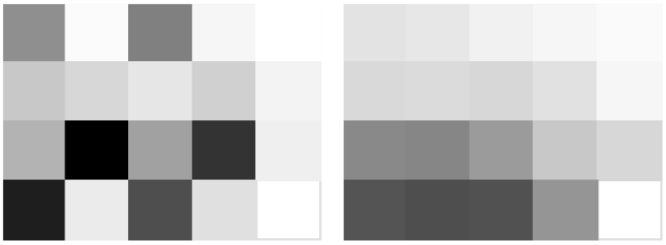


Fig4 Reference voltage map at the beginning and end of learning

Fig.4 に，提案回路における参照電圧分布を示す．参照電圧は Excel の条件付き書式(3 色スケール)により可視化し，0.2V を白，0.9V を灰色，1.6V を黒として表現した．解析条件として, 入力電圧は 20μs ごとに区間を切り替え，1.45V，0.9V，0.25V，0.8V，1.55V，0.3V，1.35V，0.35V，1.0V を印加した．また，参照電圧は 0.2～1.6V の範囲から 19 個を各ユニットへ割り当てた. 左図は学習開始時, 右図は学習開始から 10ms 後の参照電圧分布である. 初期の状態から学習後には勝者ユニット決定および近傍学習により参照電圧が更新され，グレースケールの明暗に勾配ができるように MAP 上で再配置される. これは本構成を用いる事で, 勝者ユニット決定と近傍学習により，参照電圧が入力分布を反映する方向へ自己組織化されることを示している.

３．まとめ

今回，SOM をスパイキングニューラルネットワークとして実装するために，勝者ユニットの近傍セル更新のための近傍更新回路について検討を行った. その結果, 近傍更新回路を用いることで，勝者ユニット近傍を含む参照電圧の更新が行われ, 参照電圧分布が MAP 上で勾配構造を形成可能なことを明らかにした.

今後は，入力電圧が切り替わった際に他の勝者ユニットが決まってしまう動作の解消, 勝者ユニットの更新・近傍学習の精度を高めるための検討を行う予定である.

謝辞

本研究は東京大学大学院工学系研究科付属システムデザイン研究センター基板設計研究部門を通して，ローム(株), TOPPAN(株)，日本シノプシス合同会社および日本ケイデンス・デザイン・システムズ社の協力で行われたものである

文　献

(1) 飯島楓,「スパーキングニューロン解析用ソフトウェアのための STDP 学習則実装に関する一検討」, 日本大学理工学部電子工学科卒業論文，令和 6 年

(2) 牛島爽介・佐々木芳樹:“パルス型カオスニューロンモデルを用いた自己組織化マップのための Best Matching Unit 決定回路に対する一検討” 令和 7 年電気学会全国大会，3-011，(2025)

(3) 中山和樹・佐々木芳樹:“パルス型カオスニューロンモデルを用いた自己組織化マップのための参照電圧更新回路に対する一検討”令和 7 年電気学会電子回路研究会「非線形電子回路および電子回路一般」(2025)

©2026 IEE Japan

BLE を用いた出会い頭事故防止システムの先頭車両抽出による処理時間削減に対する一検討

村越　陽*，佐々木　芳樹，（日本大学）

A Study on Reducing Processing Time by Extracting Lead Vehicles in a BLE-Based Intersection Collision Prevention System

Hinata Murakoshi, Yoshiki Sasaki, (Nihon University)

１．まえがき

近年，車載カメラやミリ波レーダーを用いた先進運転支援システム(ADAS)の精度向上により自動運転技術の実用化が期待されている．一方で，これらのセンサは見通しの良い条件を前提としており，住宅街など見通しの悪い条件における交差点での出会い頭事故を未然に防止することは困難である[1][2]. 先に我々は, Global Positioning System(以下，GPS)より受信したデータを Bluetooth Low Energy(以下，BLE)の Broadcast Messaging over Bluetooth(以下，BMoB)を用いた衝突予測座標算出システムを提案した[3]-[5]．しかし，同一車線を縦列に走行している車両については先頭車両のみを計算対象とするべきだが，従来手法では全ての他車両を計算対象車両として判定してしまう問題があった．

本稿では，縦列車両の先頭のみを計算対象とすることによる処理時間削減を目的に，OpenStreetMap(以下，OSM)から取得した交差点 ID およびその交差点までの距離情報を BMoB に付加することにより，自車両が侵入する可能性のある交差点に対する先頭車両の特定について検討したので報告する．

２．本論

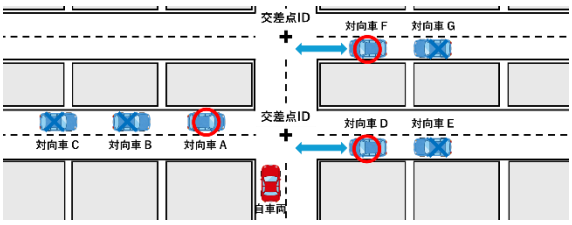


Fig. 1 住宅街交差点における自車両および他車両の配置

Fig. 1 に，今回のシステムで計算に含める対象車両を示す．図中, 赤の車両を自車両, 青の車両を他車両(A～G)とする．同図において，交差点に対して先頭となる他車両を判定し，計算対象車両に含めるために，本システムのアルゴリズムは以下の手順 1～10 により「自車両に接近している車両」かつ「交差点における先頭車両」の抽出を行う．なお，OSM から取得した交差点 ID を BMoB に付加するために，BLE 送信時刻，車両 ID，進行方向，速度，最寄り交差点までの直線距離，交差点 ID を含むデータを送信する．また，本システムを全車両に対し実装することを前提として検討を行った．

【自車両(受信側)手順 1】GPS を取得し，OSM より現在位置から半径 100m 範囲の MAP データを取得．

【自車両(受信側)手順 2】進行方向データにより，取得した MAP の進行方向近傍の交差点 ID を 3 個推定する．なお，取得したデータを本タイミングで他車両に向けて BMoB として送信を行う．

【自車両(受信側)手順 3】取得した 3 つの交差点 ID をキーとし，交差点 ID ごとに車両データ格納領域を生成する．

【自車両(受信側)手順 4】他車両からの BMoB を受信するモードへと遷移し，1000ms BMoB データを待ち受ける．

【自車両(受信側)手順 5】取得したデータの先頭パケットからデータタイプを読み取り，車両または歩行者であるか判別する．歩行者の場合，本稿の処理は行わない．

【自車両(受信側)手順 6】受信データから交差点 ID を抽出し，自車両の交差点 ID のいずれかと一致するか確認する．一致する場合は自車両へ接近中とみなし，以下の手順へ進む．一致しない場合は計算対象外とする．

【自車両(受信側)手順 7】一致した交差点 ID の車両データ格納領域が空の場合，受信データをそのまま格納する．

【自車両(受信側)手順 8】一致した交差点 ID の車両データ格納領域にデータが存在する場合，格納済みデータと受信データの進行方向を比較し，進行方向が異なる場合には新たな車両データ格納領域を生成して別方向として保持する．

【自車両(受信側)手順 9】一致した交差点 ID の車両データ格納領域にデータが存在し，かつ進行方向が同一の場合は，BMoB に含まれる交差点までの直線距離データを比較し，より近い車両データで上書きを行う．

【自車両(受信側)手順 10】以上の処理を 1 スキャン周期内で受信したすべての BMoB に対して繰り返すことで，各交差点・各進行方向に先頭車両を動的に抽出する．最終的に車両データ格納領域に残存した車両データのみを計算対象車両として，出会い頭事故防止のための衝突エリアおよび衝突時刻推定アルゴリズムの実行をする．

©2026 IEE Japan

Fig. 2　使用した MAP と周辺車両配置状況

Fig. 2 に，先頭車両抽出システムの動作検証用 MAP と車両の配置状況を示す. 同図は, 自車両が京都府京都市左京区下鴨夜光町を北上している状況にて，周囲 100m 内に他車両が 7 台(A～G)存在している状況の仮想空間である．他車両(A～G)は任意の座標と進行方向を断続的に送信するよう設定した. 本環境において, 先頭車両抽出システムは各交差点に対して進行する車両の先頭を識別するために，進行方向と進行先の交差点 ID の組み合わせが合致する車両のデータを比較するものとする．評価方法は，BMoB のスキャン開始から終了までの 1 ループに要する時間の長さにより行った.

Table 1. 先頭車両抽出システム適用有無における出会い頭事故防止システムの 1 ループ処理時間比較

	経過時間[ms]
提案システムなし	1268
提案システムあり：最小処理時間	1154
提案システムあり：最大処理時間	1190

Table.1 に処理時間比較を示す．同表は，先頭車両抽出システム適用の有無における BMoB スキャン開始から処理終了までの 1 ループ時間である. 複数の他車両 BMoB は受信時刻がランダムであるため, 他車両の MAP 上における交差点からの位置と受信順番によってはシステム上の処理に差が生じる. そのため, 今回はシステムが処理を最短で終了可能な受信順番，および処理時間が最大となる受信順番も考慮して検討を行った．なお，本検証では他車両を A～G の計 7 台で評価した. 本システムの各アルゴリズムにおける処理時間は以下のとおりである．まず，BMoB スキャン時間 1000ms を要する．また，受信した BMoB に対して，通信データが車両用か歩行者用かの判別および交差点 ID の一致確認処理（手順⑤～⑥）に約 1ms を要した．次に，一致した交差点 ID に対して車両データ格納領域が存在しない場合の新規格納，または既存データとの比較・上書き処理（手順⑦～⑨）に約 10ms を要した．最終的に，車両データ格納領域に残存した車両のみを計算対象として，出会い頭事故防止システムのための衝突エリアおよび衝突時刻推定判定アルゴリズム（手順⑩）を実行する．この処理には対象車両 1 台あたり約 40ms を要した. 先頭車両抽出システムを適用した場合, 他車両 A→C→E→D→F→B→G の順で BMoB を受信したときに最小の処理時間となり，1 ループ時間は 1154ms であった．一方，他車両 B→G→F→D→E→C→A の順で受信した場合が最大となり，1 ループ時間は 1190ms であった．BMoB のスキャン時間（1000ms）は，固定値であるため，1 ループに要する処理時間は提案システム無しで 268ms，提案システムを用いた最小は 154ms，最大は 190ms である. これは, 本提案システムを用いることで処理時間を 29.1%以上削減可能であることを示している.

３．まとめ

今回，縦列車両の先頭のみを計算対象とすることによる処理時間削減を目的に，OSM から取得した交差点 ID およびその交差点までの距離情報を BMoB に付加することにより，自車両が侵入する可能性のある交差点に対する先頭車両を特定する先頭車両抽出システムについて検討を行った. その結果，本システムを用いることで計算対象車両を先頭車両のみに限定することで，衝突エリアおよび衝突時刻推定判定アルゴリズムの実行回数を削減し, 処理時間を 29.1%以上短縮可能であることを明らかにした. 今後は，これらすべてのシステムを実装し，デモ走行を行う予定である.

文　献

(1) 三谷哲雄・須藤晃成・入谷忠光・山中英生：「小交差点出会い頭事故防止のための路上設置型 ITS システム」，土木計画学研究講演集，pp2-4，(2008).

(2) 総務省：「自動運転時代の“次世代の ITS 通信”研究会（第二期）中間取りまとめ」(2024).

(3) 村越陽・佐々木芳樹：「車両サイズと速度を考慮した出会い頭衝突防止システムに対する一検討」，令和 6 年電気学会全国大会 ，3-006，(2025).

(4)村越陽・佐々木芳樹：「BLE を用いた出会いがしら事故防止システムにおける反射板を用いた計算処理削減の一検討」，令和 7 年電気学会電子回路研究会，ECT-25-083，(2025).

(5) 村越陽，佐々木芳樹:「A Study on Reducing Processing Time by Narrowing Down Target Vehicles in a BLE-Based Intersection Collision Prevention System」， International Conference Analog VLSI，D3，pp77-80，(2025).

©2026 IEE Japan

染色液液面と放電電極の距離が脱色に与える影響

小松　真　（岩手医科大学）

Effect of the distance between the stain solution surface and the discharge electrode on decolorization

Makoto Komatsu (Department of physics, Iwate Medical University)

１．背景

当方ではこれまで針状対向電極間の水中放電による難分解物質の処理効果に注目し，水処理を模擬した染色液の脱色実験を行い，数年間にわたり継続的に処理性能の最適化を試みてきた。その過程で陽極の染色液液面からの距離が特に脱色に大きな影響を及ぼし，電極配置が水処理性能に左右する可能性が高い結果が得られたので報告する。

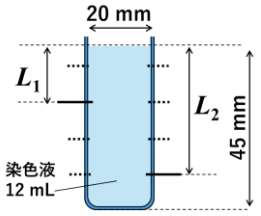
２．実験装置と実験方法

本研究では 20 mg/L インジゴカルミン染色液に対向電極間の水中パルス放電を作用させ，610 nm 可視光で吸光分光法により放電後の脱色を計測して評価した。コンデンサに充電した電荷を高耐圧リレーで放電する方式を採用しており，全体的な実験系はこれまでの当方の装置構成を踏襲しているためここでは割愛する(1)。コンデンサ容量は 0.2 μF，充電電圧は 4 kV であり放電 10 パルスを染色液に作用させた。図 1 の (a) は放電電極の断面図である。電極は染色液の容器を兼ね PET 製である。0.45 mm 径 SUS304 ワイヤーを 12 mL 染色液中に 1 mm 露出させ，容器底面から 45 mm の位置が染色液面とした。電極の設置位置は水面から 5 – 35 mm の範囲で 4 か所あり，電極の組合せは 10 通り，うち 6 通りについては陽極と陰極の区別があるため 16 通りの電極配置が存在した．放電後に脱色が継続する時間があるため(2)，放電終了後 5 – 125 min の範囲で脱色を計測した。

３．実験結果と考察

＜3・1＞実験結果　　図 1 の (b) の表は各電極配置に対する放電電流の平均値である。この表の電極位置は図 1 (a) に対応しており，$L_1 \leqq L_2$ となるようにまとめている。放電電流については電極配置による差がなく，電極間距離が大きくなると電流が小さくなるという，電気抵抗値で考えて自明な値が得られた。一方で脱色は電極間距離だけでなく陽極の位置による影響があった。図 1 (b) において，陽極位置が L_1 にあるということは陰極に比べ陽極が液面に近いことを意味しているが，図 2 は陽極位置が L_1 にあるか L_2 にあるかで区別して脱色結果をまとめたもの，つまり陽極の位置が水面に近い位置か遠い位置かで区分けしてまとめたものである。陽極位置が L_1 の場合は 125 分後にはほぼ脱色が完了するのに対し，L_2 の場合はそうは限らず，特に放電後 65 分後の濃度において非常に大きな差があり，陽極を水面に近くした場合は脱色が速く効果も強くなる傾向があった．また本実験条件全体において，陽極位置が L_1 の場合は電極間距離による差が比較的小さく、常に大きな脱色性能が得られるのに対し、陽極位置が L_2 の場合は電極間距離が大きいほど脱色の速度と性能が明確に下降した。

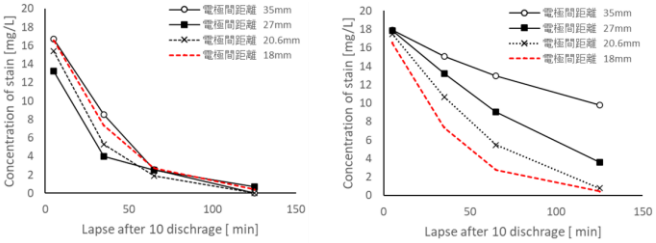
＜3・2＞考察　　放電時のエネルギーを考えれば放電電流が小さいほど脱色性能は低いため，図 1 (b) と併せて考えて陽極位置が L_2 の場合の傾向が自明で自然である。むしろ陽極位置が L_1 の場合つまり陽極が水面に近いと脱色が強くなることが重要で，電極配置が脱色性能の向上、すなわち水処理性能の向上に影響する可能性を示唆すると考える。ただし今回は現象を確認したまでの状況であり，原因は今後さらなる調査が必要である。現在は放電時の発光を分析し，電極周囲で得られる物質の調査(3) を検討中である。



Electrode Position L_1[mm]	L_2[mm]	Gap [mm]	Dischrage current Mean±SD [A]	Measurement number
5	35	35	25.8±2.5	13
15	35	27	25.1±0.9	20
5	25			
25	35	20.6	21.9±4.2	15
15	25			
5	15			
35	35	18	15.9±1.1	8
25	25			
15	15			
5	5			

(a)　　(b)

図 1　電極詳細：(a) 電極断面図，(b) 電極寸法と平均放電電流
Fig.1 electrode details; (a)scheme, (b)size and dischage current



(a)　　(b)

図 2　染色液濃度の経時変化：(a) 陽極位置が L_1 (b) 陽極位置が L_2
Fig.2 Changes in stain concentration; (a)anode at L_1, (b) anode at L_2

文　献

(1)小松真，岩手医科大学教養教育研究年報，52: 13-19. (2017)
(2) D. Kitamura et al, 2021 Kansai-section Convention of I.E.E, 113 (2021)
(3)太田幸治 他，電学誌，131 巻 2 号，80-83 (2011)

©2026 IEE Japan

熱殺菌による根尖性歯周炎治療における充填液の組み合わせが根管内温度上昇に及ぼす影響の多角的評価

北島 秀希*，太良尾 浩生（香川高専），芥川 正武，榎本 崇宏（徳島大学），
安野 恵美子（阿南高専），富永 敏彦（とみなが歯科），
湯本 浩通（徳島大学），野村　政宗（秋田高専），武居　周（宮崎大学），
池原 敏孝（徳島文理大学），木内 陽介（徳島大学）

Multifaceted evaluation of temperature increase in the root canal based on filling liquid combinations for the treatment of apical periodontitis by heat sterilization

Shuki Kitajima*, Hiro Tarao (National Institute of Technology, Kagawa College), Masatake Akutagawa (Tokushima University), Takahiro Emoto (Tokushima University), Emiko Yasuno (National Institute of Technology, Anan College), Toshihiko Tominaga (Tominaga Dental Clinic), Hiromichi Yumoto (Tokushima University), Masamune Nomura (National Institute of Technology, Akita College), Amane Takei (Miyazaki University), Toshitaka Ikehara (Tokushima Bunri University) and Yosuke Kinouchi (Tokushima University),

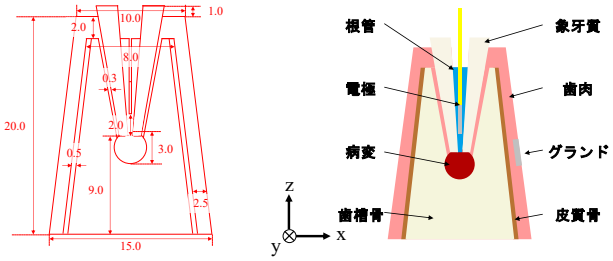
1. はじめに

根尖性歯周炎の新たな治療法として，ジュール熱による殺菌を目的とした高周波根尖療法（EMAT）が提案されている[(1)]．本療法は根管内に導電性の充填液を介在させ，高周波電圧を印加するものであるが，充填液の導電率が全体のインピーダンス分布を決定し，発熱特性を変化させる一因となる．著者らはこれまでの研究において，根管内および病変部における充填液の組み合わせが温度分布に与える影響を報告している[(2)]．しかし，そこでの評価は視覚的な温度分布図の比較という定性的なものに留まっており，効率的な加熱を実現するための数理的メカニズムの解明には至っていない．本稿では，加熱の集中度や均一性を客観的に定義する 4 つの統計的評価指標を導入し，8 パターンの充填液の組み合わせによる加熱特性の変化を多角的に評価した．さらに，得られた評価結果に対して等価回路モデルを用いた理論的考察を行うことで，効率的な加熱を実現するための数理的メカニズムと充填液選定の指針を明らかにする ．

2. 解析手法

〈2･1〉数値歯モデルと連成解析　　解析には，図 1 に示す 0.1 mm 角のボクセルにより構成された三次元数値歯モデルを用いた．電界解析には SPFD 法を適用し，温度解析にはクランク・ニコルソン法を用いて熱輸送方程式を解いた．これら両解析を双方向に連成させることにより，経時的な温度変化を算出した[(3)]．

〈2･2〉解析条件　　根管内および病変内に充填する液体の組み合わせとして，6%次亜塩素酸ナトリウム（NC6），0.9%食塩水（S0.9），4.5%食塩水（S4.5），血液（BLD）を用いた．これらを組み合わせた計 8 パターンを表 1 に示す．なお，本稿では各パターンを「(根管内充填液) － (病変内充填液)」と表記する．通電条件は，周波数 500 kHz，実効値 100 V の正弦波電圧を用い，これを ON 時間 0.02 s，OFF 時間 0.08 s（周期 0.1 s，デューティー比 20 %）のバースト状として，合計 1 s 間印加する．



(a) 寸法　　(b) 各組織

(a) Dimensions　　(b) Tissues

図 1　数値歯モデルの断面

Fig.1. The numerical tooth model (cross-section)

〈2･3〉提案する評価指標　　加熱特性を多角的に定量評価するため，次の 4 つの指標を導入した．

① 加熱均一性$CV_{\Delta T}$：温度上昇の変動係数
　値が小さいほど加熱が均一であることを示す．

② 局所性γ_1：温度分布の歪度
　負の値は高温域への偏りを，正の値は低温域への偏りを意味する．

③ 加熱強度$\bar{T}$：標的領域内の温度中央値

④ 熱効率η：全発熱量に対する根管内での発熱量割合

©2026 IEE Japan

表１　充填液の組み合わせと評価指標の算出結果

Table 1. Combinations of filling liquids and calculated results of evaluation indices

充填液の組み合わせ	$CV_{\Delta T}$ [-]	γ_1 [-]	$\tilde{T}$ [°C]	η [%]
NC6-BLD	0.72	2.42	46.32	8.33
NC6-NC6	0.36	0.41	81.45	7.89
NC6-S0.9	0.45	1.07	65.12	7.93
NC6-S4.5	0.36	0.38	88.09	10.17
S0.9-BLD	0.26	0.35	55.13	14.04
S0.9-S0.9	0.29	0.30	63.12	14.99
S0.9-S4.5	0.29	0.24	68.25	15.62
S4.5-S4.5	0.37	0.45	85.88	10.09

3. 結果と考察

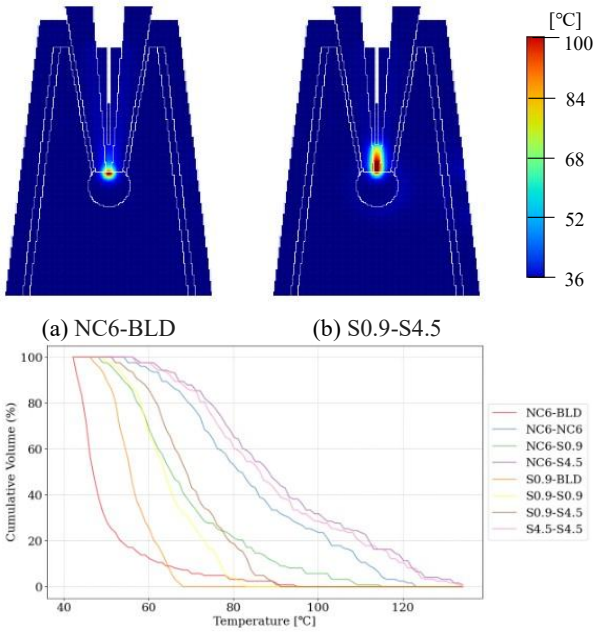
〈3･1〉連成解析の結果　　NC6-BLD および S0.9-S4.5 における温度分布の断面図を図 2(a)および(b)に示す．同図より，根管および病変内の充填液を変更することで，温度分布が変化することが確認された．また，根管内における累積温度体積ヒストグラムを図 2(c)に示す．同図から，充填液の変更が根管内の温度分布に顕著な差異をもたらすことが明らかとなった．

〈3･2〉統計的指標による特性評価　　各条件における評価結果を表 1 に示す．解析の結果，局所性（歪度）と加熱均一性（変動係数）の間には正の相関が認められた．また，温度中央値の上昇に伴い加熱均一性（変動係数）が悪化するという，指標間におけるトレードオフの関係が明らかとなった．現在主流の組み合わせ（根管内：NC6，病変内：BLD）は，検討した 4 つの指標すべてにおいて加熱特性が劣るのに対し，媒体間の導電率差が小さく，かつ双方が高導電率である組み合わせ（NC6-S4.5 等）は，高い加熱強度と比較的良好な分布特性を両立することが示された．

〈3･3〉等価回路モデルによる理論的考察　　加熱効率の要因検討のため，歯を根管部抵抗Rおよび病変部抵抗R'の直列回路でモデル化した．それらを図 3 に示す．分圧の法則より，根管内への選択的加熱には，根管内への低導電率液と病変内への高導電率液の充填，および全電流量の最大化が重要である．これにより，周囲への熱影響を抑えつつ根管内へのエネルギー集中を促進できると推察される．

4. おわりに

本研究では，新たな統計的評価指標と等価回路モデルを用いることで，EMAT における充填液選定の工学的指針を提示した．加熱強度と均一性の間にはトレードオフが存在する．効率的加熱のためには，回路全体の低抵抗化に加え，根管内充填液抵抗Rが病変内充填液抵抗R'を上回る状態を維持する充填液の選択が重要である．本知見は，将来的な安全性の高い出力制御アルゴリズムの構築や，実機による検証実験における重要な設計指針となることが期待される．



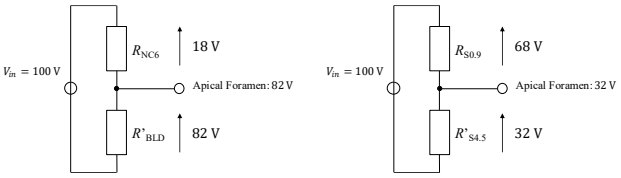
(a) NC6-BLD　　(b) S0.9-S4.5

(c) 累積温度体積ヒストグラム

(c) cumulative temperature volume histograms

図２　温度分布の解析結果

Fig. 2. Analysis results of temperature distribution



(a) NC6-BLD　　(b) S0.9-S4.5

図３　等価回路

Fig.3. Equivalent circuit

文　　献

(1) 富永敏彦・北池光希・多田瑛一郎・高比良一輝・坂東直樹・平尾早希・林邦彦・横山昌憲・吉永仁：「電磁刺激を応用した根尖性歯周炎への対応」，日本歯内療法学会雑誌，Vol.38，No.1 pp.36-47 (2017)

(2) 北島秀希・太良尾浩生・芥川正武・榎本崇宏・安野恵美子・富永敏彦・湯本浩通・池原敏孝・木内陽介：「熱殺菌による根尖性歯周炎治療における歯内充填薬液を変更した場合の根管内温度上昇の数値解析」，令和 7 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集，GS10-3 (2025)

(3) Hiroo Tarao, Masatake Akutagawa, Takahiro Emoto, Amane Takei, Hiromichi Yumoto, Toshihiko Tominaga, Toshitaka Ikehara and Yosuke Kinouchi: “Evaluation of Temperature Increase From Joule Heat in Numerical Tooth Model by Applying 500 kHz Current for Apical Periodontitis Treatment—Effect of Applied Voltage and Tooth Conductivity”, BioElectroMagnetics, Vol.42, No.3 pp.224-247 (2021)

©2026 IEE Japan

遺伝的アルゴリズムを用いた熱中症検出パラメータの最適化

水野　僚太*，仲林　昴彦，村上　智哉，池浦　良淳，早川　聡一郎（三重大学）
中神　正樹，八尾　健一朗（中部電力株式会社）

Optimization of Heatstroke Detection Parameters Using Genetic Algorithms

Ryota Mizuno, Takahiko Nakabayashi, Tomoya Murakami, Ryojun Ikeura, Soichiro Hayakawa (Mie University)
Masaki Nakagami, Kenichiro Yao (Chubu Electric Power Co.,Inc)

１．はじめに

夏の猛暑日の日数が増えてきており，作業員の熱中症対策は重要な社会問題となっている。熱中症は本人が症状を自覚できず，重篤化に陥る恐れがある。そのため，客観的なデータに基づく熱中症の早期発見が重篤化防止の有効な対策である。熱中症の一種である熱失神は迷走神経反射による急激な迷走神経刺激に起因し(1)，これに伴い心電図のR波時間間隔(以後，RR 間隔と呼ぶ)変動のスペクトルの高周波(以後，HF と呼ぶ)成分の振幅値の増加が生じる(2)。著者らは，これまで熱中症の早期発見を目的に，夏場の環境を再現した人工気候室や夏の現場作業員を対象に解析を行ってきた。その結果，熱中症の症状を本人が自覚する前に HF 成分の振幅の急上昇が現れることを確認した(3)。しかし，従来の設定値での熱中症検出判定では高精度の早期発見が困難であり，最適な設定値を決定する必要があった。

本稿では，遺伝的アルゴリズム(以後，GA と呼ぶ)を用いて熱中症検出パラメータの最適化を行い，熱中症の判定精度の向上を目的に，高温環境と高湿環境を再現した人工気候室において収集された複数の作業員の心電図を用いて HF 成分の振幅に対する熱中症の判定に用いる２つのパラメータを GA により最適化した。この最適化したパラメータと従来のパラメータを用いた場合の熱中症の検出結果を比較し，本手法の有効性を検証した。

２．実験方法

＜2・1＞実験データの収集手法　　実験データは三重県立看護大学が所有する人工気候室で収集した。高温環境と高湿環境において，のべ実験協力者 18 名の心電図や深部体温等の身体データを計測した。なお，この 18 名は重複する協力者を含んでいる。高温環境は，環境温 37℃，相対湿度 52.0%，WBGT 30.91℃とした。高湿環境は，環境温 33℃，相対湿度 80.4%，WBGT 30.90℃とした。実験協力者は人工気候室に入室した後，実験機器を装着し，作業着を着用した。センサの温度平衡のため 30 分の待機後，トレッドミルを用いた時速 4km の歩行を 30 分間行った。5 分間の休憩と水分補給の後，立位状態で軽量のロープを用いて電線のより分け作業を模したロープワークを 30 分間行った。

熱中症の主観的な状態を評価するため，各作業終了後にアンケートを実施した。このアンケートでは，熱中症の初期症状となる，めまい，痙攣，頭痛，吐き気，体のだるさ，集中力・判断力の低下について評価した。各症状の評価は，全く感じない，弱く感じる，少し強く感じる，強く感じる，かなり強く感じるの 5 段階評価とした。本研究では，いずれかの項目で「弱く感じる」以上の回答があった場合を症状有，それ以外の場合を症状無と定義した。本実験は，三重大学工学研究科倫理委員会の承認を受け，実験協力者に実験の目的および方法について十分な説明を行い，同意を得たうえで実施した。

＜2・2＞心電図の解析方法　　各作業員の心電図から取得した RR 間隔を 2Hz でリサンプリングする。その RR 間隔時系列データからバンドパスフィルタ(BPF)によって，パワースペクトルの HF 成分(0.15Hz から 0.45Hz)を連続的に抽出し，1 分間毎に平均化して HF 成分の振幅を算出する(1)。このように HF 成分の振幅値の時系列データを取得する。本研究では HF 成分の振幅の急上昇の定義を，直前の振幅値の K 倍以上を T_{min} 秒から 60 秒の間で維持する場合とした。

＜2・3＞パラメータ最適化手法　　熱中症の検出精度の向上を目的として，GA を用いたパラメータ探索を行った。最適化の対象となるパラメータは，前述の振幅値の倍率 K, および最小継続時間 T_{min} の 2 変数である。それぞれの探索範囲は K を 2.00 倍から 4.00 倍，T_{min} を 15.00 秒から 40.00 秒に設定した。適応度は，HF 成分の振幅の急上昇検知と自覚症状の有無の組み合わせに対し，表 1 に示すスコア配分に基づき算出したスコアの総和とした。ここで，症状有時に HF 成分の振幅の急上昇を検知した場合を真陽性(TP)，検知しなかった場合を偽陰性(FN)，症状無時に HF 成分の振幅の急上昇を検知した場合を偽陽性(FP)，検知しなかった場合を真陰性(TN)とする。具体的には，TP に高い報酬を与える一方，FN に対しては FP よりも重いペナルティ(-3 点)を課し

©2026 IEE Japan

た。これは，熱中症の兆候の見落としを防ぎ，作業員の安全性を最優先する意図がある。

本実験における GA のパラメータ設定および実験条件を表 2 に示す。GA のこれらのパラメータは予備実験において過学習を抑制し，良好な収束性が確認された値を採用した。探索の終了条件は，解の探索が 10 世代停滞した場合とした。また，学習用データとして，高温環境下および高湿環境下で計測された実験協力者全ての計 18 件の HF 振幅データを用いた。

表 1　適応度スコアの定義

Table.1 Definition of fitness scores

	Symptoms (+)	Symptoms (-)
HF Rapid Rise (+)	4 (TP)	-2 (FP)
HF Rapid Rise (-)	-3 (FN)	1 (TN)

表 2　GA パラメータおよび実験条件

Table.2 GA parameters and experimental conditions

Parameter	Value / Method
Population size	30
Max generations	100
Selection method	Tournament
Crossover rate	0.8
Mutation rate	0.1
Indep. mutation rate	0.2
Termination condition	Stagnation (10 generations)
Number of data samples	18

３．解析結果

本研究では，検出精度の定量的な評価指標として感度($TP/(TP+FN)$)および特異度($TN/(TN+FP)$)を用いる。乱数による初期値の依存性を考慮して 2 回 GA 試行をしたが，いずれも最大適応度は同じ値に収束し，解の再現性が確認された。そこで，最初に得られた解を代表値として採用した。この結果，最適解として $K=2.18$，$T_{min}=32.35$ が得られた。従来パラメータである $K = 3.00$，$T_{min} = 20.00$ と，最適化後のパラメータを用いた場合の検出精度の比較を表 3 に示す。表 3 に示すように，従来のパラメータを用いた場合，感度は 60.0%(10 件中 6 件)であったのに対し，GA による最適化後のパラメータでは 100%(10 件中 10 件)に向上した。これは，熱中症の兆候があるデータを全て正しく検知できたことを意味し，本手法による検出性能の改善が確認された。一方で最適化後の特異度は 25.0%(8 件中 2 件)にとどまり，従来手法より低い結果となった。この要因として，適応度の計算において，見逃しに対するペナルティを意図的に大きく設定した点が挙げられる。その結果，GA は見逃しを回避するために，熱中症起因に関連するわずかな HF 成分の振幅の急上昇に対しても警報を出すようパラメータを探索したと考える。作業現場における安全管理システムとしては，生命に関わる熱中症の初期兆候を見落とすことが最も回避すべきリスクである。したがって，特異度の低下を許容してでも感度 100%を達成した本結果は，システムの設計意図に合致した妥当なものである。特異度の低下の要因である偽陽性が発生したデータの波形を確認したところ，その要因は大きく二つに分類された。第一に，波形に混入したノイズにより HF 成分の振幅がわずかに上昇し，閾値を超過した事例である。第二に，ノイズが見られない正常な波形であるにもかかわらず，偽陽性に至った事例である。現状の手法は HF 成分の振幅の急上昇という単一の指標に依存しているため，熱中症に起因しない HF 成分の振幅の上昇との判別が難しい。この課題に対しては，HF 成分以外の自律神経指標や深部体温などのデータを組み合わせた判定ロジックの導入が有効であると考えられる。

表 3　熱中症検出性能の比較

Table.3 Comparison of heatstroke detection performance

Method	Sensitivity (%)	Specificity (%)
Conventional Method	60.0 (6/10)	50.0 (4/8)
Proposed Method	100.0 (10/10)	25.0 (2/8)

４．おわりに

本稿では，GA を用いて熱中症検出パラメータの最適化を行い，熱中症の判定精度の向上を図った。人工気候室において収集された複数の作業員の心電図を用いて HF 成分の振幅に対する熱中症の判定に用いる 2 つのパラメータを GA により最適化した。最適化したパラメータと従来パラメータを用いた場合の熱中症の検出結果を比較した結果，熱中症の兆候があるデータを全て正しく検知し，GA を用いた最適化による検出性能の改善が確認された。

今後は，偽陽性を低減するため，HF 成分の振幅の急上昇だけでなく他の指標を組み合わせた判定ロジックの確立を目指す。また，実際の作業現場における本手法の有効性を検証していく。

謝辞

本研究の遂行にあたり，人工気候室の使用および身体データの取得にご協力いただいた三重県立看護大学　大西範和先生，菅原啓太先生に心より御礼申し上げます。

文　献

(1)湯田恵美・吉田豊・他：心拍変動 HF 成分振幅のスパイク様バースト:熱中症の兆候現象，情報処理学会全公，4.431-4.432 (2018)

(2) Lipsiz LA，Hayano J，Sakata，Okada A，Morin RJ : Complex demodulation of cardiorespiratory dynamics preceding vasovagal syncope，Circulation，977-983 (1998)

(3)福井あやか・大深元輝・他：人工気候室における心電図モニタリングと熱中症兆候の関連，令 5 年電気学会全大，132-133 (2023)

©2026 IEE Japan

深部体温と SDNN による 現場作業時の熱ストレス評価

仲林　昂彦*，池浦　良淳，早川　聡一郎（三重大学）
中神　正樹，八尾　健一朗（中部電力株式会社）

Heat Stress Assessment in On-site Work using Body Core Temperature and SDNN

Takahiko Nakabayashi, Ryojun Ikeura, Soichiro Hayakawa (Mie University)
Masaki Nakagami, Kenichiro Yao (Chubu Electric Power Co., Inc.)

１．はじめに

近年，熱中症の発生リスクが高まっており，特に現場作業者にとって深刻な問題となっている。令和７年６月１日には厚生労働省より「改正労働安全衛生規則」が施行され，職場における熱中症対策の強化が行われている。その規則では，湿球黒球温度（WBGT）を用いた環境要因の評価を用いている。他にも，深部体温などの体温モニタリング，心拍数，そして心拍変動（HRV）などの生体情報を活用した熱中症リスク検出が進められている[1]。著者らはこれまで，心拍変動の高周波（High Frequency, HF）成分の突発的な増加に着目し，熱中症を予測する手法を検討してきた。しかし，熱中症は熱失神，熱疲労，熱けいれん，熱射病の四様態が存在し，それらの発症原因も様々であり[2]，心拍変動の高周波成分の増加では熱失神の予測に限られるという課題がある。

そこで本稿では，身体全体のストレス評価指標として HRV の代表的な時間領域指標である SDNN（Standard Deviation of the NN intervals）に着目し，これが現場作業時の熱ストレスと疲労蓄積の客観的な指標として有効であるか否かを検証することを目的とする。実際の現場作業時において，異なる作業日に取得された作業者の深部体温の変動と，1 分間 SDNN の変動データとの関連性を詳細に解析・評価した。本稿では，解析・評価を通じて SDNN の指標としての有効性を検証した結果について報告する。

２．実験データ収集手法

本実験に用いたデータは，中部電力グループの企業および関連施設の協力のもと,電力インフラ関連の作業現場において，実際の作業中に収集したものである。実験協力者には，バンド型デバイスである Vitalgram CTII（アフォードセンス株式会社）の改良型を胸部皮膚に装着してもらい，心電・深部体温などのバイタルデータ，加速度，ならびに気温・湿度のデータを収集した。Vitalgram のサンプリング周波数は 1024Hz に設定した。なお，この際に収集した深部体温は，皮下脂肪圧や体の熱放出量から換算された値であり，実際の深部体温とは異なる。心電図などの生体データを取得するバンド型デバイス，Vitalgram CTIIの体への装着イメージを図 1 に，主な作業内容である送電鉄塔の整備作業を行っている際の画像を図 2 に示す。

実験開始前には年齢，身長，体重，血圧といった個人情報や，その日の体調，前日の作業内容を確認するアンケートを行い，作業開始前の気温，湿度，WBGT などの環境情報も記録した。また，作業終了時には主観評価を得るためのアンケートも実施した。このアンケートでは，熱中症の初期状態となる，めまい，手足のつり，頭痛，吐き気，体中のだるさ，判断力・集中力の低下について評価してもらった。

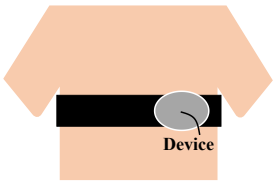


図 1 バンド型デバイスの装着イメージ
Fig.1 Band-type Device Wearing Image

図 2 現場作業の例
Fig.2 Examples of On-site Work

３．深部体温と 1 分間 SDNN 比較結果

＜3・1＞1 分間 SDNN 導出法　実験で得られた心電図から導出した RRI(R-R Interval)の SDNN を算出して解析を行う。SDNN は RRI の標準偏差，すなわち分散の平方根である。分散は数学的にはスペクトル分析の総パワーに等しいので, SDNN は記録期間中の変動の原因となるすべての周期的成分を反映しており[3], SDNN が高いと自律神経の調整機能が正常で暑さへの適応力が維持されている状態，低いと体温調節機能が低下している状態を示す。詳しい SDNN の計算式を式(1)に，それに用いる RRI の平均値導出式を式(2)に示す。

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(RRI(i) - \overline{RRI})^2} \quad (1)$$

$$\overline{RRI} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} RRI(j) \quad (2)$$

©2026 IEE Japan

本研究では，変数 n の値は計測時間を 1 分毎に分けた際の，その 1 分間に存在する RRI のデータの個数とした。よって，SDNN は心電図の記録データの 1 分毎のデータを基に計算したものである。

＜3・2＞深部体温比較と 1 分間 SDNN 結果　　実験協力者のうち，データ収集中に深部体温が常に 37℃以下であった実験協力者 A と深部体温が 37.5℃まで増加した実験協力者 B の心電図から SDNN を計算し，深部体温の変動と比較した結果について示す。作業終了時における主観アンケートではどちらも熱中症の初期症状は確認されておらず，実験協力者 A と B は共に同じ作業を行っていた。また，協力者 A は 20 代であり，作業開始時の気温は 27.5℃，湿度は 71%，協力者 B は 40 代で，作業開始時の気温は 30℃，湿度は 76%となっており，協力者 B のほうが環境面において熱中症リスクが高いと言える。

実験協力者 A の RRI と深部体温（BodyCoreTemp）および SDNN の変化を示したグラフを図 3 に，実験協力者 B の RRI と深部体温および SDNN の変化を示したグラフを図 4 にそれぞれ示す。各図における上のグラフは，左縦軸が RRI の値（単位: [s]），右縦軸が深部体温の値（単位: [℃]），横軸が計測時刻（単位: [HH:mm]）であり，青線は RRI，赤線は深部体温を示している。また，下のグラフは縦軸が SDNN の値（単位: [ms]），横軸が計測時刻（単位: [HH:mm]）である。

実験協力者 A のグラフでは，深部体温は作業時間を通じて 36.5°C から 37.0°C の範囲で推移した。この深部体温の安定した推移に対して，SDNN（1 分間）は 40 から 80 ms 程度の高水準を維持しており，持続的な低下傾向は認められなかった。この結果は，当該作業環境下における熱負荷が中程度以下であり，協力者 A の自律神経系への過度な負担や疲労の蓄積は限定的であったことを示唆している。SDNN が高水準で推移し，深部体温も安定していたことから，当該環境下における生理的な熱適応が良好であったと言える。

一方，実験協力者 B のグラフでは，深部体温は午後の作業開始後から 37.5°C を超える高水準に向けて変動した。この深部体温の上昇が顕著になった 13:00 頃を境に，SDNN は 30 ms 程度の低水準まで低下した。この変動は，深部体温の上昇によって強い熱ストレスが自律神経系に作用し，交感神経優位の状態が誘導されたことを明確に示している。SDNN の値のこの顕著な低下は，協力者 B が熱疲労などの熱中症初期症状の発現リスクが最も高まる生理的な負担の増大を経験していた時間帯を定量的に示唆する結果である。

これらの結果から，SDNN の値が現場作業時の熱ストレスと生理的疲労の客観的な指標として有効であることが実証された。

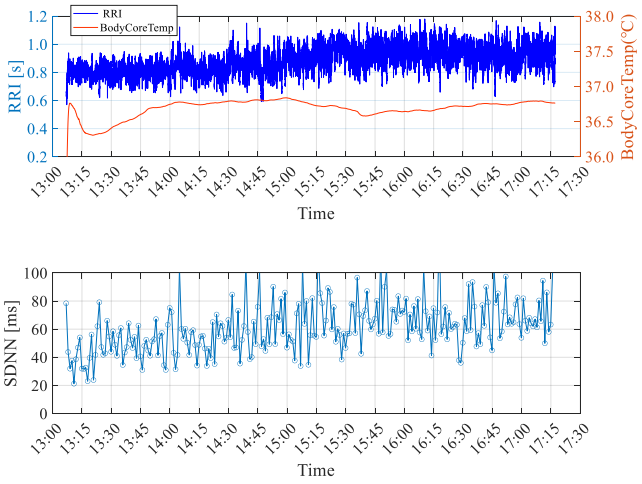


図 3 現場作業時の深部体温と SDNN の変動（協力者 A）
Fig.3 Changes in Body Core Temperature and SDNN during Field Work (Subject A)

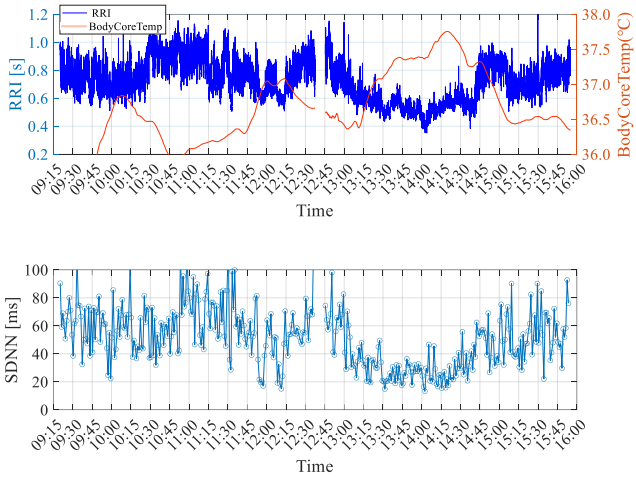


図 4 現場作業時の深部体温と SDNN の変動（協力者 B）
Fig.4 Changes in Body Core Temperature and SDNN during Field Work (Subject B)

4．おわりに

本稿は，SDNN が現場作業時の熱ストレスと疲労蓄積の客観的な指標として有効であるか否かを検証することを目的とした。検証にあたり，実際の現場において異なる作業日に取得された深部体温と SDNN のデータを詳細に解析した。その結果，SDNN の値が，現場作業時における熱ストレスおよび疲労蓄積の客観的な指標として極めて有効であることが実証された。

今後は，熱中症発症の予兆となる SDNN の低下ラインを特定し，そのリスク相関を定量的に解析していく予定である。さらに，著者らが検討してきた HF 成分急上昇等の予測手法と本知見を統合し，より高精度かつ包括的な現場での熱中症リスク予測の実現を目指す。

文　献

[1] 太田 鴻志・藤原 幸一・他：心拍変動解析と多変量統計的プロセス管理による熱中症検知モデルの開発，第 34 回人工知能学会全国大会(2020), 1C5-GS-13-01(2020)

[2] 星秋夫・樫村修生：熱中症の語源と定義，桐蔭スポーツ科学，1, 3-9(2018)

[3] M. Malik et al.：Heart rate variability, European Heart Journal, 17, 354-381(1996)

©2026 IEE Japan

味刺激に対する脳波反応パターン

Wang Ting*，岡村　純也，王　鋼（鹿児島大学）

Cortical Oscillatory Signatures of Basic Taste Qualities

Ting Wang, Jun-ya Okamura, Gang Wang (Kagoshima University)

１．まえがき

本研究は，複数の周波数帯にわたる事象関連スペクトル変動（event-related spectral perturbations：ERSPs）を解析することにより，異なる味質が大脳皮質の振動活動をどのように変調するかを明らかにすることを目的とした。コンピュータ制御のガストメータと脳波（EEG）を用い，甘味，塩味，酸味，苦味の 4 つの基本味刺激に対する神経応答を記録した。解析では，時間–周波数ダイナミクス，ならびに広範な周波数帯域における振動変化に着目した。

２．方法

右利きの健常な大学生 20 名（年齢範囲：19～26 歳）を対象とした。事前のスクリーニングにより，全参加者が正常な味覚および嗅覚機能を有することを確認した。本研究の実験プロトコルは大学の倫理審査委員会の承認を受けており，ヘルシンキ宣言に準拠して実施された。

5 つの基本味刺激―甘味（スクロース），塩味（NaCl），酸味（クエン酸），苦味（塩酸キニーネ），うま味（グルタミン酸ナトリウム）―は，水溶液として調製した。各刺激の濃度は，予備実験において，味の認知閾値を上回り，不快感を引き起こさない範囲で決定した。実験は複数のブロックから構成され，各味刺激は約 40 試行にわたりランダムな順序で提示された。予測効果を防ぐため、試行間間隔はランダム化した。

連続脳波（EEG）は，128 チャンネルのアクティブ電極を備えた電極キャップを用いて記録した。サンプリング周波数は 1024 Hz とした。オフライン前処理には BESA および EEGLAB を用いた。データは 0.1–40 Hz の帯域通過フィルタを適用し，乳様突起電極の平均を基準とした再参照を行った。眼球運動由来のアーチファクトは独立成分分析（ICA）を用いて補正した。

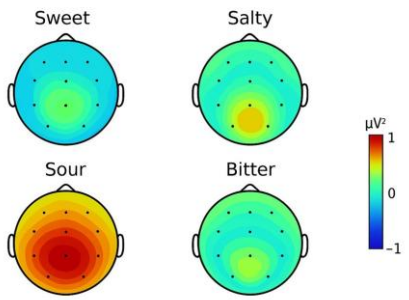


図１　誘発された 1- 4 Hz 帯域パワー変化

Fig.1 Topographical distribution of 1–4 Hz power

３．結果

事象関連スペクトル変動（ERSP）は，シータ帯（4- 7 Hz），アルファ帯（8- 13 Hz），ベータ帯（14- 30 Hz），ガンマ帯（30- 40 Hz）について検討した。

図１は，4 種の基本味刺激（甘味，塩味，酸味，苦味）によって誘発された 1–4 Hz 帯域（デルタ帯）の脳波パワー変化の頭皮上分布を示すトポグラフィ。各マップは刺激提示後の事象関連スペクトル変動（ERSP）に基づいて算出されたパワー変化を表しており，カラーバーはパワー変化量（μV²）を示す。暖色はパワー増加，寒色はパワー減少を示す。味質ごとに空間分布および強度の異なる低周波振動活動が観察された。デルタ帯に比べ，アルファ帯域の活動においては，味質ごとに依存した反応の違いが見られなかった。

４．考察

本研究は，4 種の基本味刺激が誘発する脳活動を解析し、味質ごとに異なる神経応答が生じることを示した。すべての味刺激で刺激後 350–550 ms に GFP の増大が認められた。低周波帯（1–4 Hz）では酸味が最も強いパワー増加を示し，不快な味ほど初期の注意・情動処理が強く動員される可能性が示唆された。一方，アルファ帯（8–12 Hz）では酸味・苦味で強い抑制が生じ，ガンマ帯では前頭部を中心に不快味で増強が認められた。これらの結果は，味の快・不快といった情動価が皮質味覚処理を体系的に調節することを示している。

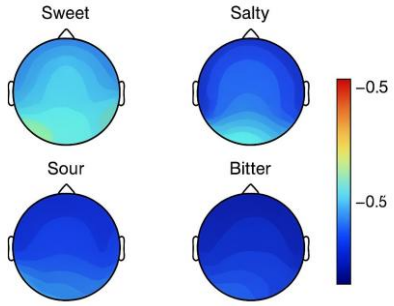


図２　誘発された 8- 12 Hz 帯域パワー変化

Fig.2 Topographical distribution of 8–12 Hz power

文　献

(1) J Diószegi: Frontiers in Genetics., 10:1272 (2019)

(2) A Johnny: Chemical Senses., 41(5):449–456 (2016)

©2026 IEE Japan

睡眠中における人体皮膚抵抗の複数部位計測および相関解析

丁　健辰*[1]，山口　陽誠[1]，山岸　健人[1]，李　成薫[2]，横田　知之[1]，染谷　隆夫[1]，
関野　正樹[1]
[1]東京大学，[2]理化学研究所

Multi-Site Measurement of Human Skin Resistance During Sleep and Correlation Analysis

Jianchen Ding[1], Yousei Yamaguchi[1], Kento Yamagishi[1], Sunghoon Lee[2], Tomoyuki Yokota[1], Takao Someya[1], Masaki Sekino[1]
[1] The University of Tokyo, [2] RIKEN

１．背景

近年，人体の皮膚抵抗測定は，被験者に対する負担が小さく，測定の実施が容易であるという利点を有することから，ヘルスケアに関する研究がますます進められている。なかでも，睡眠計測分野における皮膚抵抗測定の応用が近年注目を集めている。しかしながら，測定部位の違いによる皮膚抵抗の特性や，皮膚抵抗の変動と睡眠段階との関係については，依然として十分に解明されておらず，さらなる検討が必要である。

２．目的

本研究の目的は，人体の複数部位で測定した皮膚抵抗データを比較・解析し，部位間の関連性および皮膚抵抗変動と睡眠段階との相関関係を明らかにすることである。さらに，皮膚抵抗測定に最適な部位を選定するための基礎的なデータを得る。

３．手法

本研究では，６名の健常者を対象に一晩の計測を実施した。図１に示す測定システムを用いて，皮膚抵抗を測定するとともに，簡易脳波計により睡眠段階のデータを取得した。測定には，皮膚抵抗測定装置，ナノメッシュ電極(1)，およびＹ字型電極から構成される小型システムを用い，各被験者の前腕，手掌，および下腿外側の３部位において皮膚抵抗測定を実施した。測定システムは美容用フィルム，サージカルテープ，およびネット包帯により固定した。

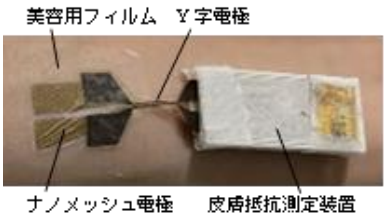


図１皮膚抵抗測定システム
Fig.1. Skin resistance measuring system

４．結果

本研究では，３部位の皮膚抵抗について、ピアソンの相関係数を用いて部位間の変動の相関性を解析した。

表１　複数部位の皮膚抵抗変動の相関係数

Table 1. Correlation coefficient of skin resistance at different body sites

被験者番号	r(Arm, Palm)	r(Arm, Leg)	r(Palm, Leg)
1	-0.153	0.861	-0.084
2	0.617	0.424	0.517
3	0.404	0.982	0.051
4	-0.379	0.558	0.394
5	0.147	0.183	0.838
6	-0.292	0.334	0.580

統計解析の結果，測定部位間の全ての組み合わせにおいて有意な相関が認められた（$p<0.001$）。

本研究では，皮膚抵抗データを皮膚コンダクタンスデータに変換し，コンダクタンスの一次微分が 0.0001 μS/s を超える点を EDA ピーク(2)と定義した。さらに，睡眠段階ごとに EDA ピーク数を算出し，これを当該段階の総時間で除した値を EDA ピーク率とした。最終的に，６名の被験者における EDA ピーク率の平均値を算出した。

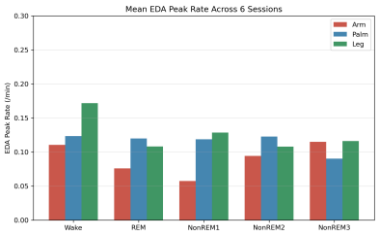


図２EDA ピーク率の平均値(N=6)
Fig.2. Mean EDA Peak Rate (N=6)

５．まとめ

本研究では，６名の健常者を対象に睡眠中の皮膚抵抗測定を行い，前腕と下腿の皮膚抵抗変動に有意な強い正の相関が認められ，多部位対応測定機器の開発が期待される。また，下腿における EDA ピーク率は Wake 段階で高値を示し，皮膚抵抗測定に基づく睡眠状態評価の有用性が示唆された。

文　献

(1)A. Miyamoto et al., Nature Nanotech, 12(9). 907～913 (2017)

(2)A. Sano et al., Int. J. Psychophysiol., 94(3). 382～389 (2014)

©2026 IEE Japan

ラット後肢への磁気刺激の前後の呼気成分濃度分析

髙橋諒太*1, 楊嘉誠 1, 權杞映 2, 山田はるか 2, 山原弘靖 1, 船谷聖子 1, 三村維真理 2, 伏見幹史 3, 西裕志 2, 田畑仁 1, 南学正臣 2, 関野正樹 1(1. 東京大学大学院工学系研究科, 2. 東京大学大学院医学系研究科, 3. 東京大学大学院情報理工学系研究科)

Analysis of exhaled component concentrations before and after magnetic stimulation of rat hindlimbs

Ryota Takahashi[1], Jiacheng Yang[1], Giyoung Kwoun[2], Haruka Yamada[2], Hiroyasu Yamahara[1], Seiko Funatani[1], Imari Mimura[2], Motofumi Fushimi[3], Hiroshi Nishi[2], Hitoshi Tabata[1], Masaomi Nangaku[2], and Masaki Sekino[1]
(1.Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Graduate School of Medicine, The University of Tokyo, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

1. まえがき

呼気ガスは非侵襲的かつ繰り返し採取可能な指標であり、運動の効果を評価するための有用な方法である。運動によって引き起こされる呼気ガスの変化については多くの研究が行われており、アセトンや酢酸などの成分が運動後に濃度が上昇することが分かっている。しかし、慢性炎症患者などへのリハビリテーション療法で用いられる電気刺激や磁気刺激による運動については研究例が少ない。そこで、磁気刺激の前後で呼気ガスを分析し、運動によって変化する呼気ガス成分を発見することを目的に研究を行う。

2. 方法

呼気採取では、ラットの電気刺激・磁気刺激は先行研究が豊富なことから、Wistar ラット(10 週齢オス)を使用し、麻酔は三種混合麻酔(ミダゾラム、メデトミジン、ブタルファノール)を投与し、磁気刺激・呼気採取を実施する。呼気採取のために麻酔下のラットに対して挿管を実施し、挿管されたチューブに小動物用の逆止弁付きの Y 字管を接続した。吸気・排気側それぞれにサンプリングバックを接続し、吸気側のバックには医療用人口空気(N2:02=78:22)を充填し、環境ガスのノイズが最小限になるような実験系を構築した(図 1)。呼気採取は 10 分間行い、約 50cc の呼気を採取した。測定においては、まず濃度増加が期待されるアセトン、イソプレンなどの解析をセンサガスクロマトグラフィで行い、その後網羅的に解析をガスクロマトグラフィ質量分析で行った。磁気刺激では小動物用コイル(MagVenture,Cool-40 Rat Coil)を腰部の坐骨神経付近に設置し、両後肢を収縮できるようにする(図 2)。刺激条件は、出力は筋収縮観測時の 2.5 倍、周波数 10 Hz、パルス幅 0.280 msec、刺激パターンは 2 秒刺激 14 秒インターバルで、総刺激回数は 18,000 発である。

本研究は東京大学動物実験委員会の承認を得て実施した(No. A25E0023(A2024E013-01))。

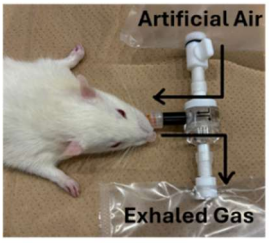


図 1　呼気採取実験系
Fig.1 Collecting Breath Sample Method

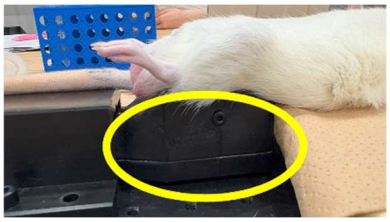


図 2 磁気刺激方法(黄色丸はコイルの位置)
Fig.2 Magnetic Stimulation Setup(The yellow circle indicates the coil position.)

©2026 IEE Japan

3. 結果と考察

まず、特定ガス種における結果を図３に示す。ここではアセトンが磁気刺激前後において有意に増加した。先行研究[1]では、高強度の刺激直後では濃度上昇は少ないことが分かっており、本結果では刺激初期の脂質代謝への影響が呼気に反映する時間が十分にとれたことにより有意差がでたと考える。また、刺激による運動によって肝臓の代謝活動が活発になると予想し、エタノール、アセトアルデヒドは濃度が減少すると考えていたが、エタノールは増加傾向にあった。これは長時間の刺激により、エネルギーが枯渇し、内因性エタノールが増加したことによるものと考える[2,3]。イソプレンは、運動によって濃度が増加することが知られている[4,5]が、本研究で検出強度以下であった。これは、先行研究ではノーズコーンや、ケージ内のガスを採取しているので呼気のみを測れていないからだと考える。したがって、ラットの呼気中には微量しか存在しないことを示す結果になった。

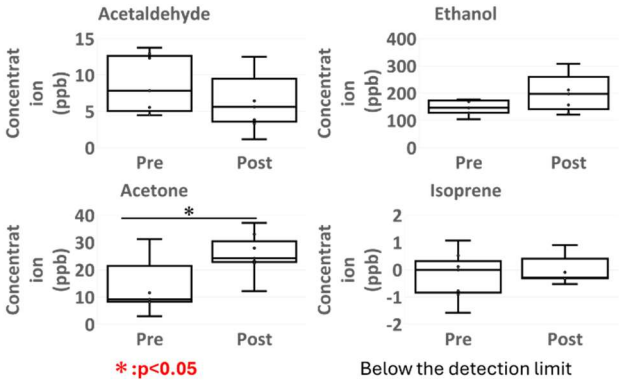


図３ 特定ガス種(*:p<0.05)

Fig.3 Specific Gases Analysis

次に、網羅的ガス種解析についての結果を図４に示す。解析の際に、測定時に加えた外部標準物質にて比を取り測定間の誤差を最小限にした。ここでは、Acetone に加えて、Octanol,Nonanal,Haptanal の３種に有意差が生じた(p<0.05)。これらの成分はアルデヒド揮発性物質で共通しており、運動前後で濃度が増加するという報告はなく、新たな発見である。Heptanal,Nonanal は酸化ストレスの指標の候補であることで知られており、磁気刺激による代謝への影響があったことが伺える結果となった。

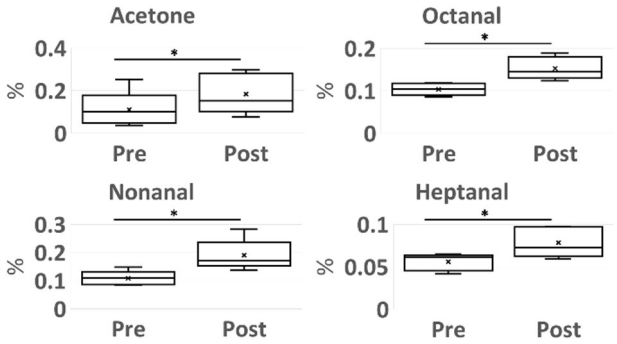


図４ 網羅的ガス種解析(*:p<0.05)

Fig.4 Comprehensive Gas Species Analysis

4. まとめと今後の方針

以上より、磁気刺激によってラットの代謝活動を活発にさせることが可能であることが分かった。呼気成分では、運動によって変化することが広く知られているアセトン以外に、Heptanal,Nonanal,Octanal の３種が新たに濃度が増加するということが分かった。また、本原稿では書き切れなかったが、同刺激回数の電気刺激の結果と比較をすると、磁気刺激の方がより代謝活動を活性化させていたことが分かる結果になった。

今後の方針としては、電気刺激が 30 分に対し、磁気刺激の方が 240 分と刺激時間に差が見られる。電気刺激を磁気刺激の刺激パターンと同様にし、240 分の電気刺激を行った場合の呼気ガス変化について観察をしたい。

文献

[1]Karsten Königstein et al,J.Breath Res.15 016006,2021

[2]El-Sayed,M.S.,Ali, N.&Ali,Z.ES.Sports Med 35,257-269,2005

[3]Meijnikman,A.S.et al.Nat Rev Gastroenterol Hepatol 21,556-571,2024.

[4]K F H Hintzen et al, J.Breath Res.16 027102, 2022

[5]Alastair Taylor,et al,Biology Methods and Protocols,9,1,bpae087,2024

©2026 IEE Japan

選択的セロトニン再取込阻害剤が脳波に及ぼす特徴解析－定位置計測用基板の動物への応用－

池谷　真里佳*，舘野　高（北海道大学大学院）

Analyzing EEG Signal Characteristics Induced by Selective Serotonin Reuptake Inhibitors:
A Fixed-Placement Measurement Substrate for Animal Studies

Marika Ikeya, Takashi Tateno (Hokkaido University)

1. 序論

厚生労働省の調査によると，近年，日本国内の精神疾患の患者数は増加傾向にあり，2023 年現在で約 600 万人が罹患している[1]．その中で最も高い割合を占める疾患が，うつ病を含む気分障害である．うつ病の薬物療法には，神経伝達物質セロトニン濃度を脳内で調整する薬剤が利用されている．特に，選択的セロトニン再取込阻害剤（selective serotonin reuptake inhibitor，SSRI）が広く使われており，長期服用によってうつ症状を軽減する効果がある．また，SSRI は耳鳴りの治療目的でも処方される．一方，SSRI の副作用として，服用開始初期に頭痛や不安障害などが報告されている．また，耳鳴り[2]や幻聴[3]などの聴覚障害の報告例もある．しかし，SSRI が聴覚情報処理に与える影響について，モデル動物を用いた脳活動計測による詳細な検討は，現在までに十分に行われていない．

脳波（electroencephalography，EEG）は，高い時間分解能で脳活動を計測でき，ヒトとモデル動物の間の橋渡し研究に有用である．特に，聴覚 Oddball 課題中の事象関連電位（event-related potential，ERP）であるミスマッチ陰性電位（mismatch negativity，MMN）は，音の逸脱検出に関連する脳波電位であり，統合失調症などの精神疾患におけるバイオマーカーとして注目されている．しかし，小型のモデル動物では，脳波計測用電極位置のばらつきによって固体間で検出信号の再現性が低く，特に MMN 検出とその特徴解析に影響を与える可能性がある．

本研究では，小動物個体間で記録電極位置のばらつきを最小限に抑え，再現性の高い電極配置を実現するフレキシブル基板（flexible printed circuit，FPC）を開発した．次に，この FPC を用い，聴覚 Oddball 課題中にマウス脳波を計測して MMN を検出した．さらに，SSRI の短期投与が聴覚情報処理に及ぼす影響を調べるため，SSRI 投与条件下の MMN を計測して音逸脱検出機能を評価した．これらの結果から，本実験手順と解析手法の妥当性について議論する．

2. 方法

2.1　脳波計測用フレキシブル基板

本研究では，脳波計測用として FPC（12.5 mm×33.8 mm，70 mg）を独自に開発した（図 1A）．FPC 電極配置の定位点として，頭蓋骨上の解剖学的な位置指標である頭蓋縫合点（ブレグマ）を用いた．FPC にはグランド，リファレンス，6 つの脳波計測点を設け，Chs 1，2，4，5 が聴覚野近傍，Chs 3，6 が下丘近傍のチャンネルとなっている（図 1B）．FPC にはリング状の銅パッドを周囲に備えた円形穴（外径 1.3 mm，内径 0.8 mm）が 8 個あり，脳波の記録用にその穴を貫通させて，ステンレス製のスクリュー電極（KOFUSEIBYO, S0.6*1.5 mm）を頭蓋骨に埋め込んだ．

2.2　FPC 装着手術と薬剤投与プロトコル

全ての動物実験は，北海道大学の動物実験規定に基づき，同大学の動物実験委員会の承認を受けた実験手法によって実施した．FPC および記録電極は，麻酔下のマウス（C57BL/6J，7-10 週齢，n＝12）に対して外科的手術によって装着した．まず，頭皮と生体膜を切開して頭蓋骨を露出し，FPC 上の基準点をブレグマに合わせ，電極埋め込み位置を決定した．そして，歯科用ドリルで電極位置に穴を開け電極を埋め込み，1-2 日間の回復期間と 5 日間の投薬期間を設けた．投薬期間後，MMN 計測日に一度電極を抜き，FPC の上から再度頭蓋骨にスクリュー電極を埋め込む手術を行った．再手術後 3 時間以上の回復期間を設けたのち，Oddball 課題の提示を行った（図 1C）．

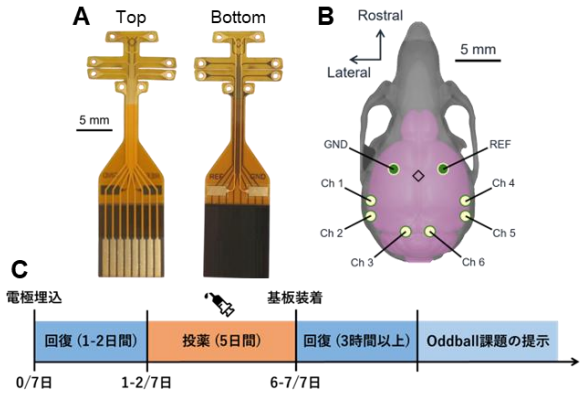


図 1．マウスの脳波計測と FPC 装着後の観察．（A）開発した FPC（左：表面，右：裏面）．（B）マウス頭蓋骨と FPC のチャンネルマップ．（C）実験プロトコルとタイムライン．

©2026 IEE Japan

1 回目の電極装着手術の後，マウスを SSRI 投与群（n＝6）と生理食塩水投与群（対照群，n = 6）の 2 群に分け，各群のマウスに SSRI，もしくは，同量の生理食塩水を 5 日間（1 日 1 回）腹腔内に注射した．SSRI の投与には，シタロプラム臭化水素酸塩（LKT laboratories，Minnesota，USA）を使用した．シタロプラムは生理食塩水に溶解し，1 回の投与量がマウスの体重に対して 10 mg/kg になるように計量し，0.10-0.15 mL の範囲の容量で投与した．

2.3　聴覚 Oddball 課題とデータ解析

聴覚刺激として，以下の 2 種類の Oddball 課題を用いた．（i）周波数逸脱条件：持続時間を 50 ms に固定し，高頻度の標準刺激（standard stimulus，STD）を 4 kHz，低頻度の逸脱刺激（deviant stimulus，DEV）を 8 kHz の tone-burst とした．（ii）持続時間逸脱条件：周波数を 8 kHz に固定し，STD の持続時間を 50 ms，DEV を 125 ms とした．いずれの条件も音圧は 80 dB SPL，刺激提示間隔は 450 ms とし，DEV の提示確率は 17%に設定した（図 2A）．

計測した脳波データに対し，50 Hz バターワースフィルタを適用後，刺激開始点を基準として加算平均を行い，ERP を算出した．MMN 波形は，DEV の ERP 波形から STD の ERP 波形を減算することで導出し（図 2B），MMN の評価対象範囲を音刺激後 30-150 ms とした[4]．この範囲内における最大電位（正ピーク）と最小電位（負ピーク）をそれぞれ同定し，これらの電位差を Peak-to-Peak 振幅として算出した．また，負ピークに達した時刻を MMN ピーク潜時と定義した．

統計解析にはノンパラメトリック検定を用い，対照群と SSRI 投与群の 2 群間比較には Mann-Whitney U 検定を，同一個体における逸脱条件間（周波数または持続時間）比較には Wilcoxon の符号付順位検定を実施した．また，算出した各 p 値に対して Holm 法による補正を行った．解析は，聴覚野近傍のチャンネル（Chs 1，2，4，5）を対象に行った．

3. 結果・考察

開発した FPC を用いた計測により，聴覚誘発応答および MMN 波形を取得できた．本報告では，代表例として左聴覚野近傍の Ch 1 における解析結果について検討を行う．

Peak-to-Peak 振幅について解析を行った結果，SSRI 投与

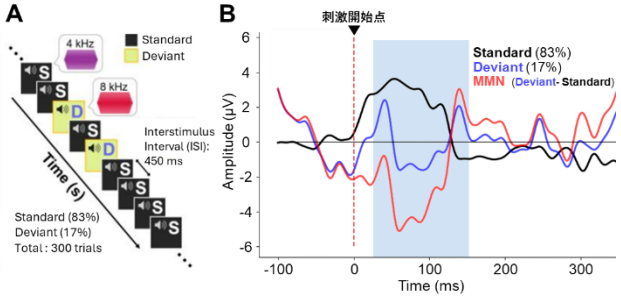


図 2. MMN の誘発と算出．（A）周波数逸脱聴覚 Oddball 課題．（B）MMN 波形．網掛け部分の Peak-to-Peak 振幅および負ピーク潜時を算出．

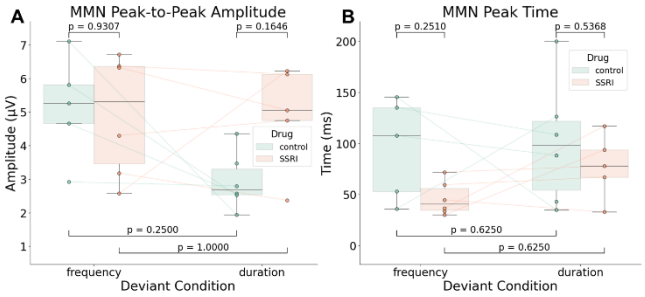


図 3. 短期 SSRI 投与による MMN への影響の評価．（A）MMN Peak-to-Peak 振幅．（B）MMN 負ピーク潜時．箱ひげ図内の各点は個体データを示し，同一個体間の条件変化を実線で結ぶ．p 値は Holm 法による補正後の値．

の有無および逸脱刺激種別の各要因において統計的有意差は認められなかった（図 3A）．しかし，持続時間逸脱条件において，SSRI 投与群は対照群と比較して振幅が増大する傾向（Holm 補正後 p＝0.1646）が確認された．また，対照群において中央値の分布から，逸脱条件によって振幅が変化する傾向が確認された．負ピーク潜時についても同様に解析を行った結果，潜時においても有意な差は確認されなかった（図 3B）．一方で，周波数逸脱条件において，SSRI 投与群は対照群と比較して潜時が短縮する傾向（p = 0.2510）が認められた．さらに，SSRI 群では中央値の分布より，逸脱条件によって潜時が変化する傾向が確認された．

統計的な有意差には至らなかったが，振幅および潜時の双方において条件依存的な変化の兆しが観察されたことは，本研究で用いた実験手順および解析手法が，短期 SSRI 投与による聴覚逸脱検知過程の変調を捉えうる可能性を示唆している．特に，SSRI 群の持続時間逸脱条件では，対照群に対して振幅が増大する傾向があり，持続時間逸脱が相対的に感度の高い条件である可能性を示唆する．また，この点の検出には，正もしくは負の何れかのピーク振幅よりも Peak-to-Peak 振幅を用いた評価が妥当であると考えられる．今後は，個体数を増やして再現性を確認するとともに，計測した全チャンネルを包括的に評価することで SSRI が聴覚情報処理に及ぼす影響をより明確に検証する必要がある．

4. 結論

本研究では，FPC 電極を用いた計測系を構築し，その解析手法を提案した．本手法の結果は，SSRI 投与による MMN の振幅増大や潜時短縮の傾向を示唆しており，小型モデル動物の薬理効果を評価する一手法として利用できる．

参考文献

[1] 厚生労働省，第 4 回精神保健医療福祉の今後の施策推進に関する検討会，参考資料 4, pp. 2-5, 2025
[2] C. Miller, *Case Reports in Psychiatry*, Vol. 2016, No. 1, 2016
[3] A. Kogoj, *Psychiatria Danubina*, Vol. 26, No. 3, pp. 277-280, 2014
[4] T. Shiramatsu *et al.*, *PLoS One*, Vol. 8, No. 12, 2013

©2026 IEE Japan

聴覚皮質における低侵襲的な神経活動変調の制御に向けた近赤外光刺激法の開発

髙橋　皓太*，舘野　高（北海道大学）

Development of Near-Infrared Optical Stimulation for Controlling Low-invasive Neuromodulation in the Auditory Cortex

Kota Takahashi, Takashi Tateno (Hokkaido University)

１．序論

近赤外光神経刺激 (near infrared neural stimulation, NINS) は, 刺激により脳の温度を上昇させ, 脳活動を低侵襲かつ高時空間分解能で修飾する，有望な脳刺激法である[1]．多くの先行研究では NINS の刺激効果を放射露光量で評価してきたが[2]，温度上昇値と変調効果の関係を精査した研究は少ない．また，過度な温度上昇は神経損傷の危険があるため，安全かつ有効な刺激条件の探索が必要である．

本研究では，安全な NINS 条件を得るために，実際のマウス脳を用いて組織内の温度計測を行った結果，組織に安全な温度上昇 (2～4℃) の範囲で刺激条件を得た．次に，電気生理学的手法を用い，実際に NINS 条件下における音誘発神経活動をマウスの脳組織で計測して，音刺激のみの条件と比較した．これらの結果に基づき，音刺激下の NINS による温度上昇と神経活動の変調効果について議論する．

２．方法

NINS には，光ファイバー (内径 200 μm, 外径 3 mm) を用い，近赤外光 (波長 λ = 1940 nm) を対象表面から 3 mm 離して照射した. 刺激パターンには, 短パルス波の繰り返し刺激を用い, 次の 4 つのパラメーターによって特徴付けた : (i) パルス繰り返し周波数 (F, 単位 Hz), (ii) 刺激時間 (DU, s), (iii) パルス幅 (PW, s), (iv) パルス振幅強度 (I, W). また，4 つのパラメーターの積 (P = F·DU·PW·I) は，NINS の放射露光量に比例する．適切な刺激パターンを選択するために，外科的手術で露出したマウス聴覚皮質に NINS を照射し，脳組織に刺入した熱電対 (直径 330 μm, 長さ 1 cm, MT-29/1HT, Physitemp Instruments LLC, USA) を用いて，組織内の温度上昇を計測した．次に，多点記録電極 (A1x16-5mm-50-177-A16, NeuroNexus, USA) を用いて電気生理学的記録を行い，聴覚皮質における神経活動を計測した．NINS (時間長 0.5 s) が音刺激 (時間長 0.1 s) 応答をどの様に修飾するかを知るために, NINS の有無の条件で音刺激の誘発応答を記録した. 特に, NINS の刺激効果を特徴付けるため, NINS 条件下で温度の最大変化を示すと予想される時刻に, NINS 下で音刺激を印加し, 記録波形から抽出した神経活動電位 (スパイク) の頻度を用いて，その応答を解析した．

３．結果

熱電対を用いた温度計測結果に基づき，安全に脳組織の刺激が可能である温度上昇 (ΔT = 2～4℃) の範囲で複数の刺激条件を選択した．NINS のみの刺激条件 (例として，$P_1 = F_1 \cdot DU_1 \cdot PW_1 \cdot I_1 = 200 \times 0.500 \times 250 \times 10^{-6} \times 0.409 = 10.2 \times 10^{-3}$ J; $P_2 = 200 \times 0.500 \times 250 \times 10^{-6} \times 0.546 = 13.7 \times 10^{-3}$ J) に対する神経応答では，P_1 刺激の温度上昇は比較的小さく ($\Delta T < 2.7$℃), 自発的な活動に比べてスパイク頻度が 1.28 倍に増加した．一方 P_2 刺激では，温度上昇が大きく ($\Delta T \geq 2.7$℃)，自発的活動に比べてスパイク頻度が減少した．次に温度上昇が小さい NINS 条件下 ($P_3 = 200 \times 0.300 \times 250 \times 10^{-6} \times 0.910 = 13.7 \times 10^{-3}$ J) で音刺激を同時に印加 （図 1b） すると，音刺激のみ (図 1a) の場合と比較して誘発応答のスパイク頻度が増加した (図 1c; Wilcoxon signed-rank test, P = 0.0388 ; n= 7).

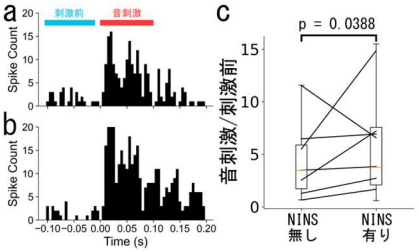


図 1.　NINS 条件下での聴覚皮質の音誘発応答変化.
(a) NINS 印加なし，(b) あり条件でのスパイク頻度
(c) NINS 印加有無でのスパイク頻度
Fig. 1. Sound-evoked responses in the auditory cortex under NINS.
(a) Spike frequency histogram without NINS.
(b) Spike frequency histogram with NINS.
(c) Comparison of spike frequency with and without NINS.

４．考察と結論

マウス聴覚皮質における NINS 印加による温度上昇を計測して，NINS パラメーターと温度上昇との関係を取得した．NINS 下では，電気生理学実験による神経スパイク活動を指標として，温度に依存した双方向性の活動変調効果を観察した．NINS 下の音誘発応答は増強の効果のみが見られた．今後は聴覚領域の治療に NINS による変調効果を応用する方法について提案することを目指す予定である．

文献

[1]S-R Tsai, Michael R Hamblin, J. Photochem. Photobiol. B, vol. 170, pp. 197–207, 5 2017.
[2] E. A. Kiyatkin, Curr. Neurovasc. Res., vol. 1, no. 1, pp. 77–90.

©2026 IEE Japan

ノイズ理論式に基づく CT 画像ノイズ成分解析

向山　隆史*（名古屋大学医学部附属病院），今井　國治，藤井　啓輔
川浦　稚代（名古屋大学），森　政樹，小柳　仁美，堤　貴紀（名古屋大学医学部附属病院）

Noise Component Analysis of CT Images Based on Noise Theoretical Formula

Takashi Mukoyama(Nagoya University Hospital), Kuniharu Imai, Keisuke Fujii,
Chiyo Yamauchi-Kawaura (Nagoya University), Masaki Mori, Hitomi Koyanagi, Yoshinori Tsutsumi (Nagoya University Hospital)

１．はじめに

CT 画像上のノイズは, 早期がんのような低コントラスト信号の検出能に多大な影響を及ぼす画質因子の１つであり，構造ノイズ，量子ノイズ，及び電気ノイズを主成分として構成されていることが知られている。これらのノイズ成分を評価することは，撮像条件の適正化や撮像後に行う画像処理の条件を検討する上で, 非常に有益な情報となる。しかしながら, 現状では個々のノイズ成分を定量的に解析する手法は存在せず，その考案は臨床上，必要不可欠であると考えられる。

そこで本報告では, CT 画像に適用可能なノイズ成分解析法を考案し，Energy Integrating Detector CT (EID-CT)及び Photon Counting CT (PC-CT)装置から取得した画像に適用した上で，その妥当性について検証した。

2. CT 画像上のノイズ成分に基づく理論式

一般に画像上のノイズは，Pixel 値または CT 値のばらつきと定義されており，その指標として標準偏差（NoiseSD）が，広く用いられている。筆者らは，以前，NoiseSD をもとに未処理のディジタル X 線画像に対するノイズの理論式を考案した。[1] そこで本研究では，この理論式を CT 画像にも適用できるように，理論の再構築を行うことにした。(1)式は基本となるノイズの理論式である。この式が示すように，$NoiseSD^2$ は透過線量と等価な Pixel 値の二次関数となり，式中の第 1-3 項は，各々構造ノイズ成分，量子ノイズ成分，電気ノイズ成分を表している。

$$\sigma^2 = m_s^2 N^2 + m_q^2 N + m_e^2 \quad (1)$$

σ: NoiseSD，m_s: 構造ノイズ係数，m_q: 量子ノイズ係数，
m_e: 電気ノイズ係数，N: 未処理画像上の Pixel 値

この理論式を CT 画像に適用するには，透過線量と等価な物理量を求める必要がある。そこで等価入力線量 N_0 として，X 線管電流量を使用し, (2)式をもとに透過線量換算値 N_{CT} を導出した。

$$N_{CT} = N_0 e^{-(HU/K+1)} \quad (2)$$

HU ; CT 値，K : 定数 (K=1000)

また，逐次近似再構成など非線形処理された CT 画像では，Texture ノイズと呼ばれているノイズが支配的となっているため, 従来の NoiseSD では確度よく評価できない。そこで，この問題点を解決する方法として，非線形処理画像に対しても確度よくノイズ評価ができる Apparent Noise Index(API, σ_{API})を採用することにした。[2]しかし，実測の API は線量に対する相対的なノイズ量であるため，理論構築の際，これを絶対量に変換した上で（$\sigma_{CT} = \sigma_{API} \cdot N_{CT}$），(1)式に導入した。以上のことから，CT 画像に対するノイズの理論式は，(3)式となり，

$$\sigma_{CT}^2 = (\sigma_{API} \cdot N_{CT})^2 = m_s^2 N_{CT}^2 + m_q^2 N_{CT} + m_e^2 \quad (3)$$

本研究ではこの式を用いて CT 画像のノイズ成分を評価した。

3. 実験方法

本研究では直径 32cm の水ファントムを対象とし，EID-CT と PC-CT を用いてスキャンした。その際, 管電圧 120 kV 一定の下, 管電流量を 20-275 mAs にした上で, Filtered Back Projection(FBP)で処理した CT 画像と Iterative Reconstruction(IR)法で処理したノイズ低減処理画像（スライス厚 5 mm）を取得した。その後，各画像に対し，移動平均フィルタ法を用いて API を測定し，ノイズの理論式の妥当性並びにノイズの成分評価を実施した。

4. 解析結果及び検討

図 1 に EID-CT 及び PC-CT 画像に対するノイズ特性を示す。CT 画像上のノイズは，理論通り，透過線量換算値の二次関数として規定でき，その精度は $R^2 \geqq 0.99$ であることが示された。また，IR 画像上のノイズは，撮像方式に関係なく，どの線量においても FBP 画像よりも低くなっており，特に，PC-CT では，画像処理の有無に関わらず定数項が $m_e^2 = 0$ となっている。これは電気ノイズ成分が存在しないことを意味しており，エネルギー閾値処理による電気ノイズの抑制効果を CT 画像上で実証した初めての事例である。さらに，この効果は EID-CT における IR 画像でも確認でき，逐次近似処理は量子ノイズだけでなく，電気ノイズの低減にも効果的であることが示された。以上の結果から，本研究で考案した CT 画像ノイズ成分解析法には妥当性があり，信頼性の高い評価・解析法であることが実証された。

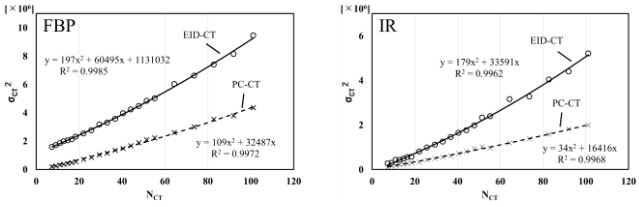


Fig.1.　Noise Characteristics of CT images based on theoretical formula

文　献

[1] M.Mori et al: Electron.Commun.Jpn, 96. 32-41 (2013)
[2] Fujii et al: J Digit Imaging, 35. 77-85 (2021)

©2026 IEE Japan

長期安定時系列予測のための変分 Koopman 推論モデル

松村　太希*　小坪　成一　（千葉大学）
銭　飛（関東学院大学）

Long-Horizon Stable Time-Series Forecasting via Variational Koopman Inference Model

Taiki Matsumura*, Seiichi Koakutsu （Chiba University）
Fei Qian　（Kanto Gakuin University）

This article proposes Variational Koopman Inference (VKI), a new generative modeling framework for nonlinear dynamical systems that require both long-horizon stability and predictive accuracy. VKI encodes observations into a latent representation governed by a low-rank, spectrally regularized Koopman operator, enabling linear time evolution in latent space. VKI model is trained with a variational objective that combines reconstruction accuracy, long-horizon rollout consistency, Kullback-Leibler regularization, and explicit spectral stability control. VKI model provides robustness to noise and missing data while explicitly enhancing extrapolation performance. Experiments on the noisy Lotka–Volterra benchmark demonstrate that VKI achieves the lowest mean squared error among LSTM and Transformer baselines under comparable number of parameters and exhibits markedly superior long-horizon stability. Experimental results indicate that VKI could be a promising architecture for physics-oriented time-series forecasting.

キーワード： 時系列予測, Koopman 作用素, 変分推論, 長期外挿, 非線形動的システム
Keywords : time-series forecasting, Koopman operator, variational inference, long-horizon extrapolation, nonlinear dynamical system

1. まえがき

深層学習を用いた時系列モデルとして，Transformer や Long Short-Term Memory（LSTM）が近年広く活用されている。これらのモデルは高い表現力をもつ一方で，大量のパラメータを要し，物理的ダイナミクスとの対応関係が不透明であることや，長期ロールアウト時に予測誤差が指数的に増幅しやすいことと，内部状態が安定性保証を欠くため，外挿性能の制御が困難であることなどの課題が指摘されている。

これらの課題に対して，本稿では Koopman 作用素 に基づく線形潜在ダイナミクスを導入することで，外挿可能性，安定性の明示的制御，物理的解釈のしやすさを同時に実現する 変分 Koopman 推論モデル（Variational Koopman Inference : VKI） を提案する。

VKI は，潜在空間に線形ダイナミクスを課す Koopman モデルで，低ランク構造による効率化，スペクトル半径に基づく安定性正則化，変分推論によるノイズ・欠損への堅牢性，および長期ロールアウト誤差を含む学習目的を統合した生成モデルであり，物理現象の長期予測を主な対象として設計する。

2. VKI モデルの定式化

観測系列 $\{x_t\}_{t=0}^{T}$，潜在状態系列 $\{z_t\}_{t=0}^{T}$ を用いる。潜在初期状態は式（1）の正規事前分布に従う。

$$z_0 \sim \mathcal{N}(0, I) \tag{1}$$

潜在ダイナミクスは Koopman 作用素 K により，式（2）のように表現する。

$$z_{t+1} = Kz_t + \xi_t, \quad \xi_t \sim \mathcal{N}(0, Q) \tag{2}$$

観測モデルは線形または非線形写像 g_θ により, 式（3）のように記述する。

$$x_t = g_\theta(z_t) + \eta_t, \quad \eta_t \sim \mathcal{N}(0, R) \tag{3}$$

線形観測の場合は， $g_\theta(z_t) = Cz_t$ とみなせる。

〈2･1〉 低ランク Koopman 作用素　Koopman 作用素は式（4）に示す低ランク摂動形式 により表現する。

$$K = I + UV^T \tag{4}$$

ここで，$U, V \in \mathbb{R}^{p\times q}$ はランク q の低ランク因子で，I は単位行列である。

式（4）の形式は，線形ダイナミクスの基底構造を保ちつつ，非線形系の効果をコンパクトに表現する利点を持ち，また固有値の制御が容易であるため長期安定性の確保に適している。

〈2･2〉 安定性正則化　Koopman 作用素の固有値が単位円外に存在する場合，長期ロールアウトで予測が発散する。そこで固有値 λ_i に基づくペナルティとして式（5）を導入する。

$$R_{\text{stab}}(K) = \sum_i \phi\big(\max(0, |\lambda_i| - 1)\big) \tag{5}$$

©2026 IEE Japan

ここで，$\phi(\cdot)$ は滑らかな凸関数（例：平方関数）とし，固有値の逸脱量を抑制する。

〈2･3〉 変分推論と学習目的　後方分布 $q_\phi(z_{0:T}|x_{0:T})$ を変分分布で近似し，式（6）に示す ELBO（Evidence Lower BOund） を最大化する。

$$\mathcal{L} = -\log p_\theta(x_{0:T_{\text{train}}}) - \beta_{\text{roll}} \log p_\theta(x^{\text{free}}_{T_{\text{train}}:T_{\text{train}}+H}) + \mathrm{KL}[q_\phi||p_\theta] + \lambda_{\text{stab}} R_{\text{stab}} \tag{6}$$

ここで，x^{free} は学習区間後に潜在ダイナミクスのみで生成した自由走行系列で，β_{roll} は長期外挿誤差の重みである。これにより 1 ステップ予測ではなく，長期外挿そのものの最適化が可能となる。なお，Kullback-Leibler Divergence（KL）項は，変分推論の原理そのものを支える中心項で，潜在変数を事前分布から大きく逸脱させない役割を果たす。

ここで，VKI による予測値 $\hat{x}_t$ は条件付き期待値として, 式（7）のように表される。

$$\hat{x}_t = \mathbb{E}[x_t \mid z_t] = g_\theta(z_t) \tag{7}$$

線形観測モデルの場合には $g_\theta(z_t) = Cz_t$ であるから，式（8）となる。

$$\hat{x}_t = Cz_t \tag{8}$$

教師あり区間末尾の潜在状態を $z_{T_{\text{train}}}$ とすると，Koopman 作用素 K による自由走行 H ステップ先の予測値は, 式（9）のように表される。

$$\hat{x}_{T_{\text{train}}+k} = CK^k z_{T_{\text{train}}}, \quad k = 1, \ldots, H \tag{9}$$

3. 実験検証

本稿では，非線形時系列の典型例である Lotka–Volterra（捕食/被食者）モデルを用い，提案手法 VKI の性能を Transformer および LSTM と比較する。実験の設定を以下に述べる。

0〜128 ステップを教師あり区間, 129〜512 ステップを外挿区間（自由走行）とする。3 手法でパラメータ数がほぼ等しくなるよう調整する。評価指標は平均二乗誤差（Mean Squared Error : MSE）と 1 回の長期ロールアウトに要した時間（Rollout time）とする。MSE は式（10）より算出する。

$$\text{MSE} = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \|x_t - \hat{x}_t\|^2 \tag{10}$$

実験結果を表 1 に示す。表 1 に示すように，VKI の MSE は 3 手法中で最も低く，特に長期領域で誤差が増加しない点が顕著である。これは，潜在空間での線形時間発展が固有値制御により安定化されていることと，デコーダが観測空間への復元を適切に行っていることを反映している。

表 1: 各モデルの MSE および Rollout time の比較

	VKI	TR	LSTM
MSE	0.0136	0.135	0.0258
Rollout time [s]	0.136	8.55	0.121

Transformer は短期領域では一定の予測精度を示す一方で，長期ロールアウトにおいて誤差が急激に増大する傾向が観測されたのに対し，VKI は長期領域でも MSE の増加が緩やかであり，外挿安定性の観点で優位性が確認できる。また，LSTM は詳細な手動チューニングにより良好な性能を示す一方で，同程度のパラメータ数で比較した場合でも，VKI は長期ロールアウトにおける誤差の増大が小さく，優位性が確認できる。

また，VKI は Transformer より高速であり，詳細にチューニングされた LSTM と同程度の計算時間である。これは 潜在線形ダイナミクスによる計算の軽量性 に起因する。総じて，VKI は長期外挿精度，安定性，計算効率の三点においてバランスよく優れた性能を示すことが確認できる。

4. むすび

本稿では，Koopman 作用素に基づく潜在線形ダイナミクスと変分推論を統合した新たな時系列モデル VKI を提案した。実験結果より，低ランク構造，安定性正則化，長期ロールアウト最適化を組み合わせることで，Transformer および LSTM を上回る長期予測精度と安定性を示した。VKI は物理指向時系列予測モデルの新たな基盤となる可能性を秘めている。

今後の研究課題として，より高次元かつ複雑な物理時系列データへの適用, 動的スペクトル制御や Koopman 作用素の構造制約の活用, および実ネットワーク・ロボティクス・流体シミュレーション等への展開があげられる。

文　献

（1） B. O. Koopman, “Hamiltonian systems and transformation in Hilbert space, ” Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 17, no. 5, pp. 315–318 (1931).
（2） A. Vaswani et al. , “ Attention is all you need, ” in Proc. NeurIPS, pp. 1–11 (2017).
（3） S. Hochreiter and J. Schmidhuber, “ Long short-term memory, ” Neural Computation, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780 (1997).

©2026 IEE Japan

引込線以下設備不良予兆検知システムの開発および実用化について

河村　拓郎*，柴田　豊（東北電力ネットワーク）

Development and Deployment of an Early Failure Sign Detection System for Downstream Equipment

Takuro Kawamura, Yutaka Shibata (Tohoku Electric Power Network Co., Inc.)

１．目的と背景

東北電力ネットワーク(株)では，2014 年度以降スマートメーター（以下，SM という）の導入を進め，30 分値やイベント情報などの電力データの収集を行っている。現在，SM と関連システムの電力データ連係によって，30 分値の自動検針や SM の遠隔設定・開閉操作等による現場対応の効率化を実現している。

一方，引込線以下設備が原因の停電（電線ヒューズ切れ，断線等）を防ぐため，計画的な設備更新工事を進めているものの，お客さまからの連絡を受けて不良設備の改修を実施する場合も多く，電力の安定供給と突発的な出向き業務対応の観点で課題が存在していた。こうした課題を踏まえ，デジタル技術による電力データの新たな活用手法を見出すことで事業価値を創造し，「停電発生回避に伴うお客さまサービスの向上」や「業務の効率化」，「設備劣化の予防保全」に寄与することを目的にシステム開発を行った。図 1 に開発システムの運用イメージを示す。

２．開発品

＜2・1＞開発品の概要

引込線以下設備不良予兆検知システム（以下，予兆検知という）は，SM から取得可能な停電イベント・電圧低下イベント（以下，SM イベント情報という）を活用し，機械学習によって，引込線以下設備の不良を停電発生前に予測するシステムである。

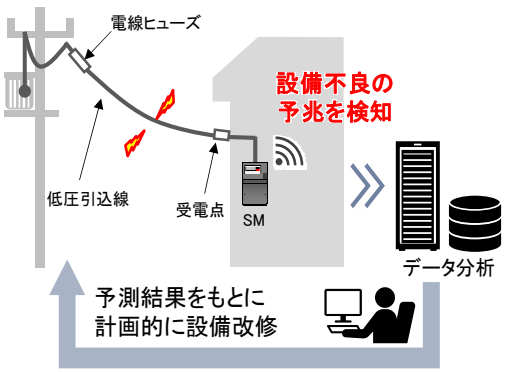


図 1 開発システムの運用イメージ
Fig.1. Operational Image of the Developed System

予兆検知はメーターデータ管理システム（以下，MDMS という）に分析サーバを実装し，データ投入から結果を出力させるまでの運用フローは，「データ加工フロー」，「予測モデル構築・適用フロー」の 2 段構成としている。図 2 に予兆検知の構成フローを示す。

なお，図 3 に示すように開発した予測モデルの評価指標として，信頼性を表す「的中率」と汎用性を表す「カバー率」を採用し，実用性を評価している。

＜2・2＞データ加工フロー

SM が発する SM イベント情報に加え，過去の停電実績や設備データとの相関関係から分析するため，データのクレンジングおよび絞り込み処理を行い，予測モデルに用いる特徴量（傾向を見出すデータ）を生成している。特徴量生成では，図 4 および表 1 に示すように停電発生前に SM イベント情報の発生頻度が高まる傾向に着目し，直近のイベント密集度を数値化する「レベリング処理」(特許第 7152461 号）を開発し，データ加工処理に取り入れることで，的中率向上を実現している。

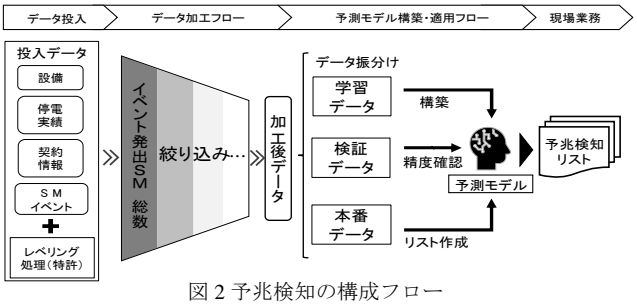


図 2 予兆検知の構成フロー
Fig.2. Flowchart of Early Failure Sign Detection System

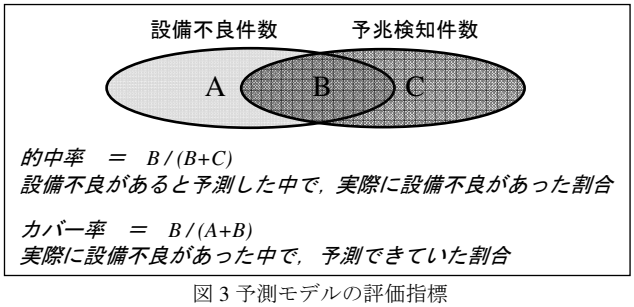


図 3 予測モデルの評価指標
Fig.3. Performance metrics of the Prediction Model

©2026 IEE Japan

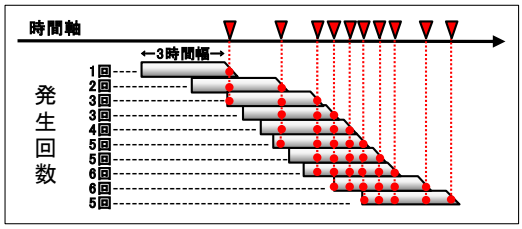


図 4 電圧低下イベントの発生状況イメージ
Fig.4. Distribution of Voltage Drop Events

表 1 レベリング処理（特許第 7152461 号）
Table.1. Leveling Process (Japanese Patent No. 7152461)

発生回数	レベル	レベリング結果
1～2回	Lv1	2
3～4回	Lv2	3
5～6回	Lv3	5
・・・	・・・	・・・

＜2・3＞予測モデル構築・適用フロー

予兆検知機能実現のため，過去の実績データを加工した「学習データ」を使用し機械学習による予測モデルを構築している。また，本モデルの精度検証には「検証データ」を使用し，実運用は「本番データ」を本モデルに適用している。さらに学習データに故障部位の情報を紐付けることで，故障部位特定モデルを構築し，本番データによる予測結果に対して，「電線ヒューズ・断線・短絡・接触不良」等の故障部位予測も可能とした。

＜2・4＞実用化

2019 年度の研究において，予兆検知機能実現に向けたシステムロジックの基礎を固め，2021 年 2 月に MDMS 機能として予兆検知をシステムへ実装した。その後，運用上の利便性を評価するための試行運用により一定の成果を確認できたことから，2023 年度に利便性や使用性の課題を解決するためのシステム管理画面の構築および予測モデルの最新化を経て，2024 年度より本格運用を開始している。

2024 年度の本格運用では，予測結果をもとに東北 6 県と新潟県合わせて 680 件対応し，そのうち約 7 割が社員による現地対応，約 3 割が机上での設計・外線工事による設備更新工事を実施した。また，現地対応を実施した 9 割超で現地設備の不良が確認されており，高い的中率を実現している。実際に検知され現地で発見された設備不良の事例を図 5～8 に示す。

３．導入効果

今回開発した予兆検知を活用することにより，引込線以下設備不良に起因した一部の停電を未然に防止することが可能となり，お客さまサービスの向上に寄与できることに加え，突発的な停電申し出の減少により計画的な業務運営に繋がっている。また，設備不良の予兆を把握できることにより，設備更新の効率化や工事費用の抑制が可能となっている。2025 年度には予兆検知を実運用で利用する社員 213 名に対しアンケート調査を実施したところ，87%（186 名）の社員が予兆検知を日々の業務で活用することによって業務効率化を実感しているという結果が得られている。

図 5 検知事例①（電線ヒューズ一部溶断）
Fig.5. Detection Case 1 (Partial Melting of Wire Fuse)

図 6 検知事例②（引込線短絡・断線）
Fig.6. Detection Case 2 (Short Circuit and Disconnection of Service Line)

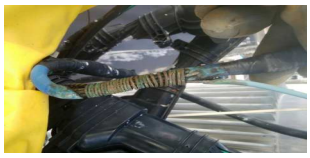


図 7 検知事例③（ジョイント個所発錆・接続不良）
Fig.7. Detection Case 3 (Rust Formation and Poor Connection at Joint)

図 8 検知事例④（受電点ケーブル短絡・断線）
Fig.8. Detection Case 4 (Short Circuit and Disconnection of Incoming Cable

４．おわりに

今回実用化した予兆検知は，2019 年度から開始した(株)日立製作所との共同研究成果により開発した機能であり，2021 年度から導入に至っている。さらに，2023 年度の共同研究では，高い的中率を維持しつつ，カバー率の向上にも寄与できる分析ロジックを特定したことから，今後のシステム改良によって更なる効果が期待できる。また，SM イベント情報を取り込み可能な MDMS に分析サーバを構築することで予兆検知を実現しているため，同様の環境が整えば，SM を保有する他の一般送配電事業者への展開が可能であると考えており，サービス化に向けた検討を進めていく。

文　献

(1)小松秀徳，西尾健一郎．スマートメータデータ分析情報の活用―分析技術の動向調査と需要分析の予備的検証―電力中央研究所報告 Y14003,(2014)

©2026 IEE Japan

UX を考慮した自己音声メッセージによる自炊支援システムの提案

松本　紳佑*，秋山　康智（東京電機大学）

Proposal of a cooking support system that considers UX with self-voice messages.

Shinsuke Matsumoto, Koji Akiyama (Tokyo Denki University)

1.　はじめに

現代の自立概念は、必要な支援を享受しつつ自らの意思で人生を選択する「自己決定」に本質がある。自立には、例えば身の回りのことを自分で行う「生活的自立」、収入を得てそれを自己管理する「経済的自立」、日常にある問題に対して自分で判断し意思決定する「精神的自立」、社会の一員として責任ある行動をとり、人との関わりの中で合意形成する「社会的自立」、自分の性だけでなく 他者の性を尊重した、責任ある行動をとる「性的自立」などがある。[1]なかでも「生活的自立」は、経済的・精神的自立を支える基盤として極めて重要である。特に自炊能力は、経済面のみならず自己効力感を育むが、大学生は多忙や経験不足からその習慣化が困難である。

行動変容を促す動機づけには、内発的動機づけと外発的動機づけの 2 種類が存在する。内発的動機づけと外発的動機づけは厳密に二分されるものではなく、一つの活動に、両動機づけが共に存在していると考えたほうが適切な場合も多い[2]と指摘されている。従来の自炊支援はレシピ提示やゲーミフィケーション等の外発的動機づけに依拠しており、支援終了後の継続性に課題があった。一方、近年の生成 AI 技術による「音声クローン」は、自己効力感を高め、内発的動機づけを強化する可能性を持つ。本研究では、生成 AI により「未来の自分」をモデル化し、自身のクローン音声で助言を行う自炊支援システムを提案し、実装する。

2.　従来技術

<2・1>AI による調理工程の効率化支援

調理に伴う物理的・認知的負荷を軽減する試みとして、AI 技術を用いた環境整備に関する研究が行われている。Sherin ら[3]は、レシピ推奨から食材量計算、デリバリーアプリを通じた配送までを統合したプラットフォームを提案している。こうしたアプローチは、環境側から参入障壁を下げる外発的動機づけとしては有効である。しかし、利便性の追求はユーザーの試行錯誤や主体的選択の機会を奪う側面もあり、料理そのものへの楽しさや達成感といった内発的動機づけを醸成しにくい。その結果、ユーザーが受動的な立場に留まり、長期的な習慣維持に至らないという課題がある。

<2・2>SNS およびゲーミフィケーションを用いた支援

大学生の自炊習慣化を目的としたシステムとして、辻本ら[4]による Twitter Bot を活用した「クックマ」が挙げられる。本システムは、SNS への料理写真投稿や、経験値・称号といったゲーム要素（ゲーミフィケーション）の導入により、自炊への関与を高めるアプローチをとっている。しかし、SNS での共有は他者評価への依存を招きやすく、期待した反応が得られない場合に意欲が減退するリスクがある。また、スコア獲得自体が目的化する懸念もある。これらは、外発的報酬に依存したシステムが抱える課題といえる。

3.　提案

本研究では、ユーザー自身の音声を用いた自己応援メッセージにより、内発的動機づけを向上させる新たな支援システムを提案する。本システムの全体概要を図 1 に示す。本システムは、主に以下の 3 つの機能群で構成される。

＜3・1＞ユーザー操作機能群：ユーザーの気分や嗜好、および食材データを入力するインターフェースである。現在の心理的・物理的状況を把握するための基礎データを収集する。

＜3・2＞調理機能群：入力された状態に基づき、最適なレシピを提案・記録する。ユーザーの嗜好や食材の消費期限を考慮した検索を行い、調理後は「過去の努力」として履歴を保

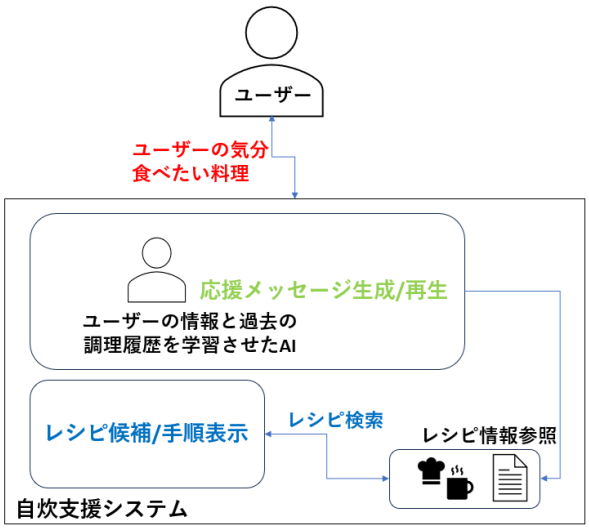


図1システム概要図

Fig.1. System overview diagram

©2026 IEE Japan

存する。
＜3・3＞応援メッセージ生成機能群：過去の調理履歴とユーザーの現在の状況を統合し、AI を用いて具体的な根拠に基づく励まし文を生成する。このテキストを、ユーザー自身の音声モデルを用いた TTS（Text To Speech）により合成・再生する。

4. 実践結果と考察

実装したシステムの構成図を図 2 に示す。

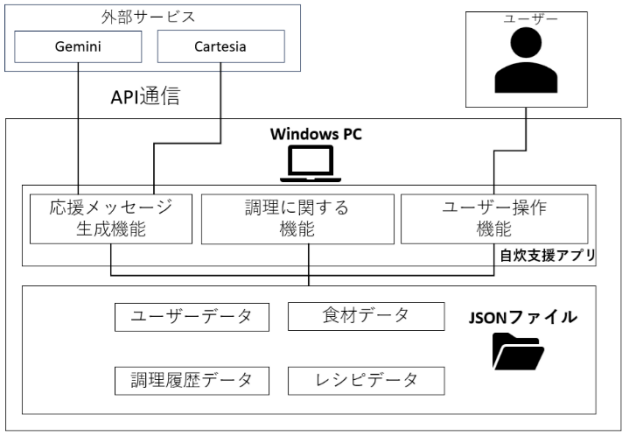


図 2 実装したシステム構成図
Fig.2. Implemented system configuration diagram

文章生成には Google Gemini、音声合成には Cartesia[5]の API を採用し、リアルタイム性の高いフィードバックを実現した。 ユーザーの性格、目標、在庫食材、および過去の調理履歴（調理の成功・失敗、調理の感想）を JSON 形式で管理し、これらを動的にプロンプトへ組み込むことで、「未来の自分」としての説得力あるメッセージ生成を可能にした。また、レシピ検索機能では、ユーザーの「嫌いな食材」の自動除外や、入庫から 14 日以上経過した食材の優先表示ロジックを実装し、実用性を高めた。

提案システムが従来の先行研究の課題をどの程度解決し得ているか、3 つの観点から考察する。

第一に、自炊モチベーションへの作用については、自己音声によるメッセージが、「調理が上手くなった自分」からの呼びかけとして機能し、心理的ハードルを下げる効果が確認された。これは、外発的報酬の付与によって行動を促す従来のゲーミフィケーションとは異なり、自身の声による応援が自炊行動に対する説得力を強化し、その影響が内発的動機づけに直接的に及んだことによるものと考えられる。生成 AI を用いたパーソナライズは有効であったが、対話の自然さを高めるためのプロンプト構造の最適化が今後の課題である。

第二に、行動の継続性に関しては一貫した向上傾向は見られなかった。これは調理行動が身体コンディションに強く依存することに加え、自己実験ゆえに外部要因の影響を統計的に分離できなかった制約が背景にある。今後は複数被験者による長期的な比較実験が必要である。

第三に、システム操作の負荷については、特に初回利用時の入力コストが認知リソースを消費し、調理への集中を阻害する傾向が示唆された。内発的動機づけを強化するには、音声入力や生体データ連携による情報の自動取得といった UX 改善が不可欠である。これにより手動入力を最小化し、自身のスキル向上を客観的に自覚させるフィードバックを実現することで、より強固な自炊習慣の定着に寄与できると考える。

5. おわりに

本研究では、内発的動機づけに基づく新たな自炊支援システムを設計・実装した。評価の結果、自己音声による応援メッセージは行動開始の心理的ハードルを下げ、モチベーション向上に一定の効果があることを確認した。一方で、調理意欲は日々の体調や気分に左右されやすく、システムの介入のみでは制御が困難な側面も明らかとなった。また、現状のプロトタイプは入力負担が大きく、スムーズな利用を妨げる要因となっている。

以上より、自己音声と生成 AI を組み合わせた手法は有用であるものの、実用化には UX のさらなる改善が必要であると結論付けた。今後は、手動入力への依存を減らす自動化手法の導入や、感情・状況のリアルタイム推定機能を実装することで、心理状態により深く寄り添った支援を目指す。また、ユーザー自身の日常生活に溶け込みつつ、自然に継続を促す設計についても検討を進めていく。

謝辞

本論文は, JSPS 科研 JP25K06529 および JP24K06314 の助成を受けたものである。

文 献

[1] 文部科学省:高校生のライフプランニング 3 自立と共生社会 ,https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2018/11/21/1411248_0_0.pdf(2018)

[2] 吉田統子:内発的動機づけ研究に関する一考察 一臨床心理学の視野から一, https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/10194/aes01-087.pdf(1996)

[3] Sherin. J, Prasath. V.S, Dr. Sonia Jenifer Rayen: AI-Driven Recipe Recommendation System and Seamless Ingredient Delivery, https://www.ijfmr.com/papers/2025/1/37792.pdf(2025)

[4] 辻本拓真, 吉野孝：大学生を対象とした自炊支援システムの開発, https://cir.nii.ac.jp/crid/1050292572095301120(2016)

[5] スタビジ編集部:自分の声のクローンを音声 AI で生成して Python から呼び出して使う方法！, https://toukei-lab.com/voice_ai(2025)

©2026 IEE Japan

UAV と AR に基づく 火の見櫓式災害救助支援システムの研究

小畑　亨介*，神戸　英利（東京電機大学）

Research on a Fire Lookout-Style Disaster Rescue Support System Based on UAVs and AR

Kyosuke Obata, Hidetoshi Kanbe (Tokyo Denki University)

１．　まえがき

我が国においては，近年，地震・豪雨・台風などの自然災害が頻発しており，その発生件数は増加傾向にある[1].このように災害発生の不確定性が高い状況においては，発災直後からの迅速な初動対応と同時に，救助隊員の安全性確保がますます重要となっている.そこで本研究では，発生後の災害救助活動に着目した.近年では，災害救助活動にも情報通信技術が積極的に導入されており，救助ロボット，無人航空機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle，以下 UAV），デジタルツインなどの新技術が，被災地の状況把握・被災者探索・交通遮断の可視化などに活用され始めている.これらの技術の中でも，本研究では UAV に注目し，その活用を検討した.

消防本部における UAV 活用状況の推移[2]から，消防本部の UAV 導入は年々進展しており，現場レベルで UAV が救助活動において有益であるとの評価が広まりつつあることを示している.とりわけ UAV は，人が立ち入ることのできない危険な場所や複雑な地形においても，上空から広範囲を俯瞰できる特性を有するため，災害時の救助活動においてその応用が期待されている.

一方で，実際に救助隊の出動が必要となる災害現場では，瓦礫の堆積や土砂崩れなどによる二次災害のリスクが極めて高い.さらに，災害時には通信インフラの損壊や不安定化も頻発するため，救助隊が安全性を確保しながら迅速に救助活動を行うことは依然として困難な課題となっている[3].

２．　研究目的

本研究では，UAV が取得した災害現場の上空視点情報を AR（Augmented Reality）上に提示することで，救助隊が安全かつ迅速に状況を把握できる災害救助支援システムを提案する.特に，救助隊の進行方向前方を UAV が飛行するよう制御することで，救助隊の先行情報をリアルタイムに取得し，UAV を仮想的な「火の見櫓」として位置づける.これにより，被災者位置や周辺の危険度を AR 上に可視化し，災害現場における効率的な探索および被災者発見の支援を目的とする.

なお，本システムでは平常時には地上通信網を利用し，災害による通信インフラの損壊や不安定化が生じた場合には，その補完手段として衛星通信を利用することを想定する.

３．　提案手法

＜3・1＞システム概要　　図 1 にシステムの全体構成を示す.

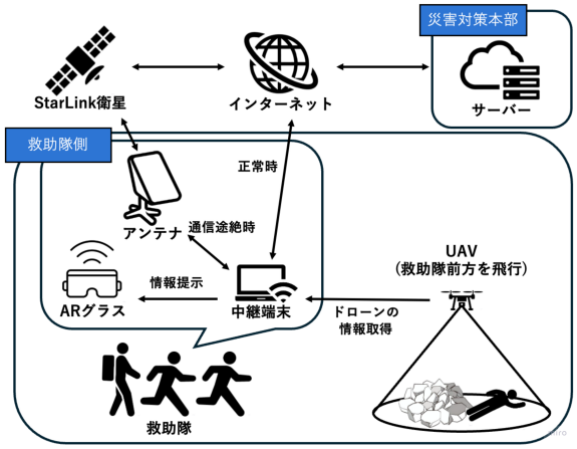


図 1　システム概要図

Fig. 1. System Overview Diagram

本システムは，UAV, AR，および通信機構の 3 要素で構成される.UAV は救助隊の進行方向前方を飛行しながら上空から被災地を撮影し，取得した映像に対して AI による解析を行うことで，被災者および危険要因の検出を行う.これにより，地上からでは確認が困難な場所の情報を遠隔で取得することが可能となる.

検出結果および必要に応じた映像情報は，通信環境に応じて地上通信網または衛星通信を介して地上へ伝送され，通信インフラが損壊した環境下においてもデータ共有を可能とすることを目指す.救助隊が装着する AR デバイスでは，中継端末上で動作する AR 可視化アプリケーションを介して，受信した映像や位置情報をもとに被災者の方向や周辺の危険要因を視界内に重畳表示する.これにより，救助隊が安全性を確保しながら効率的に現場状況を把握できる環境を提供する.

＜3・2＞エッジ映像解析および位置情報付与　　本研究では，UAV に搭載したエッジデバイスおよび GNSS モジュールを用い，UAV 搭載カメラから取得した映像に対してエッジデバイス上で被災者および周辺環境の危険要因を検出する構成を提案する.検出処理には深層学習ベースの物体検出手法を用い，UAV 映像に対するリアルタイム処理を想定する.

エッジデバイス上で被災者または危険要因が検出された場合，その検出結果をトリガーとして，同時に取得した GNSS 情報（緯度・経度）を付与し，中継端末へ送信する.この構成により，常時映像を送信することなく，救助活動に

©2026 IEE Japan

影響を及ぼす情報を効率的に共有することが可能となる.本手法は，通信負荷の低減および災害時における不安定な通信環境への適応を目的としている.

＜3・3＞AR 表示設計　　本研究では，光学透過型ディスプレイおよび頭部姿勢計測機能を備えた AR グラスを用いる構成を想定し,AR 可視化アプリケーションを構築する.当該デバイスは，救助隊員の視界を妨げることなく情報提示を行うことが可能である.UAV から取得された情報および検出結果は，端末が取得する GNSS および IMU 情報と時刻同期を行った上で，救助隊員の視野内に重畳表示される.これにより，救助隊員は自身の位置および向きを基準として周囲の状況を直感的に把握できる.AR グラス上には，救助隊員の迅速な状況把握を支援するため，以下の 4 要素を表示する.

(1) UAV から取得した映像のリアルタイム表示
(2) 周辺状況を俯瞰的に把握するためのミニマップ
(3) 被災者や危険領域の方向を示す方位インジケータ
(4) 周辺環境の危険度を段階的に示す危険度ガイド

表示設計では，災害現場における迅速な状況判断を支援するため，視認性の確保と認知負荷の低減を重視する.

４．　実装

＜4・1＞AR 可視化システムの概要　　本研究で構築した AR 可視化システムの概要について述べる.図 2 にシステム全体の構成を示す.

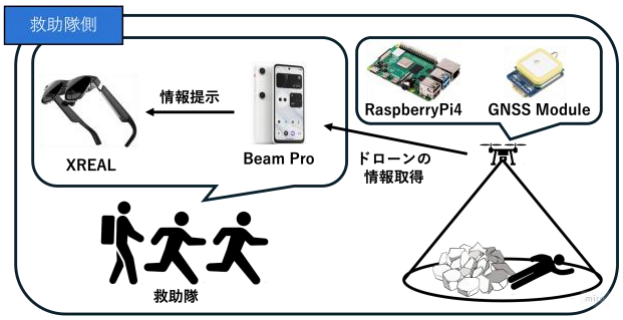


図 2　AR 可視化システム概要図

Fig. 2. AR Visualization System Overview Diagram

本研究では，救助隊員が装着する光学透過型 AR グラスとして XREAL 社の XREAL Air 2 Ultra を用い，その表示および通信を担う中継端末として同社の Beam Pro を使用した構成とした.XREAL Air 2 Ultra は透過型ディスプレイを備えており，現実環境を視認したまま情報を重畳表示できる点が特徴である.また，頭部姿勢計測用のセンサを内蔵しており，装着者の視線方向に応じた情報提示が可能である.

Beam Pro は,AR グラスと接続して動作する携帯型の中継端末であり，外部ネットワークとの通信およびアプリケーションの実行を担う.本システムでは，UAV に搭載したエッジデバイスから送信された映像および解析結果を Beam Pro で受信し，それらを AR グラスへ提示する構成とした.

このように，UAV 側で取得・解析された上空視点の情報を，中継端末を介して AR グラスに提示する構成とすることで，救助隊員の視界内に必要な情報を直接重畳し，災害現場における迅速な状況把握を支援することを可能とする.

＜4・2＞人の検出　　本研究では，UAV に搭載したエッジデバイス上で人物検出を行う構成を想定し，その実装として深層学習ベースの物体検出アルゴリズムである YOLO を用いた.最終的には小型かつ低消費電力なエッジデバイス上での動作を想定しているが，開発および検証の初期段階として，処理資源に余裕のある Raspberry Pi 4 を用いて人物検出処理の実装および動作検証を行った.また，実験段階における入力映像としては，UAV 搭載カメラの代替として Web カメラを用いた.

なお，本稿の実装では人物検出の実装と動作確認を先行して行い，危険要因の検出は今後の課題とする.

＜4・3＞アプリケーションの実装　　本研究では，AR グラスとの互換性および拡張性を考慮し，Unity を用いてアプリケーションを実装する構成を採用した.UAV から中継端末への映像配信には WebRTC を用いたストリーミング方式を採用している.現段階では，図 3 のような構成で Raspberry Pi から送信された UAV 映像を Beam Pro 上の Unity アプリケーションで受信・表示できることを確認している.

一方で，被災者や危険要因の検出結果を AR 表示に統合する機能については現在実装を進めており，今後の課題とする.

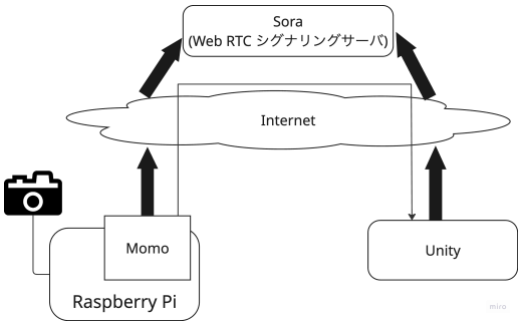


図 3　映像配信システム概要図

Fig. 3. Video Distribution System Overview Diagram

５．　まとめと今後の展望

本研究では，災害発生時において救助隊が安全性を確保しながら迅速に状況把握を行うことが困難であるという課題に着目し，救助隊を先行して飛行する UAV が取得した上空視点の情報を AR グラス上に可視化する災害救助支援システムを提案した.提案手法に基づき AR 可視化システムの構成を示すとともに，人物検出処理および映像配信機構の実装を行い，動作を確認した.

今後の展望としては，救助隊を先行して飛行する UAV の制御手法および AR 可視化アプリケーションの機能拡張を進めるとともに，模擬災害環境における救助実験を実施する.これらを通じて，本システムが救助活動の効率化および救助隊員の安全性向上に与える効果を定量的に評価し，有効性を検証する予定である.

文　献

(1) 国土技術研究センター，自然災害の多い国日本，https://www.jice.or.jp/knowledge/japan/commentary09.
(2) 消防庁，消防本部におけるドローンの活用，https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/items/040331_drone.pdf
(3) 厚生労働省，土砂災害時における消防機関の救助活動，https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/post-52/05/kyuujo_youryou.pdf.

©2026 IEE Japan

画像認識と 2D LiDAR を用いた路面損傷検出システムの提案と実装

小林　征楽*，秋山　康智(東京電機大学)

Proposal and Implementation of a Road Surface Damage Detection System Using Image Recognition and 2D LiDAR

Sena Kobayashi, Koji Akiyama (Tokyo Denki University)

1.　はじめに

我が国では高度経済成長期に集中的に整備された道路インフラが次々と建設後 50 年を迎えており，老朽化の進行が社会問題となっている．特に，路面のひび割れやポットホールなどの損傷は，走行安定性の低下や自動運転を阻害する恐れがあることが指摘されている[1].

従来，こうした点検は調査員の目視や MMS（Mobile Mapping System）と呼ばれる専用の計測車両によって行われてきたが，人手不足や運用コストが持続可能な維持管理の障壁となっている ．近年，車載カメラと画像認識技術を用いた低コストな代替手法の研究が進んでおり，実用化も進んでいる ．しかし，画像認識ベースの手法は周囲の照度環境に依存し，特に夜間やトンネル内といった低照度下では検出精度が低下するという課題がある ．

本研究では，こうした課題に対し，画像認識と 2D LiDAR を組み合わせた，照度環境にロバストな低コスト型路面損傷検出システムを提案する．

２．従来技術

<2・1> 画像認識を用いた損傷検出手法

車載カメラから取得した映像と，画像認識技術を組み合わせた手法は，比較的安価かつ容易に導入できる点から注目を集めている．前田らの研究では，路面損傷画像を対象とした大規模データセットの公開を行い，深層学習を用いた損傷検出モデルの学習・比較を可能にするなど，画像認識技術の普及と発展に大きく貢献している[2]. 一方で課題として，カメラの特性上，低照度環境下での撮影ではシャッタースピードが低下し，ブレやノイズの多い画像となるため，損傷の識別が困難になることが挙げられる

<2・2> LiDAR を用いた損傷検出手法

LiDAR（Light Detection and Ranging）は，レーザー光を用いた測距センサである．光学カメラと異なり，照度や影の影響を受けにくく，夜間やトンネルといった暗所環境でも安定して距離情報を取得できることから，自動運転やインフラ点検など多くの分野で利用が拡大している．LiDAR センサには主に3D LiDAR と 2D LiDAR の 2 種類が存在する．3D LiDAR は複数のレーザー層を用いて構造物の三次元形状を高精度に取得できる一方で，センサ自体が高価かつデータ処理量が大きくなるという欠点がある．一方，2D LiDAR は単一平面のみをスキャンするため，取得範囲は限定的であるが，安価でデータ処理量が小さいという利点を持つ．Kang らの研究では，2D LiDAR を用いたポットホール検出手法を提案している．同研究では，路面に向けて照射された 2D LiDAR のスキャンデータからポットホールを検出した[3].

３．提案

本研究では，車載カメラによる画像認識と 2D LiDAR を組み合わせた，照度環境にロバストな路面損傷検出システムを提案する．図 1 に本システムの概要図を示す.

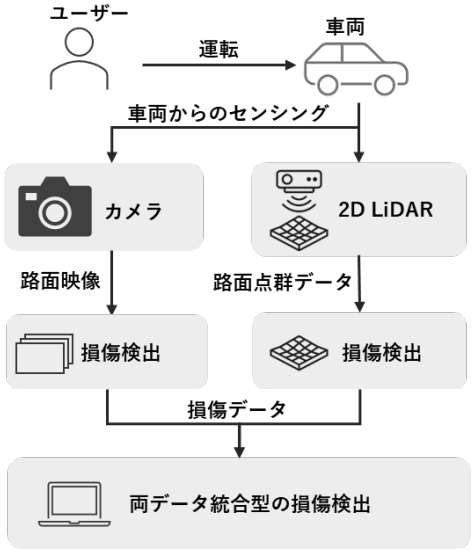


図 1 システム概要図
Fig.1. System Overview Diagram

本システムでは，走行中の車両からカメラと 2D LiDAR のそれぞれのセンサが個別でデータ取得および，処理した結果を統合し，最終的な損傷検出の判定を行う．具体的には，画像認識により損傷候補が検出され，かつ 2D LiDAR により明確な凹みが確認された場合に損傷を確定することで，影や汚れによる画像認識の誤検出を抑制する．また，夜間や暗所など画像認識が困難な環境下では, 2D LiDAR による検出を重視した判定を行うことで，照明条件に依存し

©2026 IEE Japan

ない安定した損傷検出を実現する．

このように，本研究では環境条件に応じてセンサの重みを切り替えることで，画像認識単一の方式と比較して照度環境へのロバスト性と検出信頼性の向上を図る．

４．実装

<4・1> システムの全体構成

図 2 にシステム構成図を示す．本システムは，車両に搭載した USB カメラおよび 2D LiDAR（RP LiDAR A2）からのデータを，車載 PC 上の ROS2 環境下で処理する構成となっている ．各センサから取得された「路面映像」と「点群データ」は，それぞれ独立したノードによって損傷検出が行われる ．現段階では，各センサの独立した検出モジュールの実装が完了しており，今後それぞれの検出結果統合型の損傷検出の実装を予定している．

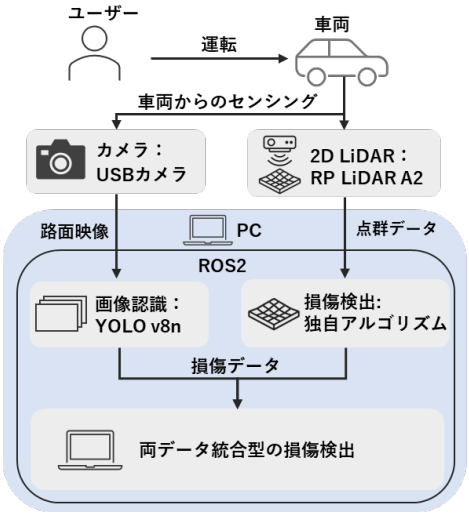


図 2 システム概要図
Fig.2. System Architecture Diagram

<4・2> 画像認識を用いた損傷検出

路面映像に対する損傷検出には，軽量な物体検出モデルである YOLOv8n を採用した ．学習データには，公開されている道路損傷データセット[2]を用い，ポットホールやひび割れを含む 9 クラスを学習させた ．

<4・3> 2D LiDAR を用いた独自アルゴリズム

取得される点群データに対し，以下の 3 段階のプロセスから成る独自アルゴリズムを実装した ．

① フィルタリング：車両周囲の不要な点群を除去し，道路幅に相当する領域のみを抽出する ．
② 路面形状推定：RANSAC アルゴリズムを適用し，路面形状を 2 次多項式で近似した路面モデルを作成する．
③ 残差による検出：路面モデル f(x)と計測値 x との残差Δx を計算し，閾値を超える箇所を損傷として検出する．

<4・4> 独自アルゴリズムの検証

アルゴリズムの有効性を検証するため，大学駐車場内に実在するポットホールを対象に計測実験を実施した ．実験では，時速約 4km で直進する車両のボンネットに RP LiDAR A2 を装着し，路面データを取得した ．対象としたポットホールは，長径約 40cm，短径約 35cm，深さ約 5cm の欠損型損傷である ．

図 3 に検出アルゴリズムを適用した点群データと検出アルゴリズムを適用していない元データの比較を示す．赤で示された各点が 2D LiDAR による測距点であり，損傷を含んだ路面の形状が凹状の点群として確認できた．元データに対してアルゴリズムを適用した結果，アルゴリズム適用後のデータでは，元データと同様の赤色で表示された測距点に加え，推定された路面モデルを示す緑色のラインが確認された．さらに，突起型損傷については検出閾値を超過した箇所が青色のマーカーとして，欠損型損傷については検出閾値を超過した箇所が赤色のマーカーとしてそれぞれ表示された．これらの可視化結果から，本手法により損傷の検出が可能であることを確認した．

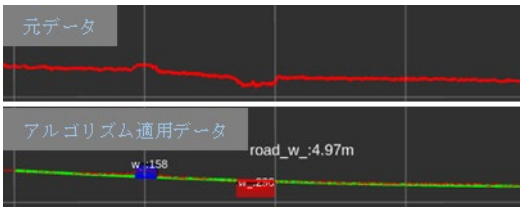


図 3 元データとアルゴリズムを適用したデータ
Fig.3. Original data and data processed by the algorithm

5. おわりに

本研究では，照度環境ロバストなシステムを目指し，画像認識と 2D LiDAR を組み合わせた路面損傷検出システムを提案した ．大学駐車場での実験により，画像認識が苦手とする夜間環境においても，2D LiDAR を用いた独自アルゴリズムにより損傷検出が可能であることを確認した ．現在の進捗は各センサ独立での損傷検出に留まっており ，今後は未着手の空間的キャリブレーションを実装し，両データ統合型の損傷検出システムの完成を目指す．

謝辞

本研究は， JSPS 科研費 JP24K06314 の助成を受けたものである．

文　献

[1]「審議会・委員会等：第７６回基本政策部会　配付資料 - 国土交通省」．参照：2025 年 11 月 3 日．[Online]．入手先：https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000579.html

[2]前田紘弥，「深層学習を用いた低廉迅速な道路損傷検出手法の構築と大規模システム化」，(No Title), 2021.

[3]Kang B.と Choi S.，「Pothole detection system using 2D LiDAR and camera」，2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Milan: IEEE, 7 月 2017, pp. 744‐746. doi: 10.1109/ICUFN.2017.7993890.

©2026 IEE Japan

フェーズフリーなPVモビリティーシェルの開発

丹治　力也*，神戸　英利（東京電機大学）

Development of a Phase-Free Photovoltaic Mobility Shelter

Rikiya Tanji, Hidetoshi Kambe (Tokyo Denki University)

1.　はじめに

日本は地震、台風、豪雨などの自然災害が多発する国であり、大規模災害時には停電・断水・通信障害・住宅倒壊といったライフラインの寸断が長期化することがある。政府,自治体からの援助は行われるものの、救助・支援隊の移動時間や物資量の面などから、個人における避難生活の長期化への備えが求められる。

一方で、地球温暖化対策の一環として、日本政府は2050年カーボンニュートラル宣言を掲げ、再生可能エネルギーの導入拡大と脱炭素化を目標としている。これにより、再生可能エネルギーの拡大, スマートグリッド, VPP, スマート家電化などが進められている。今後は、個人家庭においても、再生可能エネルギー,家庭用蓄電池の活用などが求められる。

2.　研究目的

本研究の目的は、個人が所有・運用可能な自立型エネルギーシェルター（PVモビリティシェル）を構築し、平常時と災害時の双方で活用可能なフェーズフリーな防災環境を実現することである。

平常時には、家庭電源の補助やアウトドア・リモートワークなどのレクリエーション用途に活用できる移動型電源として機能し、災害時には家庭や避難所への電力供給源として利用可能な「個人単位の避難・生活空間」を提供する。これにより、プライバシーの確保や衛生的な生活環境を維持しつつ、外部支援が届くまでの3〜5日間を自立的に過ごせるオフグリッド環境の実現を目指す。

3.　提案手法

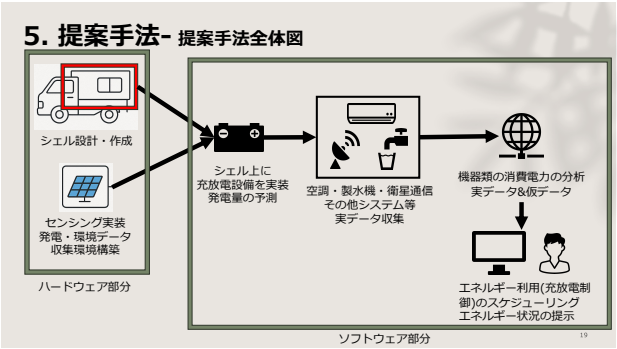


図 1 提案手法全体概要図

本研究では、太陽光発電と蓄電池を中核としたエネルギーマネジメントシステム（EMS）を備えた軽トラック搭載型シェル「PVモビリティシェル」を開発する。これは「移動可能な自立電源・居住空間」を実現し、平常時・災害時の双方で活用可能な「フェーズフリー」な防災インフラを構築するものである。本システムは、以下の3要素を統合することで、個人でも容易に運用可能なフェーズフリーな防災プラットフォームを実現する。

3.1 発電・蓄電・消費の最適化

太陽光発電システムとBMS制御付き蓄電池を連携させ、電力の発生・蓄積・消費を一元的に管理する。

EMSにより発電予測・充放電スケジュールの最適化・家電機器制御を行い、限られた資源の効率運用を実現する。

3.2 エネルギーマネジメントシステム（EMS）の構築

制御システムにより、センサ情報（発電量・消費電力・温湿度など）を収集・解析する。取得データをもとに発電予測を行い、スケジュールに基づく自動制御や電力使用の提案を行うことで、一般利用者でも直感的に扱えるエネルギー管理環境を構築する。

3.3 シェルター設計

平常時には家庭電源補助・キャンプ・リモートワーク用として利用し、災害時には避難所・家庭への電力供給源として機能する多用途設計を行う。

4.　実装

図 2 シェルターモデル

【ハードウェア構成】

図2は現在設計段階のものであり、ミニモデルを作成の上、実物大の実験環境を構築する。シェルは高さ 1,200mm（収納時）・展開時 1,950mm、屋根角度約40°の両側展開式とし、内部空間を最大化する。外壁はカーボン＋ステンレス網、断熱層にXPS 30mmを使用。展開機構にはスライドレール・蝶番・ガスダンパーを採用し、短時間で展開可能な構造とす

©2026 IEE Japan

る。電力システムでは、太陽光パネルによる発電を行い、チャージコントローラを介して BMS 付き蓄電池に充電。家電機器（照明・冷蔵庫・空調等）はインバータを介して稼働させ、必要電力を安定供給する。

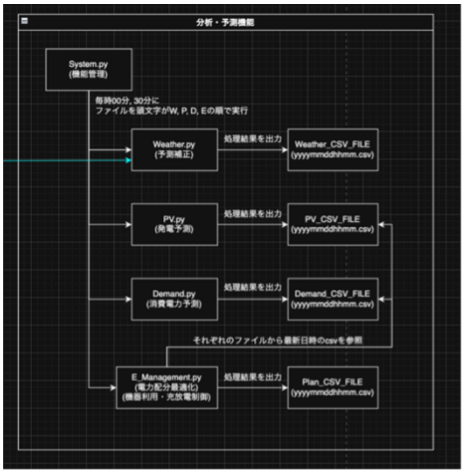


図 3 予測，最適化処理構成

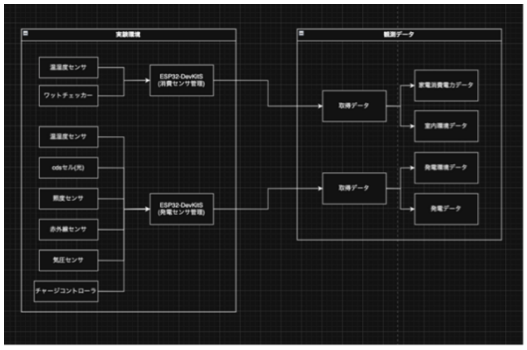


図 4 センサ構成

【ソフトウェア構成】

Python を用いて、発電量・消費電力量・蓄電残量をリアルタイムで記録・可視化。Open-Meteo API より取得した気象データおよびセンシングデータを基に発電量の予測モデルを構築・調整中。Django による Web ベース UI で電力利用状況や予測グラフを可視化し、節電提案などの提示を実装中である。EMS によって電力量の閾値やスケジュールに基づき自動制御を行う。なお、最適化の計算には pulp や gurobi を用いて実装を行なっている。現在は最適化制約の定義や Web 上からユーザーによる制約の追加手法について検討している。

5. 評価

本研究で提案する PV モビリティシェルの有効性を検証するため、以下の観点から評価を実施予定である。

5.1 エネルギー自立性の評価

発電量・消費電力量・蓄電残量を 3 日間連続稼働時に計測し、災害時を想定した自立運転性能を評価する。

気象条件（晴天・曇天・雨天）ごとに PV 発電効率と消費電力のバランスを比較し、オフグリッド環境下での持続可能性を定量的に分析する。

5.2 EMS（エネルギーマネジメントシステム）の精度評価

発電予測と実測値の誤差率を算出し、EMS がどの程度効率的な電力運用を実現できているかを評価する。

また、スケジュール制御・節電提案機能の有無による消費電力変化を比較し、最適化効果を確認する。

5.3 ユーザビリティ評価

Web 管理画面の操作性・視認性・応答性についてアンケートおよび操作時間計測を行い、一般利用者でも直感的に扱えるシステムであるかを検証する。

5.4 構造・環境耐性評価（試作段階）

シェルの展開・収納操作、構造強度、断熱性能を評価し、軽量化・居住性・耐候性のバランスを確認する。

これらの評価結果をもとに、システム全体の信頼性と運用可能性を分析し、次段階の改良および社会実装に向けた課題を抽出する

6. 結論・今後の展望

本研究により、個人レベルで所有可能な自立型エネルギーシェルターを提案した。今後、実機およびシステムの完成後、災害時に外部電源に依存せず 3〜5 日間の生活電力を自給できるオフグリッド環境を実証し、平常時には家庭電源補助やリモートワークスペースなど多目的に活用できるフェーズフリーな防災インフラを実現する。

文　献

(1) NHK,「地震 復旧状況は 被害の全体像は 2 ヶ月をデータで［3 月 1 日］」,
https://www3.nhk.or.jp/news/html/20240302/k10014376471000.html,（参照 2024-07-05）
(2) 東京都,「太陽光発電設置義務化に関する新たな制度が始まります」,
https://www.koho.metro.tokyo.lg.jp/2023/01/04.html,（参照 2025-04-30）
(3) 日本ユニセフ協会,「7. エネルギーをみんなに。そしてクリーンに」,
https://www.unicef.or.jp/kodomo/sdgs/17goals/7-energy/,（参照 2024-07-06）
(4) 環境省,「カーボンニュートラルとは - 脱炭素ポータル」,
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/,（参照 2024-07-06）

©2026 IEE Japan

SLAM を用いた屋内 AR ナビゲーションの開発

熊野 創太*，釜谷 博行(八戸工業高等専門学校)，原 元司(松江工業高等専門学校)

Development of an Indoor AR Navigation System Using SLAM

Sota Kumano, Hiroyuki Kamaya (National Institute of Technology, Hachinohe College)
Motoshi Hara (National Institute of Technology, Matsue College)

１．はじめに

近年，商業施設や公共施設などの屋内空間は複雑化しており，従来の案内板や 2D 地図のみでは目的地までの移動が困難な場合が多い。特に初めて訪れる利用者にとっては，現在地や進行方向の把握が難しいという課題がある。また、屋外で普及している GPS を用いたナビゲーションは，屋内環境では精度が低く実用が難しい。

そこで本研究では，GPS に依存せず，低コストかつ直感的な屋内誘導を実現するため、位置推定と地図生成を同時に行う技術である SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)により事前に生成した 3D マップを用い，スマートフォン上で動作する屋内 AR(Augmented Reality)ナビゲーションアプリの開発を目的とする。

２．先行研究と提案手法

屋内ナビゲーションの既存手法には，ビーコン方式，AR マーカ方式，Visual SLAM 方式[(1)]があるが，設置コストや累積誤差などの課題が存在する。本研究では，RGB-D カメラにより取得した環境情報を SLAM により 3D マップ化し，アプリ起動時に読み込む方式を採用する。また、ナビゲーション開始前に AR マーカを用いた初期位置合わせを行うことで，高精度な現在位置推定を可能とし，累積誤差の影響を抑制する。提案手法により、ナビゲーション実行時に処理負荷の軽減と動作の安定性を重視した設計とし，スマートフォン単体での実行が可能であると考える。

３．実装

3D マップ作成には RealSense D435i を使用し，RGB-D カメラから取得した情報を統合することで，研究室内環境の三次元点群マップを生成した（Fig.1）。生成された点群マップは，床面や壁面などの不要なノイズを除去した後，Unity 上でスケール調整および座標系の整合を行い，ナビゲーション環境として利用した。

AR マーカを用いた初期位置合わせ機能を実装し，スマートフォン操作により位置と姿勢の微調整を可能とした。また、Unity Navigation System を用いて経路探索を行い，A*アルゴリズムにより目的地までの経路を生成した。加えて，現在地とゴールを俯瞰的に確認できる Mini Map 機能を実装した。

本アプリは iPhone 16 上で動作し，起動からナビゲーション開始まで一連の操作が直感的に行える構成とした。

4. 実験結果

研究室内での試験運用の結果，ユーザの移動に応じてナビゲーション用オブジェクトがリアルタイムに追従し，安定したルート誘導が可能であることを確認した（Fig.2）。特に，初期位置合わせが適切に行われた場合には位置ズレが小さく，ストレスの少ない誘導が実現できた。

また，事前に生成した 3D マップを用いる構成により，ナビゲーション実行中に SLAM 処理を行う必要がなく，計算負荷の低減と動作の安定性向上が確認された。一方で，初期位置合わせが不十分な場合には，矢印表示と実際の進行方向に数十センチ程度の位置誤差が生じることが分かった。

図１　作成した 3D マップ
Fig.1. A generated 3D map

図２アプリ実装画面
Fig.2. App implementation screen

5. おわりに

本研究では，SLAM によって事前生成した 3D マップを活用した屋内 AR ナビゲーションアプリを構築した。その結果，低コストかつ高精度な屋内誘導が可能であることを示した。今後は，画像認識を用いた初期位置合わせの自動化により，さらなる精度向上と適用範囲の拡大を目指す。また，本手法は追加機器を必要とせず，既存のスマートフォンのみで実装可能であることから，商業施設や公共施設などへの応用も期待される。なお、本研究は JSPS 科研費 JP25K15380 の助成を受けたものである。

文　献

(1)常友琉成，後藤佑介,“位置情報探索における SLAM を用いた屋内向け AR ナビゲーションシステムの提案”,情報処理学会研究報告，Vol.2021-DSP-187, No.26 (2021)

©2026 IEE Japan

ASTGCN を用いた列車遅延予測と重要度分析による遅延影響駅分析の検討

北　陵汰*，福田　卓海，高橋　聖，中村　英夫（日本大学）

Train Delay Prediction and Delay-Influential Station Analysis
Using Attention based Spatial-Temporal Graph Convolutional Network with Importance Evaluation
Ryota Kita, Takumi Fukuda, Sei Takahashi, Hideo Nakamura(Nihon University)

１．まえがき

首都圏の鉄道では，慢性的な混雑や突発的なトラブルにより列車遅延が頻発し，利用者の移動計画や鉄道事業者の運行管理に深刻な影響を及ぼしている。特に朝夕のラッシュ時には，乗降時間の増加や接続列車待ちにより，一部の駅を起点として遅延が波及的に拡大する(1)。さらに，遅延は当該路線にとどまらず，接続する別路線へも伝播する。混雑が集中する乗換駅では，接続列車の待ち合わせや乗客の集中により遅延が増幅され，鉄道網全体の運行効率を低下させる。このような路線間にまたがる遅延伝播現象を考慮した将来遅延の予測は，迅速なダイヤ回復や運行計画の最適化において極めて重要である。

近年，Heglund らは鉄道網をグラフ構造として表現し，Spatial-Temporal Graph Convolutional Network（以下, STGCN）により従来手法を上回る予測精度を達成した(2)。グラフ構造を用いることで，複数路線間の接続関係や遅延の伝播を明示的に表現できる。しかし，STGCN は全ての駅や時間ステップを均等に扱うため，遅延伝播において特に影響力の大きい駅を特定することができない。この課題に対し，Guo らは STGCN に注意機構を導入した Attention based Spatial-Temporal Graph Convolutional Network（以下，ASTGCN）を提案した(3)。ASTGCN は，グラフ上の各ノード間の重要度や異なる時間ステップ間の影響度を動的に学習し，道路交通での交通量予測で高い性能を示している。

前報では，ASTGCN の recent コンポーネントのみを実装し，混雑集中駅における遅延予測の基礎的検討を行った(4)。しかし，中長期的な周期性を十分に捉えられず，また予測における駅間の重要度を分析する視点が欠けていた。

そこで本研究では，ASTGCN を用いて複数路線を対象とした遅延予測モデルを構築し，モデルの注意機構分析により遅延予測において重要となる駅を明らかにする。これにより，遅延予測における駅の重要度を定量化し，遅延対策を検討する上で有用な知見を提供することを目指す。

２．手法

＜2・1＞データ構造と予測課題　　本研究では，実際の都市鉄道路線の 2024 年度の運行記録を用いる。各駅における列車の出発における時刻と遅延秒数を列車単位で時系列に整形し，各駅における遅延時間を取得した。

鉄道遅延は前後駅や後続列車へと連鎖的に伝播する特性を持つため，各駅をノード，路線の接続関係をエッジとする有向グラフとして鉄道網を表現する。本研究では各ノードに一意の駅番号（駅 0～駅 7）を割り当て，路線および列車進行方向ごとに識別する。主路線および接続路線の各方向において列車の進行方向に沿い駅番号を付け，主路線と接続路線が交わる接続点駅である駅 3 を予測精度評価の対象駅とする。予測課題は，各列車の運行時刻までの遅延情報を入力として, 1 列車先の出発遅延秒数を推定する回帰問題として定義する。

＜2・2＞ASTGCN のモデル構成　　ASTGCN は，複数の時間スケールに対応した入力系列を並列処理し，それぞれから得られた予測結果を統合する構造を持つ。入力データは，時間スケールごとに分割し，各系列を独立したコンポーネントとして処理する。具体的には，直近数列車分の短時間変動を表す recent，1 時間周期の hourly1 および 3 時間周期の hourly3，日周期の daily，週周期の weekly に分割する。これにより，異なる時間スケールでの遅延パターンを同時に学習できる。

各コンポーネント内部では，時空間的注意機構を用いて，駅間および時刻間の関係性を動的に重み付けする。注意機構によって強調された特徴に対して，グラフ畳み込みと時間方向の畳み込みを組み合わせた処理を適用し，時空間特徴を抽出する。各コンポーネントの出力は，全結合層を通じて時間スケールごとの予測値へと変換し，融合層において統合する。最後に，全スケールの出力を統合し，1 次元畳み込みを用いて次時刻の遅延量を推定する。

＜2・3＞学習方法および評価指標　　本研究では，教師あり学習により ASTGCN の学習を行う。入力には予測対象列車より前に運行した列車の遅延時系列データを用い，予測対象である 1 列車先の出発遅延秒数を教師データとして与える。評価指標には平均絶対誤差（以下，MAE）および二乗平均平方根誤差（以下，RMSE）を用いる。評価では，路

©2026 IEE Japan

線全体を対象とした予測精度に加えて，接続駅である駅 3 に着目した評価を行う。

３．結果

＜3・1＞学習結果の精度　　提案モデルの学習結果の精度を表 1 に示す。比較手法として，常に遅延 0 秒と予測する 0 予測，学習データの平均遅延時間で予測する平均値予測，直前列車の遅延時間をそのまま用いる直前値予測，および ASTGCN を用いた。

表 1 の学習結果より，0 予測および平均値予測では各評価指標においてほぼ大きな誤差を示し，単純な基準手法では鉄道遅延の変動を十分に捉えられないことが確認された。一方で，直前値予測は路線全体の評価において MAE が約 18 秒，RMSE が約 31 秒となり，0 予測や平均値予測と比較して高い予測性能を示した。これは，直前の列車遅延が将来の遅延予測において強い説明力を持つことを示している。鉄道遅延は連鎖的に伝播する特性を持つため，直前の状態が次の状態を強く規定する傾向がある。

ASTGCN を用いた予測は，直前値予測と比較して路線全体の MAE が約 2.5 秒，RMSE が約 1.5 秒低減した。駅 3 においては MAE が約 4 秒改善しており，接続駅での予測精度向上が顕著である。また，駅間および時間方向の構造を考慮することが予測精度の向上に寄与していることを確認した。さらに残差学習構造を導入した ASTGCN は，路線全体の MAE を約 0.6 秒，RMSE を約 2 秒低減し，全ての評価対象において最も高い予測精度を示した。

これらの結果は，ASTGCN が複数路線を含む遅延伝播を適切に学習できることを示している。以下では，この学習済みモデルを用いて駅別重要度分析を行う。

＜3・2＞駅別重要度分析の結果　　学習済みモデルの注意機構を分析し，各駅が遅延予測に与える影響を定量化した。結果を表 2 に示す。表 2 より，主路線では駅 3 が最高重要度 0.424 を示し，駅 2（0.245），駅 1（0.234）が続く。この結果は，接続駅である駅 3 が予測に最も強く影響し，その周辺駅も高い重要度を持つことを示している。接続駅は複数路線からの遅延が集約される地点であり，ここでの遅延状況が周辺駅の予測に大きく影響を与えることは，鉄道運行の実態と整合する結果である。

一方，接続路線では，接続駅の隣接駅である駅 4（0.094）や駅 6（0.074）は，接続駅である駅 5（0.087）や駅 7（0.063）よりも高い値を示している。これは，遅延の影響が接続駅に集中するのではなく，接続路線側の運行状況として展開され予測に影響していることを示唆する。また，遅延予測において接続駅のみならず，接続路線側の駅の遅延情報を含めて考慮することの重要性を示している。

以上より，主路線の接続駅である駅 3 だけでなく，接続路線側の駅 4 や駅 6 も高い重要度を持つことが明らかになった。この知見は，遅延対策を検討する際に，どの駅の遅延情報を重点的に考慮すべきかを示す基礎的な情報として活用できると考えられる。

表 1 遅延予測精度の比較
Table1. Comparison of Delay Prediction Accuracy

手法	全体		対象駅（駅 3）	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
0 予測	22.09	51.05	19.57	38.21
平均値予測	23.60	50.71	19.87	37.40
直前値予測	18.06	30.56	21.03	33.86
ASTGCN	15.49	29.05	16.94	30.26
ASTGCN＋残差学習	**14.91**	**26.93**	**16.90**	**29.48**

表 2 駅別重要度
Table2. Station Importance Rating

路線	駅	順位	重要度
主路線	駅 0	8	0.031
	駅 1	3	0.234
	駅 2	2	0.245
	駅 3	**1**	**0.424**
接続路線上り	駅 4	4	0.094
	駅 5	5	0.087
接続路線下り	駅 6	6	0.074
	駅 7	7	0.063

４．あとがき

本研究では，鉄道網を駅間の接続関係に基づくグラフ構造として表現し，ASTGCN を用いた遅延予測モデルを構築した。モデルの注意機構分析により，駅別重要度を定量化し，主路線内の接続点周辺の駅だけでなく，接続路線側の駅も遅延予測に強く影響を与えていることを明らかにした。特に，接続路線の接続駅の隣接駅である駅 4 や駅 6 が高い重要度を示したことは，遅延予測において接続路線の運行状況を考慮することの重要性を示している。

今後は，時刻帯別の駅重要度変化の分析や他路線への適用を通じて，モデルの一般化性能を検証し，実用的な遅延対策手法の確立を目指す。

文　献

(1)国土交通省鉄道局：東京圏の鉄道路線の遅延『見える化』（平成 30 年度）

(2)Jacob S.W. Heglund et al. : IEEE ITSC2020, 1～6(2020)

(3)Shengnan Guo et al. : Proc. AAAI Conf. Artif. Intell., Vol.33, No.1, 922～929(2019)

(4)北 陵汰，福田 卓海，高橋 聖，中村 英夫 ： 2025 年電気学会電子・情報・システム部門大会(2025)

©2026 IEE Japan

AI を用いたメイク提案とリップカラー調合機能を備えたコスメドレッサーの研究

高﨑　七海*，神戸　英利（東京電機大学）

Research on a Cosmetic Dresser Equipped with AI-Based Makeup Recommendations and Lip Color Mixing Functionality

Nanami Takasaki,　Hidetoshi Kambe (Tokyo Denki University)

1.　はじめに

2023 年 5 月に新型コロナウイルス感染症が 2 類相当から 5 類に移行した。これに伴いマスクを外す機会が増え，メイクへの意識や行動が変化する可能性が示唆されている。[1]

自分に似合う色の指標として，パーソナルカラー診断が存在する。日本カラリスト協会によれば，4 つのパーソナルシーズンカラーに分けることができる。[2]診断方法にはさまざまな形式があるものの，診断時間や費用がかかる場合も多く診断結果をもとにどのようなメイクを行うべきか悩んでしまう場合も存在し，ユーザーにとって便利とはいえない。そのため，現代では診断と提案の正確性を高い水準で保持するシステムが求められている。

2.　研究目的

本研究では,AI を用いたメイク提案とリコメンドおよびリップカラー調合機能を備えたコスメドレッサーシステムを構築し，ユーザー個人に対して最適化したメイクアップ支援を即座に行うことが目的である。

3.　提案手法

本研究のシステム概要図を図 1に示す。

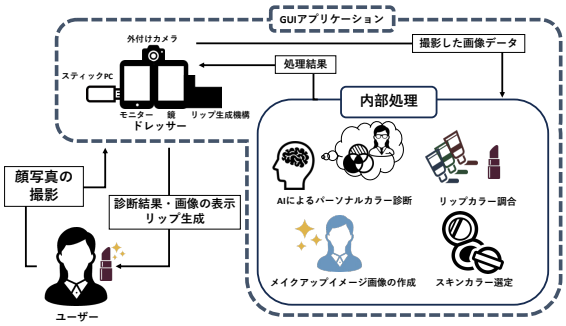


図 1 システム概要図

Fig.1. System Overview Diagram

外付けカメラで撮影した顔画像を用い，深層学習によるパーソナルカラー診断を行い，その結果に基づいて適切なメイク提案を行う。最終的に，ドレッサー上のモニターと鏡を見比べながらメイクを支援する GUI アプリケーションを提供する。

4.　実装

＜４・１＞モデル構築　　本研究では，顔画像からパーソナルカラーを分類する CNN モデルを構築した。Jung，Kim，Yoo [3]は Lab 色空間と ITA 指標を用いて肌色を自動分析しパーソナルカラーシーズン分類を行っている。この分類手法を参考にして学習に必要な顔画像の分類を行った。ここで使用した顔画像データは CelebA[4]からランダムに抽出した顔画像をパーソナルカラーシーズンごとに振り分けて各シーズン 1562 枚の合計 6248 枚用意し，作成した。

＜４・２＞Mediapipe を用いた顔フィルター機能作成　　本研究では，顔画像上にモデルおよび計算によって導いたリップカラーおよびスキンカラーを適用するために，Google が提供する Mediapipe の FeceMesh モジュールを使用し，顔のランドマークを抽出する方法を採用した。顔フィルター機能概要を図 2に示す。

図 2 顔フィルター機能概要

Fig.2. Face Filter Function Overview

＜４・３＞GUI アプリケーション　　PyQt を用いて構築した GUI アプリケーションは，起動時からカメラで撮影された自分自身がリアルタイムで表示され，音声認識で「診断する」と話すことで結果とメイクアップイメージが表示さ

©2026 IEE Japan

れる。診断結果後の表示を図 3に示す。

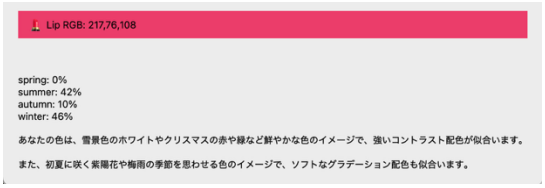


図 3 GUI アプリケーションでのリコメンド表示

Fig. 3. Recommendation display in GUI applications

5. 評価

＜５・１＞AI を用いたメイク提案・リコメンド・リップカラー評価　　実際に本システムを使用した被験者 8 名のパーソナルカラー診断モデル出力結果を表 1に示す。

表 1 パーソナルカラー診断モデル出力結果

Table 2. Personal Color Analysis Model Output Results

被験者	シーズンカラー割合				First Season	Second Season	リップカラー	
	Spring	Summer	Autumn	Winter			R,G,B 値	色
A	6	37	51	5	Autumn	Summer	218,66,91	
B	22	55	1	20	Summer	Spring	231,121,149	
C	26	15	1	57	Winter	Spring	218,86,104	
D	58	34	2	3	Spring	Summer	239,147,160	
E	29	39	2	28	Summer	Spring	228,114,136	
F	55	2	38	2	Spring	Autumn	229,122,127	
G	33	28	37	0	Autumn	Spring	231,135,141	
H	3	58	19	18	Summer	Autumn	232,149,160	

表 1より，被験者全員がパーソナルカラー診断を用いてメイク提案・リコメンド・リップカラー調合機能が行えたことが確認できた。

＜５・２＞ユーザーに最適化した支援システムのモデル評価　　作成したパーソナルカラー診断モデルのエポック数 5 回による適合率(Precision)，再現率(Recall)， 平均適合率(Average Precision: AP)の値を，学部時代のモデルと現在のモデルでの比較を表 2に示す。

表 2 モデル評価

Table 3. Model evaluation

指標評価	学部	修士
Precision	0。9164	0。9259
Recall	0。9000	0。9243
AP	0。9935	0。9816

表 2より，評価基準である 75%を超える精度であった。そして修士でのモデル構築では学部時より判値も改善していることがわかる。これは断基準の明確化や学習に使用した画像数を 400 枚から 6248 枚と大幅に増加したためだと考えられる。

6. 考察

被験者が実際にメイク提案やリップカラー調合を活用可能であることが確認できた一方で，有用性および操作性向上に改善の余地があることも判明した。

本システムの有用性について，被験者の 75%が似合っていると回答し，診断が実現されていることが確認できたが，よりユーザー個人に対して最適化した診断が可能となるよう，精度向上や個人に適したメイク提案が必要である。

7. まとめと今後の展望

本研究では，パーソナルカラー診断モデルを用いたコスメドレッサーシステムの構築を目的とした。構築したシステムを用いた評価の結果，被験者が実際にメイク提案やリップカラー調合を活用可能であることが確認できた。一方で，本研究において実装した診断モデル，アプリケーション，ドレッサーの設計には有用性および操作性向上に改善の余地があることも判明した。

今後の展望として，提案されたリップカラーを実際に調合可能な機構を実装することで，診断結果を基にしたリップカラーを直接利用できるシステムの実装を目指す。

文　献

(1) Kao Beauty Brands, “マスクを外す機会が多くなる今後に向けてメイクに対する意識や行動を調査”,efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.kaobeautybrands.com/content/dam/sites/kanebo/www-kaobeautybrands-com/pdf/press-release/2023/20230418_release.pdf,(参照 2024-11-27)

(2) 株式会社 JAPCA センター，パーソナルカラリスト検定 3 級テキスト第二版, 2012

(3) Geunho Jung, Semin Kim, Sangwook Yoo, Skin Tone Analysis Through Skin Tone Map Generation With Optical Approach and Deep Learning, Skin Research and Technology, Vol.30, e70088, 2024

(4) 香港中文大学“Large-scale CelebFaces Attributes (CelebA)Dataset”,https://mmlab.ie.cuhk.edu.hk/projects/CelebA.html,(参照 2025-11-7)

©2026 IEE Japan

昇降機走行レールのレイアウト設計自動化技術

山本昌治*，高明淑（株式会社 東芝）
株丹詩緒理、辻本敏暉（東芝エレベータ 株式会社）

Masaharu Yamamoto, Myungsook Ko (Toshiba Corporation)
Shiori Kabutan, Toshiki Tsujimoto (Toshiba Elevator and Building Systems Corporation)

１．はじめに

昇降路内の走行レールとレールを固定するブラケットの配置を決定するレイアウト設計は、昇降機の安全性、施工性、コスト削減を考慮して行われる。しかし、現状の設計では、設計者が昇降路の高さや構造条件を確認しながら、レールの長さや本数を試行錯誤で決定している。この手法には以下の課題がある。第一に、設計時間の増加である。レール割付は制約条件が多く、特に中高層建築物ではレール本数が増えるため、検討に時間を要する。第二に、最適化の困難さである。手作業では、レール本数や種類を最小化する設計を見つけることが難しく、施工コストに影響する。本研究では、これらの課題を解決するために、走行レールのレイアウト設計を自動化する手法を提案し、実証実験による提案手法の有効性を検証する。

２．走行レールのレイアウト設計手法

走行レールのレイアウト設計は、昇降行程を複数のレールで被覆する制約付き最適化問題として定義できる。昇降路の高さを H、規格品のレール長を $\{R_1, \ldots, R_k\}$とする。また全体の長さを調整するために、可変長のレールを 1 本使用し、長さhとする。上からi番目の規格長のレールを$L_i \in \{R_1, \ldots, R_k\}$とすると、$n$個のレール長さ列$[L_1, L_2, \ldots, L_{n-1}, h]$と$m$個のブラケットの高度$[b_1, b_2, \ldots, b_m]$の組み合わせで、次の制約（C1）から（C5）を満たすものを考える。

（C1）$L_1 + L_2 + \cdots + L_n + h = H$

（C2）ブラケット間の距離が一定値以下に収まるように、ブラケットを配置する。

（C3）建物が鉄骨造の場合、ブラケットは梁など強度のある部材に取り付ける。

（C3）レール長は建物内に搬入可能な長さのみ用いる。

（C4）各レールにブラケットを少なくとも一つ取り付ける。

（C5）レール同士を接続する継ぎ目板とブラケットは互いに干渉しないように配置する。

上記の制約をすべて満たすレール長とブラケットの組み合わせの中から目的関数を最小化するものを使用する。目的関数は原価や工事における取り付けやすさに基づいて、レール本数やレール種類などを考慮して定める。

３．実証実験

提案手法の有効性を検証するため、鉄骨造（S 造）および鉄筋コンクリート造（RC 造）の昇降路データを用いて実証実験を行った。実験では設計時間と設計品質を評価した。設計時間については、提案手法では設計値の算出開始時点から設計者が修正して設計を完成させるまでの時間を測定して、設計値の簡単な初期値を与える現行ツールによる設計との比較を行った。結果、現行ツールと比較して、設計時間を短縮できる傾向が確認された（図１）。設計品質については、評価者による判定により、ほとんどの物件で実用的な結果が得られると評価された。

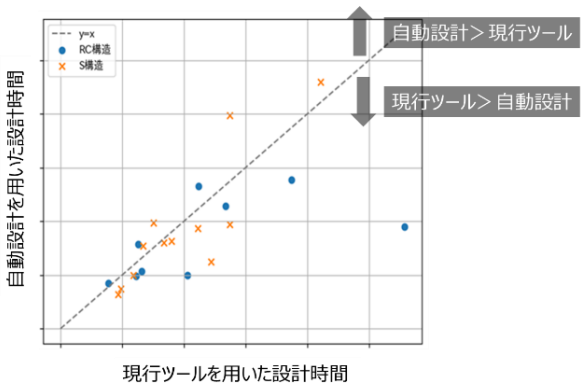


図 1 実証実験による設計時間の比較

４．結論

本研究では、走行レール配置設計を制約付き最適化問題に定式化し、レイアウト自動設計手法を新たに提案した。実証実験の結果、提案手法は現行ツールと比較して設計時間を短縮できることが確認された。また、評価者による判定の結果、提案手法で得られた設計は実用レベルの品質を備えていることが確認された。これらの成果により、本研究は昇降機走行レールにおける設計の効率化と設計品質の向上に大きく寄与することが期待される。

©2026 IEE Japan

四段階推計法を用いた
函館圏内公共交通機関の需要予測

小松　和司*（電気通信大学大学院），加藤　譲（公立はこだて未来大学），
高橋　里司（電気通信大学），

Demand Prediction of Public Transportation in Hakodate Region Using Four-Step Estimation Method
Kazushi Komatsu* (University of Electro-Communications), Yuzuru Kato (Future University Hakodate)
Satoshi Takahashi (University of Electro-Communications),

１．はじめに

交通機関の需要を正確に予測することは，地方都市である函館圏において重要な課題である．函館市，北斗市，七飯町を含む函館圏では，主な移動手段として自家用車が利用されている(1)．一方，函館圏では少子高齢化が進行しており，安全に自家用車を運転できる人の数が減少している．自家用車を運転できない人が安全に移動するためには，利便性の高い公共交通機関の整備が必要である．そのため，公共交通機関の需要予測は，将来の交通計画やインフラ整備において重要な役割を果たすと考えられる．

交通機関の需要を予測する手法として，四段階推計法が広く用いられている．四段階推計法は，区分けされた都市圏においてある地点間を結ぶ交通機関の交通量を，四つの段階に分けて予測する手法である(2)．函館圏においても四段階推計法を用いて公共交通機関を含む交通需要の予測が行われた事例(1)があるが，その事例では集計されていない調査データなどの入手困難なデータを用いているため，再現性に課題がある．本研究では，一般に公開されているデータを用いて，四段階推計法によって公共交通機関の需要を予測する手法を提案する．

２．問題設定

本研究では，函館市，北斗市，七飯町からなる函館圏における公共交通機関の将来の1日あたりの交通量を予測する．本研究で対象とした公共交通機関は鉄道，路面電車，路線バスである．また，四段階推計法を函館圏に適用するために，都市交通マスタープラン(1)で設定された B ゾーンと呼ばれる区分を用いて，函館圏を図 1 のような 27 個のゾーンに分割する．さらに，各交通機関に対して，その交通機関の停留所または駅が存在するゾーンを頂点，隣り合うゾーン間に存在するその交通機関の路線を辺とする交通ネットワークを設定する．本研究では，交通機関ごとに設定した交通ネットワークを通る将来交通量の推定を行う．

３．提案手法

＜3・1＞非集計 OD データの作成　　はじめに，四段階推計法を用いた需要予測に必要となる非集計 OD データを作成する．非集計 OD データとは，ある人が地域内で移動した際の出発地と目的地，移動にかかる所要時間，移動に用いられた交通機関，移動した人の個人属性を含む集計されていないデータである．本来，非集計 OD データはパーソントリップ調査などの大規模な調査によって入手されるが，このような調査を小規模な交通機関事業者が実施することは困難である．そこで，Sun と Erath の事例(3)と国土交通省の事例(4)をもとに，ベイジアンネットワークを元にした非集計 OD データの作成手法を提案する．

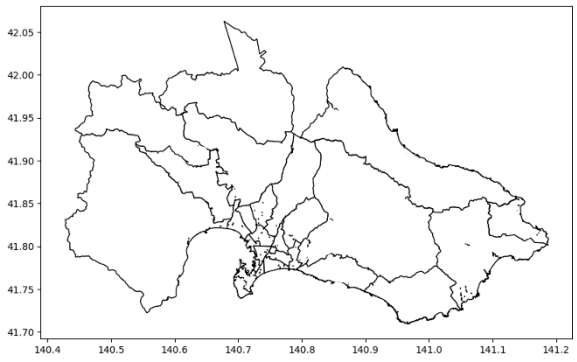


図 1 本研究で用いたゾーン分け
Fig. 1. Zoning used in this study

この手法では，非集計 OD データに含まれる各要素の値の組合せ$\boldsymbol{X}$が選択される確率を導出することで，必要なデータの内容とその個数を導出する．OD データに含まれる要素iの変数をX_i，変数X_iの選択に関わる変数の集合をΠ_iとおくと，作成する OD データ$\boldsymbol{X}$の個数Pr $(\boldsymbol{X})$は

$$\Pr(\boldsymbol{X}) = I(X_{age})N(X_{age}, X_{sex}, X_{zone}) \times \prod_i P(X_i \mid \Pi_i) \quad (1)$$

と表せる．ただし，$I(X_{age})$は年齢階層別の公共交通機関による移動の生成原単位，$N(X_{age}, X_{sex}, X_{zone})$は年齢階層，男女，居住地別人口，$P(X_i \mid \Pi_i)$は変数$X_i$の選択確率である．各変数の選択確率は令和 2 年国勢調査の結果や，国土交通省の事例(4)で用いられた多項ロジットモデルなどをもとに

©2026 IEE Japan

設定する．

＜3・2＞四段階推計法の適用　　作成した非集計 OD データに四段階推計法を適用して，公共交通機関の将来の交通量の予測を行う．本研究では，将来の交通量を発生・集中交通量，分布交通量，分担交通量，配分交通量の順に導出する．

はじめに，各ゾーンを出発地・目的地とする交通量の総和である発生・集中交通量の導出を行う．将来の発生・集中交通量は，作成した OD データから得られる現在の発生・集中交通量に，函館圏全体の現在の人口と将来の人口の比をかけることで導出する．さらに，将来の発生交通量と集中交通量の総和が等しくなるように，導出した将来の発生・集中交通量の値を補正する．

次に，各ゾーン内または各ゾーン間の交通量である分布交通量の導出を行う．最初に，各ゾーンの発生・集中交通量と面積，各ゾーン間の重心距離から分布交通量を導出する関数を設定し，OD データから得られる現在の分布交通量と現在の各変数の値を設定した関数に代入して回帰分析を行うことで，関数のパラメータを推定する．その後，設定した関数に各ゾーンの将来の発生・集中交通量を代入することで，将来の分布交通量を導出する．

次に，分布交通量を各交通機関に振り分けた交通量である分担交通量の導出を行う．ここでは，各交通機関を選択した場合の効用を線形式による関数，各交通機関の選択確率を多項ロジットモデルを用いて設定する．次に，設定した効用関数のパラメータについて，作成した OD データの値を用いた最尤推定を行う．ここで決定された効用関数，および効用関数によって決定される各交通機関の選択確率を将来の分布交通量にかけることで，将来の各交通機関の分担交通量を導出する．

最後に，各交通機関の交通ネットワークの辺を通る交通量である配分交通量の導出を行う．まず，各辺の交通量と各辺を通過する際にかかる時間を決定する関数の作成を行う．その後，作成した関数をもとに，交通ネットワーク上で起こる各ゾーン間の移動にかかる所要時間が最小となる経路に将来の分担交通量を配分することで，各辺の将来の配分交通量を導出する．

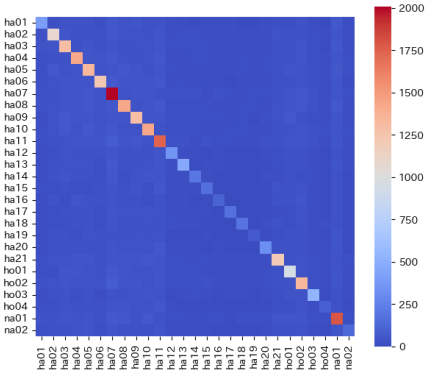


図 2 作成した OD データによる現在の分布交通量

Fig. 2. Current traffic distribution based on the created OD data

４．予測結果と考察

本研究で作成した非集計 OD データを集計して，現在の各ゾーン内，各ゾーン間の分布交通量を導出した．図 2 は作成した非集計 OD データによる現在の分布交通量を表したヒートマップである．ただし，縦軸は出発地，横軸は目的地を表している．また，ha01, …, ha21 は函館市を分割したゾーン，ho01, …, ho04 は北斗市を分割したゾーン，na01, na02 は七飯町を分割したゾーンを表している．図 2 より，本研究の手法では同じゾーン内の分布交通量，特に人口の多いゾーン内の分布交通量が多くなった．この原因として，本研究で用いた手法が人口の多いゾーンのデータや移動にかかる所要時間が短い交通機関に関するデータが多く生成される手法であったことが挙げられる．

四段階推計法から各交通機関の配分交通量を導出した結果と考察は発表で述べる．

５．おわりに

本研究では，函館圏における将来の公共交通機関の交通量を，一般に公開されているデータと四段階推計法を用いて予測した．その結果，本研究の手法では人口が多いゾーン内またはゾーン間，所要時間が短い交通機関の交通量が多くなることが示された．また，現在から将来にかけて，函館圏内の移動の傾向は大きく変化せずに交通量が減少することも示された．しかし，移動の時間帯などの本研究では捉えられない要素も，将来の交通量を変化させる要因になりうる．したがって，移動の時間帯などの移動の傾向を変化させる要素や，複数の移動間の関連性を考慮することで，より精度の高い交通需要の予測が可能になると考えられる．

文　献

(1) 北海道総合都市交通体系調査協議会:「函館圏の都市交通マスタープラン−函館圏パーソントリップ調査より−」，北海道建設部まちづくり局都市計画課 (2022)

(2) 金子雄一郎:「改訂　交通計画学」，コロナ社, pp.45-75 (2021)

(3) L. Sun and A. Erath: “A Bayesian network approach for population synthesis”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol.61, pp.49-62 (2015)

(4) 国土交通省国土技術政策総合研究所:「全国都市交通特性調査データを活用したアクティビティ・ベースド・シミュレータ 技術検証レポート ver 1.01」，国土交通省 (2024)

©2026 IEE Japan

建物の倒壊リスク評価を用いた避難経路可視化システムの研究

北野　弘章*，神戸　英利（東京電機大学）

Research on an Evacuation Route Visualization System Using Building Collapse Risk Assessment

Hiroaki Kitano, Hidetoshi Kanbe (Tokyo Denki University)

１．　まえがき

近年，日本では自然災害の発生件数が増減を繰り返しながらも，平均的に増加傾向にある．その中でも，1995 年の阪神・淡路大震災や 2011 年の東日本大震災などの大震災は，記録的な大規模被害をもたらした[1].

特に，建物の倒壊による被害は甚大であり，東日本大震災では約 13 万棟の建物が全壊したと報告されている[2]. さらに，2024 年の能登半島地震においては，倒壊した建物の下敷きとなり死亡した方が全体の約 4 割を占めた[3]. この中には，揺れが収まった後の避難行動中の被災も含まれており，揺れによって建物の耐震性が下がり，継続して倒壊する危険性があるためである[4].

このような災害を受けて，防災意識は高まりを見せているものの，災害リスクを過小評価する「正常性バイアス」により避難行動が遅れるケースが多く，結果として被害が拡大する要因となっている[5]. このため，災害リスクの認知を促進する手法を模索することが喫緊の課題である.

２．　研究目的

本研究は，災害発生時に迅速かつできるだけ安全な避難を支援することを目的とし，建物データ，ハザードマップ等の災害情報を統合的に活用するシステムを提案する．従来の避難支援では，災害リスクの可視化や経路安全性の評価が十分でなく，避難者がリスクを回避する行動を取るのが困難であった．本研究では，これらの課題を解決するために，建物倒壊リスクを考慮した避難経路を生成し，その結果を直感的に理解できる形で可視化することで，安全性と利便性を両立した避難支援を実現することを目指す．具体的には，災害発生前の避難計画の立案から災害発生時の経路選択までを支援し，避難の必要性や身の回りのリスク認知の促進に寄与することを目的とする.

３．　提案手法

＜3・1＞システム概要　　図 1 にシステムの全体構成を示す.

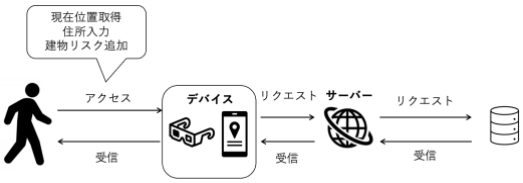


図 1　提案システム概要図

Fig. 1. Proposed System Overview Diagram

本システムでは，ユーザーがデバイスに入力した位置情報や建物リスク情報に基づき，サーバーがデータベースと連携して必要な情報を処理し，その結果をデバイスと通じてユーザーに応答するシステムを提案します.

＜3･2＞システム運用　　本研究システムは，災害前の避難計画支援，災害発生時の避難経路選択支援，および避難意識とリスク認知の促進の三つの観点から目的を達成する.

災害発生前では，建物データやハザードマップを用いて倒壊リスクを可視化し，地域の危険度を把握できるようにする．これにより，住民は平常時から避難意識を高め，避難計画やシミュレーションを立案できる．災害発生時には，端末に一定時間間隔で位置情報と周辺マップを保存することで，通信障害時でも安全な避難経路を提示できるようにし，迅速な避難行動を支援する．さらに平常時からリスクを視覚的に提示することで，避難行動への動機付けを高める.

＜3･3＞アプリ表示設計　　本研究では，避難時における利用者の迅速かつ安全な意思決定を支援するため，2D 表示，3D 表示，および AR 表示を組み合わせたアプリケーションの表示設計を行う．利用者の状況や利用端末に応じて表示方式を切り替えることで，直感的なリスク把握と避難行動の支援を目指す.

2D 表示では，俯瞰視点から地図上に建物の倒壊リスクおよび避難経路を重畳表示する．これにより，周辺地域全体の危険度分布や安全な経路を一目で把握することが可能となる．建物の倒壊リスクは段階的な色分けにより表現し，危険度の高いエリアを視覚的に強調する.

3D 表示では，ストリートビュー形式の視点を用いて，実際の街並みに近い形で建物リスクを提示する．利用者は自身の位置から見た周囲の建物状況を確認でき，危険な建物やその分布を空間的に把握することができる．これにより，2D 表示では把握しにくい建物の位置関係や周囲環境を直感的に理解することが可能となる.

AR（Augmented Reality）表示では，スマートフォンや AR グラスなどのデバイス上に，現実空間と重ね合わせて建物リスク情報および避難支援情報を提示することを想定する．具体的には，危険な建物が存在する方向を示す方位インジケータ，推奨される避難経路の方向表示，および建物リスクに応じた色分け表示を行う．これにより，利用者は画面を通して周囲の危険性を即座に認識でき，進行方向の判断を支援される.

本表示設計では，災害時の利用を想定し，情報量を必要最小限に抑えつつ，高い視認性と低い認知負荷を重視している.これにより,災害前の避難計画の検討から,災害発生時の実時間での避難行動までを一貫して支援することを目指す.

©2026 IEE Japan

４．　実装

＜4・1＞実装システム概要　　本研究で構築したシステムの概要について述べる．図 2 にシステム全体の構成を示す．

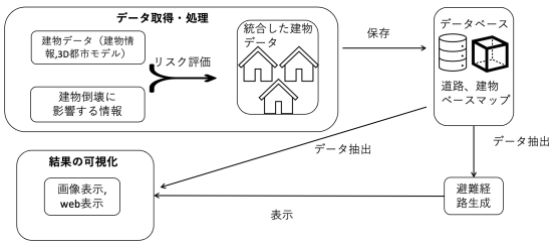


図 2　実装システム概要図

Fig. 2. Implemented System Overview Diagram

本研究において，複数のデータソースから取得した地理データやハザードマップ情報を統合し，リスク評価と避難経路計算を行い，その結果を視覚的に表現するシステムを構築する．まず，建物データ，地形データ，液状化リスク情報などを統合的に活用する仕組みを構築する．次に，災害リスク評価による避難経路の生成を行う．最後にリスク情報を直感的かつ迅速に提供する仕組みを実装する．

＜4・2＞データ処理の実装　　本研究において，建物倒壊リスク評価および避難経路計算に必要なデータは，各種ソースから取得した．ベースマップには国土地理院のタイルデータを用い，タイル座標の変換・結合処理により広域地図を生成した．液状化リスク情報には国土地理院提供の液状化ハザードマップを活用した．建物データは PLATEAU から取得し，MVT（Mapbox Vector Tile）形式に変換して使用した．また，道路データは OSMnx を用いて対象エリアの道路ネットワークを取得した．

さらに，本研究では地震発生時の建物倒壊リスクを定量的に評価するため，築年数等の耐震性能に関わる主要因を順序尺度として分類し，総合的なリスク評価を行うことを目的とした．初期段階では各指標を独立に扱ったが，複数要因が同時に建物の脆弱性へ影響する関係性を十分に反映できない課題があった．そこで現在，複数の順序変数に内在する共通構造を抽出する手法として，ポリコリック相関に基づく因子分析の導入を計画・実装している．

＜4・3＞アプリケーションの実装　　本研究では，災害時の避難支援を目的として，Web ブラウザおよびモバイル端末上で動作するアプリケーションを実装した．避難経路の生成には OSMnx を用い，道路ネットワークに対して最短経路探索を行った．生成した避難経路および建物倒壊リスク情報は，Three.js を用いて 2D および 3D 空間上に可視化した．各建物の倒壊リスクを評価し，リスクスコアを付与した．このスコアを道路ネットワークに反映させ，危険度の高い建物周辺を通過する道路に相対的に高い重みを与えることで，液状化リスクを含む災害リスクを考慮した避難経路生成を実装した．

システムの運用構成として，一般的なスマートフォン環境での利用を想定し，簡易的なクライアント・サーバ構成を採用した．図 3 に本研究で構築したサーバーシステムの概要を示す．フロントエンドの静的コンテンツは Cloudflare Pages 上に配置し，バックエンド処理はローカル PC 上で動作する Flask API により実装した．起動時のみ Cloudflare Tunnel を介して両者を接続することで，外部からのアクセスを可能とした．

本構成により，スマートフォン端末および Beam Pro を含むモバイルデバイス上で，建物倒壊リスク地図データの受信・表示が可能であることを確認した．また，Beam Pro 上では Unity を用いたアプリケーションを実装し，現在位置に基づく建物倒壊リスク情報の取得・表示処理を自動化している．

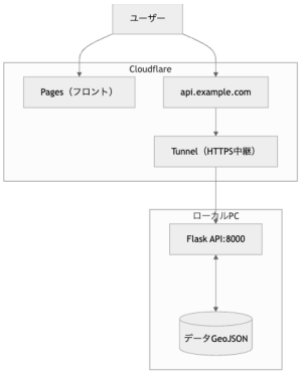


図 3　サーバーシステム概要図

Fig. 3. Server System Overview Diagram

５．　まとめと今後の展望

本研究では，建物データやハザードマップを活用し，建物情報の解析に基づくリスク評価基準を構築するとともに，建物倒壊および液状化リスクを考慮した避難経路の生成と可視化を行うシステムを実装した．本システムにより，災害時における避難経路と周辺リスクを直感的に把握可能な避難支援の実現を示した．

今後の展望として，建物倒壊リスク評価基準の精度向上やデータ処理の効率化が挙げられる．特に，建物データの統合手法や災害リスクの反映方法について改善の余地がある．また，アプリ表示は現在未完成であり，一般ユーザーが安定して利用可能な環境の構築が課題である．さらに，将来的にはデータ処理の自動化等の導入，3D 表示および AR 技術の活用により，避難経路やリスクエリアをより直感的に提示し，迅速な判断と行動を支援するシステムの実現を目指す．

文　献

(1) 中小企業庁，2019 年版中小企業白書，https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/2019/PDF/chusho/05Hakusyo_part3_chap2_web.pdf
(2) 総務省消防庁，東日本大震災記録集，https://www.fdma.go.jp/disaster/higashinihon/item/higashinihon001_13_03-03-01.pdf
(3) 内閣府，令和 7 年版防災白書，https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r07/zuhyo/zuhyo_t01_01_04.html
(4) 内閣府，首都直下地震緊急点検の実施指針資料，https://www.bousai.go.jp/jishin/kitakukonnan/kinkyuutenken_shishin/pdf/siryou_shishin.pdf
(5) MS&AD インターリスク総研，自治体から警戒レベル 4 の避難情報が発令された地域住民の避難行動の傾向のアンケート調査，https://mscompass.ms-ins.com/business-news/evacuation-during-natural-disasters/

©2026 IEE Japan

機械学習を用いた指文字認識システムの開発

夏林 純英*，釜谷 博行(八戸工業高等専門学校)，原 元司(松江工業高等専門学校)

Development of a Sign Language Recognition System Using Machine Learning

Jun-ei Natsubayashi, Hiroyuki Kamaya (National Institute of Technology, Hachinohe College)
Motoshi Hara (National Institute of Technology, Matsue College)

１． まえがき

共生社会の実現に向けて、聴覚障害者とのコミュニケーションは重要な課題の一つである。聴覚障害者とのコミュニケーション手段には手話や指文字などがあり、特に指文字は主に人名や地名などの固有名詞の表現に用いられ、手話と同様に重要である。

これまでに、手話認識に関する研究は数多く行われており、加速度センサを搭載したグローブ型デバイスを用いる手法[(1)]や、近年ではカメラ入力を用いた手法[(2)]が提案されている。そこで本研究では、機械学習の一種である LSTM（Long Short-Term Memory）モデルを用いたカメラ入力による指文字認識システムの開発によって、聴覚障害者との円滑なコミュニケーションを図ることを目的とする。

２． システム概要

画像を直接入力として学習を行う手法は計算コストが高いという課題がある。本研究では、画像から特徴点を抽出することで、効率的な学習を可能とする。得られた特徴点の時系列データを LSTM モデルに入力し、指文字の学習と認識を行う。

３． 学習用データの作成方法

本研究では、ひらがな指文字を対象とする。日本語の指文字は片手で表現されるため、Google 社が提供する MediaPipe Hands を用いて、カメラ画角内に検出された手のランドマーク 21 点を取得する。検出された各特徴点の x 座標および y 座標を学習データとして用いる。

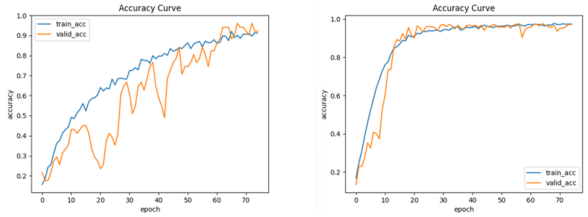
指文字には動きを伴う文字が存在するため、指文字１文字あたり 10 フレーム分の特徴点座標を取得し、時系列データとして扱う。このデータを LSTM モデルに入力し、動的な指文字の学習と認識を行う。

今回は、「あ」、「い」、「う」、「え」、「お」、「の」、「を」の 7 文字を対象として実験する。各文字に対して、位置を変えながら 90 動作分のデータを取得し、合計で 630 サンプルとした。また、学習モデルの汎用性および堅牢性を向上させるため、取得した座標に対してデータ拡張を行う。データ拡張には、平行移動、拡大縮小、回転を組み合わせたアフィン変換を用い、元データを最大で 5 倍に増加させ、合計で 3,150 サンプルとした。

４． 結果

実験結果を図 1 に示す。図 1 に示す学習曲線では、データ拡張なしとデータ拡張ありの比較を行った。横軸はエポック数、縦軸は精度[%]であり、青線は訓練データ、橙線は検証データを表す。データ拡張なしの場合、データ数が少ないため検証精度に変動が見られ、最終的な認識精度は約 92[%]であった。一方、データ拡張ありの場合、検証精度が安定し、最終的な認識精度も約 98[%]まで上昇した。また、誤答は形状の類似、動きを伴う指文字において確認された。

なお、学習データは全て同一人物かつ同一条件下で収録されており、検証・試験データも訓練データと類似した分布を持つ。したがって、得られた精度は筆者自身の手に対する個人特化モデルとしての性能を示すものとなる。



(a)データ拡張なし　　(b)データ拡張あり

図 1　学習曲線

Fig. 1. Training Accuracy Curve

５． 今後の課題

今後は、ひらがな 46 文字と、拗音や促音を含む全ての指文字に対応させる。また、MediaPipe が出力する座標データのみでは、手の個人差に対応しきれないと考える。モデルに汎用性を持たせるためには、座標のみでなく関節の角度など新たな特徴点を追加することが必要であると考える。

なお、本研究は JSPS 科研費 JP25K15380 の助成を受けたものである。

文　献

(1) 澤田秀之，橋本周司：電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J79-A, No.2 (1996)
(2) S. Kamble, arXiv:2506.11154 (2025)

©2026 IEE Japan

空間操作と XR を用いた制御システムの研究

細川　和輝*，神戸　英利（東京電機大学）

Research on Control Systems Using Spatial Manipulation and XR
Kazuki Hosokawa, Hidetoshi Kambe (Tokyo Denki University)

１．研究背景・課題

現代社会では、労働力の最適化と地理的な制約の克服の観点から、遠隔制御技術の必要性が高まっている。特に、テレワークの普及は、時間や場所にとらわれずに業務を遂行できる柔軟性や、移動に伴うコスト削減、災害時などの事業継続性向上といったメリットをもたらしている。しかし、現地での物理的な操作や肉体的な労働を伴う作業は依然として多く、これらの作業を遠隔から、安全かつ効率的に制御･遂行するための技術はまだ発展途上である。現状、工場やインフラ設備の制御には制御盤が広く用いられているが、これを遠隔から高精度で操作する技術は十分に確立されていない。一部の遠隔操作システムでは、タブレット端末などのタッチスクリーン式インターフェースが利用され始めている。しかし、この方式には重大な課題が存在する。物理的なボタンやスイッチのような触覚フィードバックがないため、操作ミスや意図しない起動・停止といった重大な事故を引き起こすリスクが指摘されている(1)。また先行研究(2)では、フライト操作中において従来の物理的な操縦装置と比較して、タッチスクリーンはパフォーマンスの低下、視覚的な注意の散漫、状況認識の低下、物理的フィードバックの欠如、人間工学的な課題といった問題を生じさせる結果が出ており、その設計にはさらなる検討が必要であると結論づけられている。

以上の背景から、本研究では、現地での物理的作業を遠隔から安全かつ高精度に制御するため、制御盤の操作性と遠隔制御のメリットを両立させる新たな遠隔制御技術の確立が課題であると考えられる。

２．研究目的

本研究は、安全性と利便性を向上させた遠隔制御システムの構築を行うことを目的とする。具体的には、先行研究で指摘された触覚フィードバックの欠如（安全性のリスク）に対し、ハプティクスデバイスを作成・利用するアプローチを取り、遠隔制御のメリット（利便性の向上）を最大限に生かすためにスマートグラスを用いて作業支援の改善を図る。

本システムは、これらの要素を組み合わせることで、安全性と利便性を両立させた新たな遠隔制御システムを構築する。構築後、本システムが有効であるかを検証するため、視覚・触覚・操作感に対する検証を実施する。

３．提案手法

＜3･1＞システム概要　　システムの全体概要について図 1 に示す。まず、ユーザーはスマートグラスとハプティクスデバイスを装着する。本システム起動後、スマートグラスの画面上部に車載カメラの映像を映し、画面下部に仮想のレバーを表示する。その状態で、仮想レバーの位置に合わせて手を動かす。特定の手の形や動きをスマートグラスのカメラ映像をもとに検知を行い、条件を満たすと PC とマイコン間の無線通信を行い、制御を行う。また、手の動きに合わせてハプティクスデバイスによる触覚フィードバックを行う。本研究では制御の一例として鉄道ジオラマを用いて制御の検証を行う。

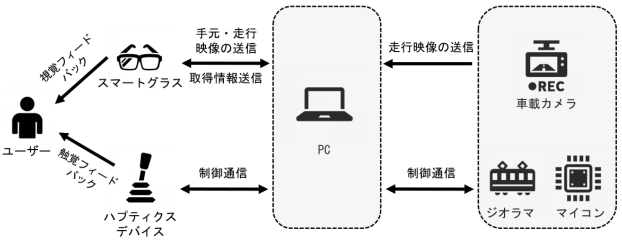


図 1 システム概要図
Fig.1. System Overview Diagram

＜3・2＞鉄道ジオラマの走行制御　　手の形や動きをカメラで撮影した映像をもとに、リアルタイムでハンドトラッキングを行う。その後、ハンドトラッキングの結果に合わせて鉄道ジオラマを制御する。また、3・1 節で述べた特定の手の形や動作については、スマートグラスから確認できるカメラ映像上に表示されているレバーを上から下に下げる動作を行い、手を特定の形(現在検討中)にすると鉄道ジオラマが動き出し、下から上に上げる動作を行うと鉄道ジオラマが止まる流れとなる。

＜3・3＞検知手法　　3・2 節で述べたリアルタイムでハンドトラッキングを行うために本研究では、空間マッピングと平面検知、ハンドトラッキングの機能を兼ね備えた XREAL SDK(NRSDK)を用いて開発を行う。XREAL SDK は空間マッピングと平面検知機能により、仮想オブジェクトを現実の表面に配置することができ、本研究の仮想レバーの配置を行うことができる。またハンドトラッキング機能により、物理的なコントローラーを用いることなく AR 空間内のコンテンツを操作することが可能になる。

©2026 IEE Japan

＜3･4＞ハプティクスデバイス　　2 節で述べた安全性の観点から本研究では、ハプティクスデバイスをユーザーが装着して触覚フィードバックを与えることで、安全性の向上を図る。ハプティクスとは、ユーザーに力や振動、動きといった刺激を与えることで、リアルにモノに触れているような感触を得られる、皮膚感覚フィードバック技術(3)とあるように、装着したユーザーに力・振動・動き等の触覚フィードバックを与える技術であるため、そのフィードバックを与えるデバイスの作成を行う。具体的には、グローブ型のような手に合わせた筐体を作成し、力・振動・超音波・空気圧等によるフィードバックを与えられるデバイスを作成する。またハンドトラッキング情報と連携し、ユーザーの手の形や動作と同期してフィードバックを与えられるシステムを構築する。

＜3・5＞車載カメラ　　本システムの操作感の向上を目的に、カメラを鉄道ジオラマに搭載してスマートグラス上で視認できるシステムの構築を行う。具体的には、カメラ映像をリアルタイムでスマートグラス上に配信を行い、実際に鉄道ジオラマに乗っているかのような視覚情報を提供する。また、XREAL SDK においてスマートグラスの回転情報を取得できる機能が搭載されており、その取得情報を用いて車載カメラとの視点の同期を行う。

４．実装

実装概要図を図 2 に示す。本研究では、スマートグラス(XREAL Air 2 Ultra)を用いてリアルタイムでの手の形や動作を取得し、その取得情報を基に鉄道ジオラマの走行制御を行う。PC 側で XREAL SDK を用いて手の形や動作を取得し、マイコンとの通信用のコードを Unity 上で作成する。手の形や動作を取得するカメラは、XREAL SDK の機能を最大限生かすために、スマートグラスに付属しているカメラを用いる。また、鉄道ジオラマを制御するためのマイコンに制御用プログラムを読み込ませ、PC 側から送られてきた内容を基にモータドライバーを用いて PWM 制御による鉄道ジオラマの走行制御を行う。鉄道ジオラマに載せる車載カメラは大きさの関係上 Raspberry Pi 4 に接続した Raspberry Pi Camera 3 を使用し、PC に Wi-Fi を用いて無線接続を行う。

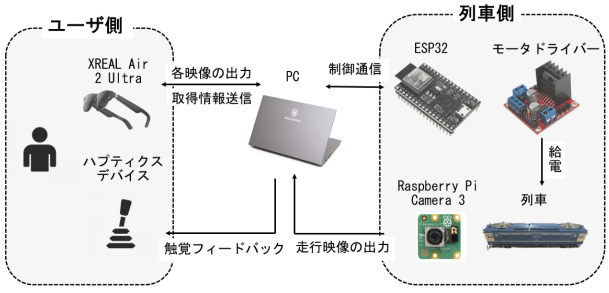


図 2 システム実装図
Fig.2. System Architecture

５．評価

本システムが有効であるかを確認するため、視覚、触覚、操作感に対する検証として、ユーザー評価（主観的評価）とシステム評価（客観的評価）を取り入れ、総合的な検証を行う。

＜5・1＞ユーザー評価（主観的評価）　　ユーザー評価は、5 段階評価等の手法を用いて実施し、利用者の主観的な満足度や課題を把握する。

・視覚: 視認性、情報量、および映像の適切性について評価する。

・触覚: 触覚フィードバックが有用であるか、操作ミス防止や状況認識向上に寄与しているかについて評価する。

・操作感: 制御全体の評価として、直観性やシステムに対する受容性などについて評価する。

＜5・2＞システム評価（客観的評価）　　システム評価は、時間遅延といった定量的な指標に基づき、システムの性能を客観的に評価する。

・制御: 応答遅延（操作入力を行ってから、ジオラマ等の遠隔制御対象の動作が開始されるまでの時間）を測定する。

・視覚: 映像遅延（車載カメラやスマートグラス（XREAL）のカメラから取得した映像が、ユーザーに提示されるまでの時間）を測定する。

・触覚: 触覚フィードバックの遅延時間を測定する。

遅延時間等の定量的な評価に関しては、後ほど具体的な許容数値（目標値）を設定し、それに対しての遅延時間などから本システムの性能を判断する。

６．まとめ・今後の展望

本研究では、安全性と利便性を向上させた遠隔制御システムの構築を行うことを可能にするための、XREAL SDK によるハンドトラッキングを用いたシステムの提案を行った。

今後の展望として、XREAL SDK を用いたシステムの作成や車載カメラ映像配信の低遅延化および仮想レバーUI の作成等を行い、それらを統合したシステムによる評価取得・検証を行う予定である。

文　献

(1)Geoff Ziezulewicz,Navy Times (2019)

(2) Yifan Wang,・Wojciech Tomasz Korek・James Blundell・Wen-Chin Li ,Ergonomics,1-15(2025)

(3) 株式会社 NTT ドコモ,MiRZA(ミルザ)| XR グラス-NTT ドコモ (2025)

©2026 IEE Japan

バーチャルバリスタによるコーヒー提供システム

佐藤　碧美*，神戸　英利(東京電機大学)

Virtual Barista Coffee Serving System

Tamami Sato, Hidetoshi Kambe (Tokyo Denki University)

1.　はじめに

現在，コーヒーは世代を問わず愛されている飲み物であり，コーヒー好きの 7 割が1日1杯以上コーヒーを飲んでおり，コーヒーを飲む時間をリフレッシュや癒しの時間に充てている。また，コーヒー豆は赤道付近の国が産地であり，気候や標高の違いにより多種多様な銘柄が生まれ，同じ豆でも挽き具合や豆・水の量で味が変化する。一方で，好みに合ったコーヒーを把握していない人も多い。これはコーヒーの味や銘柄の多様性が，選択を難しくし，自分の「好み」を明確にする障壁になっている可能性を示唆している [1]。

2.　研究目的

本研究では，バリスタと対話しているかのような環境を構築し，ユーザの味の傾向を把握することで最適なレシピを提案し，また複数種類のコーヒー豆のセットを実現することでレシピ通りのコーヒーを抽出することができる一貫したシステムの開発を行うことで，いつでも自分好みの美味しいコーヒーを楽しめる体験の提供の実現を目的とする。

3.　提案手法

提案するシステム概要図を図 1 に示す。ユーザがバーチャルバリスタが併設されたコーヒーメーカーの前に来ると，Web アプリ上に 3D 映像のバリスタを表示し，ユーザ識別を顔認証を用いて行う。識別後，豆の種類や飲み方のレシピ選択をして，コーヒー抽出を行う。

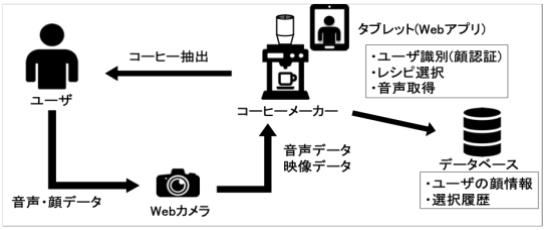


図 1　システム概要図

Fig.1. System Overview Diagram

＜3・1＞コーヒーレシピの提案　　ユーザの苦味や酸味などの嗜好情報に基づいて適切なコーヒーレシピを提案するため，先行研究で用いられているレビュー文に基づくテキストマイニング手法を参考に，レビュー文を用いた分析を行う[2]。具体的には，各コーヒー豆のレビュー文を TF-IDF によって特徴量ベクトル化し，ユーザが入力した味の特徴とのコサイン類似度を算出することで，類似度の高い豆を抽出する。この手法により，ユーザの好みに近いコーヒーを自動的に提示することが可能となる。

＜3・2＞顔認証　　ユーザの顔を見て自然に認識し，個人に合わせた応対を行う体験を実現するために，非接触かつ直感的に操作できる顔認証を行う。具体的には、外付けカメラで撮影した画像から顔特徴量を抽出し、事前に登録された顔データとの照合を行うことでユーザを識別する。認証結果は Web アプリ内で管理され，ユーザごとの履歴や嗜好情報と連携して，個人に最適化されたレシピ提案を実現する。

＜3・3＞音声認識・音声合成　　ユーザが直感的かつ衛生的にシステムを操作できるよう，音声認識と音声合成を用いた Web アプリの非接触制御を実現する。音声認識では，外付けカメラのマイクから入力された音声と事前に用意した音声コマンドを照合し，画面遷移や顔認証を行う。音声合成では，画面遷移後に設定したフレーズを自動再生し，ユーザに音声で応答する。これにより，タブレットに触れることなく操作でき，バリスタと会話しているような体験を提供する。

4.　実装

＜4・1＞実装概要　　システム実装機能の概要図を図 2 に示す。本研究では，外付けの Web カメラ映像を用いて顔認証をし，外付けのマイクを用いた非接触な音声操作を行い，ユーザの好みのレシピを Web アプリ上で表示するシステムを実装した。また，レシピ通りのコーヒーの抽出を行うためにコーヒー豆をセットする機構の設計・製作を行った。

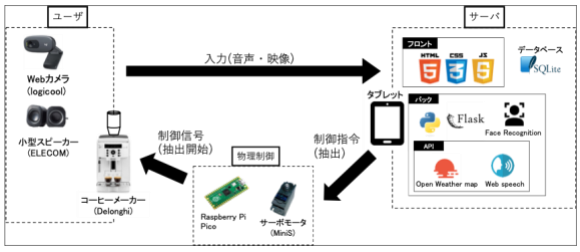


図 2　システム実装機能の概要図

Fig.2. System Implementation Function Overview Diagram

©2026 IEE Japan

＜4・2＞Web アプリケーション　Web アプリは，Python の軽量 Web アプリケーションフレームワークである Flask と，オープンソースのフロントエンドコンポーネントライブラリである Bootstrap を用いて開発した。主な機能として，顔認証，ユーザごとの履歴管理，音声操作を実装した。

顔認証には，Python で手軽に顔検出・認識が可能な Face-Recognition を用い，事前に登録した顔写真と Web カメラ映像を比較することでユーザを識別した。

ユーザごとの履歴管理にはデータベースを用い，軽量で 1 つのファイルとして管理可能な SQLite を採用し，選択履歴をテーブル形式で保存した。

音声操作には，ブラウザ上で音声認識と音声合成を実現できる Web Speech API を用いた。Web アプリの使用フローを図 3 に示す。

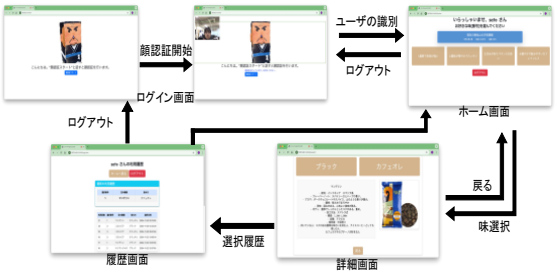


図 3　Web アプリの使用フロー
Fig.3. Web Application Usage Flow

＜4・3＞レシピに基づいたコーヒー抽出　Web アプリのシステム利用後，選択したレシピ通りにコーヒーメーカーで抽出を行えるよう，複数種類の豆を選択・供給可能な仕組みを設計した。従来のコーヒーメーカーが 1 種類の豆しか設定できない点を改善するため，この容器を Autodesk Fusion360 で設計し，3D プリンターとレーザーカッターで製作した。

容器は 1 杯分のコーヒー豆を収納できるサイズで，ピストルの回転式弾倉のような筒状の形状と豆を排出する仕切りを備えている。また，安定した供給を実現するため，仕切りの下部に漏斗状の機構を配置し，元の豆ホッパーの蓋に合わせた専用設計を施した。

5.　評価

＜5・1＞評価概要　本研究で作成したシステムに対して，目的と照合し，本システムの利用満足度を対象のアンケート用いて，評価を得た。アンケートの評価項目の詳細を表 1 に示す。

表 1　アンケートの評価項目
Table 1. Survey Evaluation Items

質問内容		評価方法	評価指標
コーヒー	満足度 評価理由	5 段階評価 記述式	コーヒーを楽しめる体験の提供ができたか， コーヒーレシピに満足したか
システム	満足度 評価理由	5 段階評価 記述式	バーチャルバリスタの機能性

＜5・2＞評価結果　被験者である 20 代男女 15 名の総評価件数 82 件を 5 段階(1:非常に不満，2:やや不満，3:どちらとも言えない，4:やや満足，5:非常に満足)ごとの満足度を表 2 に示す。

表 2　5 段階別の満足度
Table 2. Satisfaction Rating on a 5-Point Scale

	コーヒー満足度	システム満足度
1	0	0
2	0	5
3	10	16
4	32	38
5	40	23

表 2 より，「やや満足」，「非常に満足」と答えた人が総評価件数 82 件中，コーヒー満足度では 72(32+40)件，システム満足度では 61(38+23)件でともに高い評価を得られた。

この結果は，表 1 の評価指標の「コーヒーを楽しめる体験の提供ができたか，コーヒーレシピに満足したか」，「バーチャルバリスタの機能性」のどちらも達成できたと言える。

6.　考察

本システムでは，Web アプリ上でバーチャルバリスタによるレシピ提案とコーヒー抽出を行うことにより，コーヒーを楽しめる体験の提供ができたが，音声認識の機能の面で課題が残った。

音声認識は，外付けの Web カメラに内蔵されたマイクで行い，周囲の雑音に影響を受けていたため，精度が高くなかった。改善策として，マイクの品質向上等の環境要因の改善や，複数の音声認識 API の利用，アルゴリズムの改善が考えられる。

7.　まとめと今後の展望

本研究では，ユーザの好みのレシピを Web アプリ上で表示し，非接触制御可能なシステムを構築し，レシピ通りのコーヒー抽出の実装を行い，ユーザがいつでも美味しいコーヒーを楽しめて，あたかもそこにバリスタが存在するような環境の実現を可能にした。一方で，モニターに Web アプリを表示し，コーヒーメーカーとの併用をしていたが，より操作性や利便性を向上させるために，タブレット等のデバイスとコーヒーメーカーとの連携が必要である。また，本システムの課題である音声認識の精度向上に加え，Web アプリの起動停止やコーヒー抽出の工程の自動化を行い，より高い精度のコーヒーレコメンデーションシステムの実装を目指す。

文　献

[1] クロス・マーケティング，“コーヒーに対する調査(2023年),” クロス・マーケティング, 26 4 2023..

[2] Jacopo de Berardinis, Gabriella Pizzuto, Francesco Lanza, Antonio Chella, Jorge Meira, Angelo Cangelosi. "At Your Service: Coffee Beans Recommendation From a Robot Assistant." In HAI '20: Proceedings of the 8th International Conference on Human-Agent Interaction, pp. 257-259. (2020)

©2026 IEE Japan

脳動脈瘤カテーテル手術支援のための バーチャルシミュレータ

亀岡　海陸空*，濱本　和彦（東海大学）

Virtual simulator for support of catheterization of cerebral aneurysms

Erik Kameoka, Kazuhiko Hamamoto (Tokai University)

1.　研究の背景

脳動脈瘤コイル塞栓術では，術前の MRA 画像に基づきマイクロカテーテル経路戦略を立案するが，コイル挿入時にマイクロカテーテル先端を瘤内で安定して支点形成できるかが手技難度と血管損傷などの合併症リスクに影響する．ここでの安定性は，瘤内のコイル充填時にその反作用として，マイクロカテーテルの先端に作用する推進力・モーメントが血管壁との接触反力およびカテーテル内部の弾性反力と釣り合い，先端の並進・回転が実質的に抑制される準静的状態として捉えられる．一方，従来のシミュレータで使われる患者別血管模型は作成コストが高く，他症例との比較分析にも適さない．さらにバーチャルシミュレータにおいても，多点接触や拘束が増加すると挙動が不安定化しやすく，「安定」を客観的に定量化して経路間で比較する評価基盤は未整備である．また臨床では安定性判断が触覚に強く依存するため，視覚情報のみの環境では支点形成による拘束感や反力を十分に把握できず，主観に偏りやすい．

2.　先行研究

＜2・1＞バーチャルシミュレータ　　我々の研究グループでは，大腿動脈から脳動脈領域へ至るカテーテル操作を体験・学習できるバーチャルシミュレータを開発した(1)．バーチャルカテーテルは，等間隔に配置した複数のカプセル剛体を関節完全拘束で連結することで，連続体の曲げ挙動を擬似的に再現した．操作者インタフェースには力覚提示デバイス Touch を用い，操作者入力に応じて三次元方向の反力を力覚提示することで，カテーテル操作中に生じる拘束感・抵抗感をカテーテルから受ける基部反力として手元提示した．

＜2・2＞部分摩擦によるアプローチ　　脳動脈領域のマイクロカテーテルの操作感向上に努めた．Blender を用いてストレート型・カーブ型・分岐型・動脈瘤を含む血管形状をモジュール化（プレハブ化）し，症例に応じて患者別血管モデルを迅速に構築可能とした(2)．これにより，血管形状を統制した条件下での検証が可能となるとともに，血管部位別摩擦を設計パラメータとして付与・調整した．ここでは，物性値の同定ではなく，拘束感の傾向を調整する有効パラメータとして擬似再現した．しかし，これらの評価は医師の主観的な操作感に依存しており，支点形成を含む準静的状態におけるカテーテル安定性を経路間で定量比較する指標および評価手順は未整理である．したがって，安定性を経路間で比較可能とする評価手法の確立が求められる．

3.　目的

本研究の目的は，既存の脳動脈バーチャルカテーテルシミュレータを基板として，術前に脳動脈領域を対象とした複数の挿管経路を比較検討できる環境を提供する．これにより，支点形成を含む準静的状態におけるカテーテルの安定性を，術前に複数の挿管経路を力学的に比較・検討可能な支援機能の枠組みを構築することである．

4.　提案手法

＜4・1＞開発　　Unity 2020.3.33f1, Blender, Touch を用いる．先行研究より，MRA 画像をもとに脳動脈を作成後，血管壁の基本形状ごとの摩擦を設定し，バーチャルカテーテルの挿管経路の初期配置設定を行った（図 1a,b）．カテーテルの弾性力の曲げ剛性分布を，セグメント間の角度制限として勾配を付けてモデル化することで，従来は摩擦や拘束条件によって擬似的に再現されていた弾性挙動を，より構造的に再現することを可能にした．バーチャルカテーテルの初期配置は血管中心線に基づいて決定する．曲率ピークのカーブ型血管モデルでの血管壁との接点がバーチャルカテーテルの支点候補とする．

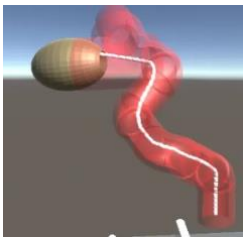


図 1a 脳動脈瘤の挿管経路 a

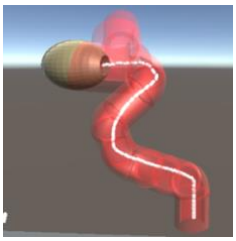


図 1b 脳動脈瘤の挿管経路 b

＜4・2＞反力提示について　　Touch は，カテーテル近位端の挿入方向 1 自由度の操作入力デバイスとして用いる．先行研究と同様に挿入・引抜操作を可能とする一方，本研究ではコイル挿入過程を Touch により模擬するため，コイルからカテーテルへ作用する反力を同軸方向の外力として近位

©2026 IEE Japan

側に付与し，カテーテル全体に張力が生じる条件を与える．支点形成によりカプセルが移動しにくい準静的状態を触覚として提示する．

＜4･3＞ログについて　　本研究では，コイル挿入中におけるカテーテルの支点形成状態および力学的安定性を，以下①～③のログ指標を時系列で統合的に解析することで，経路間で比較可能な形で評価する枠組みを構築した．

① 操作入力：コイル挿入を模擬した操作入力時における，近位側および先端側の位置･速度を記録した．これにより，異なる挿管経路間で操作条件（挿入速度等）を統一し，経路形状の違いに起因する安定性の差を比較可能とした．

② 接触状態：血管壁と接触しているカテーテルセグメント数，および接触セグメントの位置分布を記録した．これにより，多点拘束状態の有無を判別するとともに，どの位置が実質的な支点として機能しているかを定量的に評価可能とした．

③ 反力状態：隣接カプセル間の連結反力，カテーテル基部に生じる反力，およびセグメント間反力の総和を記録した．これにより，コイル挿入を模擬した力覚提示に伴う負荷が操作者側へ伝達される成分と，カテーテル内部の拘束･弾性反力として消費される成分を区別して評価した．

５．実験結果

＜5・1＞実験条件　　経路間の安定性差をログにより比較できるかを検証した．比較に際し，関節拘束の初期パラメータ，各血管区間の壁摩擦，および Touch によるコイル反力入力は固定し，挿管経路 a, b のみを変化させた．曲線血管の高曲率区間では外側壁への接触し支点が生じるなど，臨床で観察される挙動を定性的に確認した．図 2a, b ではログは掴み操作中のみ取得し，入力点の位置･速度から挿入速度を算出することで試行間の操作条件を統一した．ログ取得は固定更新に同期した約 20 Hz で実施した．

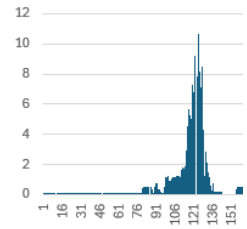


図 2a 経路 a の入力速度

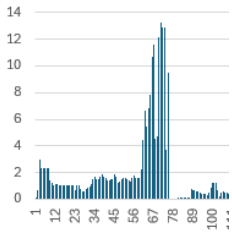


図 2b 経路 b の入力速度

＜5・2＞接触状態の比較　　血管壁と接触しているセグメント数を時系列記録した（図 3a,b）．コイル挿入を模擬した近位側牽引を加えた条件で，接触分布を時系列記録し，経路ごとの特徴を保持し，曲率ピーク近傍に接触が集中する区間を同定できた．

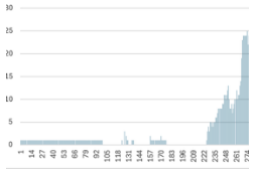


図 3a：経路 a の接触数

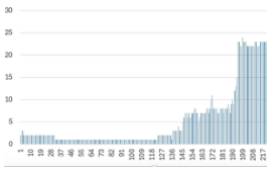


図 3b：経路 b の接触数

＜5･3＞反力状態の比較　　力学応答として，基部反力およびセグメント間反力の総和を記録した（図 4a,b）．両経路で操作条件および物理パラメータを統制したが，基部反力のスパイク出現時刻は経路により異なる（図 5a,b）．

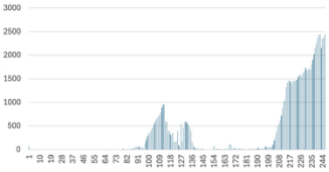


図 4a：経路 a の反力総和

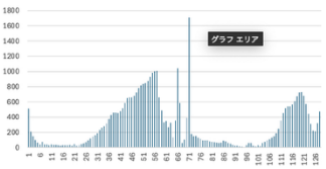


図 4b：経路 b の反力総和

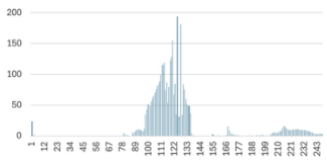


図 5a：経路 a の基部反力

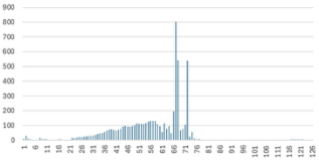


図 5b：経路 b の基部反力

６．おわりに

本研究では，連結剛体と関節拘束で準静的挙動を擬似再現し，操作入力，接触状態，基部反力，ジョイント反力総和を時系列ログとして取得し，統制条件を固定して挿管経路差を比較した．考察として，カテーテル内部の拘束反力が蓄積したのち，拘束状態が遷移（解放）した可能性がある．この「蓄積→遷移」モデルが成立するなら，(i) 基部反力総和が先に増加し続け，(ii) その後に基部反力がスパイクし，(iii) スパイク時刻近傍で接触状態が急変する，という時間構造が観測されると考えられる．本研究では，これらの因果関係を「到達タイミング差」による見かけの遅れと区別するため，時間軸の比較に加えて挿入距離でも確認し，解釈の妥当性を高めた．一方で，高速操作時に生じる通り抜け等の不連続挙動は計算時間刻みや接触判定に依存する数値的制約に起因し得るため，本研究では準静的条件に操作範囲を限定して評価した．

文　　献

(１) ウ，濱本：「VR による脳血管カテーテルの手技訓練シミュレータに関する研究」電子情報通信学会，(2023.3)

(２) 亀岡，濱本：「脳動脈瘤カテーテル手術支援のためのバーチャルシミュレータ」電気学会医用・生体工学研究会，(2024.6)

©2026 IEE Japan

伝染型ネットワークにおける信用度評価に基づく不正ノードの自律的回避

岸本 一希*, 松本 倫子（九州産業大学）

Autonomous Malicious Node Avoidance with Trust Evaluation in Epidemic Networks

Ikki Kishimoto, Noriko Matsumoto (Kyushu Sangyo University)

1. はじめに

不安定・不確実な通信環境でできるだけ定常的なネットワークを構成するのは、災害時の応急ネットワークや野外の IoT ネットワークなどで重要な意義を持つ。有望な方策として人工衛星ネットワークが期待されているが、現状ではまだコストや普及などから、簡便とは言い難い。このような状況に対処するための技術の一つとして、伝染型ネットワーク（Epidemic Networks）があり、メッセージをネットワーク内に拡散して宛先まで到達することを期待する [1]。しかし、ネットワーク内に不正なノード（ホストやデバイス）が存在してメッセージを破棄したりすると、適切な経路での到達が阻害されるとともに、ネットワーク資源が浪費される。そこで、本研究ではネットワーク内の信用度に基づく防御として、不正ノードの所在を推定して自律的に迂回・回避する経路制御の方式を提案する。

2. 伝染型ネットワーク

インターネットの TCP/IP は、長い通信遅延，頻繁なパケット損，間欠的な通信リンクなどを想定しておらず、そのような劣悪な通信環境ではネットワークを構成できない [2]。通信が間欠的に断続するような時間的な不安定さに対しては、切断時にはメッセージを一時的に保持しておき、接続時に送出する蓄積型転送通信が考案され、宇宙探査機や惑星探査機から地球への通信などで実用化されている。通信経路が不定になる空間的な不安定さに対しては、通信可能な領域までメッセージを運搬していく Message Ferry という手法なども考案されている。無線通信のネットワークでは、構成ノードが移動することでも、同様の不安定さが生じる。

別方向からの方策として、伝染型ネットワークでは、メッセージを保持するノードは、他ノードとすれ違うなど無線通信可能な範囲に入ると（接触すると）、そのノードにメッセージの複製を転送する。これを他ノードと接触する度に繰り返すことで、メッセージを拡散していく。ただし、ネットワーク全体の中にメッセージの複製が充満してしまい、通信量が過大になる。これを抑制するために複製数に上限を設けたのが、Spray and Wait である [3]。また、過去の接触履歴に基づいて配達予測確率を算出し、宛先ノードへの確率がより高いノードへメッセージを転送するのが PRoPHET であり [4]、インターネットの RFC にもなっている [5]。

3. 伝染型ネットワークへの攻撃

伝染型ネットワークのように不特定多数の中継ノードで転送していくネットワークは、全てのノードが正しく中継するという性善説で成り立っているが、全体の監視や管理がないこともあり、不正ノードの侵入や次のような様々な攻撃に対して脆弱である。

- メッセージの盗聴、改ざん
- フリーライダー（自己に有利なメッセージのみ中継する）
- ブラックホール攻撃（不正ノードが自分に届いたメッセージを全て破棄して中継しない）

特にブラックホール攻撃は伝染的ネットワークに特有であり、ブラックホールの不正ノードを推定して回避する必要がある。

4. 信用度に基づく防御

不正ノードを推定するためには、各ノードの「信用度」(Trust) を指標として活用する手法が有力である。簡単な例で説明すると、あるノードから別のノードの挙動を観察して、頻繁にメッセージを渡してくるようなら、そのノードの信用度を上げていく。信用度が初期値のままなら（メッセージを渡してくることがないなら）、ブラックホール候補とみなす。

Al Hinai らはこの方式をほぼそのまま Spray and Wait に適用した [6]。PRoPHET を対象とした Gupta らの研究は [7]、人間社会を模した信用度を最初からノードに割り振るなど、方向性が異なる。最近の研究は Blockchain の活用が活発だが、処理が重い。

5. 本研究の目的

本研究では、以上のような関連研究を踏まえ、P2P ネットワークの分野で提唱されて研究が進んでいる分散協調型の信用度管理の手法 [8] なども一部参考にして、PRoPHET におけるブラックホール攻撃の防御を目指した。特に災害時や避難時を想定して、方式を考案・設計し、NetLogo [9] でシミュレータを作成して、効果を検証した [10]。

6. 信用度に基づく不正ブラックホール・ノードの回避

第 1 の要点として、信用度の評価を次のように行う。

(1) あるノードから見た他ノードの信用度は、初期値ゼロ。

(2) ノード N_I は他ノード N_X からメッセージを渡されたら、N_X への信用度を増やす。これは関連研究 [6] と同様。

©2026 IEE Japan

(3) 伝染型ネットワークではノードどうしが接触すると、保持しているメッセージ一覧（Summary Vector）を互いに交換して、自らが持たないメッセージを相手にリクエストして相手から受け取る。したがって、通常のノードは同じメッセージを改めてリクエストすることはない。一方、ブラックホール・ノードはメッセージを破棄するので、改めてリクエストしてくることがある。そこで、N_I は N_X から同じメッセージのリクエストを改めて受けたら、N_X への信用度を減らす。これを新規に考案して導入した。

第 2 の要点として、配達予測確率を次のように扱う。自らの配達予測確率を P_S、接触した相手が持つ確率を P_R とする。なお、配達予測確率の更新手順は、PRoPHET のままである。

(1) 相手ノードの信用度が負なら、その不審な相手にはメッセージを渡さない。

(2) 信用度が正なら、元の PRoPHET に従い、条件 $P_S < P_R$ が成り立つ場合にメッセージを渡す。

(3) 信用度がゼロなら、この条件を $(1 + d / 100)\, P_S < P_R$ とする。つまり、d が大きいほど渡しにくくなる。これを新しく導入した。

ノードが疎な場合は接触が稀なため、自ノードの P_S は小さい。したがって d の効果は小さく、素性が不明でも P_R が大きい（と自称する）相手に渡しがちになる。相手がブラックホールだと通信が途絶するが、ただでさえ途絶しがちなので、危険を冒してでも渡したほうがいい。ノードが密な場合は接触が頻繁に起き、P_S は大きくなる。したがって d の効果も大きくなり、素性の不明な相手には P_R が大きくても渡さないようになる。迂回路が幾つもありえるので、あえて危険を冒す必要はない。

7. シミュレーション実験と考察

平面空間内を多数のノードが、あちこちランダムに動き回っては互いに接触を繰り返しながら、メッセージを転送していく、というシミュレーション環境を NetLogo (Ver.6.4.0) で作成した。災害時の避難所という状況を想定し、その内部は密、外部は疎な配置にしている。ランダムに選出された一定割合のノードがブラックホールであり、ただし、メッセージの最初の発信源や最終的な宛先にはならない。

以下、d を変えながら実験した結果を示す。いずれも 10 回の試行の平均値である。図 1 は、ブラックホール・ノード数の全ノード数に対する比率（横軸）と、配信率、つまり宛先まで届いたメッセージ数の全メッセージ数に対する比率（縦軸）との関係を示している。提案手法のほうが概ね少し劣っているが、どのノードも信用度の初期値がゼロなことから、元の PRoPHET よりも d だけメッセージを渡しにくくなっており、それが原因と思われる。

図 2 はブラックホール率（横軸）と総転送回数（横軸）との関係を示しており、ブラックホールが存在する場合、提案手法が元の PRoPHET より大きく優れており、ネットワーク帯域やリソース浪費を抑制できていることが見て取れる。図 1、2 から、ブラックホール率が半数を越えると転送が全体的に阻害され、到達率の悪化と変動、転送回数の減少といった様子もうかがえる。

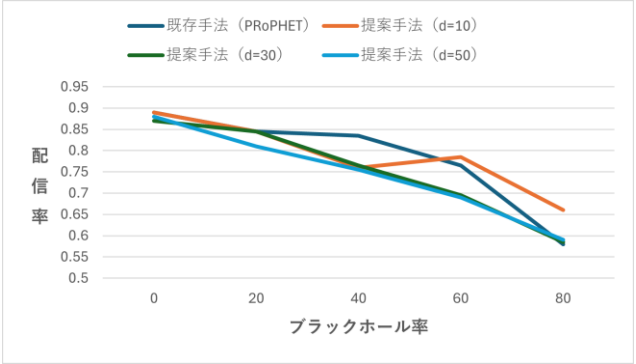


図 1. ブラックホール率 vs. 配信率

Fig.1. Blackhole node ratio vs. delivery ratio.

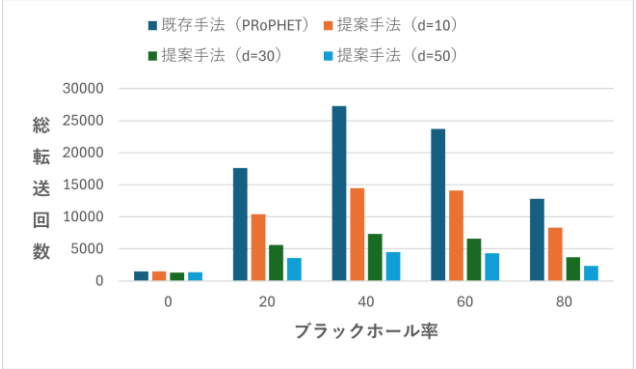


図 2. ブラックホール率 vs. 総転送回数

Fig.2. Blackhole node ratio vs. whole hop counts.

8. おわりに

本研究の Trust_PRoPHET は、計算量も元の PRoPHET と同程度の軽量と見積もっており、ネットワーク帯域の浪費を抑制できたことと併せて、バッテリー電力が貴重となる災害時はもとより、非力な IoT デバイスのネットワークなどにも有利と考えられる。また、故障などによって結果としてブラックホール化したノードにも対応できるものと考えている。

謝辞 貴重なご助言を頂いた吉田紀彦先生（埼玉大学名誉教授・立正大学研究員）に深謝する。本研究は科研費 23K11071、25K15086 の助成を受けている。

文 献

(1) A. Vahdat, et al.: Duke Univ. Tech. Rep., CS-200006 (2000)
(2) 鶴, 他: 信学会 通信ソサイエティマガジン, 16, 57-68 (2014)
(3) T. Spyropoulos, et al.: Proc. ACM WDTN, 252-259 (2005)
(4) A. Lindgren, et al.: Springer LNCS, 3126, 239-254 (2004)
(5) A. Lindgren, et al.: RFC 6693 (2012)
(6) A. Al Hinai, et al.: Proc. IEEE PDCAT, 6 pages (2012)
(7) S. Gupta, et al.: Proc. IEEE WiMob, 724-729 (2013)
(8) N. Matsumoto, et al.: JCM, 12(3), 1-12 (2022)
(9) https://www.netlogo.org/ (2025 閲覧)
(10) 岸本: 九州産業大学 卒業論文 (2026)

©2026 IEE Japan

反射型 DDoS 攻撃に対する分散協調型の検知・防御

川頭 龍心*, 松本 倫子（九州産業大学）

Cooperative Decentralized Detection and Prevention of Distributed Reflective DoS Attacks

Ryushin Kawazu, Noriko Matsumoto (Kyushu Sangyo University)

1. はじめに

ネットワークへのサイバー攻撃は、社会的脅威にもなってきており、火急の対策が求められている。様々な攻撃がある内でも、DDoS 攻撃はサービスの低下や停止を引き起こし、深刻な影響を及ぼす。特に反射型 DDoS 攻撃は検知・防御が難しく、対応に工夫を要する。また、攻撃が大規模化・広域化していることから、もはやサーバ単体や組織のファイアウォールだけでなく、ネットワーク全体で対応していくことが望まれる。そこで本研究では、反射型DDoS攻撃の検知・防御について、ネットワーク機器にその機能を持たせ、さらにそれら複数を集中管理なしに分散協調的に連携させる方式を提案する。

2. DoS 攻撃とその変種

DoS（Denial of Service）攻撃は、特定のサーバ、ホスト、ネットワーク機器に大量のパケットを短時間に集中して送りつけ、機能不全に陥れる攻撃である。その変種として DDoS（Distributed DoS）攻撃、さらには反射型 DDoS 攻撃（Distributed Reflective DoS 攻撃とも呼ばれる）がある。DoS 攻撃の送信源は単一だが、DDoS 攻撃ではネットワーク上の多数の乗っ取られたホスト、反射型 DDoS 攻撃では多数の公開サーバである [1]。

反射型DDoS攻撃の攻撃者は、送信元IPアドレスを標的ホストの IP アドレスで詐称した要求パケットを、DNS、NTP、SNMP、memcached など、公開サーバの多数に送信する。それらのサーバは正規の応答パケットを標的ホストに送りつけ、結果として標的ホストは、大量のメッセージが短時間に集中して届くことから、機能不全に陥る。応答パケットそのものは正規なこともあり、攻撃の検知・防御が難しい。特に DNS を利用するものは、DNS リフレクタ攻撃などとも呼ばれる [2]。

3. 攻撃検知・防御の分散協調化

ネットワーク上の攻撃はますます大規模かつ広域になってきており、各組織のネットワークの入口などに侵入検知防御システム（Intrusion Detection and Prevention System, IDPS）を設置するだけでは対応に限界がある。それに加えて、ネットワーク内の各所にも IDPS を散在させて配置し、かつそれらを連携させることで、負荷分散や担当エリア分散を図るべきである。このような連携を集中管理するのは、負荷分散や即応性の観点から得策でなく、相互の分散協調で実現するのが望ましい。

このような複数 IDPS の分散協調は、別の観点からも有用である。攻撃の検知・防御には様々なパラメータがあり、誤検知をできるだけ避けるための最適なパラメータ設定は必ずしも不変かつ既知ではなく、状況によっても変化する。そこでパラメータ設定の異なる複数の IDPS を同時に運用して相互に情報交換など連携させることで、互いに補填しあって最適なものに近づけていくことが期待できる。同様の考え方は、例えば機械学習の分野でもアンサンブル学習として活用されている。

4. 本研究の目的

我々は、以上のような背景や関連技術動向を踏まえ、侵入検知・防御を複数のネットワーク機器に担わせて連携させ、ネットワーク上に仮想的な IDPS を実現することを目指している。実装プラットフォームとして Software Defined Networking（SDN）の OpenFlow を採用し、まず Portscan 攻撃について、検知・防御をネットワーク上で分散協調化する研究を進め、成果を挙げた [3]。SDN による IDPS について、複数連携や分散協調に関する研究事例は、調べた限りでは他に見当たらない。

本研究は、同様の手法を反射型 DDoS 攻撃の検知・防御に展開し、実現可能性を探ることを目的としている。検知・防御に SDN を用いる関連研究として、DDoS 攻撃については Braga らの研究 [4]、反射型 DDoS 攻撃については首藤らの研究 [5]、吉田の研究 [6] がある。前者は DNS リフレクタ攻撃について、AS（Autonomous System）の入口で DNS 応答パケットを監視して検知・防御する方式で、特に、防御する間も標的ホストが DNS を参照できるような SDN の利用を提案しており、本研究とは目指す方向が異なる。後者は各 DNS サーバの近くで要求パケットを監視する方式を提案しており、本研究の下地の一部としている。

5. SDN と OpenFlow

SDN は、従来のルータにおける制御部（コントローラ）と転送部（スイッチ）を分離し、制御部の集約やソフトウェア化を可能にするアーキテクチャであり、OpenFlow はその実装仕様である。コントローラからスイッチへは転送指示など制御情報を渡し、スイッチからコントローラへは状況情報やパケット数など統計情報を渡す。なお、スイッチはパケットのヘッダは参照更新できるが、ペイロードは参照更新できない。OpenFlow を IDPS として利用する場合、通信内容に関わらない監視・防御を扱うことになる。

©2026 IEE Japan

分散協調の連携を実現するには、近隣のコントローラどうしを接続することになる。その規格は定められていないが、可能である。コントローラどうしの接続を扱った関連研究は幾つかあるが、コントローラの多重化による障害対策がテーマとなっている。しかし、それらで用いられた接続方法は、本研究でも参考にした。

本研究では OpenFlow の実験テストベッドとして、ネットワーク・エミュレータ Mininet [7]、コントローラのフレームワーク Ryu [8]、仮想スイッチ Open vSwitch [9] を用いた。

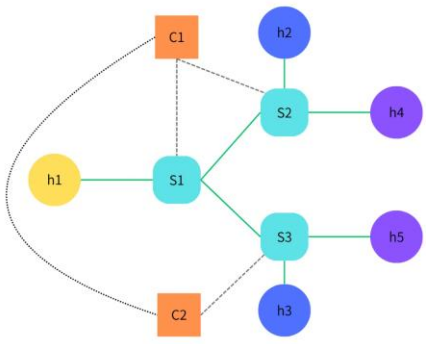
6. コントローラ連携による監視・防御

コントローラは基本的に次のような動作を繰り返す。

(1) DNS 要求パケットおよび応答パケットを一定間隔で計数。
(2) 数値が閾値を越えたら攻撃検知、越えなければ (1) に。
(3) 攻撃を検知したら応答パケット遮断、他コントローラに通知。
(4) 検知の通知が来たら、自らはまだでも、応答パケット遮断。
(5) (1) に戻って監視を継続。

攻撃検知については、上の (4) のように、コントローラごとの未然防御を可能にしている。また、パケット遮断については、一定のタイムアウト時間で解除されるので、それより少し短い時間ごとに監視を繰り返し、攻撃継続中なら遮断設定を更新して、攻撃継続を他コントローラに通知する。攻撃継続の通知を受け取ったコントローラは、自らの遮断設定を更新する。このようにコントローラ間では、標的ホストの IP アドレスおよび「新規攻撃検知」「攻撃継続」の 2 種類の通知を互いに授受し合う。

検知の主なパラメータとして、閾値とタイムアウト時間がある。閾値が小さすぎると誤検知の恐れが高まり、逆に大きすぎると手遅れの恐れが高まる。タイムアウト時間は複数コントローラ間でずらすことで、1 台よりも効果的な検知が期待できる。しかし、いずれも適切な値を事前に予測できないので、パラメータ値の異なる複数を連携させる意義がある。



h1: 標的ホスト　　C1, C2: コントローラ
h2, h3: DNS サーバ　　S1, S2, S3: スイッチ
h4, h5: 攻撃ホスト

図 1. 実験ネットワークの構成
Fig.1. Topology of the experiment network.

7. 実験システム

以上を具体化する実験システムは、最初の取組みなことから最小限の構成とし、コントローラ 2 台で、図 1 のように構成した。

h4 と h5 はそれぞれ h2 と h3 に、h1 を送信元と詐称した要求パケットを送り、h2 と h3 は h1 に向けて応答パケットを返す。その状況をスイッチ S2 と S3 および S1 で監視して、C1 と C2 は必要に応じてパケットを遮断する。C1 と C2 は互いに接続していて、それぞれの情報を交換する。このように、ネットワーク内に散在するスイッチの内、標的に近い S1 と遠い S2 との連携も想定している。また、閾値の違いの影響より先に、まずタイムアウト時間の違いの影響を知るべく、今回は C1 と C2 の閾値は同一、タイムアウト時間が異なる設定とした。

この実験システムをテスト・シナリオで動作させ、次のような挙動などを確認した [10]。

□ 攻撃を先に検知したコントローラが他方に通知することで、未然防御ができていること。
□ 特に、標的から遠いスイッチではまだ検知できなくても、近いスイッチで先に検知できること。
□ タイムアウト時間を異なる設定とすることで、異なる時点での監視ができること。
□ 攻撃が去った際には、全てのスイッチで防御の終了が自律的になされること。

8. おわりに

本研究では、反射型 DDoS 攻撃に対する分散協調型の検知・防御について、OpenFlow を活用して、まず最初の実現可能性は示せたと考えている。しかし、最小規模の実験で最低限の動作を確認したにすぎない。より大きなネットワークでの実験、より様々な攻撃パターンでの実験、より多数のコントローラの連携、より高度な複数パラメータ連携、さらには、OpenFlow を越えて、通信内容にまで踏み込んだ監視・防御の可能性の模索などに、引き続き取り組んでいく予定である。

謝辞 貴重なご助言を頂いた吉田紀彦先生（埼玉大学名誉教授・立正大学研究員）に深謝する。本研究は科研費 23K11071、25K15086 の助成を受けている。

文 献

(1) 臼﨑: 宮崎大学 学位論文 (2022)
(2) https://jprs.jp/glossary/index.php?ID=0156 (2025 閲覧)
(3) 中村, 他: 電気学会 全国大会論文集, 3, 65-66 (2022)
(4) R. Braga, et. al.: Proc. IEEE LCN, 408-415 (2010)
(5) 首藤, 他: 信学会 技術研究報告, 113(473), 223-228 (2014)
(6) 吉田: 埼玉大学 卒業論文 (2021)
(7) https://mininet.org/ (2025 閲覧)
(8) https://ryu-sdn.org/ (2025 閲覧)
(9) https://www.openvswitch.org/ (2025 閲覧)
(10) 川頭: 九州産業大学 卒業論文 (2026)

©2026 IEE Japan

高次フォルマント空間の形成による発話音声予測手法の検討

小倉　孔希*，花﨑　泉（東京電機大学）

A Study of an Utterance Prediction Method Based on Higher-Order Formant Space Modeling

Koki Ogura, Izumi Hanazaki (Tokyo Denki University)

１．はじめに

言語学習者の一般的な発音訓練方法は，教師の発音を訓練者が聞き，その発音を模倣するという流れである。しかし，発音の模倣過程において，教師と訓練者の間における性別や平均的な声の高さなどの違い，すなわち声の個人差によっては模倣が難しい場合がある。そこで，発音訓練者が将来的に発音できるようになった際の音声を予測することができれば，教師の音声を直接模倣するよりも発音の訓練効果が上がるのではないかと考えられる。

音韻はフォルマント周波数の違いによって識別される。特に，日本語および英語は第1フォルマント（F1）と第2フォルマント（F2）が音韻の識別に関与する。そして，第3フォルマント（F3）以降の高次のフォルマントは，話者の個人性に関係する[1]。本研究では，フォルマント空間に F3 以降の高次のフォルマントを加えて拡張し，高次フォルマント空間として定義する。フォルマント空間は個々人によって異なるため，教師の高次フォルマント空間と訓練者の高次フォルマント空間を変換する関数を求める。求めた関数に訓練者がまだ発音できていない音韻を入力しフォルマントを予測する。予測されたフォルマントから，時系列モデルを用いてシステムを同定することで音声を合成する。

２．高次フォルマント空間の形成と音韻の予測

＜2・1＞AR モデル　　音声のスペクトル解析およびフォルマントの推定には AR モデルを用いる。AR モデルのブロック線図を図1に示す。ここで，$y(n)$はモデル出力，$e(n)$は誤差を表す。

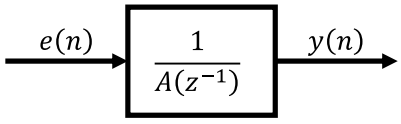


図1　AR モデル

Fig.1. AR model

したがって，AR モデルは次式で表される。

$$y(n)+\sum_{k=1}^{p}\{a_k y(n-k)\}=e(n) \qquad (1)$$

ここで，a_kはモデル係数，pはモデル次数を表す。pは 16 とし，係数a_kは最小二乗法により推定する[2]。

＜2・2＞ガウス過程回帰　　フォルマント空間変換関数の推定にはガウス過程回帰を用いる。ガウス過程の予測分布は次式で表される。

$$p(\boldsymbol{y}^*|\boldsymbol{X}^*,\mathcal{D}) = \mathcal{N}(\boldsymbol{k}_*^{\top}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{y}, \boldsymbol{k}_{**}-\boldsymbol{k}_*^{\top}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{k}_*) \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{k}_*(n,m)=k(x_n,x_m^*) \quad (n=1,\cdots,N, m=1,\cdots,M) \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{k}_{**}(m,m')=k(x_m^*,x_{m'}^*) \quad (m=1,\cdots,N, m'=1,\cdots,M) \qquad (4)$$

ここで，$\mathcal{D}$は学習データ$(\boldsymbol{X},\boldsymbol{y})$とする[3]。

＜2・3＞音韻予測実験　　実験の条件を表1に示す。本実験では，英語発音の教示資格を持つ被験者を教師とし，海外在住経験のある英語が堪能な被験者を訓練者とする。その際，訓練者が実際に発音した英語の音声を真値と定義し，予測し合成した音声と比較することで評価する。なお，実験で比較する英語母音は，強形と弱形を混合した3種類を選定した。

表1　実験条件

Table 1.　Experimental conditions

	教師被験者	訓練被験者
母国語	日本語	日本語
言語レベル	発音インストラクション資格保有	幼少期より海外在住経験あり
学習使用音韻	日本語5母音, [æ], [ɔ], [ə]	日本語5母音
予測音韻	――――――	[æ], [ɔ], [ə]
サンプリング周波数	24 kHz	24 kHz

＜2・4＞音韻予測実験結果　　音韻の予測結果を表2および図2に示す。表2および図2より，発音[æ]は真値とほぼ一致し，その他の発音についても相対的な関係は概ね一致していることがわかる。

©2026 IEE Japan

表２　フォルマントの予測値と真値の比較
Table 2.　Comparison of predicted and actual formant values

	予測値 [Hz]					真値 [Hz]				
フォルマント	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
[æ]	829	1595	2671	3375	4020	837	1627	2365	3708	5218
[ɔ]	678	908	2329	3345	4208	626	926	2257	2677	4122
[ə]	575	1308	2418	3375	4093	471	1253	2461	3107	3824

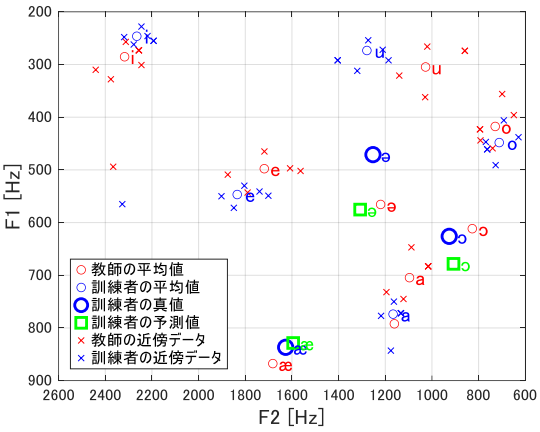


図２　予測した音韻のフォルマント空間における位置関係
Fig.2. Predicted phonetic formant spatial relationships

３．音声の合成

＜3・1＞ARX モデル　　音声の合成には ARX モデルを用いる。ARX モデルのブロック線図を図 3 に示す。ここで，$u(n)$，$y(n)$，はそれぞれモデル入力，出力，$e(n)$は誤差を表す。

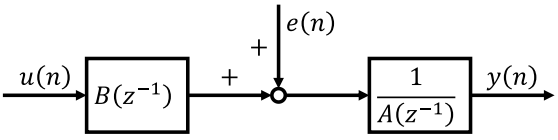


図 3　ARX モデル
Fig.3. ARX model

したがって，ARX モデルは次式で表される。

$$y(n)+\sum_{k=1}^{p}\{a_k y(n-k)\} = \sum_{k=1}^{q}\{b_k u(n-k)\}+e(n) \quad (5)$$

ここで，a_k，b_kはモデル係数，p，qはモデル次数を表す。p，qは試行錯誤により決定する。係数a_k，b_kは最小二乗法によって推定する(4)。

＜3・2＞音声合成結果　　訓練者の任意の音声を入力，予測したフォルマントを極として持つシステムを出力とした ARX モデルにより同定する。同定し合成した音声と真値の比較を図 4 および図 5 に示す。図 4 および図 5 より，ピッチによる差はあるものの，概ね周波数特性は一致していることがわかる。したがって，予測されたフォルマントをもとに音声を合成できた。

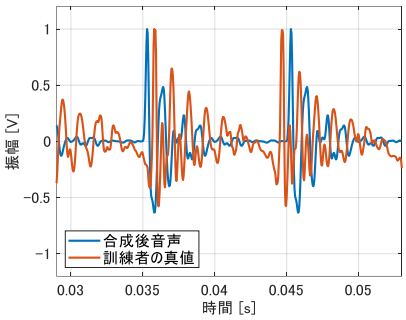


図 4　合成した音声と真値の波形比較
Fig.4. Comparison of synthesized voice and true waveforms

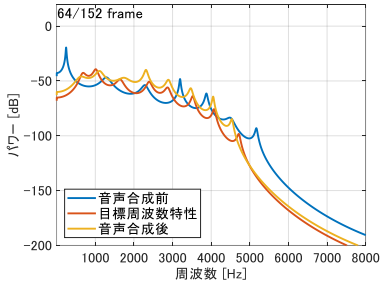


図 5　音声合成前後のパワースペクトル（64 フレーム目抜粋）
Fig.5. Power spectrum before and after speech synthesis (64th frame excerpt)

４．おわりに

本研究では，フォルマント空間を高次に拡張し，発音訓練者の目標とするフォルマントを予測し，音声を合成した。フォルマントの予測結果は真値と比較して近い値を予測できた。また，予測したフォルマントから音声を合成すると真値に近い音声を得ることができたことから，この手法が有効であることが示唆された。

文　献

(1)小橋豊：「基礎物理学選書4. 音と音波」，裳華房，pp. 166-170 (2007)
(2)中溝高好：「信号解析とシステム同定」，コロナ社，pp. 82-160 (1988)
(3)持橋大地・大羽成征：「機械学習プロフェッショナルシリーズ ガウス過程と機械学習」，講談社，pp. 81-86 (2025)
(4)片山徹：「システム同定入門」，朝倉書店，pp. 71-77 (1994)

©2026 IEE Japan

パーソナルモビリティのモニタリングシステム開発
–カメラ映像を用いた注意領域検出–

橋本　幸二郎*，山田　哲靖(公立諏訪東京理科大学)，
竹内　永(株式会社イーエムアイラボ)，藤田　然(富士見高原リゾート株式会社)，
道木　加絵(愛知工業大学)，舟洞　佑記(名古屋大学)

Development of a Monitoring System for Personal Mobility Vehicle
-Detection of Attentive Regions Using Camera Images-

Kohjiro Hashimoto, Tetsuyasu Yamada (Suwa University of Science),
Hisashi Takeuchi (EMI Lab Co., Ltd.), Zen Fujita(Fujimi Kogen Resort Co., Ltd.),
Kae Doki(Aichi Institute of Technology), Yuki Funabora(Nagoya University)

１．背景

本学のある諏訪地域の高齢化率は 30%を超え，2040 年には 40%に達する試算も出ている(1)。加えて，中山間地域に該当する諏訪地域では交通機関が十分に整備されていないことから，将来，高齢者に対する移動手段の確保が課題になる。

この問題に対して Personal Mobility Vehicle(以降，PMV)が移動困難者に対する移動手段として期待されている。本研究では，諏訪地域が自然観光地を多く持ち，シニア観光客が多く訪れる点から，自然観光地での PMV 利用を考える。

自然観光地は整備されていない道が多く, PMV 移動では危険な領域が数々存在する。また，凹凸やぬかるみ等，高度な通過可否判断が要求される箇所も存在する。そこで本研究では，観光地での安全な PMV 利用を実現するためのモニタリングシステムの開発を目指す。すなわち，利用中の PMV が現在どこを走行しているかの監視，加えて，現在位置に対する安全・危険領域の判定を可能にするシステムを目指す。

著者らはこれまで，高精度測位センサを用いた領域判定手法を提案してきた(2)。しかし，明らかな危険領域のみ判定可能であり，水たまりやぬかるみ等の動的に変化する領域等，危険ではなく注意が必要な領域については判定できなかった。

本稿では，この領域を注意領域と呼称するとし，画像認識技術を用いて注意領域を検出する。そして，検出した注意領域を走行環境マップに付与する方法を提案する。これにより監視側は危険領域だけでなく，注意すべき領域を認知した上でのモニタリングが可能になる。

２．注意領域の検出と走行環境マップ付与手法

本研究では, PMV には高精度な測位センサとカメラが搭載されているものとし，その現在位置を遠隔地で監視できるものとする。モニタリング時，現在位置に対して注意の判断を行うためには注意領域の可視化，すなわち注意領域情報を付与した走行環境マップを生成する必要となる。

＜2・1＞カメラ映像に対する注意領域検出　まず，画像認識技術を用いてカメラ映像から注意すべき領域を検出する。

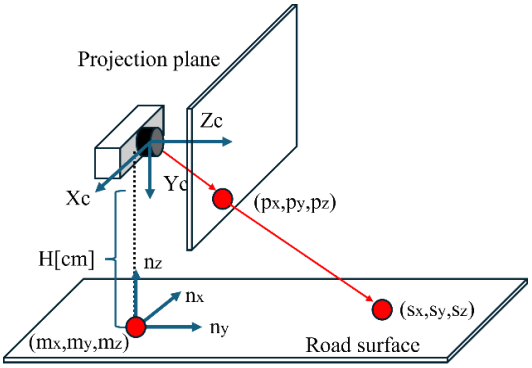


Fig.1: Relationship of Image coordinates and 3D coordinates

なお，注意領域の定義は観光地に応じて異なるものと考えられるが，ここでは水たまり，ポットホール，ひび割れ等を注意領域とする(3)(4)。これら注意領域の検出に，深層学習の物体検出アルゴリズムである YOLO(5)を用いる。すなわち，予め注意領域が写っている画像群を収集，YOLO で学習することで注意領域の検出器を生成する。

＜2・2＞検出領域座標の 3 次元変換　次に，YOLO で検出された注意領域をカメラ座標系の 3 次元座標に変換する。なお，PMV の走行路面が平面であると仮定し，注意領域はその平面上の点とする。また，PMV の搭載カメラは地面に対して水平方向を向いた固定カメラとし，予め地面からの高さ H は既知とする。そして，カメラの内部パラメータも予め算出されているものとする。

図 1 にカメラ座標系と画像座標系の関係図を示す。注意領域に該当する路面上の点を $P_s(s_x,s_y,s_z)$とする。この点 P_s は，カメラ座標系の原点とカメラ座標系から見た投影面上の点 $P_p(p_x,p_y,p_z)$からなる直線と，路面を表す平面との交点として求めることができる。このとき，以下の式に基づき求まる。

$$\begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} = t \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad \cdots (1)$$

ここで，t は以下の式で表される。

©2026 IEE Japan

$$t = \frac{n_x m_x + n_y m_y + n_z m_z}{n_x p_x + n_y p_y + n_z p_z} \quad \cdots (2)$$

(n_x,n_y,n_z)は路面の法線ベクトルを表し，路面が水平であると仮定すると$(n_x,n_y,n_z)=(0,-1,0)$となる。(m_x,m_y,m_z)はカメラ座標系から見た路面上の既知となる点を表し，カメラ位置固定かつ高さが既知であれば，$(m_x,m_y,m_z)=(0,H,0)$となる。(p_x,p_y,p_z)はカメラの内部パラメータから以下の式で求めることができる。

$$p_x = \frac{(u-c_x)p_z}{f_x} \quad \cdots (3)$$

$$p_y = \frac{(v-c_y)p_z}{f_y} \quad \cdots (4)$$

$$p_z = f \quad \cdots (5)$$

(u,v)は点 P_p の画像座標系での点であり，(c_x,c_y)は画像中心，(f_x,f_y)は焦点距離[pixel]，fは光学的な焦点距離[mm]である。

以上の処理により，カメラ座標系から見た注意領域の 3 次元座標を求めることができる。

＜2・3＞注意領域の緯度経度変換　前節の処理により得られる 3 次元座標は次に処理により緯度経度へ変換できる。これにより，先行研究[2]で得られる危険領域判定用の走行環境マップ上に付与でき，危険領域と注意領域の両者を考慮した走行環境マップを得ることができる。

現在位置の緯度経度情報を(φ_c, λ_c)とし，求めたい注意領域の緯度経度情報を(φ_a, λ_a)とした場合，注意領域の緯度経度情報は以下の式で変換することができる。

$$\varphi_a = \varphi_c + \frac{N_a}{R_N}$$

$$\lambda_a = \lambda_c + \frac{E_a}{R_E \cos(\varphi_c)}$$

ここで，R_N は子午線半径であり，ここでは 6356752 [m]とする。R_E は法線半径であり，ここでは 6378137[m]とする。N_a と E_a は前節で求めた注意領域の点 $P_s(s_x,s_y,s_z)$を ENU 座標系で表したものであり，以下の式で求めることができる。

$$E_a = s_x cos\theta - s_z sin\theta$$

$$N_a = s_x sin\theta + _z cos\theta$$

なお，ここでは高さを無視できるものとしており，現時刻のカメラ姿勢も方位角 θ として得られることを前提としている。

３．実験

＜3・1＞実験環境　本学の駐車場にて注意領域の検出及び走行環境マップへの付与の実験を行った。実験用 PMV として，株式会社 WHILL の WHILL MODEL CR2 をベースに情報処理用マイコン(Jetson AGX Orin)と高精度測位センサ(ソフトバンク ichimill)、WEB カメラ(Logicool C922n)が接続されており，現在位置の計測及び走行時の映像が情報処理用マイコンに記録されるようにしている。

図 2 は実験に用いた走行環境である本学の駐車場であり，図の矢印方向を進行方向とし，計 5 周分のデータを収集した。4 周分を YOLO の学習データに，残り 1 周分を評価データに用いる。この駐車場には，ひび割れの箇所が存在し，図 2 には検出されて欲しいひび割れの位置を赤色枠で示している。

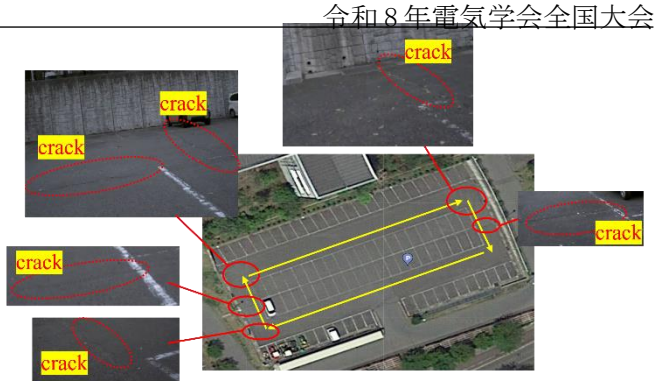


Fig.2: Driving Environment used in this Experiment

Fig.3: Result of Adding Attention Regions to the Driving Environment Map

＜3・2＞注意領域の走行環境マップ付与結果　YOLO による検出枠(中央座標)を走行環境マップに付与した結果を図 3 に示す。赤点が PMV の移動経路を表し，黄色点がひび割れ位置を表している。図 2 と比較すると駐車場内のひび割れがある位置に対して黄色点がプロットされていることが確認できる。ただし，所々で位置ずれが発生していることも確認した。これは YOLO による誤検出の影響もあるが，移動中の振動により，カメラの姿勢が変動し，画像座標系のずれが生じる場合，また加速度センサによる進行方向の角度のずれが生じる場合にこのような位置ずれが生じることを確認している。

４．結論

本稿では，PMV の走行環境下に存在する注意領域を画像認識技術に基づき検出し，それを走行環境マップ上に付与する手法を提案した。実験を通じて，画像上で検出した点を走行環境マップ上に付与できることを確認し，この結果はモニタリング時に PMV の現在位置と注意領域との位置関係を把握できることを示唆する。

謝辞

この研究は，公益財団法人エプソン国際奨学財団の助成金交付により研究が遂行されました。ここに記し深く感謝の意を表します。

文　献

(1) 諏訪信用金,：諏訪地方経済概況速報, 6 月号, p.8,2024.
(2) 橋本　他：電気学会東海支部連合大会, 2025.
(3) 堀内　：ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-H04, 2014.
(4) 芦川　他：電気学会論文誌 C，Vol.145, No.1, pp.74-82, 2025.
(5) Chein-Yao Wang, et al., https://github.com/WongKinYiu/yolov7, arXiv, pp.1-15,2022.

©2026 IEE Japan

ロボットによるサッカートラップ動作再現のための動作センシングシステムの開発とリターゲティング手法の検討

伊能　秀明＊ (広尾学園)，家村　長意，黒木　優作，桂　誠一郎（慶應義塾大学）

Development of Human Motion Sensing System and Review of Retargeting for Recreation of Football Trapping Motion

Hideaki Ino (Hiroo High School), Nagayoshi Iemura, Yusaku Kuroki, Seiichiro Katsura (Keio University)

1. はじめに

スポーツ時における人間の多様な動きをロボットで模倣・再現させるスポーツロボティクスの分野の注目が近年高まっている。ロボットに人間の動作を模倣・教示させるデータベースによる制御手法[1]としては，模倣学習[2]やダイレクトティーチングなど，数多くの手法が存在する。その中で，人間本来の動作データを使用しロボットに模倣させる上での課題として，ロボットと人間の構造的違いが挙げられる。そこで，リターゲティングを使用することで，人間とロボットが異構造の際にも，ロボットに軌道指令値を与える教示手法が注目を集めている[3]。

本研究では，スポーツロボティクスの中でもサッカーにおけるトラップという一瞬の接触でボールを止める動作[4]の模倣に注目する。従来のリターゲティングを行うタスクと異なり，トラップ動作はボールとの接触動作を伴うため，人間とロボットにおける運動学の違いだけでなく質量や慣性の違いも大きく関与してくると考えられる。

本研究では，ボール測定用と人間の動作センシング用の２台のカメラを使用してトラップ動作を撮影する，リターゲティングのためのヒューマンセンシングシステムの開発を行った。さらに人間の下腿換算質量を考慮することで，運動量保存則からボールとロボットの衝突直前に必要な速度指令値を導出するリターゲティング手法についても検討した。本研究では，この二つの特徴を組み合わせることで，通常では接触動作を伴わないリターゲティングでの動作再現の実現を目指す。

2. トラップ動作センシングシステムの開発

〈2･1〉 システム概要　本研究ではボールと人間の動作データを記録するために，2 台の Realsense カメラを使用し映像を撮影する。一台はボールの速度，位置を測定するために使用する。

〈2･2〉 ボールの軌道測定方法　図 1 にボール測定の様子を示す。オレンジ色のサッカーボールを使用し，HSV 値の範囲を定めることでオレンジ色の球体の検知をリアルタイムで実現している。そして，ボール速度測定に関しては，HSV 閾値処理で抽出した領域を 3 次元座標へ変換し，そこから得られた中心位置データから，過去 8 フレームの線形回帰を用いて速度を算出している。

Fig. 1.　トラップ動作時のボール軌道測定の様子.

Fig. 2.　トラップ動作センシング実験の様子.

〈2･3〉 人間の姿勢測定方法　また，もう一台のカメラでは人間の動作のセンシングを行う。図 2 に人間の姿勢測定の様子を示す。MediaPipe を使用し左右の脚の姿勢の動作データを記録するプログラムを作成する。

3. トラップ動作再現のリターゲティング手法の検討

〈3･1〉 下腿換算質量の計算　ここでは，測定した人間のトラップ動作を幾何学的に異構造なロボットへの軌道にプロファイルするリターゲティング手法について検討する。まずは，トラップ動作を人間とボール間で成立する運動量保存則としてモデル化したときに，トラップ動作に関与する人間側の重さを決定する「下腿換算質量」の計算について，浅井らの下腿換算質量の定義[4]に基づいて説明する。トラップ時の力学的特性を考慮し，以下の運動量保存則に基づき，ボールが受ける実効的な慣性抵抗として下腿換算質量 M_{red} を定義する。

$$m(v_0 - v_1) = M_{\mathrm{red}}(V_0 - V_1), \quad M_{\mathrm{red}} = \frac{v_0 - v_1}{V_0 - V_1} m \quad (1)$$

©2026 IEE Japan

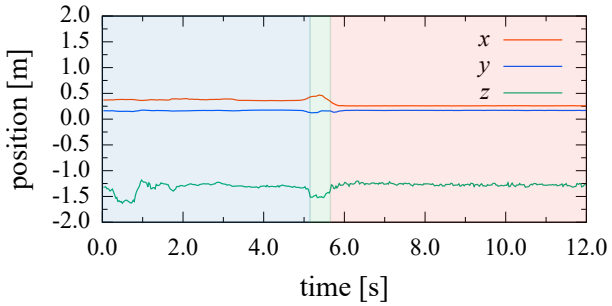


Fig. 3.　トラップ動作センシング実験の位置変化 (踵).

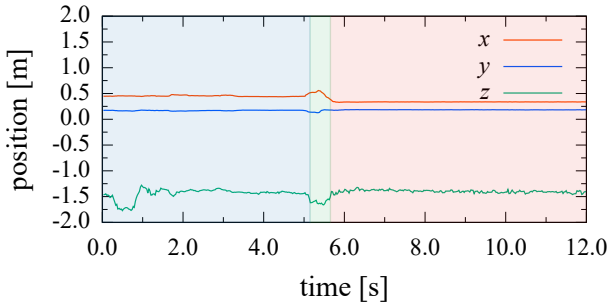


Fig. 4.　トラップ動作センシング実験の位置変化 (爪先).

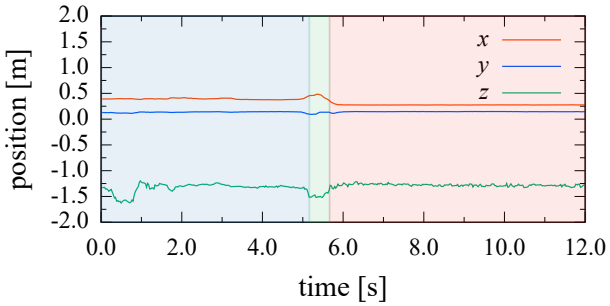


Fig. 5.　トラップ動作センシング実験の位置変化 (足首).

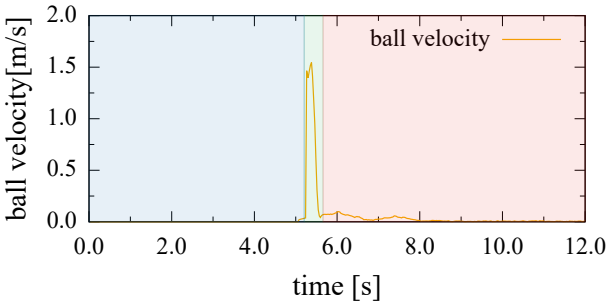


Fig. 6.　トラップ動作時のボール軌道測定の様子.

ここで，m はボールの質量，v_0, v_1, V_0, V_1 はトラップ前後のボールと人間の脚の速度を各々示す。

〈3･2〉　軌道生成手法　次に，人間とロボットにおける質量や慣性の違いを考慮したロボットへの軌道生成手法について説明する。トラップ動作をアプローチ局面 (非接触状態) とインパクト局面 (接触状態) に分割し，各局面に適した軌道を生成する。アプローチ局面 (非接触状態) においては，質量差の影響がないため，リンク長比や関節可動域などに基づく運動学的リターゲティングを行い，人間の予備動作を幾何学的に写像する。一方，インパクト局面 (接触状態) においては，質量差による反発挙動の違いを補償するため，質量比 k を用いた速度スケーリングを行う。

$$k = \frac{M_{rmred}}{M_{\mathrm{robot}}}, \quad V_{\mathrm{robot}} = kV_{\mathrm{human}}. \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

そして，この目標速度 V_{robot} を積分することで，インパクト局面におけるロボットの目標位置軌道を生成する。

4.　実　　験

開発したトラップ動作センシングシステムを用いてトラップ動作のセンシング実験を行った。実際に被験者がボールをインサイドでトラップする際の挙動を計測した。図 3–6 にトラップ時の人間の脚 (踵，つま先，足首) の座標変化およびボールの速度変化の結果を示す。

また，取得データからインパクト前後の下腿重心速度の変化を求めた。トラップ前後でのボールの速度変化はそれぞれ，$V_0 = 0.236\mathrm{m/s}$, $V_1 = -0.540\mathrm{m/s}$ であったため，(1) 式に代入し下腿の換算質量を $M_{\mathrm{red}} = 0.89\mathrm{kg}$ と導出した。

5.　おわりに

本研究では，サッカーにおけるトラップ動作センシングシステムを開発した。また，運動量保存則に基づく「下腿換算質量」による質量差を補償する新たなリターゲティング手法について検討した。運動学のみならず質量や慣性が異なるロボットにおいても，物体との衝突を伴うトラップ動作の再現が可能となると考えている。

謝　辞

本研究の一部は，JST グローバルサイエンスキャンパス事業によって行われたことを記し，関係各位に謝意を表す。

文　　献

（1） S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon, A. Valenzuela, H. Dai, F. Permenter, T. Koolen, P. Marion, and R. Tedrake, “Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for theatlas humanoid robot,” *Autonomous Robots*, vol. 40, no. 3, pp. 429–455, 2016.

（2） M. Murooka, T. Hoshi, K. Fukumitsu, S. Masuda, M. Hamze, T. Sasaki, M. Morisawa, and E. Yoshida, “TACT: Humanoid Whole-Body Contact Manipulation Through Deep Imitation Learning With Tactile Modality,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 10, no. 8, pp. 7819–7826, 2025.

（3） R. Rasch, S. Wachsmuth, and M. König, “A Joint Motion Model for Human–Like Robot–Human Handover,” *arXiv preprint arXiv:1808.09280*, 2018.

（4） 浅井武, 小林一敏, 松本光弘, “サッカーにおけるボールストップの力学的考察,” 日本体育・スポーツ・健康学会 体育学研究, vol. 26, no. 3, pp. 245–251, 1981.

©2026 IEE Japan

Wi-Fi チャネル状態情報を用いた活動推定における人・環境差のデータ拡張による影響低減

阿部　勇大*，市地　慶，杉田　典大，吉澤　誠（東北大学）

Data Augmentation for Mitigating Person and Environment-derived Degradation on Wi-Fi CSI-based Human Activity Recognition

Yudai Abe, Kei Ichiji, Norihiro Sugita, Makoto Yoshizawa (Tohoku University)

１．はじめに

日本における 65 歳以上の高齢者人口は 2024 年 10 月時点で総人口の約 29.3%を占め，2040 年には 34.8%に達すると予測されている(1). 高齢者の健康寿命増進・介護予防の効果的実現には，独居者を含め個々人の健康状態の悪化を家族や行政がいち早く把握することが望まれる．健康状態や生活の様子の把握には，死亡リスクと関連があるとされる身体活動量(2)が有力な情報として挙げられる. 日常的な身体活動モニタリングは，カメラ映像やスマートウォッチのような端末による生体信号を用いる手法・サービスが利用可能である. しかし, プライバシー侵害の懸念や端末装着の煩わしさといった課題が存在する.

プライバシーの問題が少なく端末装着が不要な手法として，家庭内の Wi-Fi 電波を二次利用する活動推定手法が提案されている(3)(4)．例えば，Yang らは Wi-Fi チャネル状態（Channel State Information：CSI）より，受信電波に含まれる身体活動に伴う変化成分から深層学習モデルによって歩行・走行といった活動を識別する手法を提案し，同一環境・人物の活動の違いを平均 98%以上の精度で分類可能と報告している(3)．Meneghello らは Wi-Fi CSI からドップラースペクトラムを抽出し，これを入力として深層学習モデルにより活動種別を推定する SHARP 法を提案し, より頑健で高精度な活動分類の実現可能性を示している(4). これら先行研究での実運用に向けた課題は，人物や環境が変化すると身体活動分類の精度が低下しうることである．実際，SHARP ではモデル訓練とは異なる人物・環境における活動分類の精度低下が生じており, 人物・環境に依らない汎化性能の向上が求められる. 一方, 多様な人物・環境での訓練データを大量に取得することは容易ではない.

本研究では人物や環境の違いに対して頑強な Wi-Fi 電波に基づく屋内行動推定手法の確立に向けて，Wi-Fi CSI から抽出されたドップラースペクトラムに対するデータ拡張手法の有効性を検証することを目的とする. 具体的には, 特定の人物・環境で取得したデータに対してデータ拡張を適用することで, 人工的に多様性と規模を増大させる. これにより，少ない訓練データを基にモデルの汎化性能を向上させ，訓練データとテストデータで人物・環境が異なる場合の推定精度低下を抑制することを目指す.

２．Wi-Fi CSI からのドップラースペクトラムに基づく活動推定手法とそのデータ拡張

本研究では，SHARP 法の研究(4)で使用され公開されている Wi-Fi CSI データセットおよび活動分類モデルに基づき，データ拡張による人物・環境差の影響低減を検討する．以下，SHARP 法における活動分類の流れを概説し，さらにデータ拡張とその実験評価方法について示す.

＜2.1＞ドップラースペクトラムを用いた活動推定　一般に，電波が伝搬する空間内で人が動作すると伝搬経路に変動が生じる．Wi-Fi 受信機器で取得可能な CSI は，搬送波の各周波数チャネルの電波伝搬特性を示す強度と位相の時系列信号によって構成されるため，人の動作に伴って生じる電波の伝達特性変化を反映する．ただし，CSI の位相成分は送受信機由来のオフセットを含むため, Lasso 回帰によるマルチパス分解を通じて位相オフセットを除去し，動作に由来する純粋な位相変化のみを抽出する．抽出した信号に短時間フーリエ変換を適用することで，時刻tにおいて速度vで動く物体からの電波反射成分の強さを表すドップラースペクトラム$X(v,t)$が算出される．ドップラースペクトラムでは，伝搬路上に存在する人体部位の動作速度や周期の違いによって速度軸v上でドップラー強度値が変化する．この変化は身体活動の種別により異なるが, Wi-Fi 送受信機の配置など測定環境が変化しても同じ活動種別であれば同様の特徴が維持されやすい利点を持つ．このドップラースペクトラムを畳み込みニューラルネットワークを用いて学習させることで，Empty, Walking, Running, Jumping といった身体活動の種別を分類することが可能となる.

＜2.2＞ドップラースペクトラムのデータ拡張手法　本研究では，データ拡張として，強度軸伸縮，速度軸伸縮，時間軸伸縮の 3 種類を適用した．以下では，各データ拡張手法について詳細を述べるとともに，ドップラースペクトラムにそれぞれのデータ拡張を適用した例を図 1 に示す.

©2026 IEE Japan

＜2.2.1＞強度軸伸縮　ドップラースペクトラム全体の強度値を変化させる手法である．被験者の体格や送受信機からの距離が異なる場合，人体からの反射波強度が変化し，スペクトラムの強度に差が生じる．このような人物・環境差を模擬するため，ドップラースペクトラムXに対して，一様分布$U(\cdot)$からサンプリングしたスケーリング係数αを乗じることで，拡張データX_{aug}を生成する．

$$X_{aug} = \alpha X,\ \alpha \sim U(0.9,1.1) \quad (1)$$

＜2.2.2＞速度軸伸縮　ドップラースペクトラムの速度軸（周波数軸）方向に伸縮を加える手法である．同じ歩行という動作であっても，手や足の振り方は体格や通り抜ける場所の広さによって異なり，それに伴って各速度のドップラー強度には差が生じると考えられる．このような差異を模擬するため，速度軸方向に線形補間を用いたリサンプリングを行い，伸縮率βを一様分布からサンプリングすることで拡張を行う．

$$X_{aug} = \mathrm{Resample}(X,\beta),\ \beta \sim U(0.9,1.1) \quad (2)$$

＜2.2.3＞時間軸伸縮　ドップラースペクトラムの時間軸方向に局所的な伸縮を加える手法である．同一の動作であっても人物・環境が異なると動作の持続時間や周期にばらつきが生じる．ドップラースペクトラムを時間軸方向に 5 個のセグメント$t^{(i)} \in \left[t_{start}^{(i)}, t_{end}^{(i)}\right], i = 1,2,\dots,5$ に分割し，各セグメントに対して独立な伸縮率$\gamma_i \sim (0.77,1.3)$を適用した後に再結合することで時間軸方向の拡張を行う．

$$X_{aug} = \left[X\left(v,t^{(1)}\right), X\left(v,t^{(2)}\right), \dots, X\left(v,t^{(5)}\right)\right] \quad (3)$$

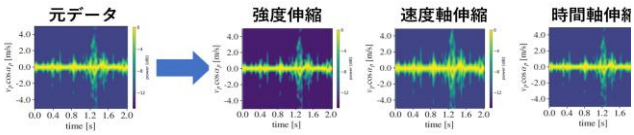


図 1 データ拡張の例

Fig.1. Examples of data augmentation

＜2.2.4＞データ拡張適用の条件　本研究では，上記 3 種類のデータ拡張を同時に適用した場合の行動分類精度を評価対象とし，拡張なしの場合と比較した．拡張後の訓練データ数は元の 3 倍となるように設定した．

＜2.3＞実験条件　本研究では，SHARP が公開する 5 つのサブセット $S_1(P_1@M_1)$，$S_2(P_1@M_1)$，$S_3(P_2@M_1)$，$S_4(P_1@M_2)$，$S_5(P_2@M_2)$を用いた．ただし，P_jは被験者j，M_kは環境kを示す．各サブセットに含まれる約 120 秒分のドップラースペクトラムを時間方向に分割し，訓練，バリデーション，テストの比率が 6：2：2 になるようにした．データ分割および学習の初期値を変更した上で 20 回の試行を実施し，各条件における推定精度の平均値を求めた．

３．結果と考察

図 2 にデータ拡張無しの場合と，3 種類のデータ拡張を同時に適用した場合の推定精度の比較を示す．

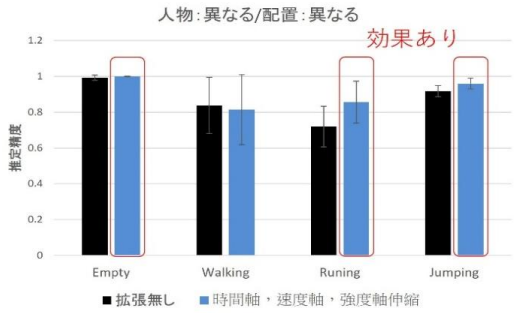


図 2　データ拡張の有無による精度の比較

Fig. 2. Comparison of accuracy with and without data augmentation

Empty, Running, Jumping の各動作において，データ拡張適用時に推定精度の向上が確認された．一方で，Walking に関しては，データ拡張による明確な改善は見られなかった．強度伸縮，速度軸伸縮，時間軸伸縮を同時に適用したデータ拡張は，被験者差および環境差が同時に存在する条件下において，一部の動作で推定精度の向上に寄与することが示された．特に Running および Jumping では，動作速度や動作強度のばらつきが大きいため，速度軸および時間軸方向の変形を含む拡張が有効に機能したと考えられる．また，強度伸縮により反射波強度の個人差が模擬され，人物差および環境差の影響が緩和された可能性がある．一方，Walking においては，データ拡張による明確な性能向上は確認されなかった．これは，Walking が比較的低速かつ周期性の高い動作であり，元データに含まれる速度分布や時間構造のばらつきが小さいため，拡張による多様性付与の効果が限定的であったことが一因と考えられる．以上より，提案するデータ拡張手法の有効性は動作特性に依存し，すべての動作に対して一様ではないことが明らかとなった．今後は，動作ごとに適切な拡張手法や拡張強度を選択する適応的なデータ拡張の検討が課題である．

４．おわりに

本研究では，Wi-Fi CSI に基づく屋内活動推定において，データ拡張による人物差および環境差の影響低減を検討した．その結果，強度伸縮，速度軸伸縮，時間軸伸縮を同時に適用することで，一部動作での推定精度向上が確認された．

文　献

(1) 内閣府：高齢社会白書，サンワ，全国官報販売協同組合 (2025)
(2) 国立研究開発法人国立がん研究センター社会と健康研究センター予防研究グループ：身体活動量と死亡との関連について，https://www.ncc.go.jp/jp/cis/divisions/epi/index.html (参照 2023-12-12)
(3) J. Yang *et al.*: EfficientFi: Towards Large-Scale Lightweight Wi-Fi Sensing via CSI Compression, IEEE Internet of Things Journal, 9, 15, 13086–13095 (2022)
(4) F. Meneghello *et al.*: SHARP: Environment and Person Independent Activity Recognition With Commodity IEEE 802.11 Access Points, IEEE Trans. Mobile Computing, 22, 10, 6160–6175 (2023)

©2026 IEE Japan

多バンド赤外カメラを用いた火山噴煙における日量 100–600 トンの SO_2ガス濃度分布計測

實渕　哲也*（防災科学技術研究所）

Measurement of SO_2 Gas Concentration Distribution in Volcanic Plumes with SO_2 Emission Rates of 100–600 Tons per Day Using a Multi-Band Infrared Camera

Tetsuya Jitsufuchi *(NIED)

１．まえがき

防災科学技術研究所（防災科研）では，2016 年度より，国の次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 次世代火山研究推進事業 課題Ｂサブテーマ２ - ２：「火山表面現象遠隔観測技術の開発」を実施中である．これまでに火山の表面現象（温度，ガス濃度分布）の面的観測手法として，多バンド赤外カメラから成る装置（表面現象撮像カメラ；Surface Phenomena Imaging Camera : SPIC）を開発した(1)。本報では，SPIC の試験観測で得た火山噴煙中の低濃度（日量 100–600 トン）の SO_2ガス濃度分布計測の結果を示す。

２．SPIC の装置構成と性能

SPIC は，異なる波長特性（バンド）を有する内蔵型光学フィルターを備えた 4 台の赤外カメラ（カメラ 1，2，3，4）から構成される多バンド赤外カメラである。カメラ 1 は 7500－14000 nm，カメラ 2 は 9300－14000 nm，カメラ 3 は SO_2 吸収帯（8650nm 近傍）に一致する 7700－9500 nm（または 8110-9500nm，7950-9300nm），カメラ 4 は SO_2 吸収のない 10300－12500nm の領域の輝度温度を測定する。SO_2 の検出はカメラ 3 で行う。カメラ 3 は冷却型（7700－9500 nm または 8110-9500nm）または非冷却型（7950-9300nm），他は非冷却型の焦点面アレイ素子（FPA）を採用している。SO_2 検出用のカメラ 3 は約 0.1K（冷却），約 0.3K（非冷却）の NETD を達成できる。 各カメラは，30fps でフレーム同期データを取得する。また，耐環境型（IP54）としている。

３．SPIC による火山試験観測と考察

本装置の機能の実証の為，SPIC（冷却型のカメラ 3，カメラ 1，4）による火山試験観測（浅間山噴煙観測）を 2023 年 11 月 27 日に実施した。計測は浅間山山頂の北 3.8km 地点の浅間園より実施した。観測ジオメトリと大気条件，SO_2 濃度を考慮した放射伝達シミュレーションによる，カメラ 3 の SO_2 濃度（0～50ppmv）に対する輝度温度応答予測を Fig.1 に，実際の観測結果の一例を Fig.2 に示す。これらより，計測された輝度温度分布は，SO_2 ガスの発光を捉えた結果であり，その濃度は約 0～3 ppmv，日量約 100～600 トンと推定された。また，この値は同時期の気象庁の DOAS 観測の結果と良い一致を示し，これまでの観測(2)より，1 桁低い SO_2 ガス放出量の火山活動状況における，SPIC の SO_2 ガス濃度分布計測機能が実証できた。

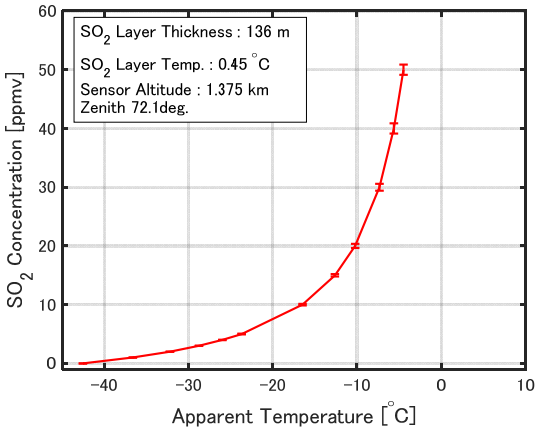


図１　SPIC の冷却型カメラ 3 の輝度温度値と浅間山噴煙中（3.8km 先）の SO_2 ガス濃度との関係のシミュレーション
Fig.1. Simulated relationship between brightness temperature and SO_2 concentration in the Asama volcanic plume for SPIC's cooled Camera 3, assuming an observation distance of 3.8 km.

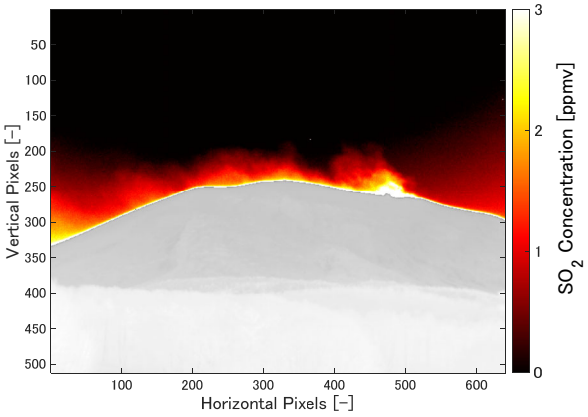


図２　SPIC の冷却型カメラ 3 の輝度温度観測値から推定した浅間山噴煙中の SO_2 ガス濃度分布（3.8km より観測）
Fig.2. SO_2 gas concentration distribution in the Asama volcanic plume, estimated from brightness temperature observed by SPIC's cooled Camera 3 from an observation distance of 3.8 km.

文　献

(1) T Jitsufuchi.: Development of an optical multispectral remote sensing system for measuring volcanic surface phenomena -Promotion Project for Next Generation Volcano Research B2 (subtopic2-2), J. Disast. Res., Vol.14, No.5, pp. 728 – 743, (2019).
(2) 實渕哲也：令 7 電気学会全大，3-065

©2026 IEE Japan

感性評価と加速度計測に基づく スニーカーデザインの UX 構造分析

梅宮　麻陽*，南雲　健人，野澤　昭雄（青山学院大学）

UX Structural Analysis of Sneaker Design Based on Kansei Evaluation and Accelerometer Measurements

Asahi Umemiya,　Kent Nagumo,　Akio Nozawa (Aoyama Gakuin University)

１．研究背景

近年，製品の購入判断においては，価格や機能に加え，「その製品を使う自分」を想起させる感情的価値が重視されている。UX 研究においても，使用前の期待や感情が体験の質に影響を与えることが指摘されており，感性的価値の高い製品では，視覚的な第一印象が体験形成に関与すると考えられている(1)。スニーカーは機能性とデザイン性を併せ持ち，使用前の期待と着用体験との関係を検討するのに適したプロダクトである(2)。一方，従来の UX 研究は主観評価に依存しており，歩行などの身体行動に表れる体験価値を十分に捉えていない。歩行はスニーカーの UX が無意識に表出する行動である。そこで本研究では，歩行中の動作を客観的に捉える手段として加速度計測を導入し，感性評価と歩行加速度の両面から，使用前の期待と着用時 UX との関係を分析し，使用前段階における UX 推定の可能性を示すことを目的とする。

２．実験方法

本研究では，同一ブランドから価格帯およびフォルムの多様性を考慮して選定した20種類のスニーカーを評価対象とした。Web アンケートでは，各スニーカーの正面および側面の製品画像を提示し，第一印象を自由記述形式で収集し，計 540 件の感性データを得た。これらの自由記述と素材・フォルム・配色などの視覚的特徴をもとに分析を行い，20 種類のスニーカーを 8 つのテイスト（テック，クラシック，アーバン，ボールド，ポップ，ハイブリッド，エレガンス，ラギッド）に分類した。また，自由記述から抽出した印象語をもとに，UX に関わる 33 項目の評価軸を設定した。評価実験は 2 段階で実施し，事前印象評価では画像提示による 20 項目の SD 尺度，着用時心理評価では実着用後に 19 項目の SD 尺度で評価した。実験は 3 日間に分けて行った。

３．解析手法

主成分分析と重回帰分析による二段階の多変量解析を行った。まず，使用時心理応答に関する 19 項目の評価データに主成分分析を適用し，主要な心理応答軸である PC1 および PC2 を抽出した。次に，PC1・PC2 の得点を目的変数，事前印象評価で取得した 20 項目の SD スコアを説明変数として重回帰分析を行い，事前印象が UX に与える影響を定量的に評価した。

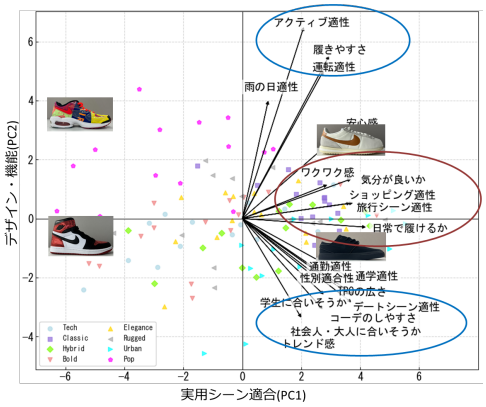


図１　事前印象評価に基づく主成分分析結果

４．結果及び考察

本稿では，着用時心理評価実験で得られた 19 項目に対する主成分分析の結果を報告する。図 1 は主成分得点の散布図であり，横軸は第一主成分（PC1），縦軸は第二主成分（PC2），図中の矢印は主成分負荷量を示す。第一主成分は，「気分が良いか」「日常で履けるか」などが正に寄与した。このため，スニーカー使用時の良好な気分と行動喚起を示すポジティブ行動であると解釈した。第二主成分は，「アクティブ適正」「履きやすさ」などが正に寄与（機能重視）し，「トレンド感」「コーデのしやすさ」などが負に寄与（デザイン重視）した。このため，PC2 はスニーカーのデザインと機能への関連性を示すと解釈した。総じて，スニーカー使用時の心理応答において，「ポジティブ行動」と「デザイン・機能」が重要な構成成分として抽出された。

５．まとめ

スニーカー評価は感性や嗜好に依存する一方，場面適合性には機能性・デザイン・快適性のバランスが重要であることが示された。本研究は，感性（事前印象）から使用体験（UX）を推定するための基礎的知見を示すものである。

文　献

(1) Norman, D. A.:　Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things, Basic Books, New York, pp.1-287, 2004.
(2) Kawabata, S., and Niwa, M.: Fabric performance in clothing and clothing manufacture, 80, pp.19–50, 1989. 2007.

©2026 IEE Japan

AI ロボットバーテンダーコンビによるメインバーテンダーサポートシステム

後藤　礼旺*，神戸　英利（東京電機大学）

Main Bartender Support System Featuring an AI Robot Bartender Duo

Reo Goto, Hidetoshi Kambe (Tokyo Denki University)

１．はじめに

近年,生成AIが発展を遂げて分野に関わらず普及したことにより,多くのモデルが台頭して場所を問わず幅広く利用されている.しかし,日本の生成AIの普及率は先進国に比べて低いのが現状である.また,内閣府が提唱した Society5.0 では,「ロボットや自動運転車などの支援により,人の可能性がひろがる社会”」[1]が含まれており,Society5.0 においてロボットが重要な要因であることがわかる.ヒューマノイドが議論可能であった場合,ホワイトボードや黒板などの人類が使用してきた道具を議論の充実のために使用することができるようになるが,原稿のヒューマノイド等のロボットにおいては会話可能であっても議論可能ではないため,議論可能なAIと動作可能なロボットの紐付けが議論を充実させていくために必要な課題であると言える.

２．目的

人と複数生成AIによる発話とヒューマノイドを用いたディスカッションの実現性と実用性を検討する.本研究ではLLM（Large Language Model）を,シングルボードPCを用いて使用することで発話とヒューマノイドを用いた複数の生成 AI と人間による議論を実現する.また, バーにて趣向にあった種類を提案する業務を通して議論の実用性を検討する.

３．提案手法

LLM 間での通信は用いず,複数の生成 AI と人間による議論をヒューマノイドのマイクとスピーカーによるやり取りのみで行うことで発話とコミュニケーションロボットを用いたディスカッションの実現性を検討する.LLM などの会話にまつわる処理はシングルボード PC,ヒューマノイドの動作制御に関する処理は制御用のマイコンを用いて行う.発話とヒューマノイドを用いた生成 AI 同士の議論を実現するにあたり,実装するヒューマノイド単体のシステム概要図を図１に示す.

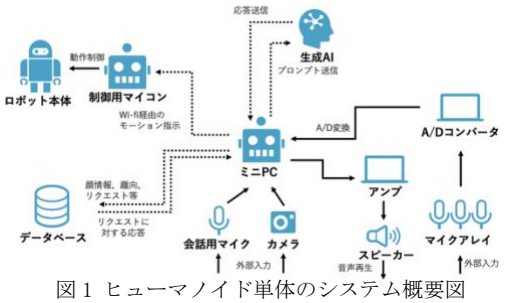


図１ ヒューマノイド単体のシステム概要図
Fig.1. System Overview Diagram for the Humanoid Robot Unit

シングルボードPCが会話機能の制御を担い,マイクから取得した音声をAPIにて送信し,LLMからの応答音声を取得しスピーカーにて再生する.複数の話者がいる環境での使用が想定されるため,マイクアレイを用いた音源定位による話者識別を行う.また,バーにて趣向にあった種類を提案する業務をヒューマノイドコンビが行うことで,ディスカッションの実現性と業務遂行による実用性の検討を行う.

４．実装

＜4・1＞生成 AI 同士による実現性検討　　人と複数生成AIによる発話とヒューマノイドを用いたディスカッションの実現性と実用性を検討するにあたって,生成 AI 間の議論における発話とコミュニケーションロボットを用いたディスカッションの実現性を検討した.マイクとスピーカーのみを用いてやり取りを行えるコミュニケーションロボットを実装し,実装した2体のコミュニケーションロボットを用いて生成AI間の発話とコミュニケーションロボットを用いた実現性の検討を行った.議論手法について図２に示す.

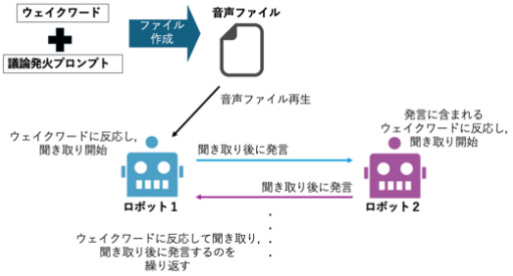


図２　議論手法図
Fig.2. Discussion Method Diagram

©2026 IEE Japan

発話とコミュニケーションロボットを用いた実現性の検討にあたり,実装したコミュニケーションロボット単体の実装システム概要図を図３に示す.

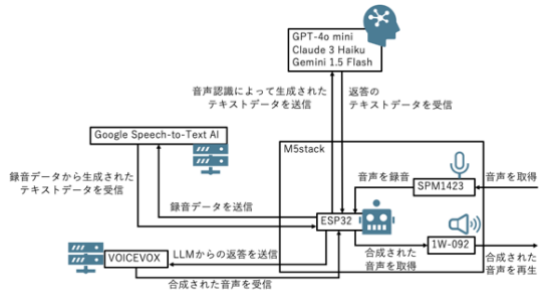


図３ コミュニケーションロボット単体の実装システム概要図
Fig.3. Implementation System Overview Diagram for Communication Robot Unit

ESP32 が一連の制御を担い,M5 Core2 内に搭載されているマイク SPM1423 から取得した音声を音声認識 API である Google Speech-to-Text AI にてテキストに変換し,GPT-4o mini, Claude 3 Haiku, Gemini 1.5 Flash のいずれかからの応答を,音声合成 API である Web 版 VOICEVOX API (高速) を通じて音声に変換して M5 Core2 内蔵のスピーカー1W-092 にて再生した.一つの議題につき, 8 種類の事前出力プロンプト,8 種類の議論発火プロンプト,8 種類の事後出力プロンプトを各々の LLM に対して用いた.また,モデルごとにスコアにばらつきがあることが知られているため評価モデルも複数使用し,対応した出力同士の類似度を,モデルを用いて算出した.

＜4・2＞会話にかかる機能の実装　本研究で使用するヒューマノイド作成にあたり,ヒューマノイドの会話機能を実装した.Raspberry Pi 5 にて,マイクから取得した音声を API にて送信し,GPT Realtime API からの応答音声を取得しスピーカーにて再生した.また,複数の話者がいる環境で対話を行うため, SPU0414HR5H-SB,MCP3208,PAM8012,ダイナミックススピーカーを用いて音響用基盤を作成した.

5. 評価

＜5・1＞評価概要　実装したコミュニケーションロボット２体を用いて音声のみのやり取りにて議論を行った.議題は「みかんの特徴」,「神話におけるりんごの役割」,「日本の出生率の変化」の３種類を用いた.
得られた事前出力と事後出力において類似度を算出し,事前出力に対して事後出力の類似度が上昇しているかを評価した.この際,Sharpe Score を用いることで入力の違いと評価モデルによる出力のばらつきを考慮した.

＜5・2＞評価結果　「みかんの特徴」,「神話におけるりんごの役割」,「日本の出生率の変化」における Sharpe score を表 1,表 2,表 3 に示す.

表１ 「みかんの特徴」における評価結果
Table 1. Evaluation Results for “Characteristics of Mandarins”

	GPT Claude	Claude Gemini	Gemini GPT
事前出力	0.6916	0.7091	0.7009
事後出力	0.7731	0.6614	0.7229

表２ 「神話におけるりんごの役割」における評価結果
Table 2. Evaluation Results for “The Role of the Apple in Mythology”

	GPT Claude	Claude Gemini	Gemini GPT
事前出力	0.7693	0.7485	0.7927
事後出力	0.8513	0.7851	0.7792

表３ 「日本の出生率の変化」における評価結果
Table 3. Evaluation Results for “Changes in Japan's Birth Rate”

	GPT Claude	Claude Gemini	Gemini GPT
事前出力	0.7981	0.8283	0.7930
事後出力	0.8045	0.7931	0.8104

GPT と Claude 間の議論においてはいずれも Sharpe score の向上が見られたが,Gemini が参加した議論においては一様に向上したとは言えない結果となった

6. 考察

＜5・1＞Sharpe score の要因　本研究では,GPT と Claude を用いた議論は可能であるが Gemini を用いた議論は課題が残るという結果となった.考えられる原因の一つとして,Gemini のリクエスト本文の構造が他の二つの LLM と比較して複雑であることにより,リクエストを送る際の負荷が大きくなり,Gemini 本来の性能が発揮できなかったことが考えられる.

＜5・2＞議論内容に対する課題　知識の共有を議論の定義とした上で AI 間のディスカッションの実現が可能であることを明らかにしたが,新しいアイデアの創出などの議論においては言及していない.現在,様々な LLM のベンチマークが登場しているがこれらは LLM 単体の性能にのみ有効であり,LLM 間における相互作用の定量的な分析には適していない.

7. まとめと今後の課題

知識の共有を目的とする議論において生成 AI 間の発話とコミュニケーションロボットを用いたディスカッションは実現可能であることを示すことができた.今後の展望では,会話用マイク並びにデータベースの選定を行い,保存したデータの活用について具体的な仕様を決定していく.評価手法については, 生成 AI 間の議論における発話とコミュニケーションロボットを用いたディスカッションの実現性を検討した際に用いた手法や実店舗の経営に用いられている指標などをもとに検討していく.

文　献

(1)Society5.0 とは,
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/society5_0.pdf,
内閣府

©2026 IEE Japan

心拍位置を条件とした拡散モデルによる心電図波形生成と MMD 距離を用いた品質評価

鴨澤　秀郁*，田中　元志（秋田大学）

ECG Generation Using Diffusion Model Conditioned on R-wave Positions and Its Quality Evaluation by MMD Distance

Hidefumi Kamozawa, Motoshi Tanaka (Akita University)

１．まえがき

心房細動（Atrial fibrillation, AF）は脳梗塞などを引き起こす早期検出が重要な不整脈である。通常，AF であれば心拍間隔（R–R interval, RRI）は不規則となるが，まれに規則的な RRI をもつ特殊な AF が発生する場合がある。これまで筆者らは，畳み込みニューラルネットワークを利用し，この特殊な AF に対応する検出方法(1)を提案してきた。しかし，特殊な AF の症例は少なく，機械学習用のデータ不足が課題であった。そこで，データ拡張を目的に，心拍間隔に関する条件付き拡散モデルによる心電図（ECG）波形生成を検討した(2)。生成データの妥当性について，分類器を用いて生成波形を識別させる評価を行ってきたが，実心電図との定量的な比較は行っていない。

本検討では，生成波形と実データの分布間の類似性を評価する指標として，Maximum Mean Discrepancy（MMD）距離(3)を用いて生成品質の評価を行う。

２．心電図生成のための拡散モデル

図 1 に示すように，心拍（R 波）位置を指定するインパルス的信号と，正常（Sinus）／AF を示す数値ラベルを条件ベクトルとして与える条件付き拡散モデルを作製した。学習には，10 s のホルター心電図セグメント（Sinus: 10,000 個，AF: 10,000 個）を用いた。拡散タイムステップ数は 200，学習回数は 600 epoch とした。規則的な RRI をもつ AF 波形を生成した例を図 2 に示す。基線の不規則な動揺など，AF 固有の特徴が反映されており，定性的には良好に生成できていると考えられる。

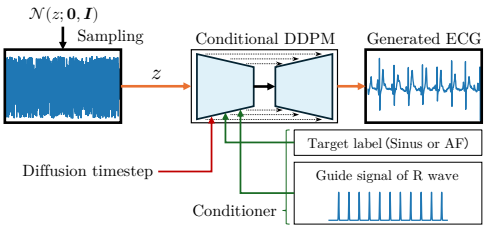


図 1　拡散モデルを用いた心電図生成の流れ

Fig. 1　Flow of generating ECG waveform using DDPM.

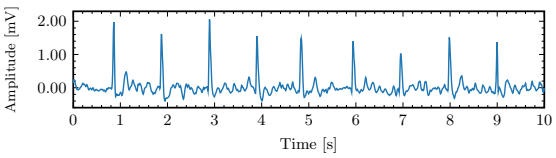


図 2　拡散モデルで生成した規則的 RRI をもつ AF 波形

Fig. 2　Example of generated AF waveform with regular RRI.

表 1　MMD の算出結果

Table 1　Calculation result of MMD.

Real data vs.	Class（Condition）	MMD（Ave.±SD）
Proposed	AF（Irregular RRI）	0.4547 ± 0.0371
	AF（Regular RRI）	0.2658 ± 0.0130
	Sinus	0.0065 ± 0.0021
Physical model(4)	Sinus	0.0302 ± 0.0104
Sinus vs. AF（Irregular RRI）		1.3293 ± 0.0165

３．生成波形の品質評価実験

生成波形と実際のホルター心電図データの分布間距離として MMD 距離(3)を算出する。MMD 距離は，データを高次元特徴空間へ写像した際の実データと生成データの平均の差に基づいて推定され，値が小さいほど両者の分布が近いことを示す。

心電図波形を学習済分類器(1)に入力して得られる中間特徴ベクトルを用いて，実データおよび生成データからそれぞれ 500 サンプルを 5 回抽出し，MMD を算出した結果（平均値±標準偏差）を表 1 に示す。比較のため，一般的な心電図の物理モデル(4)による MMD も併せて示す。また，参考値として異なるクラス（Sinus と AF）のデータ間における MMD も算出した。

評価実験の結果，Sinus では非常に小さい MMD が得られ，物理モデルによる生成波形と比較しても小さい値を示した。一方，AF における MMD は Sinus よりも大きい値となったが，異なるクラス間の MMD と比較すると約 1/3 程度にとどまっており，実データの特徴分布を一定程度反映した生成が可能であることが示唆される。

４．むすび

拡散モデルによる生成心電図波形と実データとの MMD 距離を算出した結果，良好な生成品質が確認された。今後は，生成波形を活用して AF 検出の機械学習に利用する予定である。

文　献

(1) H. Kamozawa and M. Tanaka: Adv. Biomed. Eng., **14**, 46–53 (2025)
(2) H. Kamozawa and M. Tanaka: Int. Conf. Mater. Eng. Resour. (Akita, Japan), A2-P19 (2025)
(3) A. Gretton, et al.: J. Mach. Learn. Res., **13**(25), 723–773 (2012)
(4) PE. McSharry, et al.: IEEE Trans. Biomed. Eng., **50**(3), 289–294 (2003)

©2026 IEE Japan

PFC-NIRS と EEG を用いた神経血管カップリングに基づく安静時脳活動推定手法の検討

泉水　来樹*，福田　卓海，高橋　聖（日本大学）

Investigation of Resting-State Network Analysis Using Neurovascular Coupling from PFC-NIRS and EEG
Raiki Sensui, Takumi Fukuda, Sei Takahashi (Nihon University)

１．まえがき

日常環境における不注意やマインドワンダリング（以下 MW）の検出により，事故防止や作業効率向上が期待できる．これらの内的な認知状態には，デフォルトモードネットワーク（以下 DMN）と呼ばれる安静時脳活動ネットワークが神経基盤として存在する．DMN は機能的磁気共鳴画像法（以下 fMRI）や全脳を計測対象とした脳波（以下 EEG）や機能的近赤外線分光法（以下 fNIRS）を用いて計測や評価が行われてきたが，計測時の拘束性や装着負担の高さから実環境における応用は困難である．これに対し，前頭前野（PFC）を計測対象とする fNIRS は高い携帯性と低い拘束性を特徴として有しており，装着負担が比較的少ないため実環境における計測に適している．実際に先行研究では，PFC-NIRS を用いて MW の評価がされている(1)．しかしながら，計測領域が限定的であるため DMN の活性を検出することは困難である．そのため，従来の PFC-NIRS 単独では DMN コア領域である mPFC の賦活が報酬系や感情制御などを由来とするか DMN を由来とする神経活動であるかを分離できていないと考えられる．そこで本研究では，DMN 活性時に DMN 領域における血流動態と神経結合カップリング（以下 NVC）が認められている EEG のα波に着目する(2)．この EEG と NIRS のデータを併用し，隠れマルコフモデル（以下 HMM）を学習することで NVC に基づく DMN 状態を推定する手法を提案する．また，本研究では工学的応用に先立ち，PFC-NIRS のみで DMN を捉えられる可能性を明らかにすることを目的として，マルチモーダル解析により推定された DMN 状態が PFC-NIRS のみの情報で判別可能であることを検証した．

２．方法

＜2・1＞実験　　男子大学生 21 名（平均年齢 21.29 歳±0.72 歳）を対象に安静-タスク-安静-タスク-安静からなる各セクション 120 秒，計 10 分間の実験を実施した．被験者は DMN を誘発するための開眼安静および対照条件の認知タスクからなる 2 種類の課題に取り組む．なお，実験実施中は PFC-NIRS と EEG を着用した状態で椅子に着座し，極力動かないことを指示した．

PFC-NIRS には前額部を計測対象としている WOT-220（NeU 製）を用いた．図 1 に計測 CH の位置を示す．WOT-220 のサンプリングレートは 5Hz であり，全 16CH を対象に計測を行った．EEG は Unicorn hybrid black（g.tec medical engineering GmbH）を使用した．Unicorn hybrid black のサンプリングレートは 250Hz であり，計測部位は国際 10-20 法の基づき，Pz，PO7，Oz，PO8 とした．図 2 に計測 CH の位置を示す．参照電極および接地電極は，左右の乳様突起に配置した．なお，EEG の計測では記録時に 50 Hz のノッチフィルタと 0.1～30 Hz のバンドパスフィルタを適用した．

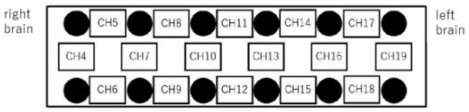


図 1　NIRS CH 位置
Fig 1.CH Position of NIRS

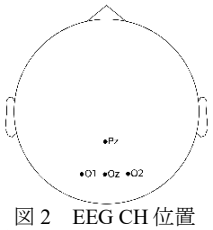


図 2　EEG CH 位置
Fig 2.CH Position of EEG

＜2・2＞前処理　　NIRS によって計測した Hb 信号に対し，生理的ノイズやトレンド成分を除去しつつ DMN 由来の低周波成分を抽出するために，多重解像度解析とハイパスフィルタを用いた信号再構成を行った．前処理の結果，最終的な解析帯域は 0.002 Hz ～ 0.04 Hz となった．EEG 信号については各 CH の信号からα波帯域（8-13Hz）を抽出後，ヒルベルト変換を行い振幅包絡線の信号を求めた．求めた全 CH の信号を平均化することで EEGαパワーの信号とした．また，神経活動と血流動態反応には時間的な遅延が存在するため，正準血行動態反応関数による畳み込み積分を EEGαパワーに対して行った．最終的に NIRS のサンプリングレートに合わせて 5 Hz にダウンサンプリング処理を施し，これを解析用データとした．

＜2・3＞隠れマルコフモデルの学習および分析　　脳活動の動的な変化を捉えるため，z スコア化した前処理済みの NIRS 信号（16CH）および EEGαパワーの時系列データを用い， HMM を構築した．推論は変分ベイズ推定を採用し

©2026 IEE Japan

た．また，比較検証として NIRS（16CH）のみを用いて同様の HMM を学習した．なお，両手法の学習における状態数Kは 3〜9 の範囲で各状態にて 10 回学習を実施し，ベイズ情報量規準（以下 BIC）による適合度評価と，試行間の再現性（以下 RC)がおよび mPFC の活性化を確認できる状態の存在を元に状態数を決定した．

学習後，Viterbi アルゴリズムを用いて脳状態系列を推定し，mPFC の賦活傾向かつ EEGαパワーとの有意な正の相関が確認された状態を，NVC に基づく DMN 状態と定義した[(2)]．なお，相関の閾値は fMRI および EEG を用いた研究に基づき r>0.3 とした[(3)]．さらに，NIRS-EEG モデルで推定された状態が NIRS 単独で判別可能か検証するため，LDA を行った NIRS-EEG を用いた HMM により推定された状態系列を正解ラベルとし，説明変数にはzスコア標準化を適用した全16CHのNIRS信号を用いた．なお，評価には反復 5 分割交差検証を採用し，判別精度の有意性は，置換回数を1000回とするパーミュテーションテストにより評価した．

３．結果および考察

NIRS-EEG を用いた各状態Kにおける学習の結果を表 1 に示す．表 1 より，Kが 7 において BIC の減少に加え，RC が 0.46 と局所的な極大を示した．これは，Kが 6 では同定不可能な脳活動をK が 7 においては推定可能であることを示唆している．この数理的な安定性に基づき解析対象をKが 7 の結果とした．図 3 にKが 7 において DMN 反応を確認できた状態の空間的 z スコア後の Hb 平均結果を示す．結果として， CH12，17，19 にて統計的に有意な賦活を確認した．また，CH12 に隣接する CH10，11，13 において賦活に至らなかったものの正の空間的 z スコアを確認した．さらに，EEGαパワーとの相関では CH10，11，13 にて閾値を超え，統計的に有意な相関を確認した（r>0.3，p < 0.05）．この結果より，外側 PFC（CH17, 19）の活性を含むものの，CH12 を活動の頂点として隣接領域に向かって緩やかに減衰する空間的な活動が形成されており， 空間的整合性による mPFC 領域の賦活傾向を確認した．加えて，DMN コア領域である mPFC 領域において EEG αパワーとの有意な相関を確認し，NVC に基づく DMN 反応を確認した．よって，NIRS-EEG を用いた HMM では DMN の推定が可能であると言える．

NIRS 信号のみを用いた学習の結果，表 1 に示すように状態数の増加とともに BIC の減少を確認した．また，Kが 7 にて RC の局所的な増加を確認したが，脳活動の分離が大きくなった結果，mPFC の賦活を示す状態を推定できなかった．そのため，RC が低下する直前で 0.485 となるKが 5 の結果を解析対象とした． Kが 5 にて推定された状態において，CH6，9 における統計的に有意な空間的 z スコアの減少を確認した．また，同状態は統計的に有意な結果に至らなかったものの CH11，12 の賦活傾向を確認した（p<0.1）．

表 1 状態数ごとの BIC・RC
Table 1.BIC and RC HMM State Numbers.

Model Selection Summary

K	BIC (NIRS+EEG)	RC (NIRS+EEG)	BIC (NIRS)	RC (NIRS)
3	-428.8	0.746	-397.0	0.775
4	-572.8	0.547	-530.0	0.629
5	-716.8	0.488	-662.8	0.485
6	-861.1	0.348	-795.6	0.428
7	-1,004.6	0.460	-928.4	0.438
8	-1,148.8	0.305	-1,061.4	0.400
9	-1,288.8	0.301	-1,194.2	0.394

*: p < 0.05, **: p < 0.01

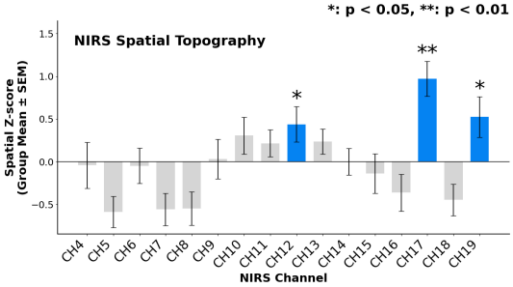


図 3 NIRS-EEG 条件下における結果
Fig 3. Results in NIRS-EEG Condition.

一方， EEGαパワーとの相関では閾値を超えて統計的に有意な相関を示す CH は確認できなかった．この結果より，NIRS 信号のみの HMM 学習では mPFC の賦活傾向および DMN と拮抗する外側部（CH6，9）の抑制を捉えることは可能であるが，その反応は NVC による DMN 反応を含んでおらず， DMN を基盤とする神経活動を捉えることが困難であると言える．

全 16 チャネルの NIRS 信号を入力とした LDA の結果，7 クラス分類における平均正解率は 35.70%であり，ランダム基準（14.29%）を上回る有意な結果を得た（p< .001）．このことから，NVC に基づく DMN 時刻の推定には EEGαパワーが現状必須であるが，PFC-NIRS はこれらの状態を判別する情報を有しており，PFC-NIRS に現れる DMN 反応を明らかにすることで PFC-NIRS 単体での DMN を基盤とする不注意の検出が可能となることを示唆している．

４．むすび

本研究では，PFC-NIRS の工学的応用に先立ち，不注意や MW の神経基盤である DMN を PFC-NIRS と EEG の併用により推定する手法を提案した．実験の結果，NIRS-EEG を用いた HMM において NVC に基づく DMN 反応を捉えることが可能であった．さらに，LDA の結果，PFC-NIRS は提案手法によって推定された脳活動の状態を判別可能とする情報を有していることが示唆された．今後は，DMN 活性時における PFC-NIRS の結合や時間的変化などを明らかにし，工学的な応用を目指す．

文　献

(1) Durantin G :Frontiers in Systems Neuroscience,Vol.9.(2015)

(2) Mo J:NeuroImage, 112-8 (2013)

(3) Goldman RI:Neuroreport, 2487-92,(2002)

©2026 IEE Japan

ドライバの血行動態指標に対する顔面熱画像の時間応答遅延に関する検討

坂崎 玲菜*，大山 翔之祐，郷野 英太郎，小山 詩織，南雲 健人，野澤 昭雄（青山学院大学）

An Investigation of the Temporal Response Delay of Facial Thermal Images to Hemodynamic Indices in Drivers

Reina Sakazaki, Syonosuke Ohyama, Eitaro Gono, Shiori Oyama, Kent Naumo, Akio Nozawa (Aoyama Gakuin University)

１．序論

運転支援システムの高度化に伴い，DMS (Driver Monitoring System) には，不注意検出に加えドライバの快適性やストレスといった多角的な内的状態の評価が求められる。本研究では，その評価指標として，ストレス対処様式に着目した。ストレス対処様式は，血行動態指標である，平均血圧 (Mean Blood Pressure: MBP)，心拍数 (Heart Rate: HR)，心拍出量 (Cardiac Output: CO)，全末梢血管抵抗(Total Peripheral Resistance: TPR)，一回拍出量 (Stroke Volume: SV)から判別可能である(1)。岡嶋らの研究によると，ドライバの状態評価において，ストレス対処様式の有用性が示されている(2)。

従来の血行動態計測手法である連続血圧計は，身体的拘束を伴うという課題がある。そこで，遠隔測定可能な心臓血管系指標である顔面熱画像に着目した。顔面熱画像は生理的変化を含む複数の温度分布が重畳するため，信号を少数の基底で表現できるスパースコーディングを用い特徴的パターンを抽出した。しかし，抽出された皮膚温変動は，熱伝導による遅延を含むため，血行動態指標とは時間的に同期しない。従って、抽出した特徴と血行動態指標との対応関係を明らかにするには，この応答遅延の把握が必要であり，本研究ではスパース表現に基づきその遅延特性を分析した。

２．実験方法

被験者は22歳～24歳の男性7名とした。実験は，室温24.0 ±1.0 ℃の対流の無い暗い実験室で行った。実験プロトコルは，呼吸統制区間・課題区間・安静閉眼区間で構成し，課題区間ではレース運転・狭路運転・単調運転の 3 条件を実施した。計測指標は，血行動態 (MBP，HR，CO，TPR)と顔面熱画像である。血行動態は，連続血圧計 (Finometer MIDI, Finapres Medical Systems B.V 社製)から計測した。顔面熱画像は，赤外線サーモグラフィカメラ (Boson, FLIR Systems, Wilsonville, OR, USA) から計測した。

３．解析方法

呼吸統制区間終盤の 30 秒をベースラインとし，運転課題区間に Wilcoxon の符号順位検定を実施した。有意差 ($p < 0.001$) が認められた区間を抽出し，MBP・HR・CO が有意に増加した区間を能動的対処，MBP・TPR が増加し CO が減少した区間を受動的対処とし，呼吸統制区間の終盤 30 秒を対処なしとしてラベルを付与した。顔面熱画像は，顔面形状の個人差をなくすため，標準顔面熱画像に変換した(3)。各被験者の課題区間から得た 300 枚の顔面熱画像からスパースコードを抽出し，血行動態指標（MBP, CO, TPR）との間で相互相関分析を行った。各基底において相関が最大となる遅延時間を算出し，相関係数の絶対値を重みとした加重中央値によって応答遅延時間を決定した。さらに，遅延補正の有効性を検証するため，補正の有無による判別精度の比較を行った。データ数は被験者 7 名分に設定し，各ストレス対処様式の画像を 50 枚ずつ抽出することで，総画像枚数を 1050 枚とした。モデル構築には SVC を用い，説明変数をスパース係数，目的変数をストレス対処様式ラベルとして，7 分割交差検証を行った。

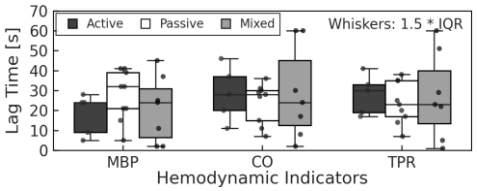


図 1 ストレス対処様式別の顔面皮膚温応答遅延時間
Fig.1. Response Latency in Facial Skin Temperature

4．結果および考察

相互相関分析から得られた顔面皮膚温分布の応答遅延時間は概ね 5～45 秒程度であった。MBP における遅延時間は，能動的対処では短く，受動的対処では長い結果となった。能動的対処の遅延は，CO の上昇に寄与する応答であるため，比較的早く顔面皮膚温分布変動に現れる傾向があり，受動的対処の遅延は，TPR の上昇に寄与する末梢血管抵抗によるものであるため，反応に時間を要すると考えられる。SVC による分類精度は，遅延補正なしの 54.0%に対し，補正ありでは 58.2%と 4.2%向上した。以上より，血行動態に対する皮膚温変動の応答遅延の存在が示唆された。

5．結論

本研究では，スパース表現を用いて抽出した特徴量に基づき，ドライバの顔面皮膚温分布変動における応答遅延を分析した。応答遅延時間は概ね 5～45 秒であることが分かった。血行動態の変動に対し，皮膚温変動の応答には遅延があることが示唆された。

文　献

(1) 藤澤清・柿木昇治・山崎勝男:「新生理心理学」, 北大路書房(1998)
(2) 岡嶋智朗・南雲健人・野澤昭雄:「走行環境や運転特性に起因するドライバのストレス対処様式の分析」, 自動車技術会論文集, Vol.56, No.1, pp.48-54(2025)
(3) K Nagumo, K Oiwa, and A Nozawa: “Spatial normalization of facial thermal images using facial landmarks”, Artificial Life and Robotics, Vol.26, No.4, pp.481-487(2021)

©2026 IEE Japan

眼鏡および髭による被覆を考慮した顔面熱画像による体調推定モデリング

鈴木　智恵*，北脇　千歳，高野　聖仁，南雲　健人，野澤　昭雄（青山学院大学）

Condition Estimation Modeling Using Facial Thermal Images Considering Occlusions

Tomoe Suzuki, Chitose Kitawaki, Masahito Takano, Kent Nagumo, Akio Nozawa (Aoyama Gakuin University)

１．研究背景

建築現場の労働災害防止には，作業員の日常的な体調変化を迅速に把握することが不可欠であり，遠隔かつ低負荷な判別手法の確立が求められる。非接触計測が可能な顔面皮膚温度分布は，自律神経活動を反映して変動するため(1)，これを利用した体調判別システムが期待されている。しかし，不良時の温度パターンは個人差や症状の種類によって多岐にわたるため，あらゆる不調状態を網羅的に学習させた汎用的なモデルの構築は困難である。そこで本研究室では，正常な健康状態からの統計的な逸脱を不調として捉える異常検知アプローチを採用し，汎用的な体調判別手法の確立を目指してきた(2)。この方針のもと，実社会への実装を念頭に建設現場での実証実験を継続しており，得られた膨大なデータに基づき解析を行ってきた。しかし，現場では眼鏡や髭による顔面の被覆が多く見られ，これらが熱画像上の局所的な温度欠損を招き，異常度を過大に算出させる誤検知が大きな課題となっている。一方で，皮膚温度変化は顔面全体に波及することから，被覆領域を除外しても十分に体調推定が可能であるとの仮説を立てた。本研究では，画像内の被覆領域を特定・除外したうえで温度分布を評価するモデルを構築し，被覆の影響を抑制した高精度な体調判別の実現を目的とする。

２．実験方法

11 月から 8 月の 10 か月間，建設現場の作業員 286 名（16～73 歳，平均 43.0±12.9 歳）を対象に，顔面熱画像と体調アンケートを収集した。期間中の近傍気温は-0.9℃から 26.6℃（平均 10.9±6.3℃）であった。計測装置は，赤外線サーモグラフィカメラ（Boson，FLIR Systems；温度分解能 0.1℃，256×320 pixel）とタッチモニターで構成し，現場入り口の半屋内環境に設置した。体調は 4 段階の自己申告により評価し，被験者の負担軽減のため始業・終業時の任意のタイミングで実施した。

３．解析方法

本研究では，空間標準化，環境補正，Local Moran's I（LMI）統計量の算出，および k 近傍法（k=3）による異常検知モデルを用いて体調推定を行った。まず，顔形状の個人差を正規化するため熱画像を空間標準化し，環境補正後の画像から空間的相関を示す LMI 統計量を特徴量として算出した 。次に，眼鏡や髭による影響を検討するため，20×20 pixel の標準画像から被覆領域を除去したモデルと除去しないモデルを構築した。被覆条件は「眼鏡」「髭」「両方」の 3 パターンとした 。学習には「良好」データを，テストには良好および「不良」データを用い，AUC と TNR により評価した 。

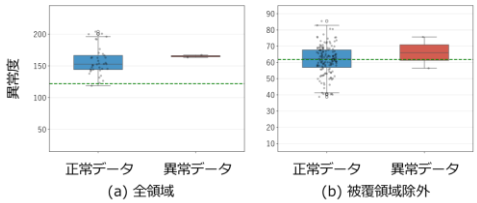


図 1 眼鏡着用者に対する異常検知の結果
Fig.1. Results of anomaly detection for glasses wearers

４．結果及び考察

図 1 に眼鏡着用者に対する異常検知の結果を示す。被覆領域を除外する前の TNR は 0.03 であったが，被覆領域を除外した後は TNR が 0.49 となり，異常度が過大に算出されることは減少した。同様に，髭がある人，および眼鏡をかけていて髭がある人の TNR も増加傾向が見られた。これにより，被覆領域を除外することで，体調良好データを正しく識別した割合が向上し，被覆領域がモデルの識別精度に与える悪影響が軽減したと考えられる。

５．まとめ

本研究では，顔面熱画像から眼鏡や髭などの被覆領域を除外したデータを用いて，体調推定モデリングを構築した。その結果，モデルの評価指標である TNR が向上した。このことから，被覆領域が異常度の過大な算出に与える影響が軽減され，モデルの識別性能が改善したと考えられる。

文　献

(1) S. Ioannou, V. Gallese, and A. Merla : “Thermal infrared imaging in psychophysiology: Potentialities and limits”, Psychophysiology, Vol.51, No.10, pp.951-963 (2014)

(2) C. Kitawaki, M. Takano, K. Nagumo, B. Lamsal, and A. Nozawa : “Feature Extraction for Health Condition Analysis from Facial Thermal Images Considering Spatial Autocorrelation”, IEEJ Trans. EIS, Vol.146, No.1, pp.26-31 (2026)

©2026 IEE Japan

顔面熱画像の局所空間自己相関特徴を用いた慢性ストレス判別モデル

湊　温媛*，門倉　昌矢，高野　聖仁，南雲　健人，野澤　昭雄（青山学院大学）

A Chronic Stress Classification Model Using Local Spatial Autocorrelation Features of Facial Thermal Images

Haruhi Minato, Masaya Kadokura, Masahito Takano, Kent Nagumo, Akio Nozawa (Aoyama Gakuin University)

１．研究背景

慢性的なストレスはうつ病や心血管疾患のリスク因子であり，日常的に計測可能な評価手法が求められている。従来，心理アンケートやコルチゾールを用いた評価が提案されてきたが，前者は回答負担が大きく，後者は検体管理や専門的分析を要するため日常利用には適さない。そこで本研究では，日常的に取得可能な顔面熱画像に着目した。

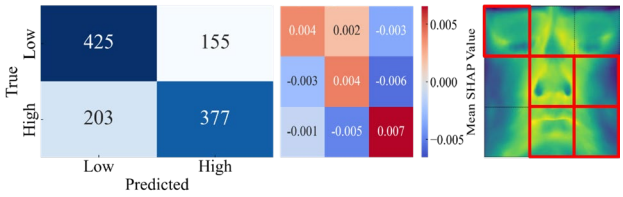
顔面熱画像は顔面皮膚表面の温度分布を定量化したものであり，皮膚温は自律神経活動により調節される血流変化を反映することから，自律神経機能の指標として用いられている。心的ストレスは自律神経機能に影響を及ぼすため，顔面熱画像は慢性ストレスの客観的指標として有用である。また，皮膚温分布は熱伝導や血流の連続性により高い空間的自己相関を示すが，慢性ストレス下では交感神経活動の亢進によりこの空間的連続性が低下すると考えられる。先行研究では独立成分分析（ICA）を用いた手法が報告されている(1)が，空間的依存性を十分に考慮できない可能性がある。そこで本研究は，顔面熱画像の局所空間自己相関特徴を用いた慢性ストレス判別モデルの構築を目的とする。

２．実験方法

本研究では，慢性ストレス状態に近い状況下のデータ取得を目的として，学会発表の前後に計4回の実験を実施し，心理アンケートおよび顔面熱画像を取得した。赤外線サーモグラフィカメラ（FLIRA35，FLIR）を用い，サンプリング周波数 1 Hz で，各実験につき 180 枚の画像を取得した。被験者は 21～27 歳の健康な成人男女 15 名とし，室温 23.00 ± 1.50 ℃，対流のない実験室で実施した。実験は 30 分間の室温順化およびアンケート回答と 3 分間の安静閉眼から構成し，実験前日に 6 時間以上の睡眠を確保し，実験 2 時間前から食事・喫煙・運動・睡眠を禁止した。

３．解析手法

顔面熱画像は被験者間の顔形状差を低減するため空間的標準化を行い(2)，各画素における空間的自己相関指標として Local Moran's I 統計量（LMI）を算出した。心理アンケートには Wilcoxon の符号順位検定によって有意差がみられた STAI の状態不安尺度を慢性ストレススコアとして用いた。



（a）混同行列　　（b）各顔面領域のSHAP値と，SHAP値の高かった上位5領域

図 1 慢性ストレススコアの閾値を 43 としたときの，判別モデルの混同行列及び各顔面領域の SHAP 値
Fig.1. Confusion matrix of the classification model and SHAP values for each facial region when the threshold for the chronic stress score is set at 43

目的変数を慢性ストレススコア，説明変数を各画素の LMI とし，閾値によりストレスレベルを High・Low の 2 群に分類する判別モデルを構築した。モデル構築には 15 分割交差検証を用い，評価時にはデータ数の多い群を間引いた上で判別精度を算出した。

４．結果及び考察

図 1 に慢性ストレススコアの閾値を 43 としたときの，判別モデルの混同行列及び各顔面領域の SHAP 値を示す。判別精度は 69.1％であった。本判別モデルは Low と出力するバイアスが強く，High に対する再現率が不十分であった。特に High を Low と誤判定する偽陰性率の高さが，モデル全体の精度向上に向けた課題である。また，SHAP 値の絶対値が大きい箇所は推定への寄与が大きく，慢性ストレスに関連する重要な顔面領域であると考えられる。

５．まとめ

本研究では，顔面熱画像の局所空間自己相関特徴を用いた慢性ストレス判別モデルの構築を試みた。その結果，判別モデルの判別精度は 69.1 ％であった。

文　献

(1) M.Kimura, et al.:"A Preliminary Study on Correlation Between Independent Components of Facial Thermal Images and Subjective Assessment of Chronic Stress", IEEJ Trans actions on Electronics Information and Systems, Vol.142 No.1, pp.1-7 (2022)

(2) K.Nagumo, et al.: "Spatial normalization of Facial Ther mal Images Using Facial Landmarks", Artificial Life and Robotics, Vol.26, No.4, pp.481-487 (2021)

©2026 IEE Japan

人体信号による磁気浮上装置の駆動システムの開発

岩波　康生*・岡本　吉史（法政大学）

Development of Driving System for Magnetic Levitation Using Human Signals

Kosei Iwanami and Yoshifumi Okamoto (Hosei University)

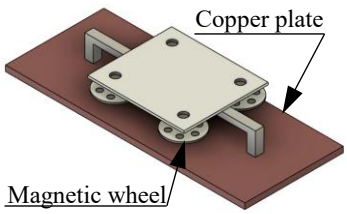
１．まえがき

工場内搬送では，搬送対象や床面との接触を避けることで，摩耗粉の抑制や保守負担の低減が期待できる[1]．このため，導体板上で誘導反発力により浮上・移動する磁気浮上移動体が検討されている[2],[3]．一方，搬送作業では手が塞がる場面が多く，非接触かつ直感的な操作が求められる．

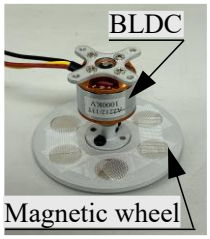
本稿では，AI を活用した人体信号を入力とする磁気浮上装置のハンズフリー駆動システムを提案・試作したので報告する．なお，本装置は特許出願中の技術を検討しているため，詳細な説明を割愛する．

２．製作方法

図 1（a）にモデル図，（b）に試作した磁気車輪ユニットを示す．本機はガイドレールに沿う一軸駆動とした．導体板には銅板を用い，磁気車輪の回転軸を銅板法線に対して傾斜角 1.72 度傾けて配置した．銅板厚さは，回転数および板厚を変化させた浮上力計測結果を基に，十分な浮上力が得られる 4 mm を採用した．磁気車輪は厚さ 3 mm，表面磁束密度 229 mT の円柱磁石を埋設した 6 極アルミ製で，銅板に対し傾斜させることで浮上力ベクトルに水平成分を与え，その成分を推進力として取り出す方式[4]とした．本研究ではこの磁気車輪を四輪構成に拡張し，一軸方向の推進を実現した．



(a) Magnetic levitation device model.



(b) Magnetic wheel unit.

Fig. 1.　Operation mechanism

３．磁気浮上装置の制御方式

図 2 にフローチャートを示す．まず，機器のセットアップとして，直流安定化電源および BLDC 駆動用 ESC を接続し，装置を動作可能な状態にする（Step 1）．次に，人体信号を取得し，所定の信号処理により駆動指令を生成する（Step 2）．最後に，指令に基づき磁気浮上装置を駆動する．モータ駆動電圧は 12 V とし，生成した指令は Python からシリアル通信で ESP32 へ送信し，ESP32 は ESC に PWM 信号を出力してブラシレスモータの回転速度を制御する（Step 3）．

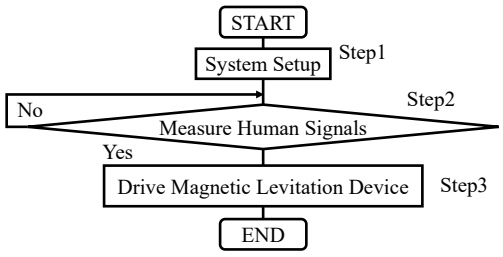


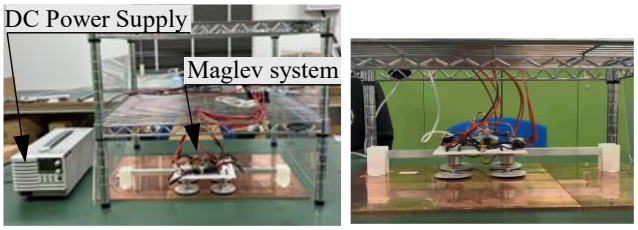
Fig. 2.　Flowchart for driving magnetic levitation device using human signals.

４．駆動実験

本章では，人体信号に基づく推進制御による磁気浮上移動体の駆動結果を説明する．

実験環境を図 3 (a) に，実機の駆動の様子を (b) に示す．人体信号の取得から PWM 更新までの遅延（ソフトウェア計測）は平均 66 ms，99 パーセンタイル（P99）は 92 ms であり，欠落率は 0.67 %であった．その結果，人体信号に応じて駆動指令の切替を安定して実現できることを確認した．

今後は，浮上姿勢の安定化，操作性の定量評価と入力条件の最適化を課題とする．



(a) Experimental setup.　　(b) Driving behavior.

Fig. 3.　Magnetic levitation driving system using human signals.

文　献

[1] 坂野進，浅川誠，黒田久雄，武田有司，「LSI 製造クリーンルーム用搬送装置」，日本機械学会論文集（C 編），52 巻 473 号，pp. 412–416，1986.

[2] 藤井信男，小川幸吉，松本敏夫，「誘導反発磁気浮上装置としての磁気車輪の特性について」，日本 AEM 学会誌，4 巻 4 号，pp. 6-12，1996.

[3] Joon-Hyuk Park, Yoon Su Baek, “Design and analysis of a maglev planar transportation vehicle,” *IEEE Trans. Magn,* vol.44, no.7, pp. 1830–1836, 2008.

[4] Nobuo Fujii, “Magnet wheel using permanent magnets for repulsive magnetic levitation and induction type thrust,” *Proceedings of ISMST4*, pp.165–178, 1999.

©2026 IEE Japan

単一ホイール故障時の３輪オムニロボットに対する曲率ラティスに基づくモーションプリミティブ軌道計画

斎藤　誠二*（職業能力開発総合大学校）

Motion-Primitive Trajectory Planning Based on a Curvature Lattice for a Three-Wheeled Omnidirectional Robot under a Single-Wheel Fault

Seiji Saito* (The Polytechnic University of Japan)

This paper presents a trajectory planning method for a three-wheeled omnidirectional robot under a single wheel fault. After the fault, the robot is approximated by a unicycle kinematic model. Constant-curvature motion primitives are generated by assigning translational and angular velocities to satisfy wheel tangential speed limits, with a minimum turning speed to avoid excessively slow motions. These primitives form a state lattice on which an A* search computes collision-free trajectories with a curvature -transition penalty. Simulations in a narrow-aisle environment confirm that the planned trajectories remain feasible under the degraded post-fault mode.

キーワード：オムニホイールロボット，ホイール故障，モーションプリミティブ，状態ラティス，軌道計画
(Keywords: omnidirectional mobile robot, wheel fault, motion primitive, state lattice, trajectory planning)

1. はじめに

物流や製造の現場では，自律移動ロボット（Autonomous Mobile Robot: AMR）による搬送作業の自動化が進んでいる。これらの現場では，棚や設備の間に狭隘な通路が多く，限られた空間内で走行することが求められる。このような環境では，全方向移動ロボットは運動自由度が高く，障害物回避やすれ違い動作において有用である。

一方，構造が簡素で，比較的軽量化や低コスト化を図りやすい 3 輪オムニホイールロボットは，単一ホイールのアクチュエータ故障に対する冗長性が低く，故障時にはホロノミック性を失い，運動学的にはユニサイクル（差動二輪に等価な 2 入力）モデルで表される非ホロノミック制約の下で動作せざるを得ない。したがって，故障前の 3 輪モデルを前提とした軌跡の追従を継続した場合，側方移動や高曲率旋回が実現できず，追従誤差が増大し，通路逸脱や障害物への接触により安全性を低下させるおそれがある。

これまで，ホイール故障の診断や駆動再構成，故障後モデルに対するロバスト制御やモデル予測制御など，制御系レベルのフォールトトレラント制御に関する研究は多数報告されている。また，故障診断・モデル切替えと障害物回避・追従制御を統合したナビゲーション手法も提案されている[(1)]。しかし，故障後の非ホロノミック運動制約を満たす参照軌道を計画段階で系統的に生成する手法の検討は十分ではない。

本研究の目的は，ホイール故障後の運動制約が変化した条件下でも，障害物環境において安全に実行可能な軌道を計画することである。本稿では，ホイール故障を想定した 3 輪オムニホイールロボットを，故障後はユニサイクル運動学モデルとして扱い，その運動制約を満たすモーションプリミティブに基づく軌道計画手法を提案する。具体的には，並進速度・角速度の上限制約および曲率制約を考慮して，ユニサイクルモデルの運動制約を定式化し，これを満たすモーションプリミティブ集合を生成する。さらに，状態ラティス上で A* 探索を行い，障害物環境における軌道を計画する。シミュレーションにより，提案手法が故障後モードにおいても実行可能な軌跡を生成できることを確認する。

2. 提案手法

〈2･1〉　ユニサイクルモデルと運動制約

本研究では，3 輪オムニホイールロボットの 1 輪アクチュエータ故障により可動性が低下し，横方向速度を独立に生成できない状態を想定する。このとき運動は 2 入力に制限され，運動学的にはユニサイクルモデルで近似できる。ロボット入力を並進速度 v と角速度 ω とし，曲率を $\kappa = \omega / v$ と定義する。

ホイール周速度上限に基づきホイール接線速度の最大値を $v_{\mathrm{w,max}}$ とする。故障後は「1 輪ロック＋2 輪駆動」の等価モデルを仮定し，曲率 κ に対してホイール制約から得られる実行可能な並進速度上限を次式で与える。

$$v_{\mathrm{limit}}(\kappa) = \frac{v_{\mathrm{w,max}}}{\max\left(\left|\frac{\sqrt{3}}{2}+\frac{3L}{2}\kappa\right|,\ \left|-\frac{\sqrt{3}}{2}+\frac{3L}{2}\kappa\right|\right)} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，L はロボット中心から駆動輪までの距離である。さ

©2026 IEE Japan

らに，探索において極端に低速な旋回を避けるため，下限速度 v_{turn} を基準として設け，前進運動の実行可能性を確保するため曲率制限 $|\kappa| \le \kappa_{\max}$ を導入する。ここで，$\kappa_{\max}$ は $|\kappa| \le \kappa_{\max}$ の範囲で $v_{\mathrm{limit}}(\kappa) \ge v_{\mathrm{turn}}$ が成り立つように定める。本稿では，$L = 0.14\,\mathrm{m}, v_{\mathrm{turn}} = 0.30\,\mathrm{m/s}$，$v_{\mathrm{w,max}} = 0.5146\,\mathrm{m/s}$ を用いた。これより，$\kappa_{\max} \approx 4.04\,\mathrm{m}^{-1}$ となる。直進時に許す車体速度上限 v_{straight} とホイール制約に基づく $v_{\mathrm{limit}}(\kappa)$ を考慮し，並進速度を

$$v(\kappa) = \min\left(v_{\mathrm{straight}}, v_{\mathrm{limit}}(\kappa)\right) \quad \cdots\cdots (2)$$

とする。ここでの入力選定は，制約を満たす実行可能運動をサンプリングする考え方に基づく[2]。

〈2･2〉 曲率ラティスとモーションプリミティブ生成

ユニサイクル運動学モデルおよび運動制約に基づき，局所軌跡として曲率一定なモーションプリミティブを生成する。離散化した曲率レベル集合を

$$K = \{\kappa_i \mid |\kappa_i| \le \kappa_{\max}\} \quad \cdots\cdots (3)$$

と定義する。本稿では $\kappa_i = 0, \pm\Delta\kappa, \pm 2\Delta\kappa, \ldots, \pm 8\Delta\kappa$ とし，$\Delta\kappa = \kappa_{\max}/8$ とする。各候補プリミティブに対して式（2）により並進速度 $v = v(\kappa_i)$ を定め，$\omega = \kappa_i v$ としてユニサイクル運動学を数値積分し，ステップ長 s に対応する局所軌跡を得る。終端状態をノード，モーションプリミティブをエッジとして曲率ラティスを構築する[3]。

〈2･3〉 曲率ラティスに基づく A* 軌跡計画

構築した状態ラティス上で A* 探索を行い，開始状態から目標状態までの軌跡を計画する。各ノードはロボットの位置・姿勢 (x, y, θ) に対応し，エッジは前節で生成したモーションプリミティブに対応する。コスト関数には，プリミティブ弧長に基づく移動距離に加え，曲率変化量に応じたペナルティを付与し，曲率の不連続な遷移を抑制する[4]。

障害物との干渉判定には，ロボット外形に安全マージンを加えた安全フットプリントを用いる。各モーションプリミティブのサンプル点に安全フットプリントを重ね，任意の時刻において障害物セルと交差するプリミティブは衝突ありと判定し，探索候補から除外する。これにより，ユニサイクルモードの運動制約と障害物回避条件の双方を満たす安全な軌跡計画を実現する。

3. シミュレーション結果

提案手法の有効性を確認するため，狭隘な通路や棚配置を模擬した 2 次元グリッド環境を対象にシミュレーションを行った。環境は $6\mathrm{m} \times 6\mathrm{m}$ の領域とし，分解能 $0.1\mathrm{m/cell}$ で障害物（棚）を配置した。開始状態は $(x, y, \theta) = (0.5, 0.5, 0)$，目標状態は $(5.5, 5.5, 0)$ とし，2 章で構築した曲率ラティス上で A* 探索を実行した。

モーションプリミティブは曲率一定の集合 $\kappa \in K$（17 本）から構成し，各プリミティブにはホイール周速度上限 $v_{\mathrm{w,max}}$ に基づく曲率依存の速度制約および曲率制限を満たすように速度プロファイルを付与した。加えて，探索コストに曲率変化量 $|\Delta\kappa|$ のペナルティを導入し，曲率の不連続な遷移を抑制した。

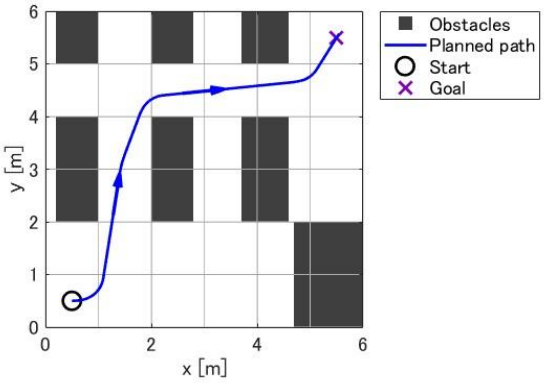


図 1. モーションプリミティブに基づく計画軌跡

Fig. 1. Planned path using motion primitives.

Fig. 1 に計画結果を示す。計画軌跡は障害物と干渉せず，かつ各ステップにおいて速度および角速度の上限制約を満たすことを確認した。また，$|\Delta\kappa|$ ペナルティにより，曲率が急変する遷移が抑えられ，経路全体として過度な旋回を避けた滑らかな軌跡が選択される傾向が得られた。

4. おわりに

本稿では，3 輪オムニホイールロボットの 1 輪故障を想定し，故障後に差動 2 輪モードで動作することを前提としたモーションプリミティブに基づく軌道計画手法を提案した。2 輪モデルの運動学に加え，ホイール速度上限および車体角速度上限を満たす速度プロファイルを付与して実行可能なプリミティブ集合を構成し，曲率ラティス上の A* 探索により障害物環境での軌跡計画を行った。今後は，故障診断機構および MPC による追従制御との統合と，実機実験による有効性・適用限界の評価を行う。

文　献

（1） S. Saito and J. Jiang : “Fault-tolerant navigation frameworks for omnidirectional mobile robots under actuator failures via an enhanced potential field”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, in press (2025).

（2） T.M. Howard, C.J. Green, A. Kelly, and D. Ferguson : “State Space Sampling of Feasible Motions for High-Performance Mobile Robot Navigation in Complex Environments”, *Journal of Field Robotics*, Vol.25, No.6–7, pp.325–345 (2008).

（3） M. Pivtoraiko and A. Kelly : “Differentially Constrained Mobile Robot Motion Planning in State Lattices”, *Journal of Field Robotics*, Vol.26, No.3, pp.308–333 (2009).

（4） M. Tiger, D. Bergström, A. Norrstig, and F. Heintz : “Enhancing Lattice-Based Motion Planning With Introspective Learning and Reasoning”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.6, No.3, pp.4385–4392 (2021).

©2026 IEE Japan

圧縮・拡大硬化を用いたロボットの運搬性向上

越智　洸太*，松本　光春（電気通信大学）

Improving Robot Transportability by Using Compression and Expansion Hardening
Kodai Ochi, Mitsuharu Matsumoto (The University of Electro-Communications)

１．まえがき

災害環境における人による救助活動には危険や制限が伴うため、近年人に代わり作業を行う災害支援ロボットの開発が進められている[1]。災害支援ロボットは未知環境への適応のため多機能化し[2,3]、構造の複雑化、体積や質量の増加を起こしている。

一方、災害時には陸路は断絶し機能不全に陥る可能性が高いため、迅速な物資運搬には空路の利用が想定される。しかしながら、航空機は積載量に乏しいため、従来型の災害支援ロボットは空路での運搬に不向きである。そこで機能性と迅速な被災地への運搬の両立を目指し、パーツの拡大・硬化が可能なロボットの開発を行った。

２．実験概要

＜2・1＞ロボットパーツの製作　　本研究ではウレタンスポンジと紫外線硬化樹脂を用いたロボットパーツの運搬時の小型化と使用時の拡大・硬化を目的とする。運搬時にはウレタンスポンジは圧縮状態では長辺方向が元の長さに対して約 15%まで圧縮される。また硬化用の紫外線硬化樹脂の量はスポンジの元の見かけ上の体積の約6分の1とした[4]。運搬時には 3D プリンターで生成された PLA 製の容器に圧縮状態で納められる。容器は器と蓋に分離する構造となっておりそれぞれスポンジの長辺を含まない面と接着させた。容器内へスポンジと紫外線硬化樹脂を圧縮格納して蓋を閉じた状態にした後、ナイロン・ポリエチレンシート製の袋に入れ、真空保存機を用いて袋内部を脱気し形状を固定した。図1左は実際に圧縮状態となったパーツの一例である。以上の手続きにより紫外線硬化樹脂は圧縮されたウレタンスポンジへ浸透する。また脱気後はスポンジに樹脂を十分に浸透させるため 1 時間程度安置した。パーツの使用時にはパーツの袋を切断することでスポンジは圧力から解放され、ウレタンスポンジの弾性力により膨張する。膨張したパーツを太陽光の照射する自然環境へと 1 日放置することで、紫外線硬化樹脂の化学反応により剛性が上昇した。図 1 右は拡大後に硬化中のパーツの様子である。

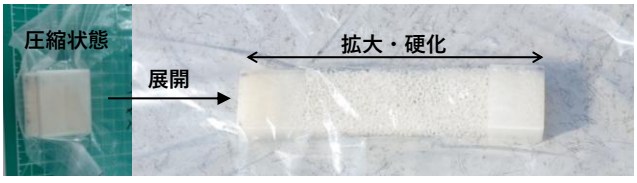


図 1　提案手法による拡大・硬化の様子
Fig.1. Expansion and hardening process by the proposed method

＜2・2＞ロボットの構成の比較　　前節の手順で製作したロボットパーツを、既存ロボットと比較した。図 2 は既存ロボットと提案手法によるロボットの組み立て前後の寸法を比較した模式図である。既存ロボットの場合、組み立ての前後で構成要素の体積は変化しない。一方、提案手法では、構成要素の見かけ上の体積は、圧力解放による拡大・硬化後に組み立てられるため増大する。提案型は拡大後、既存ロボットに比べ水平方向へ約 2 倍、厚さは 5 から 7 倍の寸法となるよう設計されている。提案手法によりロボットは縮小状態からおよそ 3 倍程度体積が上昇する。

以上のモデルをもとに、図 3 のような同型のロボットを製作した。図 3 は組み立てられた既存型と提案型のロボットの実物の様子である。図 3 の通り、各パーツとも拡大・硬化し、ロボットの形状を保つことができている。なお、

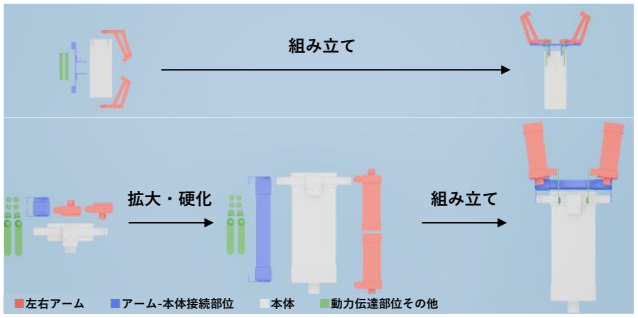


図 2　既存手法と提案手法を比較した模式図
Fig.2. Schematic diagram comparing the existing method and the proposed method

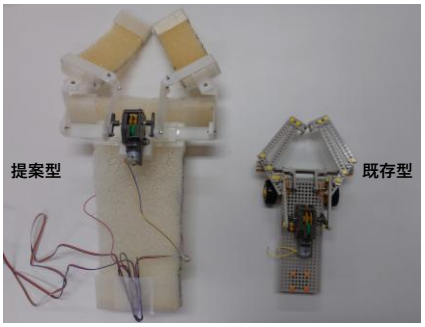


図 3　製作したロボットの外観の比較
Fig.3. Comparison of appearance of the developed robot

©2026 IEE Japan

パーツの復元量は圧縮のため想定よりも少なく、拡大は想定された全長のおよそ 9 割前後となった。またモーターなどを含めたロボットの全体質量では、提案型ロボットは既存型の約 2.5 倍であった。

３．結言

本研究では、運搬時に小型でありながら、作業段階では大きく硬い状態へ変化するロボットを提案した。既存ロボットと同様の構成のロボットを、スポンジと紫外線硬化樹脂の複合材料を使用して製作し、拡大・硬化の実現性を検証した。実験では、パーツの組み立て前後において、ロボットのフレーム部分を圧縮状態から拡大・硬化後の状態へと推移させ、体積の変化量を調査した。

本実験では動力等も同様の構成で比較したため、提案型ロボットにはモーターやシャフトに合わせ不要な部位を搭載する必要があった。そのため今後の実装では更なる最適化を行いたいと考えている。また使用した複合材料についてより長期的な耐久性の検証が必要だと考えられる。加えてロボットの運搬性向上のため他の有効な材料や構成の検討を行う。

４．謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K01129、JP25KJ1290 の助成を受けたものです。

文　献

(1)Z. Xuexi, et al.:2019 CCC, 4746~4750 (2019)

(2)P. Hebert, et al.:Journal of Field Robotics, 32(2), 255~274(2015)

(3)T. Kamegawa, et al.:Advanced Robotics, 34(2), 132~139 (2020)

(4)K. Ochi, et al.:IJMERR, 13(3), 386~391 (2024)

©2026 IEE Japan

注意機構付きヘッドを含む果樹のセマンティックセグメンテーションモデル用教師なしドメイン適合

三谷　竜樹*，鈴木　漣 ,川合　勇輔(一関工業高等専門学校)

Unsupervised Domain Adaption for Fruit Semantic Segmentation Model with Attention-based Joint Head.

Tatsuki Mitani,Ren Suzuki ,Yusuke kawai (National institude of technology .ichinoseki college)

1.　序論

近年では農業分野の DX 技術が盛んに研究されている。中でも果実の収穫は人間作業者の拘束時間が長いことで知られている。ロボットによる果実の自動収穫を 傷予防や果樹の保護といった観点で、人間に近いレベルで実現するには果実や枝といった作業領域における高精度な３次元的認識が不可欠である。しかし果樹の３次元認識モデルを学習させるための高品質なセマンティックセグメンテーション用データセットの構築は人間による膨大なアノテーション作業を必要とし、非常に高コストな実装となっている。

本研究では従来の UDA (Unsupervised Domain Adaptation)[1]手法ではランダム性が高く難しいとされている、果樹の４クラス(果樹、枝、葉、その他)のセマンティックセグメンテーションモデル用のデータセットを生成する手法を提案する。

２．手法

本研究は果樹園での点群画像撮影による未ラベルデータセット構築、UDA パイプライン開発、PointTransformer による精度検証を行う。

＜2・1＞ データセット収集

点群データセットは岩手県水沢市のリンゴ園にて RealSense D435i 及び ZED2 カメラを用いて撮影した 2856 枚の ply 形式のものを利用する。

＜2・2＞ UDA パイプライン

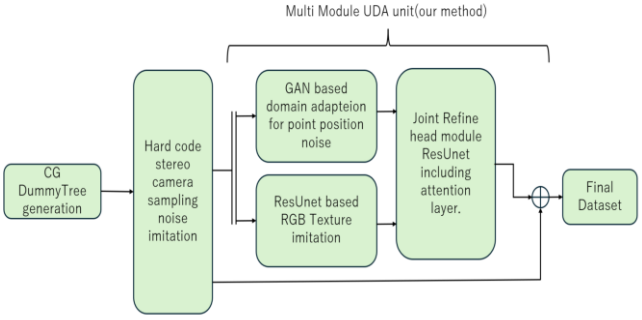


図 1 UDA パイプライン

Fig.1 UDA pipeline

本研究では Fig.1 のように、ハードコードのノイズ付与[2]、GAN を利用したピクセル単位の位置ノイズ、ResUnet による RGB の色むら再現を基本としたパイプラインを構築した。また各入力次元の整合性を取りつつ、出力の安定化とチューニングの利便性向上を狙い JointRefineHead の役割をする attention レイヤー付き ResUnet の構造を付与した。

エンコーダは Residial Block と Sqeeze-and-Excitation (SE)ブロックを組み合わせた構造になっており、チャネル方向の重要度を学習的に制御する。

1. ResBlock

   2層の 3x3 畳み込みブロックからなり、必要に応じて 1x1 畳み込でショートカットを挿入する標準的な構成を採用した。Stride=2 の ResBlock により空間解像度を H->H/2->H/4 と段階的にダウンサンプリングする。

2. SE ブロック

   各 ResBlock の出力特徴マップ x に対し、グローバル平均プーリングでチャネルごとの統計を集約し、2層の全結合層と Sigmoid からなる MLP でチャネル重みベクトルを推定する。また得られた重みを用いて、チャネル毎にスケーリングを行う事で、RGB・Depth・ラベル由来の特徴の中からタスクに有効なチャネルを強調する。

   Encoder は３段構成であり、それぞれの最初の ResBlock に SEBlock を付加することで、浅い層から深い層まで段階的にチャネル注意を導入している。この様に JointRefineResUnet は SE 付き ResidualEncoder と

©2026 IEE Japan

Unet 型 Decoder を組み合わせたマルチモーダル残差ネットワークとして RGB と Depth に条件付けながら一貫して精緻化するように動作する。

３．結果

Joint Refine Head の効果を確認する為に Joint Refine Head の前後での主要指標を比較した。

比較には RGB,Depth それぞれの PSNR,SSIM,MAE,RMSE を利用した。

表 1 Depth GAN における主要指標

Table 1. Key Metrics in Depth GAN

Metric	Mean
RMSE	2.4332683730125426
AbsRel	1.4354546049237251
SSIM	0.5729297758674902

表 2 Texture ResUnet における主要指標

Table 2.Key Metrics in Texture ResUnet

Metric	Value
Samples	2856
PSNR	15.82 dB
SSIM	0.3877
LPIPS	0.8309

表 3 Joint Refine Head に置ける主要指標

Table 3.Key Metrics in Joint Refine Head

Metric	Value
Samples	2856
RGB-PSNR	16.18 dB
RGB-SSIM	0.4009
SSIM	0.0020(in [0,1] depth)
Depth-RMSE	0.0139(in 0,1] depth)

表１及び表３より JointRefineHead によって Depth の RMSE が大きく減少したことが確認できる。しかし表２及び表３より、RGB の補正に関しては SSIM は JointRefine 適用前よりも値が小さくなっている。一方で PSNR は向上している為、局所的な表現力をモデルが優先的に獲得したことを確認できる。

このパイプラインが果樹の点群用の UDA であることを踏まえると概ね期待通りの性能であると言える。

また実際の出力を UDA 適用後のダミー点群を図 3[左:未適用,右:適用済み] に示す。実際に JointRefineHead を含むモデルでの UDA 適用後ではエッジなどの RealSense のフライングドットの様な構造や色ノイズなどが教師なしで再現されていることが確認できる。

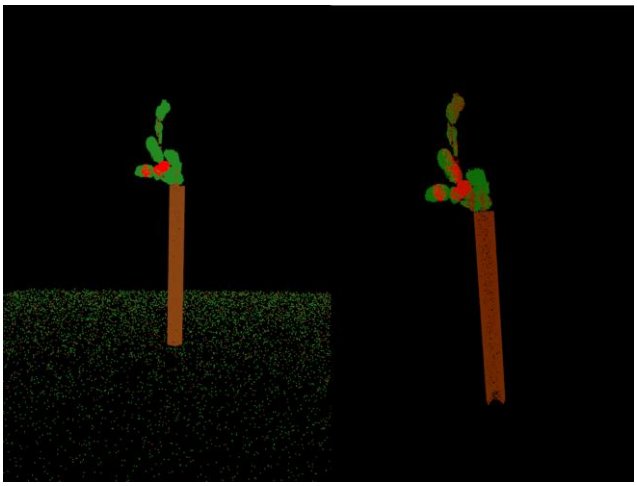


図 2 UDA 適応前後の可視化済み点群

Fig 2 Visual Comparison of Point Clouds Before and After UDA Adaptation

3. 謝辞

本研究成果は２０２５年度野崎わかば会によって助成されたものです。

文献

(1)A. Chaddad, Y. Wu, Y. Jiang, A. Bouridane and C. Desrosiers: “Simulations of Common Unsupervised Domain Adaptation Algorithms for Image Classification,”arXiv preprint arXiv:2502.10694,(2025)

(2) Wanmeng Li・Simone Mosco・Daniel Fusaro・Alberto Pretto, Bridging the Gap between Synthetic and Real Data for Unsupervised Domain Adaptation in 3D LiDAR Semantic Segmentation, arXiv / IROS 2025,3~5(2025)

©2026 IEE Japan

人・ロボットの協調運搬タスク獲得を目的とした模倣学習による基礎検討

千葉　秋陽*，島津　大輝，曾根　周作，川合　勇輔 (一関工業高等専門学校)

Fundamental Evaluation of Imitation Learning for Acquiring Human-Robot Cooperation Transportation Task

Shuhi Chiba, Daiki Shimadu, Shusaku Sone, Yusuke Kawai (National Institute of Technology, Ichinoseki College)

１．はじめに

近年、人とロボットが同じ空間で協調・協働して作業するタスクの需要が増加している(1)。また、深層学習の登場により AI 技術によるロボット応用も盛んにおこなわれている。特に人間が持つ繊細な動作の獲得は模倣学習によって一定の成果を上げている(2)(3)。本研究では，人・ロボット協調運搬タスクに着目し，農作物収穫時の人とロボット協調運搬タスクを模倣学習によって獲得することを目的とする。本研究の妥当性は実験結果を通じて評価する。

２．ハードウェア構成

本実験におけるシステムは、リーダー・フォロワー方式による 2 台のロボットアーム、環境認識用のカメラ、および学習・推論を行う計算機により構成される。ロボットに関しては、2 台の CRANE-X7 を設置し、リーダー機の関節角度情報をフォロワー機へ送信することで同期操作を実現した。視覚情報の取得には Logicool 製の Web カメラ(C920)2 台を使用した。1 台は作業領域全体とコンテナ配置状況を把握するために俯瞰位置に設置し、もう 1 台はハンドの手元や把持対象の厚み情報を補完するためにロボットの側面に設置した。また、ディープラーニングモデルの学習およびリアルタイム推論を行う計算機には、GPU に NVIDIA GeForce RTX 4070 Ti Super を搭載したワークステーション(OS: Ubuntu 22.04)を使用した。

３．コンテナ交換システムの構築

＜3・1＞Action Chunking with Transformer (ACT)　本研究の中核となる学習アルゴリズムとして、Action Chunking with Transformer (ACT)を用いる(2)。ACT は、条件付き変分オートエンコーダ(CVAE)と Transformer を組み合わせた模倣学習手法である。従来の Behavior Cloning(BC)はタイムステップごとに単一行動を予測するため、誤差蓄積や動作の微小振動が生じる課題があった。これに対し ACT は、「アクション・チャンキング(Action Chunking)」と呼ばれる，現在時刻から k ステップ先までの一連の動作系列(チャンク)をまとめて予測・実行する仕組みを採用している。また、CVAE の導入により、同じ観測状態下に対して複数の異なる有効な動作が存在する場合(マルチモーダル性)でも、状況に応じた適切な動作分布を学習可能となっている。

＜3・2＞ネットワークアーキテクチャ　本研究では、ACT の実装において、タスクの特徴に合わせた入出力設計を行った。ネットワークへの入力データは、視覚情報とロボット内部状態の 2 種類である。視覚情報については、2 台のカメラから取得された RGB 画像を ResNet-18 に入力し、特徴量抽出を行う。ロボットの内部状態については、各関節(7 軸)およびグリッパ(1 軸)の計 8 軸に対し、「関節角度」、「関節角速度」及び「関節トルク」の 3 種類の情報を取得した。これらを統合した 24 次元のベクトルを現在時刻のロボット状態としてモデルに入力する。モデルの出力は、現在時刻から k ステップ先までの目標到達角度系列である。本実験ではチャンクサイズを 100、50、30 の 3 条件に設定し、タスク遂行能力への影響を検証した。

＜3・3＞データ収集プロセス　学習データの収集およびシステムの制御周期は 30Hz で統一して実施した。本実験では、農家における作物収穫作業の負担軽減を目的とし、一般に作業者が両手で保持する重量コンテナの運搬を、人間とロボットが片腕ずつ出し合って行う「人・ロボット協調運搬タスク」を設計した。具体的な動作は、はじめに①机の中央に配置された実入りのコンテナを人間とロボットが左右から同時に把持し、協調して左側の集荷位置へ移動・設置する。続いて②右側に待機している空のコンテナを同様に把持し、中央の作業位置へセットして次の収穫に備える。モデルの学習においては、ACT の標準的な損失関数を採用した。予測された動作軌道(アクションチャンク)と教師データとの誤差計算には L1 損失を使用し、これに CVAE の潜在変数が正規分布に従うように制約を与えるための KL 発散項を加重和したものを最小化するように学習を行った。

4. 実験および評価

＜4・1＞実験条件および評価指標　実験は，人間との協調によるコンテナ搬送タスクにおいて実施した。モデルの推論パラメータであるチャンクサイズ(Chunk Size)がタスク遂行能力に与える影響を検証するため、チャンクサイズを k=30，50，100 の 3 条件に設定し，各条件に付き 5 回の試行を行った。タスクの成否については，ロボットが実入りコンテナを把持して指定位置まで移送させ，かつ空のコン

©2026 IEE Japan

表１ チャンクサイズ毎の生成軌道の類似度
Table 1. Similarity of generative trajectory in each chunk size

chunk size	k=100	k=50	k=30
Success	93.07%	92.73%	91.38%
Failure		84.81%	52.45%

テナを設置するまでの一連の動作が完遂された場合を，「成功」と定義した。また，生成された動作の品質を定量的に評価するため，教師データと実行された軌道の類似度を算出した。本評価では時系列データの伸縮を許容する動的時間伸縮法（DTW: Dynamic Time Warping）[4]を採用し，ロボットの全 8 軸それぞれに対して個別に算出した。各軸における類似度の算出プロセスは以下のとおりである。教師データのデータ長を N，実行データのデータ長を M とし，DTW アルゴリズムにより両者の累積距離 D を算出する。この D を正規化係数（N+M）で除算することで、「1 ステップ当たりの平均誤差（Average Error:AE）」を求める。

$$AE = D/(N+M) \quad (1)$$

さらに，この平均誤差を以下の式を用いて類似度（Similarity）を定義した（式(2)）。本実験では，許容限界誤差を 1. 0rad に設定した。1. 0rad 以上の誤差が生じている場合は類似度 0%，誤差がない場合は 100%となる。

$$Similarity\ (\%) = \max\left(0, 100 \times (1 - AE)\right) \quad (2)$$

＜4・2＞実験結果　　全試行（各条件 5 回）におけるタスクの完遂率は以下である。チャンクサイズ 100（k=100）を設定した場合，5 回すべての試行において動作が完遂され，100%の成功率を達成した。一方，k=50 では 40%（2/5 回），k=30 では 20%（1/5 回）と、チャンクサイズが短くなるにつれて成功率は著しく低下した。図 1，図 2 にタスク成功時、失敗時の生成軌道結果を示す。図 1 のように成功時には波形の概形が良好に再現できている。図 2 の失敗時の結果において、k=50 の場合，ロボットアーム動作自体は比較的滑らかであったものの，コンテナ把持の瞬間に，手先位置にわずかな誤差が生じ，対象物を掴み損ねるケースが確認された（図中 22 秒付近）。これに対し、k=30 の場合，動作中にロボットアームに振動が生じ，目標軌道を維持できないなど、制御が不安定化する傾向が見られた。表 1 にチャンクサイズ毎の生成軌道の類似度をまとめた結果を示す。タスク成功した試行同士で比較を行った結果，チャンクサイズ k=100 の場合に 93. 07%という最も高い類似度を記録した。失敗時のデータに着目すると、k=50 の失敗試行では類似度が 84. 81%と比較的高く，軌道の大枠は生成できているものの，最終的な把持に必要な微調整能力不足が示唆される。一方で，k=30 の失敗試行では類似度が 52. 45%まで低下しており，これは振動等の発生により軌道生成が破綻していることを裏付けている。以上の結果から、チャンクサイズの違いが「失敗の仕方」に強く影響することが明らかとなった。一方で, k=100 が最も優れた結果を示した理由は，長いチャンクが一貫した動作を生成したためである。長期的な予測により，動作の振動も抑制されたといえる。従って人間との協調運搬のような接触や外乱を含むタスクには，十分な長さを持つチャンクサイズの選定が不可欠であると考えられる。

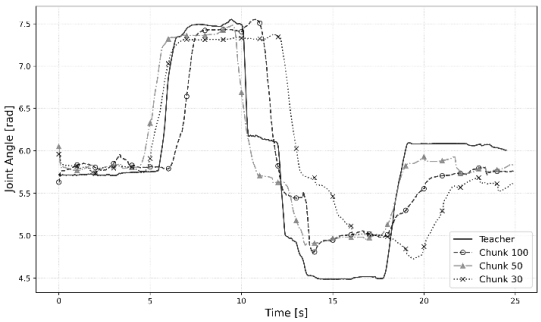


図１ タスク遂行時における生成軌道
Fig.1. Generative Trajectory on Task Success

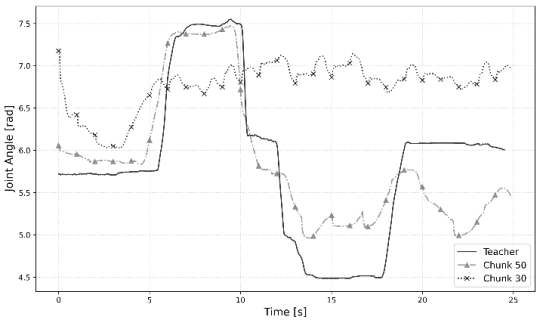


図２ タスク失敗時における生成軌道
Fig.2. Generative Trajectory on Task Failure

５．おわりに

本研究では、人・ロボットの協調運搬タスク獲得を目的とした模倣学習による基礎検討を行った。作物収穫用コンテナを人とロボットで協調把持・運搬するタスクと対象にチャンクサイズ毎での動作精度の違いや教示データとの類似度の評価を行った。結果として予測動作を長く取るチャンクサイズ k=100 の時が最も精度が良いことが実験から検証された。本研究では位置指令をベースとした模倣学習を行ったが、今後は力情報を陽に考慮し、より複雑なタスクに対する検証を進めていく。

６．謝辞

本研究成果は２０２５年度野崎わかば会および科研費 25K17631 によって助成されたものです。

文　献

(1) K. Kosuge and N. Kazamura, Proc. IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, pp. 142-147, 1997.
(2) T. Z. Zhao,V. Kumar, S. Levine, and C. Finn, *Proc. Robotics: Science and Systems (RSS)*, Daegu, Republic of Korea, July 2023.
(3) 山根康希・境野翔・辻俊明，日本ロボット学会誌，vol. 42, no. 4, pp. 394-397, 2024.
(4) H. Sakoe and S. Chiba, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 26, no. 1, pp. 43-49, Feb. 1978.

©2026 IEE Japan

４脚動物脚機構の 3D プリンタによる Print-in-Place 型一体造形の検討

伊藤　怜哉*，山内　翔，鈴木　恵二（公立はこだて未来大学）

Design and Fabrication of Print-in-Place Mechanisms for Mimicking Quadruped Leg Structures

Satoya Ito, Sho Yamauchi, Keiji Suzuki (Future University Hakodate)

１．まえがき

近年，3D プリンティング技術において，一度のプリント工程で完成した可動部品や機構を作成する「Print-in-Place（以降，PiP 表記）」と呼ばれる技術が注目を集めている。この技術は，別々の部品を後から組み立てる必要がなく，3D プリンタが造形する際に可動部分を含む全体を一体化してプリントすることができる。そのため，印刷直後に可動部分がそのまま動作するという特徴を持つ。PiP の利点として，組み立てが不要であるため他部品の内部に機構を埋め込み可能であること，安価かつ短期間で製作可能であること，3D プリンタで印刷するため均質性が保たれることなどが挙げられる。

しかし，現状の PiP 技術の多くは試行錯誤の段階にある。様々な PiP を用いたモデルが Web サイトなどに掲載されているものの，それらは単体での動作モデルに留まり，実際にロボットの機構として応用しているようなケースは見られない。そのため，PiP 技術の実用化には，さらなる技術的検討が必要とされている。

そこで本研究では，4 脚動物の脚機構に着目し，その特性を模倣した PiP 型機構を設計・製作することで，PiP 技術のロボットへの応用可能性を検討することを目的とする。具体的には，高い走行性能を持つ 4 脚ロボット「Cheetah-cub」(1)(図 1)で採用されている ASLP レッグを対象とする。Cheetah-cub は安価で複製や修理が容易であることを目標としており，これは 3D プリンタによる PiP 造形を用いることで再現可能であると考えられる。本研究では，マルチマテリアル 3D プリント技術を用いて，ASLP レッグを模倣した一体造形可能な脚機構の構築を試みる。

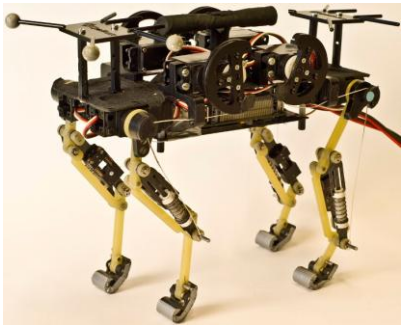


図 1 Cheetah-cub

Fig.1. Cheetah-cub

２提案手法

＜2・1＞機構の概要と定義　　本研究で構築する脚機構は，パンタグラフ構造とバネ特性を持つ関節を一体化したものである。模倣対象とする ASLP レッグは，パンタグラフ構造による脚の伸縮動作と，バネによる衝撃吸収・エネルギー回生機能を特徴とする。

従来の組み立て式機構とは異なり，PiP でこれを実現するために，本研究では以下の構成を提案する。

1 点目はパンタグラフ構造であり，脚機構をパンタグラフ構造で設計し一体造形する。2 点目は埋め込み型弾性ヒンジであり，関節部分および衝撃吸収部に，ゴムのような素材を用いたリーフスプリングを配置する。これにより，回転軸とバネ機能を兼ね備えた関節を，組み立て不要な状態で造形する。

この構成により，脚機構全体を一回の造形で作製可能とし，ロボット本体への埋め込みや，複数脚の同時製造を容易にする。

＜2・2＞マルチマテリアル印刷による一体造形　　脚機構全体を一体造形するため，硬質な素材と柔軟な素材を 1 回の印刷で使い分けるマルチマテリアル印刷を行う。

主要なリンク部材には，一般的で造形が容易かつ剛性の高い PLA フィラメントを使用する。一方，バネとしての弾性が求められるリーフスプリング部および関節部には，ゴムのような弾力性と高い耐衝撃性を持つ TPU フィラメントを使用する。本研究では，TPU として適度な硬度を持ち，マルチマテリアル印刷が可能な 68D のフィラメントを採用した。

PiP の設計制約として，可動部が固着しないようパーツ間および可動部に適切な隙間を設けるとともに，サポート材を使用せずに造形できるよう，オーバーハングの角度を考慮した形状設計を行う。

３．脚機構の設計と実装

＜3・1＞耐久性と動作を両立する設計　　PiP 機構の実用化においては，造形後の耐久性と適切な弾性力の確保が課題となる。本研究では，試作機を通じた動作検証と耐久性評価の結果に基づき，以下の設計仕様を確立した。

1 点目はパンタグラフ構造の耐久性向上である。パンタグラフ構造は関節部分に特に負荷が集中するため関節部分に

©2026 IEE Japan

は丸みを帯びた形状を採用し，耐久性の向上を図った。2 点目はリーフスプリングの強化である。TPU 素材の柔軟性を活かしつつ，必要な反発力と耐久性を確保するため，十分な厚みを持つ設計とした。3 点目は足先構造の最適化であり，接地時の干渉を防ぎつつ適切な弾性を発揮できるよう，スプリング機構を小型化し，形状を調整した。

これらの設計により、外力を受けた際の破損を防ぎつつ，Cheetah-cub の脚のようなしなやかな動作を実現する(図 2)。

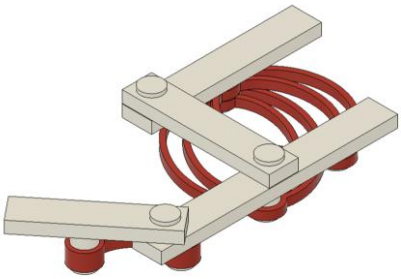


図 2 製作した PiP 脚モデル

Fig.2. PiP leg model created

＜3・2＞動作検証　設計したデータを基に， 3D プリンタを用いて一体造形を行った。印刷には Bambu lab の X1-Carbon を使用した。造形された脚機構は，組み立て作業を一切必要とせず，プラットフォームから取り外し，サポート材を除去した直後から動作することが確認された。

手動による動作検証を行った結果，パンタグラフ構造が正常に機能し，脚の伸縮動作に合わせてリーフスプリングが適切に変形・復元する様子が確認された。これにより，提案手法による PiP 脚機構が，ASLP レッグの機能を模倣できていることが示された。

４．ロボットへの応用

＜4・1＞機構の改良と小型化　　単体での動作確認後，実際のロボットへの搭載を目指し，脚機構のさらなる改良を行った。

まず，ロボット筐体への収まりを良くするため，脚機構全体のサイズを縮小し，小型化を図った。

次に，脚の伸縮制御をより効果的に行うため，Stanford Pupper(2)の脚機構を参考に，膝部分から伸びる新たなパーツを追加した。この追加パーツにより，アクチュエータによる脚機構全体の収縮動作が可能となった。

＜4･2＞1 脚モデルによる動作検証　　改良した機構の有効性を確認するため, 1 脚のみの実機モデルを用いた動作検証を行った。

実験システムとして，アクチュエータには高トルクなデジタルサーボモータ LD-25MG を使用し, 制御にはマイコンボード Arduino Leonardo を用いた。

図 3 に実際に使用した実機を示す。実験では，サーボモータの回転運動が膝部分に追加したパーツを介して脚の屈伸動作に変換され，スムーズに動作することが確認された。また，小型化された PiP 機構がモータの駆動力に耐えうることが実証された。

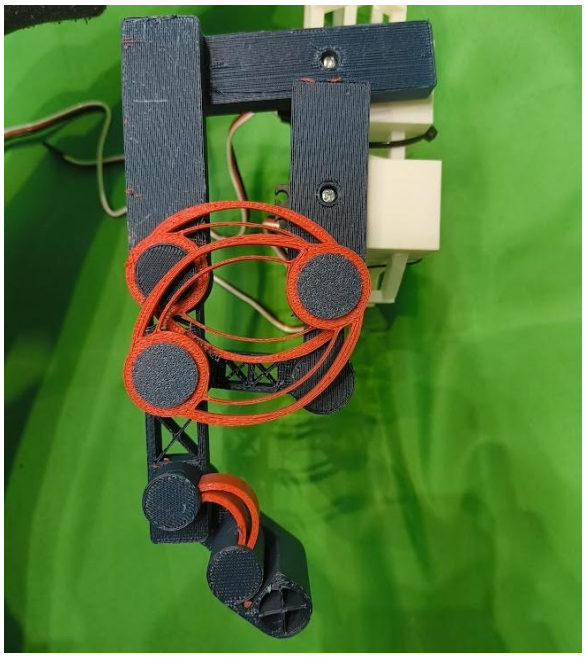


図 3 1 脚モデルの実機

Fig.3. Single-leg model prototype

５．まとめと今後の展望

本研究では，4 脚動物の ASLP レッグを模倣した脚機構を，マルチマテリアル 3D プリンタを用いた PiP 技術により構築した。PLA と TPU を組み合わせ，耐久性と弾性を両立させた設計を行うことで，組み立て不要な脚機構を実現した。

本実験により，1 脚単位での機構の有効性が確認された。今後は，この脚機構を 4 脚配置したロボット全体の設計・製作を進める。PiP 技術の利点を活かし，モータやバッテリーを挿入するだけで完成する PiP 型 4 脚ロボットの実現を目指す。

文　献

(1) SPRÖWITZ, Alexander, et al., The International Journal of Robotics Research, pp. 932-950, 2013.

(2) Stanford Pupper, https://docs.google.com/document/d/1OfrtImh0dQoEvRji5PUVH9bgwHnR-8KkTXR1eMLzXh0/edit?tab=t.0#heading=h.7qqq4i2y2lj, , accessed: 2026-1-5.

©2026 IEE Japan

3D プリンタによる個人の身体に合わせた外骨格スーツ作成手法の検討

多田　賢太*，山内　翔，鈴木　恵二（公立はこだて未来大学）

Investigation of Personalized Exoskeleton Suit Creation Using 3D Printing

Kenta Tada, Sho Yamauchi, Keiji Suzuki (Future University Hakodate)

１．はじめに

近年のロボット技術の発達により，様々な分野でロボット技術が応用されるようになってきている。その中で，現在日本では超高齢化社会を迎えており，介護者不足や介護者の高齢化などが社会問題になっている。こうした問題を抱えている福祉分野で注目されているロボットの 1 つとしてパワードスーツが挙げられる(1)。パワードスーツとは，ウェアラブルロボット，つまり着るロボット，人間が装着するロボット，という新しいロボットの形態であり，日常生活で人間の動作を支援するための技術である(2)。サイバーダインが販売している装着型サイボーグ HAL がその一例であり，実際に様々な企業で導入され高い評価を得ている。しかし，個人で導入するには非常にコストが高く，広く普及させるのは難しいと考えられる。そのため，本研究では 3D プリンタを用いて身体構造を変化させられる外骨格スーツを作成することを目的とする。そのために，自動設計システムを利用した外骨格スーツ設計システムの開発を行う。

山内，鈴木は，ロボットの内部構造をダイヤモンド結晶構造を参考にした構造にすることで，内部を均一に疎でありながら強度を確保し，共通の手法で構築可能な設計の手法を考案した(3)。ロボットは，外見に直接影響する一定の厚さを持った外骨格とロボットに必要な構成要素を収納しその位置関係を保つ内骨格に分けられ（図 1），この内骨格が結晶構造に変換される（図 2）。

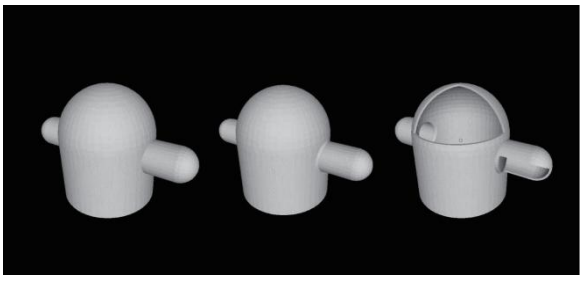


図 1 分離した内骨格と外骨格
左から右へ：外骨格，外骨格，内骨格

Fig. 1 Separated endoskeleton and exoskeleton From left to right: exoskeleton, exoskeleton, and endoskeleton

この手法により，構成要素間の関係性や部位の固定などを考慮する必要がなくなるため，配線やモータ，センサなどのパーツをロボット内に自由に配置することができる。

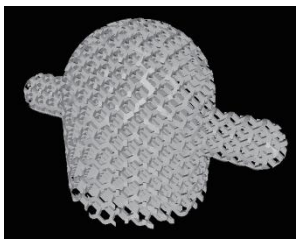


図 2 変換後の結晶構造

Fig. 2 Crystal structure after conversion

本研究では，山内，鈴木が提案したコンピュータによるロボットの自動設計システムを利用し，利用者一人ひとりに合わせた外骨格スーツを設計できるシステムの開発を目標とする。これにより，より多くの人が今まで以上に手軽に，自分に合った外骨格スーツを使用できるようになると考えられる。

２．提案システム

＜2・1＞システム概要　　まず，本研究におけるシステムの概要である。はじめに，3D スキャナを用いてパワードスーツ利用者の身体をスキャンし，3D モデルを作成する。その後，実際に装着できるようにモデルに厚みやマージンを設定して加工を行ってから，3D プリンタで印刷する。その後，印刷した外骨格にセンサやアクチュエータを取り付け，パワードスーツとして使用できるようにする。

＜2・2＞身体のスキャン　　対象者のスキャンはスキャナを三脚で固定した状態で行う。スキャナは 3DMaker Pro Lynx を使用する。スキャン範囲が広く一度で画面内に納まらない場合は，対象者がモデルの状態を画面上でリアルタイムに確認しながら慎重に移動してスキャンを進める。

＜2・3＞身体の 3D モデル化　　スキャンした身体の点群データをスキャナの専用ソフトウェア JM Studio を用いて処理をし，3D モデル化する。

＜2・4＞3D モデルをもとに外骨格スーツ作成　　スキャンして完成したモデルを実際に装着できるように加工する。加工には主に Autodesk Fusion を使用する。加工の際には，スキャンしたモデルデータから，必要部位の切り出し(図 3)やプリントできるサイズへの分割を行う。

しかし，それだけでは印刷してもマージン（身体との隙間）や厚みがないため装着することが出来ない。そのため，実際に装着できるようミンコフスキー和を取ってマージン

©2026 IEE Japan

や厚みの設定を行う。ミンコフスキー和とは，モデルの表面から一定距離の範囲に厚みを付けた形を作る計算である。

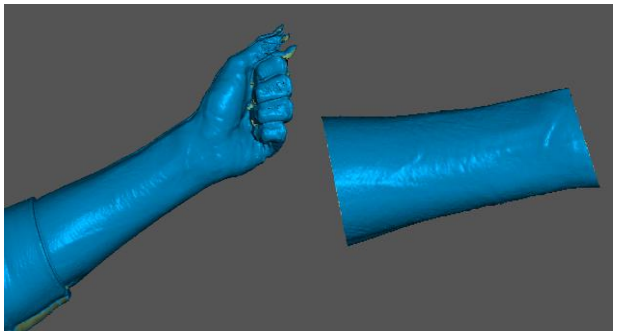


図３ 作成した 3D モデルと切り出し後の 3D モデル
Fig. 3 Created 3D model and 3D model after cutting out

また，ミンコフスキー和はボクセル形式を経由することで計算をシンプルな形に近似できるため，ポリゴンで構成されている 3D モデルをボクセルに変換してから計算する。ミンコフスキー和を用いて実際のモデルにマージンと厚みを取った結果を図 4 に示す。

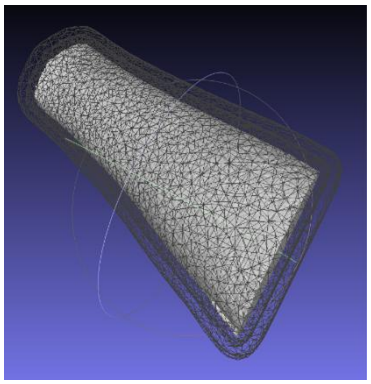


図４ ミンコフスキー和の結果
Fig. 4 Result of taking the Minkowski sum

図 3 の右のモデルからマージン 5mm，厚さ 5mm を取っている。なお，マージンは設定しないと装着時に窮屈で挟まってしまうため設定している。

＜2・5＞外骨格スーツの印刷　　作成した外骨格スーツの 3D モデルを印刷する。印刷する際は，身体に装着できるよう分割して行う。

＜2・6＞外骨格スーツの着用　　外骨格を身体に固定する方法として，外骨格にバンドを通す固定具を取り付け巻きつけることを考えている。また，地肌に取り付けると擦れたり挟まったりして装着者が痛い思いをするため，アームカバーやコンプレッションウェアを着た上から装着することを想定している。加えて，印刷時に分割した面で鋭利な部分ができてしまうが，保護材や計算による処理を考えている。

＜2・7＞マイコン，センサやアクチュエータの配置　　本研究では，センサやアクチュエータの制御は Raspberry pi で行う。Raspberry pi を配置する際には，専用のケースを作成し，それを外骨格スーツ上に配置する。 そのため，外骨格スーツの 3D モデルにそれらを配置するための領域を取り付け，それに自動設計システムを用いる。ケースの取り付けに立体構造を用いる理由としては，強度を確保しながらセンサなどの配置に活かすことが出来るためである。

＜2・8＞コントローラによる制御　　今回は Raspberry pi で動作させるサーボとして LD-25MG を採用する。そして，タクトスイッチを用いたコントローラを作成し制御を行う。今回は制御できることを確認するため，ドライバーを差し込んだ機構を作成し，5 つのタクトスイッチにそれぞれ異なる動作を割り当て，スライド動作させる。

＜2・9＞補助具　　装着時，重量による手にかかる負荷が大きかったため，肩から吊るして重量を分散できる補助具を作成した。肩，肘，外骨格スーツとの接合部にボールジョイントを採用することで，可動域を確保しながら手にかかる負荷を軽減する（図 5）。

図５ 身体に装着した状態
Fig. 5 When worn on the body

3. 結論

＜3・1＞まとめ　　本研究では，身体構造を変化させられる外骨格スーツを作成するため，身体をスキャンしてその人に適合した外骨格スーツのベースの作成に向けた手法を提案した。スキャンモデルを加工して印刷することで，実際に装着可能な外骨格スーツを作成することが出来た。しかし，現在はボタンの基盤がむき出しで，簡単な動作確認程度しかできていないため，基盤を埋め込んだコントローラを作成し，操作ができるように改善を行う予定である。

＜3・2＞今後の展望　　今後はコントローラを作成し，適切な制御を行えるようにシステムの改善を行う。また，実際にアクチュエータなども用いて制御を行い，外骨格スーツとしての性能を発揮できるのかどうかを検証する必要がある。

文　献

(1) 木口量夫，計測と制御，　Vol.45，　No.5，p.436~439，2006
(2) 小林宏，計測と制御，　Val48，　No.1，　p.112~117，2009
(3) 山内翔, 鈴木恵二, 電気学会論文誌 C, Vol.139, No.9, p.1051~1058, 2019

©2026 IEE Japan

変形ロボットの自動設計システムに対応した 3D プリンティング手法

今井　渚斗*，山内　翔，鈴木　恵二（公立はこだて未来大学）

3D printing methods for automated design of deformable robots

Nagito Imai, Sho Yamauchi, Keiji Suzuki (Future University Hakodate)

１．まえがき

現在，変形可能なロボットは様々な分野において研究・開発が行われている。例として，FlyingStar(1)を挙げる。このロボットは，プロペラ下部に走行用のタイヤがついており，変形することで飛行と走行の両方を行えるドローンとなっている。これにより，飛行が困難な状況での活動と走行が困難な状況での活動を一台のロボットで可能になる。このように，変形可能なロボットは従来の活動に加えて新たな動作を行うことが可能となり，活動範囲を広げることができる。しかし，変形可能なロボットは製作コストが高く，独自の変形機構を搭載しているため他のロボットへの転用は難しい。また，ロボットの設計を簡略化することを目的としたロボットの自動設計手法(2)を先行研究として挙げる。この手法では，ロボットの内部構造をダイヤモンド結晶構造を参考にした立体構造に変換することで内部構造の強度やパーツ配置を容易にする。この立体構造によって，ロボットの内部パーツ配置を最適化問題に置き換えることができるためコンピュータで扱うことが容易になっている。

これらより，現在までに変形ロボットの自動設計システムの開発を行った。本研究では，変形をある形からある形へと見た目が変化することと定義する。このシステムでは変形前モデルと変形目標モデルを入力し，変形前モデルを分割・回転させることで変形目標モデルに変形させる。その際にモデルを分割する位置と変形機構を配置する位置を最適化問題として解く。本研究では，変形ロボットの自動設計システムによって算出された変形パターンを用いた変形ロボットの実機化を行う。本研究で実機化する変形ロボットの変形前の状態と変形後の状態のモデルを図 1 に示す。変形前の状態にサーボモータを使用する汎用的な折り畳み変形機構を搭載して変形後の状態へ変形することを目指す。

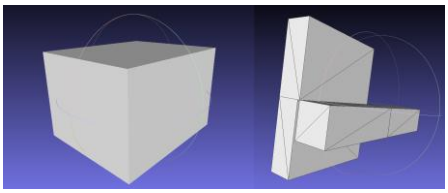


図 1 変形前モデル(左)と変形後モデル(右)
Fig.1. Pre-transformation model (left) and post-transformation model (right)

２．　提案手法

初めに，変形ロボットの自動設計システムで使用されたモデルを使用する変形機構のサイズに合わせて調整を行う。前述したように，変形機構にサーボモータを使用する都合上変形機構の小型化には下限があるためである。変形ロボットに使用する考案した変形機構を図 2 に示す。

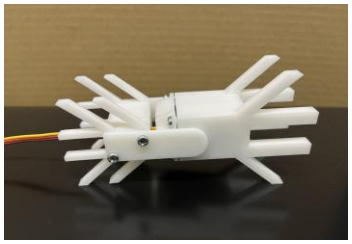


図 2 変形機構
Fig.2. Transformation mechanism

次に，山内らの自動設計システム(2)を用いて作成したモデルを結晶構造型の立体構造化を行う。この際に，変形に使用する変形機構の配置を変形ロボットの自動設計システムによって算出された位置に行う。図 3 に結晶構造型立体構造に配置された変形機構を示す。

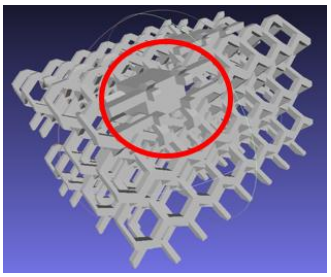


図 3 結晶構造型立体構造
Fig.3. Crystal Structure-Based 3D Structure

次に，結晶構造型立体構造化を行ったモデルを 3D プリンタでプリントする。プリンタは Bambu Lab の X1-Carbon を使用し，樹脂は PLA Basic を使用する。また，変形機構にサーボモータを入れて固定するためのパーツや変形機構同士を繋ぐためのパーツを補助パーツとしてプリントする。

最後に，プリントした結晶構造型立体構造のモデルに外骨格の取り付けを行う。

本研究で製作した変形ロボットは Arduino Leonardo で制

©2026 IEE Japan

御を行っている。サーボモータは LD-25MG を使用して回転変形を行っている。図 4 に変形前の状態，図 5 に変形後の状態を示す。

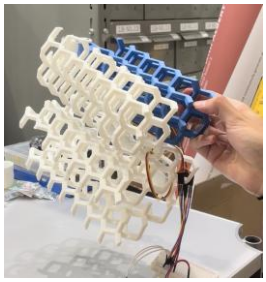


図 4 変形前
Fig.4. Before transformation

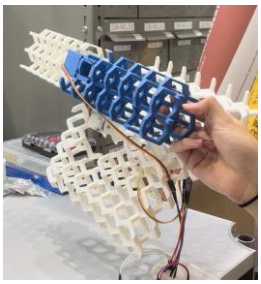


図 5 変形後
Fig.5. After transformation

３．実験

本研究では，変形ロボットの自動設計システムによって算出された変形パターンを用いた変形ロボットを 3D プリンタで製作し，変形機構に用いているサーボモータを回転させ変形動作の実験を行った。結果として，変形動作は問題なく行えた。しかし，干渉の対策を変形機構に行った結果，変形目標モデルから離れた外見になった。

４．考察

現在変形ロボットに使用している変形機構では，干渉の対策として変形パーツ間の距離を大幅に空ける必要があり，その結果変形目標モデルと同一の外見を維持することができなくなった。そのため，従来の変形機構よりコンパクトで干渉の対策を必要としない新たな変形機構の考案と試作，動作検証を行った。図 6 に新しく考案した変形機構を示す。動作検証は，簡易的な結晶構造型立体構造を用意し，新しく考案した変形機構の配置をその結晶構造型立体構造に配置して，変形のテストを行った(図 7)。

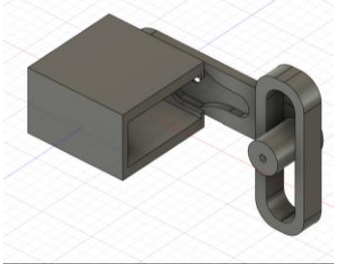


図 6 新しく考案した変形機構
Fig.6. Newly transformation mechanism

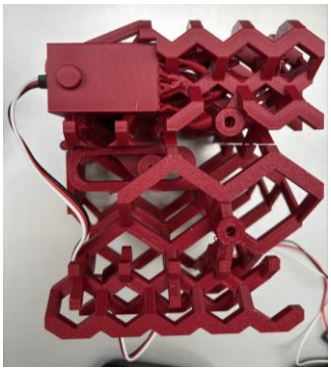


図 7 立体構造へ組み込み
Fig.7. Embedding into a 3D structure

その結果，変形パーツ間の距離を空けることなく干渉を起こさずに変形することが可能な機構の製作に成功した。これにより変形ロボットの自動設計システムによって算出された変形パターンを用いた変形ロボットにおいても干渉を起こさず，変形目標モデルと同一の外見を維持した変形ロボットを製作することが可能になると考える。

この結果より，今後は従来使用していた変形機構の位置に新しく考案した変形機構を導入し変形目標モデルと同一の外見を維持した変形ロボットの製作を行う。

５．まとめ

本研究では，変形ロボットの自動設計システムによって算出された変形パターンを用いた変形ロボットの 3D プリンティング手法の提案を行った。従来使用していた変形機構では変形目標のモデルとは異なるいびつな外見になることが分かった。そのため，変形ロボットの外見を変形目標モデルと同一の外見を維持できるような変形機構を新しく考案した。

今後は，新しく考案した変形機構を使用し，変形目標モデルと同一の外見を維持した変形ロボットの製作を行い，変形動作のテストを行う。

文　献

(1) Nir Meiri，David Zarrouk： *In 2019 International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*，5302／5308，IEEE (2019).

(2) 山内翔，鈴木恵二：電気学会論文誌 C，Vol.139，No.9，1051／1058 (2019).

©2026 IEE Japan

2D LiDAR による栗収穫ロボットの自律走行

石原　健太郎*，湯治　準一郎（熊本高等専門学校）

Autonomous Navigation of a Chestnut Harvesting Robot using 2D LiDAR
Kentaro Ishihara，Jun-ichiro YUJI (National Institute of Technology, Kumamoto College)

１．まえがき

栗の収穫作業は，中腰姿勢でトング等を用いて一つずつ手作業で行われており，身体的負担が非常に大きい。近年では，農業従事者の高齢化や減少により人手不足が深刻化しており，ロボットによる自動収穫への期待が高まっている。栗収穫ロボットには，イガ果や果実を傷つけずに収穫可能な機能に加え，不整地や障害物が点在する環境下での安定した自律走行能力が求められる。

自律走行を実現する技術として，これまでに高精度 GNSS を用いた自律移動草刈りロボットの開発[1]などが報告されており，開けた環境においては高い走行精度が実現されている。しかし，本研究が対象とする栗園のような樹木が密集する環境では，同論文でも指摘されている通り，樹冠による衛星信号の遮へいやマルチパスの影響により，測位が不安定になるという課題がある。実際に高精度 GPS/GNSS モジュール ZED-F9P を用いて CLAS（Centimeter Level Augmentation Service）による測位精度検証を行った際も，樹木周辺では固定解（Fix 解）の維持が困難であった。また，高精度 GNSS 受信機は導入コストが高く，実用化・普及における障壁の一つとなっている。

そこで本研究では，2D LiDAR による周囲環境の計測とオドメトリを組み合わせることで，GNSS に依存せず，かつ安価なセンサ構成で安定した自律走行システムを開発した。

２．自律走行システムの目的と構成

本システムの目的は，樹木が密に植えられた栗園において，高精度 GNSS に依存せず，安価かつ安定した自律走行を実現することである。栗園特有の環境を考慮し，周囲の環境形状を捉える 2D LiDAR によるスキャンマッチングを主とした自己位置推定を採用することで，安定した自律走行システムの構築を目指した。

開発したシステムの構成を図 1 に示す。本システムは，上位の処理を行う PC（ROS1 搭載）と，下位のモータ制御を担うマイクロコントローラ（ESP32）の 2 層構造で構成されている。センサ部には 2D LiDAR（ust-30lx）および車輪エンコーダを搭載し，PC 上で Cartographer による地図生成および emcl2[2]による自己位置推定を行う。PC で算出された速度指令値（v,ω）を駆動・ステアリング用の制御量に変換された後，UDP 通信を介して ESP32 へ送信され，各モータドライバの制御を行う。

図 1 システムの構成
Fig.1. System Configuration

３．栗収穫ロボットのハードウェア構成

本研究で製作した栗収穫ロボットの外観を図 2 に示す。本ロボットは，前輪駆動・後輪操舵の車両をベースとした。

本ロボットの駆動部にはデファレンシャルギヤが一体化した DC モータを採用した。操舵装置は，ラック＆ピニオン方式のアッカーマン機構を採用することで，DC モータとエンコーダによりステアリング角度の性格な制御を可能としている。これらの指令値はコントローラ・PC からの指令値をもとに ESP32 上で動作する PID 制御アルゴリズムによって算出される。

収穫部は，地面に落ちた栗（イガ果および果実）を傷つけることなくピックアップするため，柔軟な素材を用いた回転ブラシ式の収穫機構を備えている。

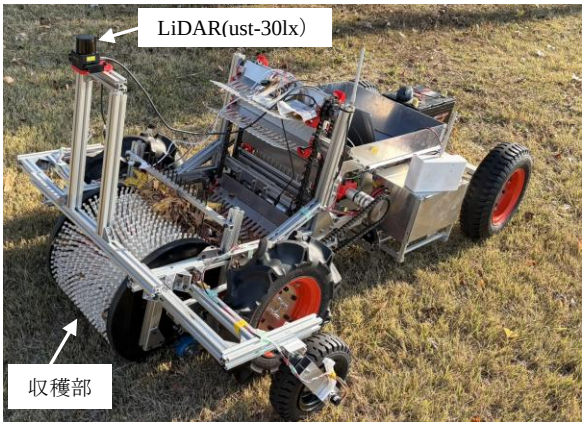


図 2 栗収穫ロボット
Fig.2.Chestnut harvesting robot

©2026 IEE Japan

４．自律走行システム

＜4・1＞ Cartographer による環境地図作成　　環境地図作成には，LiDAR SLAM 手法の Cartographer を使用した。不整地である圃場では車輪スリップによるオドメトリ誤差が大きいため，LiDAR スキャンマッチングのみで地図を作成した。実験の結果，樹木等が点在する環境下で実用的な地図作成が可能であることを確認した（図 3)。

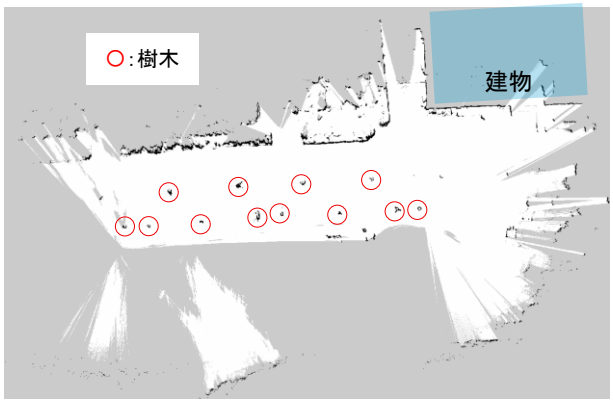


図 3 環境地図
Fig.3. Environmental map

＜4・2＞ emcl2 による自己位置推定　　自己位置推定には拡張 MCL 手法の emcl2 を用いた。これは LiDAR スキャンと地図の不整合からパーティクルの信頼度を評価する手法である。実験では概ね安定して収束したが，オドメトリの累積誤差等に起因する一時的な推定の発散も観測された（図 4)。しかし，尤度に基づいたリセット機構により速やかに再収束したため，自律走行への継続に致命的な影響は生じなかった。

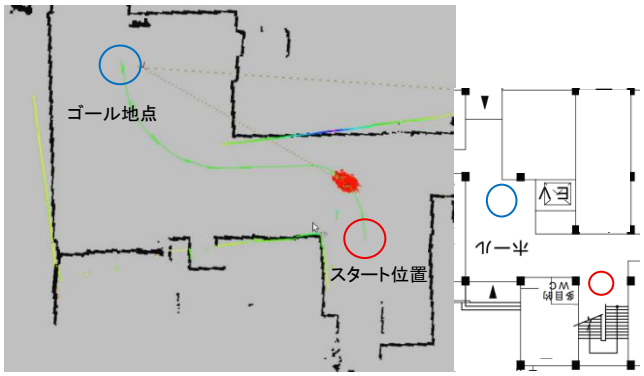


図 4 自己位置推定（発散）
Fig.4. localization (Divergence)

＜4・3＞ 計画経路の生成および経路追従　　図 3 と同じ環境下で手動走行時の推定自己位置を記録し，スプライン補間と曲率制限を施すことで滑らかな計画経路を生成した（図 5)。経路追従には Pure Pursuit 法を用い，推定位置から目標速度を算出した。旋回時の安定性確保のため，曲率に応じた減速処理を加えている。算出した指令値は UDP 通信を介して駆動系へ送信し，追従走行を実現した。

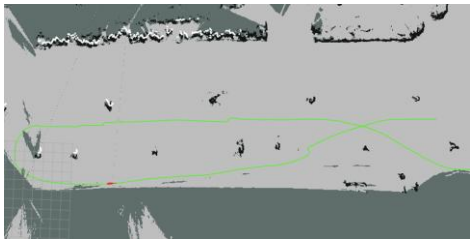


図 5 計画経路
Fig.5. Planned path

５．走行実験および考察

構築した自律走行システムの有効性を検証するため，図 4 と同じ建物内で走行実験を行った。事前に作成した地図と計画経路を用い，スタートからゴールまでの自己位置推定の安定性と経路追従精度を評価した。

図 6 と図 7 に走行結果を示す。走行実験の結果，操舵出力を抑制した条件では操舵応答の遅れにより曲線部で経路外側への逸脱が生じた。一方，操舵出力を約 66%向上させることで経路追従性が大幅に改善された（図 7)。位置推定の一部の乱れは，オドメトリ誤差補正の影響と考えられる。緑が計画経路，赤が走行軌跡である。

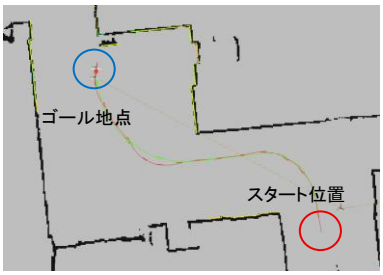


図 6 走行結果（出力 15）
Fig.6. Navigation result（Output limit: 15）

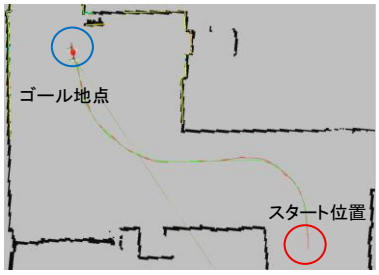


図 7 走行結果（出力 25）
Fig.7. Navigation result（Output limit: 25）

６．結論

栗園での自律走行システムを構築し，実験により有効性を検証した。操舵出力が追従性向上に寄与することを確認した。位置推定の安定化と信頼性向上が今後の課題である。

文　献

(1) 林拓真，渡邊崇，小玉尚人，大城孝弘，下窪竜，蔵爪亮，ロボティクス・メカトロニクス講演会'21 講演論文集，1P2-A12 (2021)
(2) 上田隆一，emcl2 GitHub レポジトリ，https://github.com/ryuichiueda/emcl2/　(2025 年 11 月 8 日閲覧).

©2026 IEE Japan

カメラバルーンと地上ローバーを組み合わせた巡回監視ロボット

山田　尚明*，新井　浩志（千葉工業大学）

A Patrol Robot Combining a Camera Balloon and a Ground Rover

Naoaki Yamada, Hiroshi Arai (CHIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY)

１．はじめに

近年、少子高齢化やコロナ禍の影響により日本の産業の様々な分野で労働力不足が顕在化している。警備業界も例外ではなく、人手不足の解消のために警備用の巡回監視ロボットが研究開発されている(1)(2)。巡回監視ロボットは大きく分けて、地上走行タイプとドローンタイプの 2 種類がある。前者の例としては、SEQSENSE 社の SQ-2(3)が実用化されている。また、後者の例としては、セコム社のセコムドローン XX(4) や、Flyability 社の ELIOS 3 (5)がある。

地上走行タイプの長所は、長時間動作が可能で人々が巡回動作を視認しやすく、ロボット自体が堅牢である点である。短所は遠方を見渡して監視するためにカメラを高所に設置すると機体が大きく重くなることである。一方、ドローンタイプの機体は小型軽量で、高い視点から監視できる。短所としては、長時間の巡回監視に向かない点や墜落する危険がある点が挙げられる。

一方、バルーンを用いた屋内監視巡回ロボットとして松井氏らが行った天井走行ロボットの研究[6]があるが、監視位置が天井の高さに限定され、吹き抜けなどの天井の高さが変わる箇所では使用できない。そこで本研究では、カメラバルーンと地上ローバーを組み合わせて小型軽量かつ高い位置から監視ができ、長時間の動作が可能な監視ロボットの実現を目指す。

２．提案する巡回監視ロボット

図 1 に提案するロボットの概要を示す。機体はカメラバルーン部と地上ローバー部から構成される。カメラバルーン部にはヘリウムガスを注入したアルミバルーンを用い、Wi-Fi 機能を有した小型のマイコン付カメラを吊るす。このカメラのことを以後バルーンカメラと呼称する。ヘリウムバルーンは浮力の確保に電力源を必要としないため、ドローンと比較してより長時間の監視を可能にする。バルーンはエナメル線 2 本でローバーと接続する。バルーンカメラへの電力供給はこのエナメル線を通して行う。これにより、重量のあるバッテリーを地上ローバーに搭載することが可能になり、バルーンの浮力はバルーンカメラの重量相当でよくなる。地上ローバーは三輪のオムニホイールを用いて、

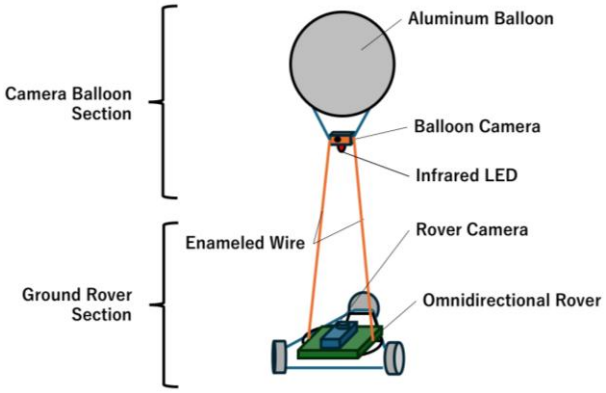


図 1 巡回監視ロボット概要
Fig.1. Overview of the proposed Patrol Robot

ホロノミックな全方向移動を可能とする。

地上ローバーがバルーンを引っ張って移動するため、移動時にバルーンが揺れてバルーンカメラの映像が揺れてしまうという課題がある。この課題を解決するために、本研究ではバルーンの傾きを少なくする地上ローバーの制御方法について提案する。バルーンの揺れを検出するためにはバルーン側マイコンに IMU センサを搭載して角度を検出する方法が一般的である。しかし、この方法ではバルーン側の重量が増加してしまう。そこで、図 1 に示すようにバルーン側のマイコン基板に下向きに赤外線 LED を取り付け、ローバー側に上向きに設置したカメラで赤外線 LED の位置を取得することでバルーン角度を検出することとする。このカメラのことを以後ローバーカメラと呼称する。ローバーは画像中心からの赤外線 LED の位置を元にバルーンの傾きを算出し、カメラの揺れが収まるように地上ローバーを制御する。特にローバーが移動している状態から停止する際は、加速度が大きく変化し揺れが大きくなるため制御が必要である。

3. 実装評価

提案する巡回監視ロボットのハードウェア構成を図 2 に示す。バルーン側のカメラ付マイコンには XIAO_ESP32S3 を用いた。バルーンカメラの監視映像は Wi-Fi 経由で PC へ送信する。また、評価実験では精度比較用のために 9 軸 IMU

©2026 IEE Japan

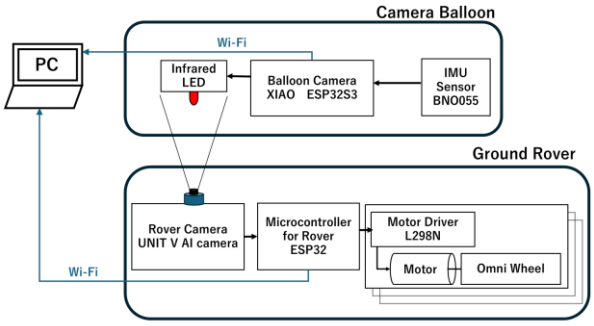


図 2 ハードウェア構成
Fig.2. Hardware Configuration

センサ BNO055 をバルーン部に搭載した。カメラ付マイコン、IMU センサ、赤外線 LED はユニバーサル基板上に搭載してバルーンに吊るす。バルーンは 30 cm 四方のものを 2 個用いた。バルーンに吊るしている重量はエナメル線が 3g, マイコン基板部が 15g である。1 個当たりの浮力が 17g 程度のバルーンを 2 個用いているので約 34g の浮力がある。ローバーカメラには UNIT V AI camera を用いた。このカメラはエッジコンピューティング向け AI カメラで、低コストかつリアルタイム性のある画像認識が可能である。これにより、ローバー単体で素早く赤外線 LED の位置を算出できる。ローバー部の制御には ESP32 を用いる。ローバーカメラで取得したバルーンの傾きのログを Wi-Fi で PC へ送信でき、PC から機体操作を行うことができる。

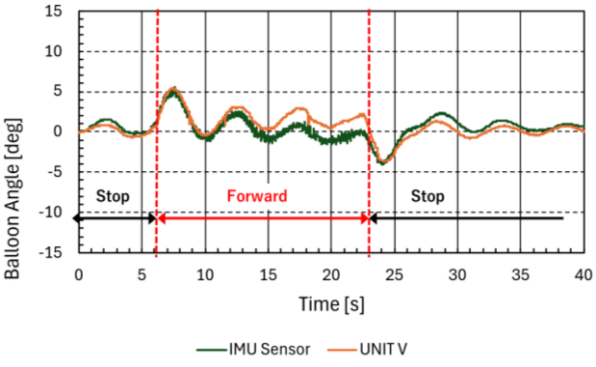


図 3 バルーン角度
Fig.3. Angle of the Balloon

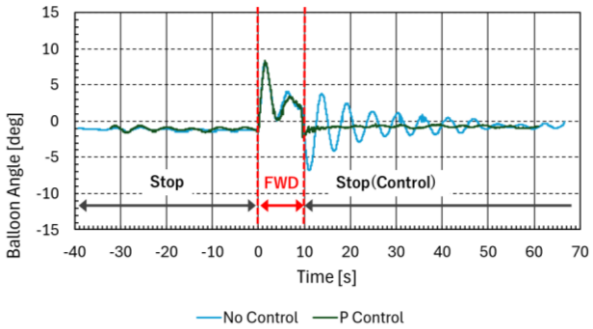


図 4 停止時のバルーンの揺れ制御
Fig.4. Controlling the swaying of the balloon when the rover is stopped

IMU センサで取得したバルーン角度とローバーカメラで取得したバルーン角度の比較結果を図 3 に示す。バルーン角度はローバーの前進方向に傾いた場合を負としている。ローバーを約 1m 前進させ、前進中と停止中のバルーンの揺れを計測した。この結果から最大 2 度程度の誤差はあるものの、おおむね同一の値を計測できることがわかった。

次に移動状態から停止する際にバルーン角度を 0 度に維持するようにローバーの移動を制御した結果を図 4 に示す。この実験ではローバーを約 0.28 m/s で 10 秒間前進させ、その後ローバーが停止した瞬間から P 制御を行ったものを、全く制御しないものと比較している。この結果から、制御なしでは揺れが±2 度以内に収まるまで約 50 秒程度かかっているのに対し、P 制御をした場合は約 5 秒で揺れを収束させることができた。

4. まとめ

カメラバルーンと地上ローバーを組み合わせた監視ロボットを提案した。赤外線 LED とローバーカメラを用いた画像ベースの角度取得手法が有用であることがわかった。また、地上ローバーの停止時には P 制御によりバルーンの揺れを 10 倍早く抑えられることがわかった。

今後、巡回監視ロボットとして実用化するためには、発進時や加減速時、カーブや旋回などより細かな動作での揺れの制御が必要となる。その際にバルーンのねじれが発生する可能性があるが、今回の赤外線 LED 一つの手法ではねじれを検出することができない。そのために赤外線 LED を複数用いる手法や、物体認識でバルーン自体を認識する必要がある。また、柔軟な監視を行うためにはカメラ視点の高さを変更できるよう、地上ローバー側にエナメル線の長さを可変できる機構が望まれる。また、エナメル線の長さを可変することによってカメラの揺れを抑える制御についても検討する予定である。

文　献

(1) 下笹洋一: “警備ロボットビジネス”,日本ロボット学会誌, vol.20, no.7, pp.692-695, 2002.
(2) Theodoros Theodoridis et al.: “Toward Intelligent Security Robots: A Survey”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol.42, no.6, pp.1219-1230, 2012.
(3) 桐林星河: “巡回警備ロボット「SQ-2」のシステムアーキテクチャ”,機械学会,ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A1-A04, 2020.
(4) セコム株式会社: “日本初、AI を活用して巡回・侵入監視を行うセキュリティドローン「セコムドローン XX」を開発”,セキュリティ研究, 26(11),pp.20-21, 2023.
(5) Flyability: ELIOS 3 https://www.flyability.com/ja/elios-3
(6) 松井侑史: “バルーンの浮力を利用した天井走行ロボットの研究”,機械学会,ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P1-E05, 2017.

©2026 IEE Japan

電力流通設備保全に向けた４足歩行ロボットによる物理スイッチの自動操作検証

富木　洋一*，田中　斗志貴，青木　康二郎（東京電力ホールディングス株式会社）
栗原　徹（高知工科大学）
合田　周平，小岩　裕，竹井　勝則（東京電力パワーグリッド株式会社）

Verification of Automated Switch Operations Using Quadruped Robots for Power Distribution Facility Maintenance

Yoichi Tomiki, Toshiki Tanaka, Kojiro Aoki (Tokyo Electric Power Company Holdings Inc.)
Toru Kurihara (Kochi University of Technology)
Sheuhei Gouda, Yu Koiwa, Katunori Takei (TEPCO Power Grid, Inc.)

１．はじめに

保守保全を担う要員の高齢化や減少，電力流通設備の高経年化が進む中，巡視・点検の効率化，トラブル発生時の現地確認の早期化等のため，4 足歩行ロボット（Spot®）の変電所等への適用を検討している。変電所の自動巡回，指定対象物の自動撮影，階段昇降，ロボットアームによるドア開閉のほか，変電設備に使用される菊型ハンドルの回転スイッチ，ドアハンドル，キャビネット扉について，ロボットアームの手動操作により ON/OFF 操作・扉開閉が物理的に可能である[1]。一方で，コントローラを用いた手動操作は複雑で，遠隔地からロボットのカメラ画像を見ながらの手動操作は画像伝送の遅延もあり，さらに難易度が上がる。このため，操作スキルに依存しないスイッチ操作の自動化が必要である。そこで，電力流通設備向けの物理スイッチ操作を自動化するプログラムを開発し，訓練用実設備を用いてその実現性を検証した。

２．物理スイッチの自動操作プログラム

Spot には標準機能として，自動ルート走行や自動撮影，アーム付き Spot についてはドアの開閉や，カメラ画像に写っている対象を指定することで物を掴むといった汎用的な機能が備わっている。一方，電力流通設備に特有の制御盤のスイッチ操作や，OF ケーブルのバルブ操作などは，標準機能では対応していない。そこで，ロボットメーカより公開されている，Spot のアーム先端に搭載されているカメラ，測距センサ，アームをプログラムで制御するための API を活用し，回転スイッチ，回転バルブ，レバーバルブ，配電盤の扉開閉の操作を自動化する自動操作プログラムを開発した[2][3]。開発時は，操作対象のスイッチ単体をパネルに固定した模擬設備を活用した。

対象とするスイッチまでのロボットの移動については，標準の自動走行機能を利用し，Spot がスイッチ付近に到着すると，ユーザーは自動操作プログラムを実行する。実行時に，アーム先端カメラの高さや向きを設定しておき，操作可能なスイッチが画角に入ると，図 1 のようにスイッチが認識される。操作対象のスイッチを選択することで，自動的にスイッチ操作が開始される。

図 1 スイッチ類の画像認識
Fig.1. Image recognition of switches

３．自動アーム操作の検証

自動アーム操作を模擬設備および訓練用実設備（図 2）で検証した。表 1 に示すように，回転スイッチとレバーバルブについては模擬設備，訓練用実設備どちらでも自動操作が可能である。回転バルブは訓練用実設備では自動操作できなかった。配電盤の扉開閉は模擬設備のみで実施した。

表 1 検証結果
Table.1. verification results

検証項目	模擬設備	訓練用実設備
回転スイッチの操作	○	○
レバーバルブの操作	○	○
回転バルブの操作	○	×
配電盤の扉開閉	○	−

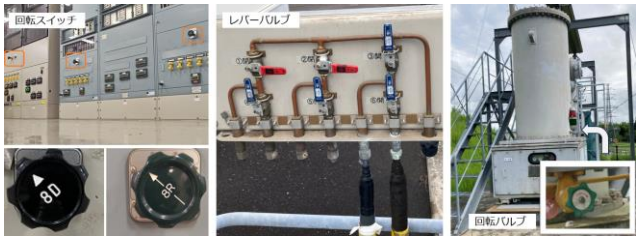


図 2 訓練用実設備
Fig.2. Images of training equipment

©2026 IEE Japan

＜3・1＞菊型スイッチの操作

初回操作の成功率は約 8 割であり，初期アーム位置を調整して再試行することで，操作不能な回転スイッチは確認されなかった。失敗の主要因は，スイッチの画像認識後，アームからスイッチまでの距離を取得し接近するが，アーム先端の距離センサにより距離を取得できないことであった。公開 API では直接的な対策は困難であるものの，測距に失敗した際にはアームの初期位置を変化させ再試行することで改善が可能である。また，スイッチの正面のみならず，斜め方向や図 4 に示す狭い通路を想定した側面からの操作も自動で実施できた。標準の自動走行機能で指定位置に到着後，自動操作プログラムに切り替えて実行することで，複数箇所のスイッチを連続的に自動操作できた。自動走行では指定位置に対して 10 cm 以下の誤差で停止し，各位置において設定したアーム高さと向きに基づく先端カメラの画角から対象スイッチが外れることはなかった。

図 3 回転スイッチの操作
Fig.3. operation of a rotary switch

＜3・2＞レバーバルブの操作

屋外にある OF ケーブルのレバーバルブ設備の開閉操作についても自動操作が可能であった。レバーバルブ間の間隔が狭く，下側のバルブを操作する際に干渉があったが，干渉を回避するために，図 4 のようにグリッパの下側の細いアゴを回転軸の外側に配置した。レバーバルブのカバーおよびロックについては事前に取り外した。

図 4 レバーバルブの操作
Fig.4. operation of a lever valve

＜3・3＞回転バルブの操作

GIS の回転バルブを対象に開閉可能かを検証したが、図 5 のように模擬設備（左）では操作可能であったが、GIS の訓練用実設備(右)では回転バルブは高所や入り組んだ箇所に配置されており，アームグリッパを開く際の干渉等で操作できなかった。

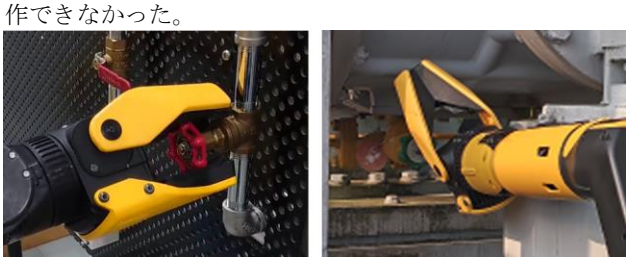


図 5 回転バルブの操作
Fig.5. operation of a rotary valve

＜3・4＞配電盤の開閉

配電盤の開閉については，図 6 に示す配電盤を模擬設備として用い，扉の開閉が可能であることを確認した。配電盤のハンドル形状や扉サイズは多種多様であり，すべての配電盤に対応させることは現状では困難である。

図 6 配電盤の扉の開閉
Fig.6. operating the switchboard door

4．まとめ

本研究では，変電所構内電力設備における各種現地操作のロボット代替を目的として，Spot のアームの活用可能性を検証した。標準プログラムでは対応できない各種スイッチ操作に対し，専用の自動操作プログラムを開発し，訓練用実設備を用いて実現性を確認した結果，屋内に配置され環境の安定している菊型の回転スイッチの操作は可能であり，レバーバルブや回転バルブはその設置環境に依存することが明らかとなった。Spot のアームが物理的に届き，周囲に干渉しない条件下では，遠隔指示による操作が可能である一方，カバーやロックなど予期しない状況への対応は難しい。配電盤の開閉はハンドル形状や盤サイズが多種多様で，対応するためには，画像認識や力覚フィードバックを活用した AI との統合が必要であり，今後も関連技術調査を継続する。加えて，自動走行機能と自動操作プログラムの統合により，誰でも簡単に使える一連の機能を備えたシステムの開発を進める。

文　献

(1) 富木 他：令和 7 年電気学会 B 部門，11-6 No.372
(2) 栗原 他：ViEW2025，IS4-24
(3) 花井 他：電気電子情報四国支部連合大会, 13-28，p.121

©2026 IEE Japan

アーク 3D 表示のための線刻データ自動生成プログラムの開発

渡辺　琴凪　　奥村　万規子（神奈川工科大学）

Development of an Automatic Line Engraving Data Generation Program for Arc 3D Display

Kotona Watanabe, Makiko Okumura, (Kanagawa Institute of Technology)

Arc 3D display is a technology that projects images in midair using arc-shaped line engravings on a transparent substrate. Forming these engravings by hand required significant time and effort for complex images. This research developed a program that automatically generates line engraving data for Arc 3D displays from arbitrary 2D images. This program seamlessly performs thinning of the input image, equidistant sampling, and conversion to arc data based on parameters. Furthermore, it implements a data output function in DXF format compatible with cutting plotters, establishing an efficient image production process.

キーワード：アーク３D，線刻，プログラム，カッティングプロッタ
(Arc 3D, Line Engraving, Program, Cutting plotter)

1.　はじめに

アーク 3D 表示は、透明フィルムに多数の円弧状の線刻を施し、単一光源下で立体像を観察する表示方式である[(1)~(3)]。我々はこれまで、アーク 3D 表示の研究において、コンパスカッターを用いた手作業による線刻加工を行ってきた。しかし、この手法による加工は、単純な図形の作製には適しているものの、複雑なイラストの作製においては、精度の確保と作業時間が課題であった。そこで本研究では、任意の画像から線刻加工用データ（DXF）を自動生成し、GUI 上で輪郭の切断・削除・色分け編集を行えるプログラムを開発した。

2.　アーク 3D 表示の原理

アーク 3D 表示は、図 1 に示すように、光源、線刻上の点、観察者の 3 点が一直線に並ぶ条件を満たしたときに、その点が強く輝いて見える現象を利用している。透明なフィルム上に多数の円弧状線刻を配置することで、左右の目に異なる位置の輝点を提示し、両眼視差によって空中に像を結像させる。このとき、知覚される像の奥行き位置は円弧の半径に依存する。円弧の半径が小さいほど基板近くに像が結ばれ、半径が大きいほど基板から離れた位置に像が知覚される特性を持つ。したがって、適切な半径を持つ円弧群を配置することで、任意の立体像を構築することが可能となる。

3.　自動生成システムの構成

〈3･1〉　画像の前処理　　本プログラムでは、入力されたラスタ形式の画像に対し、線刻の軌跡となる中心線を抽出するために以下の処理を行う。本プログラムにおける処理の流れを示す（図 2 参照）。

①　画像の読み込みと二値化

まず、OpenCV ライブラリを用いて任意の画像データを読み込み、グレースケール変換を行う。続いて、画像の輝度情報に基づき二値化処理を行う。この際、二値化の閾値（0～255）は GUI 上で任意に設定可能としており、入力画像の線の太さやコントラストに応じて、線刻として抽出したい領域を適切に分離できるように設計した。

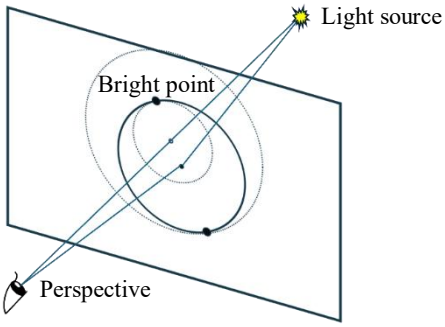


図 1　Arc 3D 表示の原理

Fig. 1.　Principal diagram of bright spot generation

②　細線化と輪郭検出

二値化結果に細線化を適用し、線幅を 1 画素に縮退させる。得られた骨格画像から輪郭点列を抽出し、折れ線として GUI に表示する。ユーザは右クリックによる分割、ドラッグ消しゴムによる部分削除により、不要部分を切断・除去できる。

〈3･2〉　等間隔サンプリングと円弧生成　　編集後の輪郭データから、加工用の点群および円弧を生成する。

①　等間隔サンプリング

©2026 IEE Japan

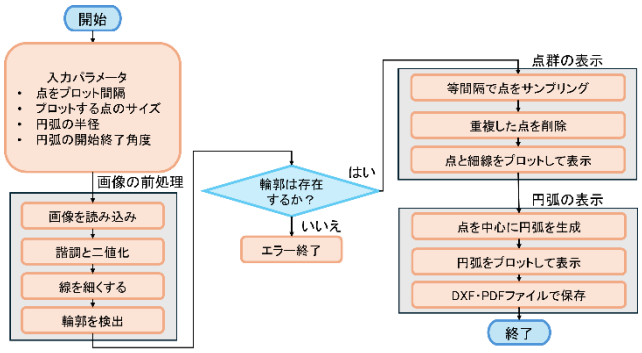


図２　システムのフロー

Fig. 2.　System Flow.

輪郭の点列は画素配置に依存して間隔が不均一である。そこで折れ線の弧長に沿って距離を積算し、指定間隔Δ（例：10 px）で線形補間して再サンプリングする。これにより、輝点密度のムラを抑えた点群を得る。

②　円弧データ生成と色別半径

再サンプリング点を円弧中心とし、開始角度・終了角度と半径 r から円弧を生成する。GUI 上で輪郭ごとに赤・青・緑を割り当て、色に応じて半径を切替えることで、部位ごとに異なる奥行きを簡便に設計できる。

〈3･3〉　データ出力　　編集後の輪郭は黒色の LWPOLYLINE として、円弧は「色×半径×角度×線幅」ごとにブロック化し、インサート配置する。これにより DXF の容量を抑えつつ多数の円弧を出力する。

4.　製作実験及び結果

開発したプログラムの有用性を検証するため、複雑な形状を持つ「馬車」のイラストを用いて製作を行った。実験に用いた元画像を示す（図 3（a）参照）。馬車のような題材は、車輪や装飾的な曲線など微細な構造を含んでおり、我々が従来行っていた手作業によるコンパスカッターを用いた加工では困難であった。

本プログラムにより、入力画像から自動生成された線刻データを示す（図 3（b）参照）。ここでは、車輪や装飾の複雑なラインが円弧の集合体へと変換されていることが確認できる。

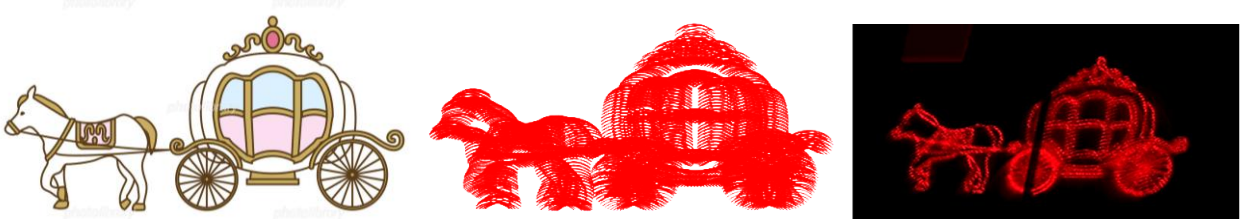
生成された DXF データをカッティングプロッタ（グラフテック社製 CE8000）に入力し、透明なフィルムへ線刻加工を行った。その結果、手作業では数時間を要していたデータ作成から加工までの工程を、数十分程度に短縮することができた。製作したフィルムを単一光源下で観察した様子を示す（図 3（c）参照）。設計通りの位置に輝点が生成され、複雑な構造を持つ像が表示されることを確認した。

5.　結言

本研究では、アーク 3D 表示の製作効率と表現力を向上させるため、画像処理技術を用いた線刻データ自動生成プログラムを開発した。画像処理による輪郭抽出から CAD データ生成までの一連の処理を自動化することで、複雑な画像を表示用のデータへ変換することが可能となった。これにより、アーク 3D 表示のデザイン自由度が向上し、より高度な表現への応用が期待できる。

文　　献

（1）大坊真洋・小林正信・町田俊一・木村光照：「円弧状の線刻による立体ディスプレイ」，BULLETIN OF JSSD, Vol.46, No.1, pp.19-26 (1999)
（2）西山慎悟・水科晴樹・陶山史朗：「新しいアーク 3D 表示方式の提案」，ITE Technical Report，Vol.39，No.36，pp.5-8 (2015)
（3）Kensuke Tamano, Shiro Suyama, and Hirotsugu Yamamoto: “Perceived rotation angle and depth position of face-like illustrations with inverted concave depth positions in arc 3D display”, Optical Review, Vol.32, pp.348-356 (2025)



(a)　馬車の元画像　　(b)　出力された線刻データ　　(c)　観察された像

図３　複雑な馬車の各データ

Fig.3.　Complex carriage data.

©2026 IEE Japan

色覚多様性を持つ人々の課題を解決するシステムの研究

宇野　孝紀*，神戸　英利（東京電機大学）

A Study on System for Solving Challenges Faced by People with Color Vision Diversity

Koki Uno, Hidetoshi Kanbe (Tokyo Denki University)

１．　はじめに

従来「色覚異常」や「色弱」と呼ばれていた特性は，近年，単なる視覚の多様性であるとの理解から「色覚多様性」と呼ばれることが増えている．本研究もこの立場に立ち，この用語を用いる．日本人男性の約 5%（20 人に 1 人），女性の約 0.2%（500 人に 1 人）が先天性の色覚多様性を持ち，世界では約3億人に上るとされている．色覚多様性を持つ人々は，特定の色の組み合わせが区別しにくいという課題を抱える．従来，果物の熟度や肉の焼き加減の判断が困難であるといった課題が知られていた．さらに情報化社会の進展に伴い，案内図，Web サイト，グラフ，配線など，色に依存した情報伝達が急増し，彼らが直面する課題は質・量ともに増大している．例として，焼肉のシミュレーション画像（図 1）では，一般色覚者には生焼けの赤みとして認識できる部分が，色覚多様性を持つ人には焼けた部分との区別がつきにくく，判断が困難となる．現在の医療では色覚多様性を根本的に治療することはできないため，彼らの困難を解決するための支援技術が求められている．

図１　一般的な見え方(左)と色覚多様性を持つ人の見え方(右)

Fig.1. Normal Vision (Left) / Color Blindness (Right)

２．研究目的

本研究の背景には，二つの課題がある．第一に，色覚多様性を持つ人々が特定の色の区別ができないことにより，日常生活や社会生活で様々な課題を抱えているという社会課題である．第二に，既存の支援技術（先行事例）がこれらの課題を十分に解決できていないという技術的課題である．先行事例として，色覚補助メガネやスマートフォンアプリが存在する．しかし，補助メガネは色の違いを強調できても，その色が示す「状態（例：柿の熟度）」までを判断する支援はできない．また，「色のめがね」に代表される既存アプリは，色名をテキストで表示したり，特定の色を強調したりする機能を持つが，「色名から状態を判断する」という認知的な負担が利用者に残る．さらに，強調表示の調整を利用者自身が試行錯誤で行う必要があり，手軽さや個人最適化の面で課題があった．そこで本研究では，色覚多様性を持つ人々が直面する課題を汎用的に解決するスマートフォン向けWebアプリケーションの開発を目的とする．具体的には，以下の 3 つの機能の実装を目指す．(1) 個人適応型の画像処理：利用者ごとの見え方の個人差（型・強度）を測定し，個人に合わせた補助を行う．(2) 物体検出による状態認識：色から状態を判断することが困難な対象物に対し，その「状態」を検出し，ラベルで提示する．(3) 色名表示機能：画面上の指定した部分の色名をテキストで表示する．

これらの機能を単体，あるいは組み合わせて利用可能にすることで，多様な課題に汎用的に対応できる支援システムを構築する．

３．　提案手法

＜3・1＞システム概要　　図 2 にシステムの全体構成を示す．

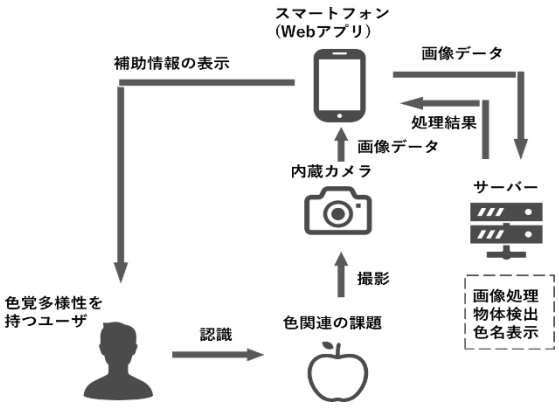


図２　システム概要図

Fig.2. System Overview Diagram

色覚多様性を持つ人々の課題は，「色の違いが分からない」「対象物の状態を知りたい」「正しい色名を伝えたい」という三つに大別できる．本研究では，これらに対応するため，画像処理，物体検出，色名表示の三つの技術を統合した支援システムを提案する．

提案システムはスマートフォン上で動作する Web アプリケーションとして実装し，利用者が内蔵カメラで対象を撮影すると，選択した機能に応じた補助情報を画面上に提示する．

＜3・2＞個人差に応じた画像処理　　人間の色覚は三種類の錐体細胞によって成立しており，色覚多様性はそのいず

©2026 IEE Japan

れかに異常があることで生じる．本手法では，混同色線の角度差を利用して色覚の型を判定し，さらに識別可能な最小色差を測定することで個人差を定量化する．得られた結果に基づき，入力画像を色セグメントに分解し，識別困難な色同士を区別可能な色相へ再配置する．

＜3・3＞物体検出による状態認識　色の違いから状態を判断することが困難な課題に対しては，物体検出技術を用いて対象物の状態を認識し，ラベルとして提示する．本研究では，高速かつ高精度な YOLOv8 を採用し，スマートフォン上でのリアルタイム処理を可能とする．

＜3・4＞色名表示機能　他者とのコミュニケーション支援を目的として，画面上で指定した領域の色を解析し，対応する色名をテキストで表示する機能を実装する．

４．実装と評価

＜4・1＞プロトタイプ実装　提案手法の有効性を検証するため，プロトタイプシステムの実装を行った．色覚特性測定画面：「型の測定」および「強度の測定」を行うための Web インターフェースを実装した．スライダー操作による調整に加え，より直感的な検査表形式の実装も試作した．物体検出モデル：YOLOv8 を用い，「焼肉の焼き加減」および「バナナの熟度」を判定するモデルを構築した．

＜4・2＞シミュレーションによる評価　提案した個人差の測定手法が有効か検証するため，Machado ら[3]の色覚シミュレーションモデルを用いた評価を行った．1 型および 2 型の色覚（2 色覚および異常 3 色覚）をシミュレートした環境下において，システムが提示する「1 型変調刺激」および「2 型変調刺激」が，参照刺激に対してどの程度の色差（ΔE）として知覚されるかを検証した．検証の結果，1 型 2 色覚をシミュレートした環境下では，1 型変調刺激に対する色差は 4.70 と小さく（識別困難），一方で 2 型変調刺激に対するは 18.53 と大きくなり，理論通り 1 型と 2 型の区別が可能であることが示された．同様に，2 型 2 色覚環境下においては，2 型変調刺激のが 7.95，1 型変調刺激が 13.94 となり，逆の傾向が確認された．これにより，本システムが提示する測定刺激が，特定の視細胞の特性を反映しており，Web ブラウザ上での簡易的な型判定として一定の有効性を持つことが示唆された．

＜4・3＞システムの有用性評価　前節のシミュレーション評価に加え，システム全体が「実際に利用者の課題を解決できているか」を検証するため，ユーザ評価を計画している．色覚多様性は型や強度によって見え方が大きく異なるため，システムの有効性を網羅的に示すには，各特性を持つ被験者による検証が不可欠である．色覚の型と強度を医学的に確定診断できるのはアノマロスコープのみであるため，本評価ではアノマロスコープによる診断を受けた被験者を，各型および強度ごとに最低 1 名ずつ確保して実験を行うことを計画している．具体的な実験では，色覚多様性を持つ人々が日常生活で困難を感じる場面（焼肉，路線図など）の画像を用意し，それらに対して提案システムによる補助（画像処理や物体検出ラベル）を適用する．その結果を被験者に提示し，視認性の向上や判断の容易化に寄与するかについて，アンケートやヒアリングを通じて評価を収集する予定である．これにより，数値的な色差だけでなく，実際の使い勝手や安心感といった質的な有用性を明らかにする．

５．　まとめと今後の展望

本研究では，色覚多様性を持つ人々が直面する「色の識別」「状態の判断」「色名の伝達」という課題を汎用的に解決するため，個人特性の測定に基づく画像処理と，物体検出による状態提示を統合した Web アプリケーションを提案・実装した． シミュレーションモデルを用いた定量的評価により，提案した測定手法が色覚の型を一定程度判別可能であることを確認した．

今後は，計画しているユーザ評価を通じてシステムの実用性を検証するとともに，物体検

出モデルの対象拡充を進め，より多くの生活課題に対応できるシステムを目指す．

文　献

(1) 浅田一憲：色覚異常者の QOL(Quality Of Life)を向上させる色覚ツール，https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002010-3436&ml_lang=en（参照 2025-04-03).

(2) 三原優輝：ディスプレイを用いた色覚異常の強度測定，https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsaj/41/6+/41_1/_pdf/-char/ja (参照 2024-10-09).

(3) G. M. Machado, et al.: A Physiologically-based Model for Simulation of Color Vision Deficiency, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 15, No. 6, pp. 1291-1298 (2009). (参照 2025-11-09).

©2026 IEE Japan

スマートロック連携のための歩容認証システム

25RMD15　菜澤大樹
指導教員　　神戸英利　教授
副指導教員　秋山康智　教授

1.　はじめに

近年,日本国内における建物への侵入窃盗の認知件数は減少傾向にあるが,依然として年間約 40,000 件 [1]と少なくない件数が報告されている.さらに,その被害額については近年増加傾向が報告されており [1],生活安全にかかわる重大な課題である.侵入の原因については,その多くが無施錠や合鍵の作製などの手口であり,これは従来型の物理的な錠に依存した防犯制の不完全性を示している.これら侵入の認知件数と被害額について図 1 に示す

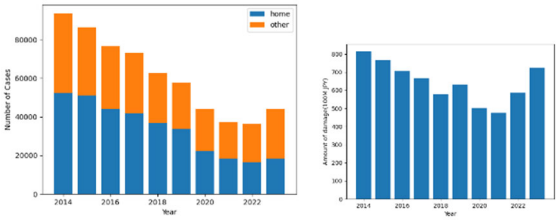


図 1 侵入の認知件数(左)と被害額(右)

一方で,スマートロックの普及が進展しているが,スマートフォンや IC カードを用いる方法では依然として物理デバイスの紛失や盗難等,鍵に関するリスクが残存している.これに対し生体認証は物理デバイスを紛失するリスクは回避できるが,専用デバイスを設置するためコストがかかることや,デバイスを操作する手間がかかるという問題が残されている.

2.　目的

本研究では,歩行時の特徴である歩容を用いた個人識別手法を用いることで,非接触かつハンズフリーな入退室管理用の認証システムを実現することを目的とする.監視カメラから得られる映像に対し姿勢推定を行い,得られた関節点の位置情報を基に歩容を抽出し個人識別を行うことで,服装や環境の変化などに頑健な認証システムの実装を目指す.また,その個人識別制度の検証を通じて,本手法の実現可能性を検討する.

3.　提案手法

本研究では,監視カメラによって取得された歩行映像から,姿勢推定を用いて人物の関節点の情報を抽出し,その時系列的変化から特徴量を抽出し多クラス分類を行うことで個人識別を行う手法を提案する.本手法の処理フローを図 2 に示す.

まず,利用前に,ユーザは自分の歩容を事前に登録する.

認証時には,映像の各フレームに対し姿勢推定を行い,これを時系列データとして取得する.次に,得られた関節点の位置情報に対して正規化を行い,個人間で比較可能な情報を得る.その後,歩行の周期など歩容を表す特徴量を抽出する.

最後に,抽出した特徴量を個人識別モデルにより分類を行い,映像に映る人物が事前に登録されたユーザと一致するかを判定する.本手法により,個人が歩行する姿から識別を行うことが可能となり,非接触かつ実質的に利用者の操作が不要な認証を実現することができる.

本手法では画像取得と推論処理を分離し,クラウドの利用により複数個のスマートロックを導入する場合に対応可能なスケーラビリティを確保する.さらに,認証の成否はログデータベースに記録し,認証に失敗した不審な人物の確認を可能とする.

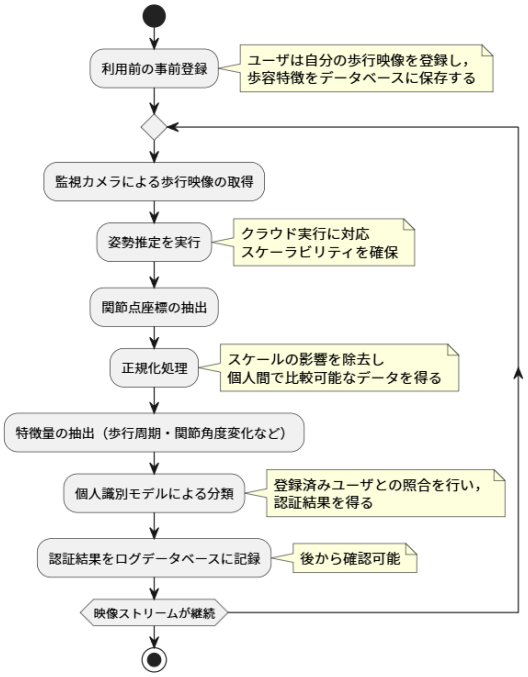


図 2　提案手法の処理フロー

4.　実装

提案手法を実現するために,表 1 に示すハードウェアと技術を用いた.

表 1　構成要素一覧

構成要素	仕様技術・機材	主な役割
姿勢推定モデル	Yolo11n-Pose [2]	入力映像から関節点を推定
エッジデバイス(カメラ)	Raspberry Pi Camera V3	歩行映像の取得
エッジデバイス(計算機)	Raspberry Pi 5 (8GB)	カメラ映像をクラウドへ送信
プログラミング言語	Python3	各処理の実装に利用
クラウド環境	AWS (EC2, S3)	受け取ったデータを用いた認証処理

エッジ側では Raspberry Pi Camera V3 を接続した Raspberry Pi 5 が動作しており,取得した画像をクラウド上へストリーミング送信する.

クラウド側では,受信した映像データに対して YoLo11n-pose

©2026 IEE Japan

モデルを用いた姿勢推定を行い,得られた関節点の位置情報を正規化した後,歩行周期など特徴量を抽出する.抽出した特徴量に基づいて多クラス分類による個人識別を行い,その結果をログデータベースに記録する.

ログデータベース上の情報は後からブラウザで参照可能とした.

5. 評価手法

精度と速度の2項目についての評価を行う.

精度の評価は生体認証機器のハードウェア要件を定める際に使用されるFAR(他人受入率)と本人受入率TAR(本人受入率)を算出し,精度評価を行う.FARとはシステムが承認されていない他人が確認されてしまう件数の割合を示しており,TARはシステムが承認されているユーザを正しく確認できた割合を示している [3].FARはFPR(偽陽性率),TARはTPR(真陽性率)にそれぞれ対応するため,モデルの全体的な性能をROC-AUC用いて評価する.

さらに、実運用を想定した評価として、目標とするFARの閾値を設定し,そのときのTARを評価する.この評価は、特定のFARを安全性要件として固定し、その条件下でどれだけのユーザを正しく認証できるかを評価することを目的とするものであり,生体認証機器のハードウェア要件を定めるWindows Helloで用いられている [3].

速度は推論,特徴抽出,分類による認証を一件完了するまでシステムが要する時間を測定する.

6. 考察

現在実装しているクラウド上での特徴量抽出機能について,映像から関節点の位置を推定する際にノイズが混入し,正確な歩行周期が取得できない問題が確認された.この問題対しては,ノイズ低減のために移動平均に基づいた比較的高速に処理が可能なSavitzky-Golay(SG)フィルタを適応し,波形の特徴(ピーク位置など)を保持しながら時系列データの平滑化を行うことで一定の改善がみられた.

一方で,微小なノイズはこの手法により抑制できるものの,大きな外れ値が混入した場合は対処しきれず周期の抽出が不安定になることが確認できている.このような外れ値は補正を行う必要があるが, 統計的外れ値検出や前後フレーム情報を用いた補間などのうち,どの手法を用いて検出・補完するかは今後の検討課題である.

現在はモデルの可搬性,拡張性を重視しYoLoを用いているが,このモデルはフレームごとに処理を行っているため人物が大きく動いた場合関節点の左右が入れ替わるなどの問題が確認されているため,時系列情報を考慮可能なモデルの切り替えも視野に入れている.

7. まとめ

本研究ではカメラを用い歩く姿を画像から検知し,完全ハンズフリーで認証を行うシステムを実装することで,ユーザに安全性だけでなく利便性を提供することを可能とすることを目的としている.

現在は特徴量の設計段階におけるノイズ・外れ値への対策を行っており,服装や環境の変化に対し頑健な認証システムの下地となるデータを取得できるよう実装を進めている.

8. 今後の展望

歩容を用いた研究は個人識別だけでなく医療などの領域でも行われており [4],本システムを統合することで日々の歩行特性の変化から健康状態をモニタリングし,疾病リスクの早期検知に貢献する可能性がある.

また,監視カメラの映像と認証情報が結びつくことから人流の推定にも応用が可能であり,セキュリティ以外の領域への展開も考えられる.

本システムでは,特徴抽出後に画像情報を即時破棄する仕組みを採用しているが,実運用時には認証に失敗した不審人物のみを記録する運用が可能である.これにより,利用者のプライバシーに配慮しつつ,安全性を確保できると考えられる.

参照文献

[1] 警察庁, “令和5年の刑法犯に関する統計資料,” 8 6 2024. [オンライン]. Available: https://www.npa.go.jp/toukei/seianki/R05/r05keihouhantoukeisiryou.pdf. [アクセス日: 5 11 2025].

[2] Ultralytics, “YOLOv11-Pose: A Lightweight Real-Time Pose Estimation Model for Human Activity Recognition,” Ultralytics, [オンライン]. Available: https://docs.ultralytics.com/tasks/pose/. [アクセス日: 14 12 2024].

[3] Microsoft, “Windows Hello 生体認証要件,” 20 2 2024. [オンライン]. Available: https://learn.microsoft.com/ja-jp/windows-hardware/design/device-experiences/windows-hello-biometric-requirements. [アクセス日: 5 11 2025].

[4] M. M. H. ,. A. Y. P. ,. R. T. R. Jan Stenum, “Clinical gait analysis using video-based pose estimation: Multiple perspectives, clinical populations, and measuring change,” PLOS Digit Health, 2024.

©2026 IEE Japan

単眼全方位カメラ画像に基づく立体視映像生成

葭葉　那由多*，中村　真吾（芝浦工業大学）
Stereoscopic image generation based on a monocular omnidirectional camera
Nayuta Yoshiba, Shingo Nakamura, (Shibaura Institute of Technology)

１．緒言

通信インフラの発達で，遠隔地で精密操作が可能となり，立体視映像の活用が注目されている．従来手法は複数カメラを要し，設置や処理負荷が課題であった．本研究では，全方位カメラ 1 台による立体視映像生成手法を提案し，有効性と制約を検討する．

２．提案手法

＜2・1＞視点移動画像の生成　　本研究では，全方位カメラ 1 台で撮影した画像を入力として，深層学習モデル pix2pixHD[1] を用い，視点を右方向に移動させた画像を生成する. pix2pixHD は条件付き敵対的生成ネットワークに基づく画像変換モデルであり，本研究では入力画像と，右視点へ移動させた画像の対を用いて学習を行う．これにより，任意の入力画像から右視点画像の生成が可能となる．全方位画像への対応させるため左右連続性を考慮し，Circular Padding を導入する．また，生成画像の輪郭保持を目的としてエッジマップ間の L1 損失および深度値を入力として追加する．さらに，深度を一部欠損させたデータを併用することで，深度情報が得られない場合にも RGB 画像のみから右視点画像の生成をできるようにする．

＜2・2＞立体視映像のリアルタイム表示　　本システムでは，PC に接続された全方位カメラ映像を無線でサーバへ送信し，受信した各フレームを pix2pixHD に入力して右目画像を逐次生成する. 映像伝送には WebRTC を用い, JPEG 形式の画像を送信する．左目と右目の画像は，Unity 上の仮想空間に配置した球体オブジェクトの内面にテクスチャとしてマッピングされる．HMD(Head-Mounted Display) の視点は球体中心に固定し，左目と右目用の球体にそれぞれ左右画像を割り当てることで，HMD に立体視映像を提示する．

３．実験

＜3・1＞実験概要　　単眼視，2 台カメラ立体視，単眼立体視の 3 条件で, 静止画とリアルタイム操作の実験を行った．静止画 19 名，リアルタイム操作実験 18 名，いずれも 10〜20 代の男性の被験者を対象とした．全方位カメラに RICOH THETA V，HMD に Meta Quest 2 を用いた．

＜3・2＞実験条件　　pix2pixHD は，Unity で取得した画像と Pano3D Dataset [2]から得た 1024×512pix の計 10,000 枚の全方位カメラ画像で学習した．また Depth Pro[3] により推定した深度情報を補助入力として用い，一部を欠損させたファイルを含めた．正解画像には，64 mm 右に視点移動した画像を使用した．実験時は深度情報を用いず，RGB 画像のみを入力して画像生成を行った．2 台カメラ立体視では，瞳孔間距離が 64 mm となるようカメラを配置した．

＜3・3＞実験方法　　静止画実験では，2048×1024 pix の画像を提示した. 2 物体のうち近くに見える方を被験者に回答させ，被写体および距離条件を変化させた 3 条件の画像をランダムに提示した．リアルタイム操作実験では，全方位カメラを搭載したロボットを自由に 2 分間操作させ，映像酔いおよび臨場感についてアンケート評価を実施した．1536×768 pix の映像を 3 条件のいずれかでランダムに提示した．評価指標として，静止画実験では正答率と検出力指標を，リアルタイム操作実験では SSQ と IPQ を用い，Wilcoxon 符号順位和検定（$p < 0.05$）で有意差検定をした．

＜3・4＞実験結果と考察　　正答率および検出力指標では，提案手法は単眼視との間に有意差は認められなかった．一方，2 台カメラ立体視は他条件より有意に高い成績を示し，提案手法による立体視では 2 台カメラ立体視と同等の奥行き知覚精度は確認されなかった．　また SSQ と IPQ の結果から，提案手法は他条件と比較して視覚的負荷が大きい傾向が確認された．これは生成画像の品質および視差再現の不十分さに起因すると考えられる．

4．結言

全方位カメラ 1 台による立体視映像提示を実現した．実験の結果，提案手法は奥行き知覚精度と快適性の面で，他手法と比べ劣る傾向が確認された．今後は，生成精度を向上させ，快適な VR 体験の実現を目指す．

文　献

(1) T.-C. Wang, M.-Y. Liu, J.-Y. Zhu, A. Tao, J. Kautz, and B. Catanzaro, in Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit , pp. 8798–8807 (2018) .

(2) G. Albanis, N. Zioulis, P. Drakoulis, V. Gkitsas, V. Sterzentsenko,F. Alvarez, D. Zarpalas, P. Daras, Pano3D, Zenodo (2021).

(3) Aleksei Bochkovskii, Amaël Delaunoy, Hugo Germain, Marcel Santos, Yichao Zhou, Stephan R. Richter, and Vladlen Koltun, Proceedings of the International Conference on Learning Representations (2025) .

©2026 IEE Japan

生理指標を用いたAR酔いの客観的評価に関する検討

松平　幸大*，濱本　和彦（東海大学）

Study on Objective Assessment of AR Sickness Using Physiological Indices

Kodai Matsudaira, Kazuhiko Hamamoto (Tokai University)

１．序論

近年，拡張現実 (AR) 技術の進歩に伴い，スマートグラスをはじめとする軽量かつ小型のデバイスの普及が進んでいる. 産業用途のみならず日常的な利用も拡大しており，長時間利用における安全性と快適性の確保が喫緊の課題となっている. 仮想現実 (VR) 環境下で広く報告されている VR 酔い[1]と同様に，AR 環境においても不快感が生じ，ユーザー体験を損なう可能性が懸念されている[2]. そこで本研究では，AR 空間提示時における被験者の生理指標の計測と，主観的な酔いの評価を同時に実施し，解析を行う．これにより，AR 酔いの特性を主観・客観の両面から明らかにし，その客観的な評価指標を確立することを目的とする.

２．実験手法

本実験には，裸眼またはコンタクトレンズにより正常な視力を有する成人男女計 38 名が参加した．実験環境は，視覚的な干渉による視線への影響を避けるため，壁や障害物から十分な距離を確保した開けた空間とした．被験者は顎台を用いて頭部を固定した状態で，光学シースルーである MagicLeap1 により提示された AR 空間内を水平方向に左右移動する球状の注視点を追跡させる視線追従課題を 10 分間行った．実験条件は，注視点までの距離 (70cm, 200cm) と移動幅 (20 度, 30 度) の組み合わせによる計 4 条件とした. 評価指標として，主観評価にはサイバー酔いの評価に広く用いられる Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [3]を採用した．生理指標として，視線，心電図，脳波の計測を行った. 視線からは視線誤差や瞬目時間などを時系列で取得した. 心電図からは心拍変動解析により自律神経活動指標を，脳波からは主要な周波数帯域のパワー値を算出した．得られたデータに対し，スピアマンの順位相関係数を用いた相関分析を行い，SSQ スコアと生理指標の関連性を調査した.

表１ SSQ スコアと有意な相関を示した生理指標一覧

	N	O	D	TS
視線誤差 X	0.2519**	0.2412**	0.296***	0.272***
瞬目時間	0.2883***	0.3071***	0.313***	0.315***
LF	0.2573**	0.3165***	0.2983***	0.3094***
HF	0.311***	0.241**	0.3043***	0.2913***
α 波	0.1792*	0.1834*	0.1506	0.1711*
β 波	0.1153	0.2388**	0.1955*	0.2042*

(p < .05 * p < .01 ** p < .001 ***)

３．結果および考察

実験の結果，SSQ の下位尺度分析において，AR 環境下では吐き気 (N) よりも眼精疲労 (O) のスコアが顕著に高い値を示す傾向が確認された. これは，従来の VR 酔いが吐き気を主症状とするのに対し，AR 環境下での視線追従課題においては，眼精疲労が不快感の主要因となることを示唆している．表１に SSQ スコアと有意な相関を示した生理指標を示す. 視線指標においては，水平方向の視線誤差および瞬目時間が全ての尺度と有意な相関を示した．タスク継続に伴う視覚疲労や集中力の低下が，追従精度の悪化や瞬目の変化として客観的に反映され，これらが主観的な不快感と強く関連していると考えられる. 心電指標においては，心拍変動の LF 成分および HF 成分ともに全ての尺度と有意な相関を示した. これは，不快感の増大に伴い自律神経活動全体が亢進していることを示唆する. 脳波指標においては，β 波が眼精疲労 (O) および見当識障害 (D)，総合スコア (TS) と有意な相関を示した．β 波は視覚処理や集中時に関連する指標であることから，視線追従課題による視覚的な情報処理負荷が脳活動に反映され，その負荷が AR 酔いにおける眼精疲労感の増大に寄与していると考えられる.

４．結論

本研究では，AR 環境下での視線追従課題における生理指標と主観的な酔いの関連性を調査した．その結果，AR 酔いは VR 酔いと異なり，眼精疲労が主たる要因であることが示された．また，視線誤差の増大，自律神経活動の亢進，および脳波 β 波の増大が SSQ スコアと相関を示したことから，これらが AR 酔いの客観的評価指標として有用である可能性が示唆された. 今後は，これらの指標を用いた AR 酔いのリアルタイム推定手法の構築を目指す.

文　献

(1) L. Rebenitsch and C. Owen: "Review on cybersickness in applications and visual displays", Virtual Reality, 20, 2, 101-125 (2016)

(2) M. Kaufeld, M. Mundt, S. Forst and H. Hecht: "Optical see-through augmented reality can induce severe motion sickness", Displays, 74, 102283 (2022)

(3) R.S. Kennedy, N.E. Lane, K.S. Berbaum and M.G. Lilienthal: "Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness", The International Journal of Aviation Psychology, 3, 3, 203-220 (1993)

©2026 IEE Japan

画像分類モデルにおけるウェーブレット領域と色空間に着目した判断根拠可視化手法の検討

関　弘翔*，細野　裕行（日本大学）

A Study on Visual Explanation Focusing on Wavelet Domain and Color Space in Image Classification Models

Hiroto Seki, Hiroyuki Hosono (Nihon University)

１．まえがき

画像認識 AI で広く用いられている深層学習は，大規模化したニューラルネットワークの持つ膨大なパラメータの最適化を行う。これにより，データに含まれる潜在的な特徴を機械が自動的に獲得できる一方で，判断根拠の不透明性に繋がっている。画像分類モデルの判断根拠を可視化する説明可能な AI（Explainable AI: XAI）手法として代表的なのは，Gradient-weighted Class Activation Mapping（Grad-CAM）[(1)]である。そのほか，摂動に基づく Randomized Input Sampling for Explanation（RISE）[(2)]や，代理モデルに基づく Shapley Additive Explanations（SHAP）[(3)]などが提案されている。これらの手法はいずれも，AI の判断根拠として入力画像の各要素がモデルの予測結果にどれだけ影響しているかを提示するものである。よって従来手法は，AI が空間的に何処を見ているかを示すことができるが，どのような特徴，つまり何に着目したかを示すことができない。

本研究では，画像分類モデルを対象に，その判断根拠を空間に加えて特徴レベルで説明する新しい XAI 手法を検討する。具体的には，人間の視覚特性に基づく CIE-L*a*b*色空間と，空間・周波数解析を行う離散ウェーブレット変換（Discrete Wavelet Transform: DWT）による多重解像度解析（Multi-Resolution Analysis: MRA）を前処理として導入し，SHAP を用いてモデルの判断根拠を可視化する Color-Wavelet SHAP（C-Wave SHAP）を提案する。

２．方法

＜2・1＞色特徴分解　　画像分類モデルへの入力として用いられる RGB 色空間は，各チャネル（R, G, B）が高い相関を持つ。例えば明度の変化に対し，各画素値は一様に増減する。よって，画素値の変化が物体の色の変化に起因するのか照明変動に起因するのかの区別が困難である。

そこで本研究では，人間の視覚特性に基づき定義された L*a*b*色空間を採用する。この色空間は，L*（明度），a*（赤−緑軸），b*（黄−青軸）の直交した 3 軸で色を表す。よって，画像分類モデルの判断根拠を，物体等の形状や陰影の情報を表す L*成分と，物体等の色彩情報を表す a*，b*成分という独立した要因として分離が可能となる。

図 1　C-Wave SHAP におけるランダム摂動の例
Fig. 1.　Example of random perturbation in C-Wave SHAP

＜2・2＞構造特徴分解　　画像分類において，物体等が持つテクスチャ（模様）やエッジ（輪郭）は重要な特徴である。しかし，従来の空間領域での判断根拠可視化では，ある空間領域の寄与は評価できても，空間的な周波数構造を直接評価することはできない。そこで本研究では，L*成分に対して DWT による MRA を導入し，画像を異なる解像度レベルの周波数帯域へ分解する。本研究では，マザーウェーブレットとして Haar ウェーブレットを採用する。

＜2・3＞特徴寄与度算出　　＜2・1＞＜2・2＞節で定義した位置，色と構造からなる特徴空間を利用し，画像分類モデルの予測に対する各特徴の寄与度として SHAP 値を算出する。SHAP とは，協力ゲームにおいて各プレイヤーがもたらす貢献を公平に算出する Shapley 値の考え方を用いて，機械学習モデルの予測に対する各入力特徴の寄与を算出する手法である。本研究では，特徴の追加・削除によるモデル出力の変化を近似するために SHAP の中でも KernelSHAP[(3)]を採用する。RISE や SHAP など，入力特徴の摂動に基づいて説明を行う従来の判断根拠可視化手法では，画素のスーパーピクセルを単位としたマスキングが一般的であるが，本研究では，位置に加え「特定の周波数成分」や「特定の色成分」単位でマスキングを行う点が大きな特徴である（図 1）。

＜2・4＞特徴寄与度マップによる判断根拠可視化　　画像空間上の各位置における特徴成分（色成分や各周波数帯域）ごとに，対象クラスに対する特徴寄与度マップを生成する。これにより，モデルが「色」と「構造」のどちらに着目したかや，どの位置の特徴が対象クラスらしさを増減させたかを把握できる。

＜2・5＞顕著性マップによる判断根拠可視化　　空間上の各位置において全特徴の SHAP 値の絶対値の和をとり，従来の顕著性マップと同様に空間的な重要度を表示することができる。これを特徴統合顕著性マップと呼ぶ。

©2026 IEE Japan

３．結果

＜3･1＞データセットとモデル　データセットには，一般物体認識ベンチマークである ImageNet（ILSVRC 2012）[4]の検証用データセット（Validation Set）を用いた。画像分類モデルには，CNN ベースの ResNet50[5]を採用した。

＜3・2＞定量評価指標　可視化結果の信頼性を定量化するため，Deletion/Insertion Metrics[2]を用いた。Deletion は，重要度が高いと判定された特徴から順に削除しながら，モデルスコアの推移を測定するものであり，曲線下の面積（Area Under the Curve: AUC）が小さいほど，真に重要な特徴を捉えていることを意味する。Insertion はその逆であり，AUC が大きいほど真に重要な特徴を捉えていることを意味する。

＜3・3＞特徴的な模様の動物に対する判断根拠可視化　図 2 に，特徴的な模様を持つ動物としてシマウマの画像に対する C-Wave SHAP の説明を示す。図 2 より，シマウマの分類において，最も細かなエッジからなるレベル 1 の高周波成分が支配的であったとわかる。寄与度マップでも，シマウマが存在するグリッドが高い正の SHAP 値になっていた。

＜3・4＞特徴的な色の動物に対する判断根拠可視化　図 3 に，特徴的な色を持つ動物として金魚の画像に対する C-Wave SHAP の説明を示す。図 3(a)より，分類において色成分が支配的であると示された。図 3(b)に，Deletion/Insertion の各ステップで分類を行った結果を示す。Deletion の 30%時点で赤い成分は残存するものの，分類スコアは 0.039 と低値になっている。Insertion では，処理段階において b*が表現する黄色成分から優先的に追加されており，10%時点で分類スコアは 0.973 に達している。図 3(c)に，特徴統合顕著性マップと Deletion/Insertion Metrics を従来手法と比較した結果を示す。C-Wave SHAP の顕著性マップを見ると，RISE と同様に複数領域に点在する金魚に対してモデルが注目していることを可視化できている。グラフを見ても C-Wave SHAP の Deletion は低 AUC，Insertion は高 AUC と望ましいカーブを描いており，重要な特徴を適切に捉えている。

４．まとめ

本研究では，画像分類モデルの判断根拠を，空間的位置に加えて周波数特徴と色特徴に基づいて説明可能な C-Wave SHAP を提案した。評価実験の結果，C-Wave SHAP は特徴成分ごとの寄与度分析により，モデルが分類時に「何を」見たかを事後的に解釈できることを示した。

本研究は JSPS 科研費 JP24K20800 の助成を受けたものです。

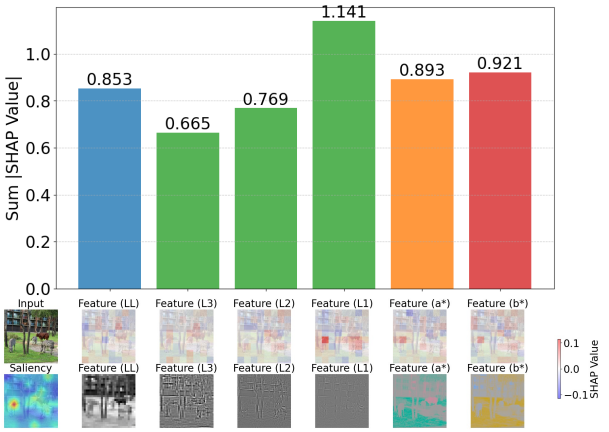
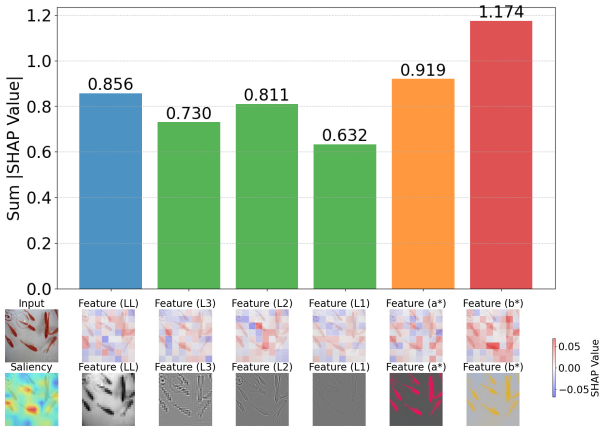
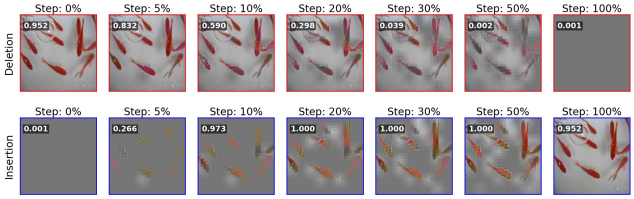


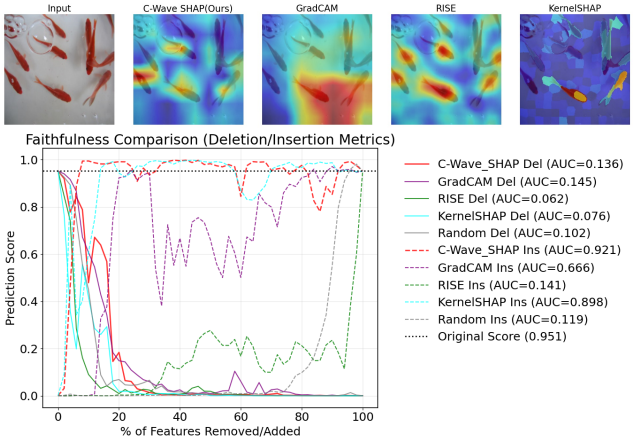
図 2　ゼブラの画像に対する C-Wave SHAP の説明例
Fig. 2.　Example of C-Wave SHAP explanations for zebra.



(a) Feature contribution map.



(b) Deletion/Insertion process images



(c) Feature integration saliency map and Deletion/Insertion metrics.

図 3　金魚の画像に対する C-Wave SHAP の説明例
Fig. 3.　Example of C-Wave SHAP explanations for goldfish.

文　献

(1) R. R. Selvaraju, et al., in Proc. of the ICCV (2017)
(2) V. Petsiuk, et al., in Proc. of the BMVC (2018)
(3) S. M. Lundberg, et al., in Proc. of the NeurIPS (2017)
(4) J. Deng, et al., in Proc. of the IEEE CVPR (2009)
(5) K. He, et al., in Proc. of the IEEE CVPR (2016)

©2026 IEE Japan

トマトカラースケール推定精度を向上させる直交性を持ったモノクロカメラ用複数枚光学フィルタの設計

石田　周汰 *，栗原　徹　(高知工科大学)
武居　祐子, 降幡　夏生, 松井　貴弘　(KOA 株式会社)

Shuta Ishida*, Toru Kurihara (Kochi University of Technology)
Yuko Takei, Natsuki Furihata, Takahiro Matsui (KOA Corporation)

概 要

本研究では，トマトのカラースケールおよびリコピン濃度推定を目的として, 直交性を持たせた 2 枚の学習可能な光学フィルタを用いる手法を提案する. 分光反射データから光学フィルタの設計と推定を同時に学習する深層モデルを構築し, 直交性制約を導入しないモデルとの比較実験を行った. 結果としてカラースケール推定において正解率が約 7%向上することを確認した.

1　はじめに

トマトの成熟度 (カラースケール) 及びリコピン濃度は重要な品質指標であるが, 従来の目視評価や化学分析 (HPLC 等) には人的差異やコスト, 破壊的測定などの課題がある. そのため非破壊的かつ迅速な推定方法が求められている.

ハイパースペクトル画像（HSI）は非破壊かつ高精度な推定を可能にするものの, ハイパースペクトルカメラは高価であり, 農業現場での運用は容易ではない. そこで, 必要な波長のみを透過する光学フィルタを設計し, 安価なカメラで推定を行う手法が提案されている [1]. しかし RGB カメラでは固定されたカラーフィルタにより重要な波長情報が損失する可能性がある.

本研究では, モノクロカメラを対象に学習により最適化された光学フィルタを設計し, フィルタ通過後のモノクロ画像から品質推定を行う手法を提案する. また, 複数フィルタに直交性制約を導入することで特徴波長の分散を促し, 成熟度及びリコピン濃度推定の精度向上が可能かを検証する.

2　提案手法

本研究では,397〜1000nm のスペクトルデータを入力とし, 複数の光学フィルタの設計からカラースケール及びリコピン濃度の推定までを一貫して行うネットワークを構築する. ネットワークは推定値の MSE ロスの最小化を目的に学習する. 光学フィルタは各波長に対応する透過率を要素とする学習可能なベクトルとして定義し, 入力スペクトルとの内積によって輝度値 (モノクロ画像) を生成する．さらに, 複数枚のフィルタから得られる情報が冗長にならないように, フィルタ間に直交性制約を導入した. これによって各フィルタが異なる波長帯を強調するように学習され, 互いに相補的な特徴波長を抽出できる設計になっている. この構成により, より高精度な品質推定を実現する.

2.1　データ

実験に用いるスペクトルデータは 2025 年 5 月 12 日に KOA 敷地内のハウス内で撮影した. 収穫したトマトは白色反射板と共に並べ,Specim 社製ハイパースペクトルカメラ SpecimIQ を用いて上から撮影した.

この画像から,YOLOv8 を用いてトマトを検出し, 各トマトの周辺の画素スペクトルを取得した. 白飛びや過度な暗点等を避けるため, 取得するスペクトルデータに複数の閾値条件を設け, 有効スペクトルのみを取得した.

2.2　深層モデル

提案手法では, ハイパースペクトル画像から取得した 397〜1000nm(202 バンド) の反射率データを用いて深層モデルの入力とした. 入力データは各波長について最大値で正規化を行い, 目的変数も同様に最大値で正規化してから学習に用いる.

提案モデルでは入力データと同じ長さの学習可能な 2 枚の光学フィルタ F_1, F_2 を持ち, 入力データとの内積 I_1, I_2 に基づいて以下の特徴量を生成する.

$$f_1 = I_1 + I_2 \tag{1}$$

$$f_2 = I_1 - I_2 \tag{2}$$

$$f_3 = \frac{I_1}{I_1 + I_2} \tag{3}$$

$$f_4 = \frac{I_2}{I_1 + I_2} \tag{4}$$

上記と I_1, I_2 を含む 6 要素を持つベクトルを入力次元として, 作業者が図 1 のようなカラーチャートを参照して決定したカラースケールと化学分析によりリコピン濃度を推定する.

モデル構造は定義した 6 要素を全結合ネットワーク (6-32-64 に入力し, そこからカラースケール (64-128-1) とリコピン濃度 (64-128-64-1) のそれぞれのネットワークに分離させ各 1 次元の回帰値を出力する構造になっている.

©2026 IEE Japan

最適化には Adam, 学習率 $1.0 * 10^{-4}$, 損失関数には MSE ロスを用いて,300 エポックまで学習を行った. エポック内で Validation データの損失関数が最小となるモデルを Test データに適用した.

さらに, 光学フィルタ F_1, F_2 の学習においては, フィルタ形状を滑らかにするための二階差分に基づく平滑化正則化項 (L_{smooth}) と, 両フィルタが同一方向を持たないようにする直交性正則化項 (L_{ortho}) を導入した. 損失関数の式を以下に示す.

$$L = L_{\text{MSE}} + \lambda_{\text{smooth}} L_{\text{smooth}} + \lambda_{\text{ortho}} L_{\text{ortho}} \tag{5}$$

$$L_{\text{ortho}} = \cos^2\theta = \left(\frac{\mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{F}_2}{\|\mathbf{F}_1\| \, \|\mathbf{F}_2\|} \right)^2 \tag{6}$$

平滑化項の重みを決定する係数を λ_{smooth}, 直交性項の重みは λ_{ortho} と定義し, 本研究ではそれぞれ 0.01, 0.10 と設定した. この直交性項を用いるモデルと，直交性項を無効化したモデルの両方を学習し，性能比較を行う.

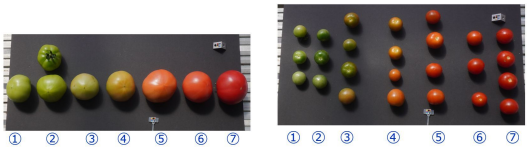


図 1: カラーチャート
Fig. 1 Color chart

提案法の有効性を確認するために同様の分光反射データを用いた比較実験を行った.5 分割交差検証により, データは学習 132 個, 評価 33 個に分割し, 評価データの中で MSE ロスが最も小さいモデルを固定の 29 個のテストデータに適用し,5 回のテスト結果の平均を評価した. 比較対象としてフィルタ同士の直交性を考慮しないモデルを構築した.

3 結果

学習によって得られた 2 枚のフィルタの透過率を図 2 に示す. 直交性有りのフィルタは直交性無しのフィルタに比べてそれぞれ別の波長帯を強調していることがわかる.5 分割交差検証の結果, カラースケールの推定値を四捨五入によって 1〜7 とした場合, 直交性有りのモデルの平均正解率は 57.2%, 直交性無しのモデルは 50.3%となった. 直交性の有無によって 6.9%の精度向上を確認した. しかし, リコピン濃度の推定値と実数値の平均絶対誤差 (MAE) の値は直交性有りのモデルが 0.423, 無しのモデルが 0.402 と僅かに直交性無しのモデルの方が優れていた. また, 図 3 にはカラースケール, 図 4 にはリコピン濃度の真値と予測値の散布図を示す. この散布図から直交性有りのモデルではカラースケールが 4,5 の予測値のばらつきが抑えられていることがわかる.

表 1: テスト結果
Table 1 Test results

	直交性有り	直交性無し
正解率 (CS)	57.2%	50.3%
MAE (CS)	0.480	0.531
MAE (リコピン)	0.423	0.402

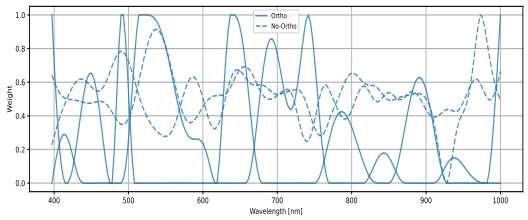
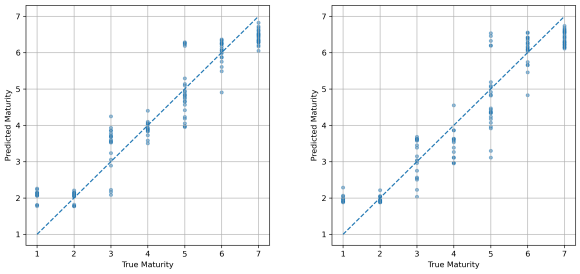
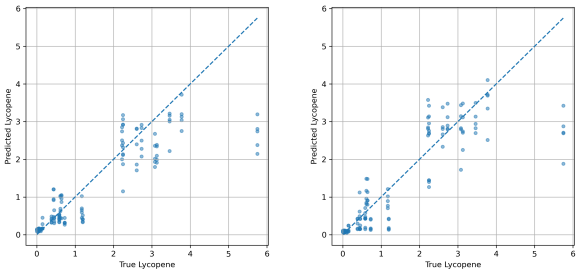


図 2: 設計されたフィルタ
Fig. 2 Designed optical filters



直交性有り　　直交性無し

図 3: カラースケールの散布図
Fig. 3 Scatter plots of color scale



直交性有り　　直交性無し

図 4: リコピン濃度の散布図
Fig. 4 Scatter plots of lycopene concentration

4 終わりに

本研究では, モノクロカメラを用いた直交性のある光学フィルタ設計法を提案し, その有効性を検証した. 結果として, 光学フィルタ間に直交性制約を導入することでフィルタで強調される波長帯が分散し, カラースケール推定において正解率の向上が確認できた. しかし, リコピン濃度の推定では直交性無しのモデルの方が僅かに良好な結果となり, 推定対象の特性に応じて必ずしも直交性が最適ではないということが分かった.

参考文献

[1] 栗原徹， 武居祐子，松原夏生，長田広幸，松井貴弘，“トマトカラースケール推定精度を向上させる光学フィルタの End-to-End 設計の検討,” ViEW, IS1-11, pp.234–238, パシフィコ横浜, 12/05-06, 2024.(2024/12/05)

©2026 IEE Japan

２視点没入型バーチャル環境が生体へ与える影響と作業効率に関する研究

柳澤　佳汰*，濱本　和彦　(東海大学)

Study on the Effects of Dual-View type Immersive Virtual Environment on Biological Systems and Work Efficiency

Keita Yanagisawa, Kazuhiko Hamamoto (Tokai University)

１．背景

２視点没入型バーチャル環境(Immersive Virtual Environment: IVE)とは，ユーザを複数の大型スクリーンで囲み，映像環境に没入させる装置である．位置情報取得用のマーカー付き液晶シャッターメガネを着用することで，IVE 内ではユーザの視点に最適化された立体視が可能となる．一般的な HMD（Head Mounted Display）と比較して，身体的拘束が少なく，バーチャル環境内で身体動作を用いた直感的なインタラクションが可能である．従来, IVE では最適な立体視が可能な人数は 1 ユーザに限られることがほとんどであった (Single View). Single 条件では 1 フレーム(1/120 秒)あたり，片目に 120Hz で映像が出力され，一般的なフレームレートである 1/60 秒間では，片目あたり 1/120 秒(8.3ms)の無映像時間が生じる．近年，プロジェクターの描画速度向上により, 1 フレーム内で 2 ユーザ分の映像を片目あたり 240Hz で出力することが可能となった．これにより，2 ユーザが同時に装置内で最適な立体視を行う Dual View が実現した．一方で, Dual 条件では 1/60 秒間において，1 ユーザの片目あたり 3/240 秒(12.5ms)の無映像区間が生じる．さらに，1 ユーザの両目に対して 2/240 秒(8.4ms)の無映像時間が生じる(図 1). 本学の IVE は時分割立体投影方式を採用しており，用途に合わせて Single 条件と Dual 条件の切り替えが可能である（図 2）．本方式では，交互に投影される視差映像に同期して，液晶シャッターメガネが開閉することで立体視を実現する．マーカーのないメガネを装着した場合，自身の視点とは異なる視差映像を視認することになり, Single 条件と Dual 条件ともに視覚的不整合が生じる．

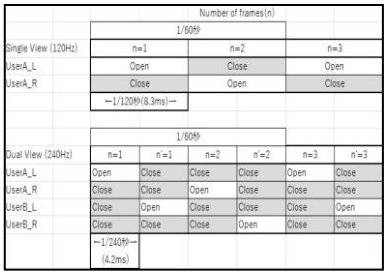


図 1. プロジェクターからの映像出力イメージ
Fig.1. Image output from the projector

図 2. 本学の IVE
Fig.2. Dual-View type IVE

２．目的

本学の IVE を用いて Single 条件と Dual 条件におけるコンテンツ視認時の性質が VR 酔いと没入感に与える影響を評価することと 2 名の共同作業時における作業効率の違いを明らかにすることである．最終目的は今後，オンラインで接続された IVE 同士を用いた協調作業や教育環境の設計に貢献することである．

３．提案手法

＜3・1＞実験環境　　本学品川キャンパスの IVE を用いる．開発環境は Unity(2020.3.36)と作成したコンテンツを IVE に投影するためのプラグインである MiddleVR である．

＜3・2＞実験方法　　IVE 内での視認条件の違いが VR 酔いに与える影響を調査した事前調査[1]では，視認条件間に有意差が存在しなかった．そのため，本研究では主に作業効率の評価に着目し, 2 名 1 組の被験者による「アフリカ大陸 3D 国名パズル」を実施した．被験者は「操作者」と「指示者」に分かれ，操作者は常にマーカー付き液晶シャッターメガネを装着し，コントローラーで国別ピースを操作する．操作者がピースを掴むと，対応する国旗がバーチャル環境上に表示される．一方，指示者は Dual 条件時のみマーカー付きメガネを装着し，紙の指示書を参照しながら，操作者が保持するピースの国旗と正しい配置位置を照合し，設置指示を行う．この共同作業を通じて，視認条件の違いが VR 酔い，没入感，および作業効率に与える影響を評価する．

＜3・3＞評価方法　　VR 酔いの主観的評価には吐き気(N), 眼精疲労(O), めまい(D), 総合評価(TS)の 4 項目から構成される Simulator Sickness Questionnaire(SSQ)を用いる．没入感の主観的評価には General Presence (g), Spatial Presence (sp), Involvement (inv), Experienced Realism (real)の 4 項目で構成される Igroup Presence Questionnaire（IPQ）を用いる．作業効率の評価には，実験ログから算出した作業平均時間，ピースを掴んで悩んでいた平均時間，失敗回数の平均を用いる．さらに，バーチャル環境内のピース散布図を作成し，IVE 内における選択されやすいピースのサイズおよび位置を可視化した．統計分析には HAD を使用する[2].

４．実験結果

©2026 IEE Japan

＜3･1＞VR 酔い主観的評価(SSQ)　　視認条件（Single/Dual）およびユーザ属性（操作者/指示者）を要因とする二元配置分散分析の結果，D 値において交互作用に有意傾向が認められた(F(1, 28)=3.16, p=.087). 単純主効果検定の結果，Dual 条件ではユーザ属性の主効果に有意傾向が認められた(F(1, 28)=4.04, p=.054). 平均値は操作者 3.48，指示者 24.36 で，指示者の方が高い値を示した．また，指示者においては，視認条件の主効果に有意傾向が認められた（F(1, 28)=3.40, p=.076）．平均値は Single 条件 5.22, Dual 条件 24.36 であり，Dual 条件の方が高い値を示した．

＜3・2＞没入感主観的評価(IPQ)　　二元配置分散分析の結果，g，real 値においてユーザ属性の主効果が有意であった(g:F(1,28)=4.26, p=.048; real:F(1,28)=6.51, p=.016).

ユーザ属性の水準ごとの平均値は，g 値では操作者 3.25，指示者 1.94，real 値では操作者 2.38，指示者 1.42 であり，いずれの指標においても操作者の方が高い値を示した．視認条件の主効果および視認条件とユーザ属性の交互作用はいずれも有意ではなかった。

＜3・3＞作業効率評価　　各視認条件においてサンプル数が 8 と少なく，外れ値も確認された. Q-Q プロットの結果から正規性がないと推察されたため，ノンパラメトリック検定を用いた．マン･ホイットニーの U 検定の結果，ピースを掴んで悩んでいた時間は，Single 条件の方が Dual 条件よりも有意に長かった（平均順位：Single=11.38，Dual=5.63; U=9.00, z=-2.36, p=.018）．作業時間および失敗回数については，視認条件による有意差は認められなかった．

また，ピース散布図および環境ヒートマップから，選択されやすいピースの座標は，操作者の前方 5～8m，左右 3m の範囲に集中し，足元や後方のピースは選択されにくい傾向が示された．また，あてはめられた順位とピースのサイズの相関分析では，視認条件別および全体のいずれにおいても強い負の相関が認めら，サイズの大きいピースほど早く選択される傾向が確認された．特に 1 ㎥立方体に対して 2～4 倍のサイズが選ばれやすかった．

5．考察

＜5・1＞SSQ　　Dual 条件で指示者の D 値が高くなった傾向は，紙の指示書を参照する低没入度の状態と映像への高没入度の状態を繰り返すことにより焦点が定まらず，めまいを感じる傾向にあったためと考えられる．

＜5・2＞IPQ　　g, real 値ではユーザ属性の主効果のみ有意であり，操作者の方が指示者よりも高い値となった．これは操作者がコントローラーを用いてバーチャル環境に直接干渉できるためと考えられる．一方, sp, inv 値に有意差が認められなかった理由として, IVE では相手の身体が常に視界に入ることで役割に関わらず sp 値が高まったこと，および現実空間での対面コミュニケーションや紙の指示書を併用した実験条件により，inv 値の役割差が生じにくかったためと考えられる．

＜5・3＞作業効率　　Single 条件では指示者に視覚的不整合が生じるため，操作者への指示が上手くいかず，ピースを掴んだまま悩む時間が Dual 条件よりも長くなったと考えられる．

＜5･4＞2 視点没入型バーチャル環境の性質　　液晶シャッターメガネの性質による一瞬の暗転や Single 条件における指示者の視覚的不整合は，VR 酔いや没入感に影響を与えるほどではなかったと考えられる．

６．まとめ

本実験環境では，液晶シャッターメガネによる一瞬の暗転や Single 条件における指示者の視覚的不整合は，VR 酔いや没入感に大きな影響を与えないことが示された．しかし，Dual 条件では指示者のめまいが高まる傾向となった．これは没入度の高低を繰り返すことによる焦点のズレが要因だと考えられる．作業効率については，Dual 条件の方が操作者のピースを掴んで悩む時間が短縮された．没入感はユーザ属性間で差がみられ，コンテンツに直接干渉できる操作者の値の方が高くなった．

以上より，2 視点没入型バーチャル環境のコンテンツ設計指針として，指示はバーチャル環境内に UI 表示し，没入感向上のため，コントローラーによる直接的なインタラクションを取り入れることが望ましい．オブジェクトは，操作者前方 5～8m，横 3m の範囲に配置し，1 ㎥の立方体に対して 2～4 倍の大きさが選ばれやすいと示唆された．

今後は，2 ユーザが同時に快適に作業できる環境の実現に向け，解像度やスクリーン輝度の調査，遠隔接続された IVE 間での作業を想定した UI 配置や操作性の最適化を検討していく．さらに，立体構造物の学習や防災・産業用シミュレータへの応用を通じ，新たなアイデアの創出や技能の熟練度向上を目指す．

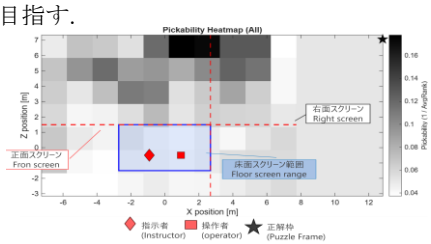


図 3.バーチャル環境ヒートマップ
Fig.3. Virtual Environment Heatmap

文　献

(1) 栁澤佳汰: 2 視点 CAVE におけるコンテンツ体験時の生体への影響に関する研究，令和 6 年電気学会全国大会(2024)
(2) 清水裕士:フリーの統計分析ソフト HAD：機能の紹介と統計学習・教育，研究実践における利用方法の提案　メディア・情報・コミュニケーション研究, 1, 59-73, (2016)

©2026 IEE Japan

動画データを参照にした自動人物除去

露崎　智哉，中村　真吾（芝浦工業大学）

Automatic Person Removal Using Reference Movie Data

Tomoya Tsuyuzaki, Shingo Nakamura (Shibaura Institute of Technology)

１．背景

近年，デジタルアーカイブや SNS の発展に伴い，人物が映りこんでいない背景単独の画像・動画の需要が高まっている．しかしながら，観光地や都市部の公共空間においては，終日多くの来訪者が行き交うため，実際に無人の背景のみを撮影することは極めて困難である．

人物を除去する既存手法として，深層学習に基づく物体検出や画像インペインティングによる欠損領域の自動補完が挙げられる．しかし，従来のインペインティングは単一画像内の情報に依存するため，補完結果が実景と乖離する事例が少なくない．とりわけ文化財や広告物など，背景の細部が意味的に重要なシーンでは，不自然な補完が顕著な問題となる．

そこで，本研究では，画像検索による最適フレーム抽出と位置合わせを経て，参照型インペインティングを行う背景補完システムを構築した．これにより実景に基づく高品質な補完を実現した．

２．提案手法

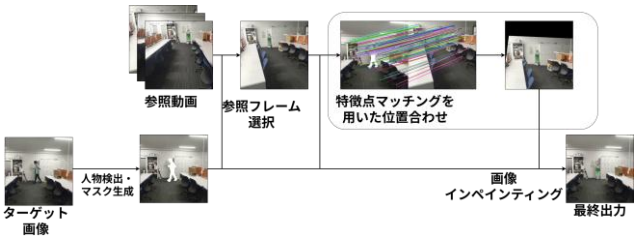


図 1 提案手法の概要図
Fig. 1. Overview of the proposed method.

以下に提案する自動人物除去の手順を示す（図１参照）．

1. **人物検出・マスク生成：** YOLO11n を用いたセマンティックセグメンテーションにより，ターゲット画像から人物領域をピクセル単位で検出し，インペインティング用のマスクを生成する．
2. **参照フレーム選択：** 事前に撮影した動画内の全フレームから，ターゲット画像の欠損領域を補完するために最適な参照フレームを選定する．この際，高速近似最近傍探索ライブラリ Faiss [1] を用い，類似度が高く，かつ遮蔽領域の背景情報を含むフレームを効率的に探索する．
3. **特徴点マッチングを用いた位置合わせ：** 選定された参照フレームは，撮影視点が異なるため，LightGlue [2] を用いて特徴点マッチングを行い，その後ホモグラフィ変換によりターゲット画像との幾何学的な位置合わせを行う．
4. **画像インペインティング：** 位置合わせされた参照フレームとマスク画像を入力として，参照画像活用型インペインティングモデルである TransRef [3] の構造を改良したモデルを用いて背景補完を行う．これにより事実に基づいた背景復元を実現する．

３．実験内容

提案手法の有効性の検証のため，2 種類の実験を行った．

＜3・1＞実験 1 参照フレーム選定精度の検証

提案手法における参照フレーム選定精度を検証する．人物を含まない背景画像に疑似マスクを適用し，パラメータ等の条件変更による選定結果の差異を分析する．評価指標には，有効被覆率に加え，再学習済み TransRef 適用時の定量および定性評価を用いる．

＜3・2＞実験 2 人物除去・背景補完の精度の検証

人物除去および背景復元の最終品質を評価する．比較手法として，再学習済み TransRef，構造改良を加えた TransRef (提案手法)，および高精度な非参照ベース手法を用いる．評価には独自撮影した実環境動画を使用する．評価は定量・定性の両面から行う．

４．結言

本研究では，参照動画からの最適フレーム抽出と位置合わせ技術を統合し，実際の背景情報に基づく高精度な自動人物除去システムを構築し，その評価を行った．

文　献

(1) J. Johnson, M. Douze, and H. Jégou, IEEE Transactions on Big Data, vol. 7, no. 3, pp. 535–547 (2019)

(2) Philipp Lindenberger, Paul-Edouard Sarlin, Marc Pollefeys, ICCV, pp.16106–16116 (2023)

(3) T. Liu et al., Neurocomputing, vol. 632, art. no. 129749 (2025)

©2026 IEE Japan

牡蠣断面画像における二層間の境界線検出

尾方　瑛仁*，野崎　真也(琉球大学)
坂巻　隆史(東北大学)

Boundary detection between two layers in cross-sectional images of oysters

Eito Ogata, Shinya Nozaki (University of the Ryukyus)
Takashi Sakamaki (Tohoku University)

１．まえがき

現在，日本ではカキの養殖方法として垂下式養殖というものが主流となっている。この養殖において牡蠣の生育密度と生育環境には関係性がある[(1)]。この牡蠣の生育環境の関係性について，牡蠣殻の Mg/Ca 比分布に基づいた牡蠣成長の定量的な指標[(2)]が存在するが，化学分析を行うために多大な労力と時間を要する。そこで，牡蠣殻断面画像から特徴量を取得し，特徴量から直接生育状態または成分を関連付けることで簡易的に定量的な評価を行うことを研究の目的とする。牡蠣の断面には葉状層とチョーク層部分が存在し，それらが生育環境に影響を及ぼす可能性がある。このことから，本報告では殻頂付近の葉状層とチョーク層が折り重なる領域における二層の境界線の直線検出を行う。

２．提案法および実験方法

＜2・1＞局所領域における直線検出

牡蠣の断面画像に存在する葉状層とチョーク層は，基本的には直線または曲線からなる。そこで，画像内のエッジを直線として検出することが出来る OpenCV の HoughLineP 関数を用いた。しかし，牡蠣殻断面画像に対して検出を行うと，実際の境界線の数より多く検出されていた[(3)]。そこで，局所領域に着目することで検出の精度の向上を試みた。ここで，750×550 ピクセルの殻頂断面画像内の局所領域を 50×50 ピクセルのサイズで切り取った。局所領域に対するパラメータの組み合わせを表 1 および表 2 に示す。直線検出前のエッジ抽出のパラメータとして，最小閾値を 30 から 300 とし，最大閾値を 60 から 600 とした。それに伴い，Sobel フィルタサイズは，閾値が低い場合に 3，高い場合では 5 とした。直線検出のパラメータとして，Threshold（しきい値）を 5 から 20，Min Line Length（同一線上とみなす最小の長さ）を 5 から 20，Max Line Gap（最大許容ギャップ）をすべて 5 とした。しかし，このようにパラメータを調整しても適切に直線を得られない場合がある。

表 1 エッジ抽出のパラメータの組み合わせ
Table 1. Edge extraction parameter combinations

最小閾値	最大閾値	Sobel フィルタサイズ
30	60	3
50	100	3
100	150	3
100	200	3
150	200	3
150	300	3
200	400	5
300	600	5

表 2 直線検出のパラメータの組み合わせ
Table 2. Line detection parameter combinations

Threshold	MinLineLength	MaxLineGap
5	5	5
10	10	5
15	15	5
20	20	5

＜2・2＞検出した直線の削減

領域ごとに最も適切なパラメータに調整するには手間と時間がかかる。そこで，検出した直線の削減を行うことでパラメータの負担を減らすことが期待できる。牡蠣の断面画像に存在する葉状層とチョーク層は基本的には直線または曲線からなる。このことから，検出した各直線に対して法線ベクトルを求める。そして，すべての角度の中央値から一定の誤差範囲外の直線を削除する。誤差は，中央値から±5°，±10°，±15°，±20°，±25°，±30° の 6 つで評価を行った。

＜2・3＞直線削除後の局所領域の結合

直線を削除した後の各局所領域の結合を行い，全体画像にした。全体画像にする際の各局所領域におけるパラメータはすべて同じものとした。

©2026 IEE Japan

３．実験結果および考察

＜3・1＞局所領域における直線検出の結果

局所領域における直線検出の結果を図 1 に示す。

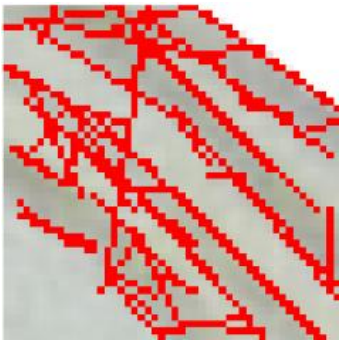


図 1 局所領域における直線検出の結果

Fig.1. Results of line detection in local regions

図 1 から二層の境界線適切に検出できていない。これは，二層の境界線が近い距離にあることと葉状層内のエッジも抽出されてしまったことが原因だと考えられる。

＜3・2＞検出した直線の削減結果

角度の中央値から誤差±15° 以外の直線を削除した結果を図 2 に示す。

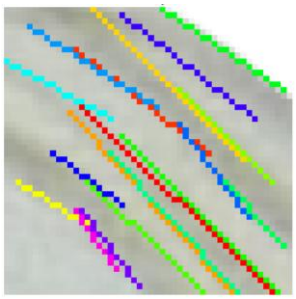


図 2 検出した直線の削減結果

Fig.2. Result of reducing detected lines

図 1 と図 2 を比較すると直線が削減されたことが分かる。また，層に対して交わるように検出されていた直線がなくなっている。

＜3・3＞直線削除後の局所領域の結合結果

各局所領域において，最小閾値 300，最大閾値 600，Sobel フィルタサイズ 5，Threshold5，Min Line Length5，Max Line Gap5 のパラメータで，角度の中央値から誤差±15° 以外の直線を削除したときの結合後全体画像結果を図 3 に示す。また，殻頂付近のチョーク層と葉状層の二層が折り重なる領域を図 4 に示す。

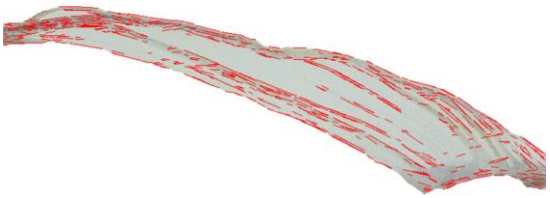


図 3 直線の削減後の全体画像結果

Fig.3. Overall image result after line reduction

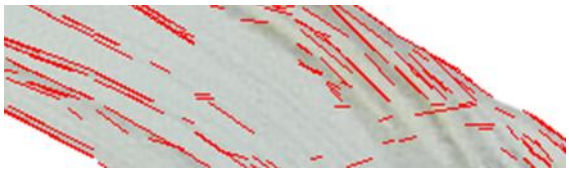


図 4 殻頂付近の二層が折り重なる領域

Fig.4. The area where the two layers overlap near the apex of the shell

図 3 から適切に削減できなかった領域があることが分かるが，図 4 から殻頂付近の二層が折り重なる領域では，半数以上が二層の境界線そった直線になっていることが分かる。一部では葉状層と異なる向きの直線が検出されている。これは，局所的に処理を行った際での直線の角度が全体的な葉状層のものと異なるためである。

４．むすび

本稿では，局所領域における検出した直線の削減を行った。今回の直線の削減では，境界線に対して大きくずれた直線の削除を行うことが出来ることが分かった。しかし，適切に削減できていない領域もあった。

今後は，検出した直線からどのような評価を行うか検討する必要がある。

５．謝辞

牡蠣断面画像を使用するにあたり，サンプルの撮影を行った山里一景氏に感謝を申し上げます．

文　献

(1) 山本 裕規・吉木 健吾・小松 輝久・佐々 修司・濱名 正泰・村田 裕樹・柳 哲雄，“志津川湾におけるカキ養殖等の環境容量に関する数値モデル解析－災前と現在の比較－，” 土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.73，No.2，pp. I_1339-I_1344，(2017)．

(2) 栗原 有輝・畠山 勇二・丸尾 知佳子・西村 修・坂巻 隆史，“カキ殻の Mg/Ca 比分布に基づく二次生産性評価関する基礎的研究，” 土木学会論文集 G(環境)，vol.78，No.7，pp. I_103-I_113，(2022)．

(3) 尾方瑛仁・野崎真也，“局所領域に着目した牡蠣殻断面画像における層部分抽出，” 電気学会次世代産業システム研究会，IIS-25-085，(2025)．

©2026 IEE Japan

火山灰検出における二値化処理組合せ手法の提案

丸山 晃征*，杤 健一，渡邉 裕太，永田 亮一，吉村 和晃，前薗 正宜（鹿児島高専）
楠原 良人（一般社団法人地域環境エネルギー研究所）
古市 浩隆，三谷 幸治（株式会社ユピテル）瀬濤 喜信（弓削商船）

Proposal of Combined Binarization Processing Method for Volcanic Ash Detection

Kosei Maruyama, Kenichi Haji, Yuta Watanebe, Ryoichi Nagata, Kazuaki Yoshimura, Masaki Maezono (N.I.T. KC)
Yoshito Kusuhara(Association for Regional Green Energy Research)
Hirotaka Furuichi, Koji Mitani(Yupiteru Corporation) Yoshinobu Seto (N.I.T. YC)

１．序論

鹿児島県には活火山である桜島が存在し、温泉や火山灰を利用した陶器などの観光資源により、多くの来訪者を惹きつけている。一方、桜島は不定期かつ高頻度で噴火するため、周辺住民や観光客への降灰の悪影響も大である。

降灰被害対策は迅速である程、効果が高いため、降灰を検知し、リアルタイムに通知する Sobel フィルタ[1]を用いたシステム開発を進めている。Sobel フィルタは、画素の輝度勾配を抽出する画像処理手法の 1 つであり、灰の輪郭を強調した検出ができる。しかし、灰が高密度に堆積した際、検出精度が低下する点が課題である[2]。そこで本研究では、二値化を組み合わせた手法を提案し、その有効性を検討したので報告する。

２．原理及び実験方法

初めに、撮影した画像に二値化処理および Sobel フィルタ処理を施し、その 2 つの画像をブロック毎に分割する。次に 96×96 pixel のブロック内の画素値の平均値を計算し、Sobel フィルタ画像にて、周辺のブロックの画素値の平均値と比較する。ここで、平均値の差が予め設定した閾値を超えた場合、色の変化が著しいとみなし、Sobel フィルタ処理での平均値を用いる。逆に、閾値を超えなかった場合は色の変化を抽出する必要がないと判断し、二値化処理での平均値を用いる。

3. 実験結果

3.1. 灰を各点に高密度に堆積させた場合

まず初めに、各点に灰を高密度に堆積させた際の検出精度の評価をした。今回は、ブロック内における画素値での平均値の総和を正規化したものと画像内の灰 0.01[g]の塊の個数を指標に評価した。図 1 にその結果を示す。図 1 より、二値化処理を組み合わせた手法の方が、灰の塊の数の増加に対し、より線形的である。

3.2. 灰をまばらに分布させた場合

次に、灰をまばらに分布させた際の検出精度の評価をした。今回は、平均値の総和を正規化したものと人工的に降らせた灰の量を指標に評価した。図 2 にその結果を示す。図 1 と同様、二値化処理を組み合わせた手法の方が灰の量の増加に対し、より線形的である。

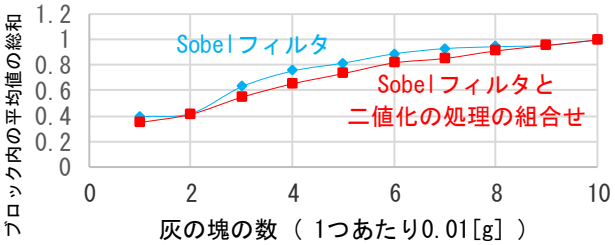


図 1. 灰の塊の数とブロック内における画素値の平均値の総和の相関

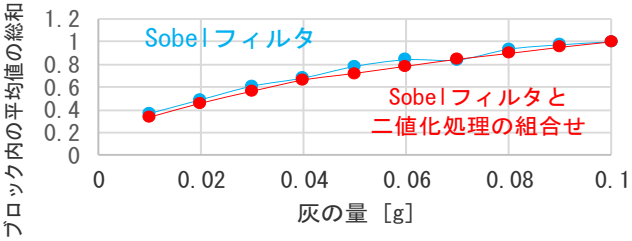


図 2. 灰の量とブロック内における画素値の平均値の総和の相関

4. 考察及び結論

図 1 および図 2 ともに、二値化処理を組み合わせた手法の方が灰の塊の数および灰の量の増加に対し、線形的である。以前までの手法[2]は、局所的な色の変化のみを検出していたのに対し、今回の手法は周辺ブロックからの色の変化も見ることで広域的に処理を行っている。そのため、灰が存在していない部分および灰が高密度で堆積している部分を以前より高精度で判別出来た。また、ブロックサイズをより細かくすることで、精度向上を見込める。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP24K07995 の助成を受けたものである。

文 献

[1] 安居院 猛、中嶋 正之 :「画像情報処理」 pp.23～25 (2007 年 第 16 刷発行)
[2] 丸山 晃征、その他 :「非接触式火山灰検出装置のセンサ改良と防災システムの検討」, 電気情報関係学会 九州支部連合大会、07-PS-11 (2025)

©2026 IEE Japan

YOLO を用いた高速道路走行中の逆走車検知システムと路上試験

酒井　優彰*，川合　勇輔，村上　力（一関工業高等専門学校）

YOLO-Based Wrong-Way Vehicle Detection System for Highways and Its Field Test

Hiroaki Sakai, Yusuke Kawai, Riki Murakami (National Institute of Technology,ICHINOSEKI College)

１．はじめに

近年，日本では超少子高齢化社会が進行しており，人口構造の変化が顕著となっている。これに伴い，交通をはじめとする生活インフラの分野において，高齢ドライバーの増加が社会的課題である。この影響により，高速道路上での逆走事案が増加[(1)]しており，死亡事故リスクは通常の事故と比較しても約 40 倍に達する。国土交通省の調査によると，令和４年から令和７年までの逆走事故の発生件数は年間で 200 件以上であり，日本においては更なる高齢化社会の進行により増加する懸念がある。

逆走事故が発生すると，道路の通行止めや物流の遅延による経済的損失，被害者の身体的・心理的被害などの問題が発生する。このことから，逆走事故を未然に防ぐ社会基盤システムが求められている。現在の対策は，大きな矢印や「進入禁止」の標識，電光掲示板を高速道路の出入り口に設置するものが多くを占めている[(2)]。これらの対策は，一度本線に進入してしまった逆走車に対しては効果が限定的である。先行研究では固定カメラで逆走車を監視する手法もあるが，映像の範囲内しか検出できないという課題がある[(3, 4)]。

本研究では，既存のドライブレコーダーを活用したシステムを想定し，YOLO とエッジコンピュータを用いた高速道路走行中の逆走事故防止基盤システムの開発を目的とする。本稿では，物体認識モデルで優れた精度が得られている YOLO シリーズを活用して，転移学習による逆走車検知 AI モデルの構築と検証を行う。

２．YOLO を用いた逆走車検知 AI モデル

＜2・1＞データセット　本研究では，物体検出モデルとして YOLO(You Only Look Once)[(5)]系列の yolov8n を転移学習する。学習に使用する車載カメラ画像のデータセットは，車載画像ライブラリ BDD100K[(6)]の画像を使用し，自車に向かう車両には“approaching”を，自車と同じ方向に走行している車両には“not_approaching”のラベルを指定してアノテーションし，計 1374 枚のデータセットを用意した。このデータセットを訓練画像 1175 枚，評価画像 99 枚，検証画像 100 枚に分割し，次の２種類のデータセット条件の下にそれぞれ比較検証する。

① 既存データセットのアノテーションから転移学習したモデル
② ガウスノイズを訓練画像に付加することで既存データセットを水増しし，転移学習したモデル

本研究では，実環境における天候などの外乱に対するロバスト性を向上させるため，データセットに対してデータ拡張を適用した。具体的な手法は，元画像$I(x,y)$の各画素に対して白色ガウスノイズ成分$\eta(x,y)$を付加する。ノイズ付加後の画像 $\hat{I}(x,y)$は式(1)でモデル化される。

$$\hat{I}(x,y) = \eta(x,y) + I(x,y) \tag{1}$$

また，白色ガウスノイズ $\eta(x,y)$は，正規分布（ガウス分布）に従う確率的なノイズ[(7)]であり，その確率密度関数$p(z)$は以下の式(2)で定義される。本研究では，平均$\mu = 0$，標準偏差$\sigma = 50$としデータセットを構築する。

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

＜2・2＞モデルの学習　前節で提示した①ノイズなしデータセットと，②ノイズありデータセットで学習した場合のモデル精度の違いを検証する。本研究では，Loss が最小の時点でのモデルを最終的に出力し，学習モデルとして使用する。ノイズなしデータセットでは Epoch=757 で Loss=0. 2556 が最小値となった。ノイズありデータセットでは Epoch=530 で Loss=0. 2765 が最小値となった。

＜2・3＞モデルの性能評価　本節では，物体認識で一般的な評価指標である mAP を用いて，学習したモデルの性能を評価する。mAP (平均平均精度:mean Average Precision)は，式(3)で定義される AP(Average Precision:平均精度)の全分類クラスにおける平均をとった値である。

$$AP_i = \int_0^1 \boldsymbol{p}(\boldsymbol{r})dr \tag{3}$$

ここで，pは precision，rは recall である。mAP は PR 曲線で囲われた領域の面積であるAPを用いて計算され，1 に近いほど高性能なモデルであると評価できる。図 1 に実際に構築した２つの逆走車検知モデルを検証画像で評価した PR 曲線を示す。図 1 より，(b)ノイズありのモデルの方が AP が大きい，すなわち性能が高いといえる。また表 1 のように

©2026 IEE Japan

mAP50（IoU 閾値=0.5 での mAP）はノイズなしのモデルが 0.76，ノイズありモデルは 0.82 と得られ，ガウスノイズありのモデルの方が，性能が向上していることが確認できる。

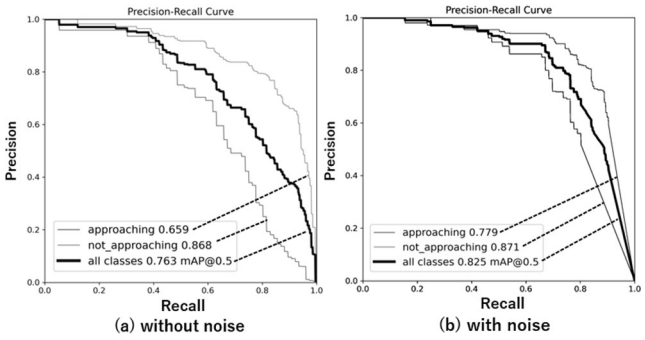


図１　ノイズの有無による PR 曲線の比較
Fig. 1 Comparison of PR curves with and without noise

表１　ノイズの有無によるモデルの学習結果
Table. 1 Model training results with and without noise

	Precision	Recall	F1score	mAP50	mAP50-95
ノイズなし	0.68	0.74	0.71	0.76	0.50
ノイズあり	0.83	0.75	0.79	0.82	0.59

３．他モデルとの比較

＜3・1＞比較するモデル　前章では物体検出モデルに yolov8n を用いたが，ここでは他の物体検出モデルとして，yolo の新旧バージョンである yolov5nu，yolov11n，Fatser R-CNN[8]での比較を行う。前章と同様に，BDD100K データセットから新しい 20786 枚をアノテーションし，訓練画像 16628 枚，評価画像 2079 枚，検証画像 2079 枚に分割した。前章でガウスノイズを付加した場合に良い結果を得たため，本実験でも同様に訓練画像にガウスノイズを付加し水増しを行い，Epoch=1000 にて学習を実行する。表 2 に各モデルの学習結果を示す。ここで，Faster R-CNN の AP50，AP はそれぞれ，yolo の mAP50，mAP50-95 に対応する指標である。表 2 より，Fatser R-CNN に比べ yolo シリーズが mAP50, mAP50-95 がともに高い数値となった。yolov8n のノイズの有無に着目すると，ノイズありは Precision(誤検知の少なさ)の数値が高く，ノイズなしは Recall(見逃しの少なさ)の数値が高い。また，最新である yolov11n は他のモデルよりも mAP50, mAP50-95 において，最も高い数値となった。

表２　各モデルの学習結果
Table. 2　Learning results for each model

	Average Recall		AP50	AP	
Faster R-CNN	0.805		0.795	0.551	
	precision	recall	mAP50	mAP50-95	F1 Score
yolov5nu	0.866	0.847	0.908	0.724	0.856
yolov8n	0.884	0.833	0.909	0.730	0.858
yolov8n(ノイズなし)	0.865	0.864	0.910	0.728	0.865
yolov11n	0.862	0.856	0.911	0.731	0.859

4．路上での動作検証

高速道路上で逆走車に遭遇する状況の再現は困難であるため，一般道路の対向車を逆走車と見立て検証を行った。また，逆走車を検出した場合に GPS で位置情報を取得・記録・通知するエッジコンピュータを乗用車に搭載し，逆走事故防止基盤システムの検証も行った。図 2 に示すように，各方向からの車両の進行方向を判別できていることが分かる。

図２　道路上の実環境での検証
Fig. 2 Verification in a real road environment

5．おわりに

本稿では，yolov8 を用いた逆走車両検出モデルの構築と，他モデルとの比較検討を行った。画像認識と位置情報の連携により，逆走への早期対応が可能となる。今後は，モデルの精度，警報システムとの統合，実際の高速道路に適した検出手法の検討を行っていく。

6．謝辞

本研究の一部は高速道路調査会の助成を受けたもので，ここに謝意を示す。

文　献

(1) 国土交通省:「高速道路での逆走対策に関する有識者委員，高速道路の逆走発生状況」, https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/reverse_run/pdf08/03.pdf
(2) 東日本高速道路株式会社:「高速道路の逆走を防ぐための対策」, https://www.e-nexco.co.jp/activity/reverse/policy.html
(3) Zillur Rahman, Amit Mazumder Ami, Muhammad Ahsan Ullah: ”Real-Time Wrong-Way Vehicle Detection Based on YOLO and Centroid Tracking”, IEEE TENSYMP, pp. 916-920 (2020)
(4) Arya Ketabchi Haghighat:”Automating Wrong-Way Driving Detection Using Existing CCTV Cameras”, Iowa State University. Institute for Transportation(2020)
(5) Glenn Jocher and Ayush Chaurasia and Jing Qiu:”Ultralytics YOLOv8” (2023), https://github.com/ultralytics/ultralytics.
(6) Yu, Fisher and Chen, Haofeng and Wang, Xin and Xian, Wenqi and Chen, Yingying and Liu, Fangchen and Madhavan, Vashisht and Darrell, Trevor:”BDD100K : A Diverse Driving Dataset for Heterogeneous Multitask Learning”, Proc. IEEE CVPR(2020)
(7) Ajay Kumar Boyat and Brijendra Kumar Joshi:” A Review Paper: Noise Models in Digital Image Processing”, SIPIJ, Vol.6, No.2, pp.17-21(2015)
(8) Shaoqing Ren and Kaiming He and Ross Girshick and Jian Sun:”Faster R-CNN:Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks”, IEEE TPAMI, Vol.39, No.06, pp.1137-1149(2017)

©2026 IEE Japan

カメラとレーザーを用いた沈下の変位計測法

黒坂 政嘉*，坂田 勇樹，鈴木 康夫，竜田 尚希，神亀 理恵，堀田 裕弘（富山大学）

Measuring Method of Pier Settlement Displacement using Cameras and Lasers

Yukihiro Kurosaka, Yuki Sakata, Yasuo Suzuki, Naoki Tatta, Rie Jinki, Yuukou Horita (University of Toyama)

１．はじめに

橋梁は地域の経済活動や住民生活を支える重要なインフラであり，その健全性は社会全体の安全・安心と経済活動の継続性を保証するものである。特に，橋梁の沈下は構造物全体の安全性に直接影響を及ぼし，不均等な沈下が生じると応力集中により亀裂や破損が発生し，最悪の場合には崩落事故につながる危険性がある。このため，定期的な沈下診断を実施することで危険な兆候を早期に発見し，重大な事故を未然に防ぐことが大切である。

橋梁の沈下には地盤沈下，基礎の劣化，洗掘など多様な原因が考えられ，精密な診断により原因を正確に特定することで，効果的な補強や改修計画を立案することが可能となる。これまでに，深層学習による損傷検出(1)，GNSS による変位モニタリング(2)，ノンターゲット画像計測であるデジタル画像相関法による変位計測(3)などを用いた方法は，沈下を含む橋梁の異常を効率的かつ高精度に把握するための有効な手段といえる。

本研究では，より簡便で高精度検出が期待できるターゲット画像計測に着目し，レーザーとカメラを用いた非接触型変位計測を目的として，実環境下での計測において顕在化するノイズや揺らぎに対応可能なレーザー変位測定法を検討する。

２．提案法

＜2・1＞システム全体構成　　提案するレーザー変位測定法は，カメラによって取得された映像フレームを入力とし，レーザー光点の位置を時系列データとして出力する構成を有する（図１）。データ処理も含めたシステムの処理の流れは以下のとおりである。

1. レーザー光源等をターゲットに照射し，カメラ映像を取得し，時系列画像を得る
2. 取得した画像に対して空間幾何学的補正を行い，歪みの影響を除去する
3. 画像中の背景特徴を用いてカメラ安定化処理を行い，撮影時の揺らぎを低減する
4. 安定化された画像からレーザー光点を検出し，フレームごとの座標値を取得する
5. 状態推定によりレーザー位置の時系列データを平滑化し，追跡精度を向上させる
6. レーザー位置を経過時間とともにCSV形式で保存する
7. 変位操作直後の過渡的な揺らぎを除外し，各変位ステップにおける定常区間（60 秒）を抽出する
8. 定常区間内の座標データから平均値および標準偏差を算出する
9. 0 mm 指令時を基準とした相対変位量を求め，変位計測結果として評価する

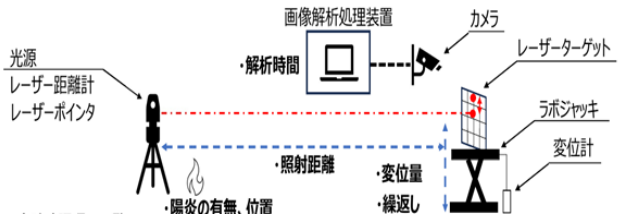


図１　システム構成図
Fig.1. System Configuration Diagram

＜2・2＞空間幾何学的補正　　カメラによって取得される画像座標系は，撮影角度や設置条件に依存しており，そのままでは物理的な変位量との直接的な対応付けが困難である。本研究では，対象平面上の 4 点を事前に指定し，それらの対応関係から射影変換行列を算出する。これにより，画像上のレーザー位置を補正後の平面座標系へ写像し，以降の処理では歪みの影響を受けない座標系で変位を扱うことが可能となる。

＜2・3＞カメラ安定化処理　　実験環境では，カメラの微小な振動や揺れがレーザー位置推定に影響を与える可能性がある。これを抑制するため，本研究では背景領域に存在する特徴点を検出し，フレーム間での追跡を行うことで，カメラの相対的な動きを推定する。そして，推定された変換情報を用いて各フレームを補正することで，背景が静止しているかのような映像を生成する。

＜2・4＞レーザー点検出　　本研究では，レーザー光の色特性を利用し，HSV 色空間に基づく色抽出を行った。まず画像を HSV 色空間へ変換し，あらかじめ設定した色閾値を用いてレーザー点を二値化する。その後，画像モーメントを用いて抽出領域の重心を算出し，レーザー光点の座標として取得する。この方法により，照明条件の変動や背景ノイズの影響を抑えつつ，安定したレーザー位置検出が可能となる。

©2026 IEE Japan

＜2・5＞状態推定による時系列平滑化　　レーザー点検出結果には，画像ノイズや一時的な誤検出に起因するばらつきが含まれる。これを低減するため，状態ベクトルには位置および速度成分を含む等速運動モデルを仮定し，カルマンフィルタを用いて予測・更新を行った。観測値が得られない場合でも予測ステップにより連続した軌跡推定が可能であり，時系列データとしての安定性が向上する。

３．実験方法と結果

＜3・1＞実験方法　　本実験では，レーザーポインタ，ターゲット，カメラ，および画像解析処理用 PC から構成される実験装置で変位計測を行った。レーザー光をターゲットに照射し，カメラで取得した画像からレーザー位置を検出することで変位量を算出した。変位はラボジャッキにより付与し，照射距離および変位量を変化させた条件下で繰り返し計測を行った。変位量の実測値に関しては, 0 mm, 5 mm, 10 mm，5mm，0mm，-5mm，-10mm，-5mm，0mm の順で変化させる。また，照射距離は，3m，10m，20m，30m として実験を行う。変位の真値は，ワイヤセンサにより取得する。

＜3・2＞データ処理　　本研究では，取得したレーザー光点の時系列データに対し，定常状態に基づくデータ処理を行い，変位計測結果の評価を行った。取得されたデータには，変位操作直後に一時的な揺らぎや誤検出が含まれるため，これらの過渡的挙動を除外し，各変位ステップにおいて安定した状態が得られている時間区間のみを評価対象とした。具体的には，各変位ステップにつき 60 秒間の定常区間を設定し，当該区間に含まれる Y 座標データの平均値を代表値として算出した。なお，実環境での計測ではサンプリング周期が一定でないため，本研究ではデータ点数ではなく時間を基準とした評価を採用している。また，計測系の設置誤差や初期位置のずれの影響を低減するため，指令変位が 0 mm である条件における平均値を基準とし，各ステップの平均値との差分を相対変位量として定義した。さらに，同一条件下で複数回実施した試行について，相対変位量を変位ステップごとに集計し，試行間の平均値および標準偏差を算出した。

＜3・3＞実験結果　　表 1 に，指令変位（実測値）と，提案手法により算出した変位推測値の比較結果を示す。表より，指令変位に対して推定された変位が概ね一致しており，提案手法により定常状態における変位を安定して計測できていることが確認できる。また, 誤差のばらつきは小さく，試行間においても一定の再現性が得られていることが分かる。また, 各照射距離における標準偏差の平均は, 3m で 0.207, 10m で 0.185，20m で 0.198，30m で 0.272 と，照射距離 10m が最もデータのばらつきが小さくなったが，照射距離が遠くなるほど，データのばらつきは大きくなると言える。

４．おわりに

本研究で提案した評価法は，実環境におけるノイズやサンプリング揺らぎを考慮した実用的な変位計測法であることが分かった。今後は，計測距離の拡張や陽炎や積雪などの対策についても検討していきたい。

本実験を行うにあたり，日頃からご指導頂く株式会社アイペックの皆様に感謝いたします。

文　献

(1) 吉倉麻衣, 福岡知隆, 諏訪太紀, 藤生 慎, 高山純一, 橋梁の橋脚全体画像に対する複数損傷の自動検出表示と技術者の評価, AI・データサイエンス論文集, 3 巻, J2 号, pp.398-405, 2022
(2) 有井賢次, 渡邊学歩, 武智国加, 清水則一, スタティック測位法を用いた GNSS による橋梁の自動連続三次元変位モニタリング, 土木学会論文集, 79 巻, 6 号, ID: 23-00002, 2023
(3) 四井陽貴, 松岡弘大, 貝戸清之, サブピクセル推定誤差発生メカニズムに着目した橋梁変位の全視野画像計測の実用的改善法, 土木学会論文集, 79 巻, 15 号, ID: 22-15054, 2023

表 1　実験結果の比較
Table 1. Comparison of Experimental Results

実測値(mm)	推測値 3m	誤差	推測値 10m	誤差	推測値 20m	誤差	推測値 30m	誤差
0mm	0.156	+0.156	0.032	+0.032	-0.432	-0.432	-0.058	-0.058
5mm	4.500	-0.500	4.554	-0.446	4.556	-0.444	5.662	+0.662
10mm	9.432	-0.568	9.789	-0.211	9.283	-0.717	10.768	+0.768
5mm	4.413	-0.587	4.838	-0.162	4.955	-0.045	5.335	+0.335
0mm	-0.083	-0.083	0.108	+0.108	0.260	+0.260	0.156	+0.156
-5mm	-4.696	+0.304	-4.629	+0.371	-4.538	+0.462	-5.182	-0.182
-10mm	-9.953	+0.047	-9.559	+0.441	-9.525	+0.475	-9.965	+0.035
-5mm	-4.739	+0.261	-4.701	+0.299	-4.733	+0.267	-4.721	+0.279
0mm	-0.073	-0.073	-0.140	-0.140	0.172	+0.172	-0.098	-0.098

©2026 IEE Japan

グリップ形状分析と画像処理に基づく配電用引込線径種の机上推定手法の開発

伊澤　侑馬*，澤田　蓮　（北海道電力ネットワーク株式会社）

Development of a Desktop-Based Estimation Method for Distribution Service-Drop Conductor Size Based on Grip-Shape Analysis and Image Processing.

Yuma Izawa, Ren Sawada (Hokkaido Electric Power Network, Inc.)

１．まえがき

近年，系統連系申請や契約容量変更に伴い，既設引込線の適合確認（許容電流・電圧降下）の機会が増加している。一方，引込線は設備量が膨大であり，当社では現時点で径種・亘長等の詳細な設備情報は管理対象項目として定めていない。そのため，既設引込線における径種・亘長の確認方法については，現地出向に依存しやすい。以上の背景から，現地出向を要さず机上で既設引込線径種を推定する手法が求められている。

また，当社では引込線を電柱に引き留めるための装柱器具として，一般的なバインドレスがいしではなく，DV グリップを使用している。この DV グリップは，所定の引張性能とするため，引込線の径種ごとに全長等の仕様が異なる特徴がある。そこで本論では，DV グリップの外形に着目し，その撮影画像から形状パラメータを抽出して径種を推定する手法を検証し，現地出向の削減について提案する。

２．提案手法

＜2・1＞契約容量に基づく候補径種の一次絞り込み

画像特徴点のみに基づく推定は利便性が高い一方，径種の過小推定は安全性の観点で許容されにくい。そこで本手法では，画像解析の前段で契約容量を入力として受け取り，電気的な下限制約により径種候補を一次絞り込みする。具体的には，契約容量から想定負荷電流を算定し，各径種の許容電流条件を満たす径種のみを径種候補として残す。さらに，引込線亘長が取得できる場合には，電圧降下が上限値（2.0V）以内となる条件も併用し，径種候補を追加で絞り込む。これにより，画像特徴点における推定径種が仮に過小に推定された場合でも，電気的妥当性を満たさない径種が最終候補に残らない構成とし，過小推定リスクを抑止することができる。

＜2・2＞規格既知長を用いたスケール推定（寸法正規化）

撮影距離やズーム倍率が未知な画像から実寸を推定する場合は，画像内に基準長（既知長）を導入する必要がある。本手法では DV グリップの金物部（フック部）に規格化された寸法が存在する点を利用し，基準長を用いて画素-実長の換算係数を推定する。

基準長に対応する画素長をl_{ref}，既知の実長をL_{ref}とし，

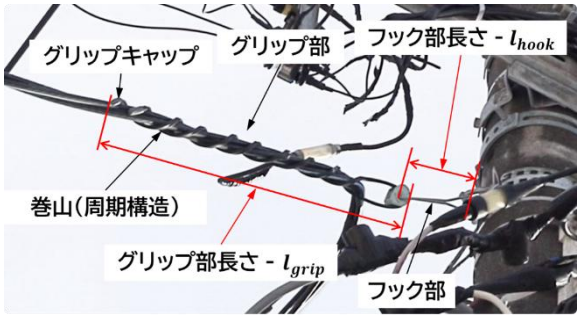


図１　DV グリップの部位と測定箇所

Fig.1. Components of the DV-grip and measurement

換算係数を$k = L_{ref} / l_{ref}$とする。次に，図 1 のとおり，フック長とグリップ長に対応する画素長をそれぞれl_{hook}，l_{grip}とし，推定実長を$\hat{L}_{hook} = kl_{hook}$，$\hat{L}_{grip} = kl_{grip}$ として算出する。このスケール推定により，画像の解像度や拡大率の差異に依存せず，長さを比較可能な形に正規化できる。

＜2・3＞フック長・グリップ長による主判定

径種候補が得られた後，主判定としてフック長・グリップ長の特徴に基づき径種を判定する。単一特徴だけでの判定では，グリップ種別差や計測誤差の影響を受けて誤判定につながりやすい。このため本手法では，参照データベース（以下，「DB」という。）との近似値で 2 つの特徴を同時に判定する。

具体的には，径種候補ごとに DB に格納された代表値（$L_{hook}^{(d)}$，$L_{grip}^{(d)}$）と推定値（$\hat{L}_{hook}$，$\hat{L}_{grip}$）の距離を計算し，距離が最小となる径種を主判定結果とする。距離尺度は，例えば，測定ばらつきを考慮した重み付き距離は，式（1）のように構成できる。ここでは，識別ギャップが大きくなるように調整し，候補間の分離性能を高める。出力は 1 候補の断定に加え，上位候補の順位・距離差を併記し，後段の予備機能に引き渡す。

$$D(d) = \alpha \left| \hat{L}_{hook} - L_{hook}^{(d)} \right| + \beta \left| \hat{L}_{grip} - L_{grip}^{(d)} \right| \qquad (1)$$

＜2・4＞予備機能：巻山数・グリップキャップ色による曖昧性解消

主判定で上位候補が僅差となる場合に限り，巻山数およびグリップキャップ色を補助特徴として用い，曖昧性を解消する。巻山数は径種識別に有効である一方，逆光・影・低

©2026 IEE Japan

解像度や経年劣化の影響を受けやすく，目視カウントでは作業者間のばらつきが生じやすい。そこで本手法では，グリップ部の関心領域を設定し，平滑化およびコントラスト補正により凹凸の周期成分を強調した後，二値化・ノイズ除去を経て，凹凸構造に対するピーク計数により巻山数 Nを算出する。抽出結果は画像上に重畳表示（図 2）し，必要に応じて関心領域や閾値を調整可能とすることで，運用上の再現性を確保した。得られた巻山数 Nと参照値との差に基づき僅差候補の整合性を比較し，主判定結果を補強する。グリップキャップ色は粗いカテゴリとして扱い，僅差候補の判別に限定することで実運用の頑健性を確保する。

図 2　DV グリップの径種判定と巻山数の自動抽出
Fig. 2. Conductor-size identification using the DV-grip and automatic extraction of the number of grip wraps

図 3 に，予備機能適用前後の最上位候補の推定確率出力例を示す。推定確率は，分類器の出力スコアであり候補間の相対比較に用いる指標であるが，実アプリケーションでの検証（$n = 200$）では，予備機能の適用により最上位候補の推定確率が平均 46.5%から 56.7%へ向上し，上位候補間の分離性が改善することを確認した。

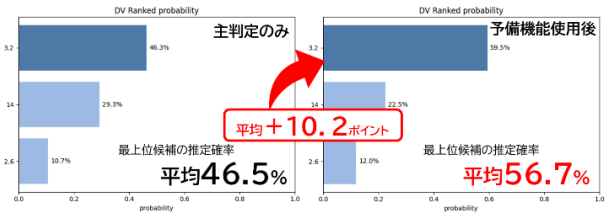


図 3　最上位候補の推定確率の比較（予備機能前後）
Fig. 3. Comparison of the top-ranked candidate probability before and after the auxiliary function

3．実装と評価

提案手法は，Python 単体で動作する机上推定アプリとして実装した。推定フローは，契約容量（必要に応じ亘長）で候補径種を一次絞り込みし，その候補内でフック長・グリップ長の特徴により主判定し，僅差時のみ巻山数自動抽出およびグリップ色特徴で判定結果を補強する（図 4）。DB（径種別寸法・仕様）と制約計算（許容電流・電圧降下）を内蔵し，径種候補の順位と根拠を併記して出力するため，説明可能性と手順標準化を両立した。

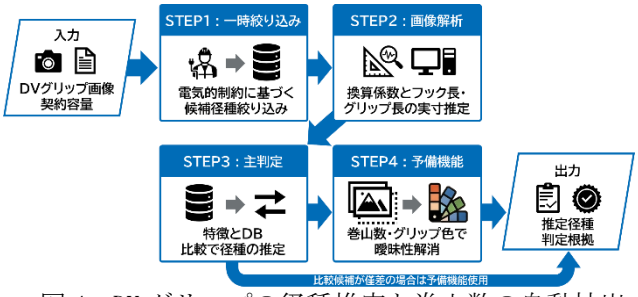


図 4　DV グリップの径種推定と巻山数の自動抽出
Fig. 4. Conductor-size estimation using the DV grip and automatic extraction of the number of grip wraps

現場事業所にて従来の直営現地調査と比較した結果，月間 12.3 件/1,850 分に対し，本手法は 72.6 件/218 分で処理でき，業務時間を約 88%削減した（約 150→約 3 分/件，約 98%短縮）。また，真値取得 n=200 件で一致率 90%超を確認し，地図サービス・スマートフォン画像等の撮影条件が異なる場合でも安定した推定精度を得た（図 5）。

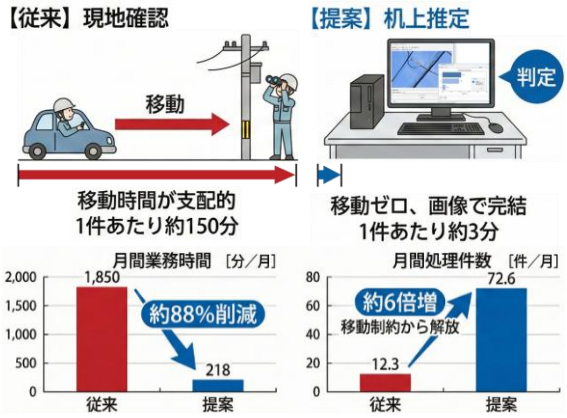


図 5　業務変化と月間業務時間および処理件数
Fig. 5. Workflow changes and monthly working time and number of processed cases

4．おわりに

本論では，DV グリップ画像から引込線径種を机上で推定する手法を確立した。フック部の規格既知長を基準にスケールを復元することで，拡大率不明の地図サービス画像やスマートフォン画像を「寸法計測可能な情報」へ変換した点が最大の特徴である。さらに，契約容量に基づく制約と形状特徴を段階的に統合し，僅差時のみ補助特徴を用いる構成とすることで，過小推定リスクを抑制しつつ判定根拠の明確化を図った。実証では，予備機能により候補の分離性が向上すること，ならびに業務時間の大幅削減と高い一致率が同時に得られることを確認した。今後は，DB の拡充や測定処理の半自動化を進め，対象設備の拡張と現場業務への横展開を加速していく。

文　献

(1) 特許 7695428：「引込線径種の判定装置，判定方法及びプログラム」

©2026 IEE Japan

大臼歯 AI 鑑別モデルにおける撮影方向の検討

酒井　俊祐*, 勝又　亮太, 牛　邁馳, 五十嵐　由里子, 内木場文男 , 金子　美泉(日本大学)

Consideration of shooting direction in the molar AI diagnostic model

Shunsuke Sakai, Ryota Katsumata, Maichi Niu, Yuriko Igarashi, Fumio Uchikoba, Minami Kaneko (Nihon University)

１．緒言

AI 技術の発展により自動運転や情報解析などを支援するシステムが開発されている。加えて，医歯薬系の専門領域にも AI 利用が広がっており，専門家を支援することで人手不足の解消が進められている。しかし，個人差などで対象物の定義が困難であることから一部の利用に留まっている事例の一つに歯の鑑別がある。歯の鑑別は法歯学や先史学における個体識別や最小個体数の推定などに必須となる。一般的に，歯の鑑別には形態や摩耗の個人差を考慮し細かい形状の差を見極める経験と知識が必要となり，専門家でないと正しい鑑別が難しい。しかし，災害現場や遺跡において常に専門家が立ち会うことは困難となる(1)。このような課題への対策として歯列弓内における X 線画像や歯科情報のデータ化および自動照合などの研究が進められている(2)。しかし，遺体の損傷が激しい遺跡などでは歯は歯列内に収まらず，単離した状態で発見されることが多い。

そこで我々は,単独歯の画像から歯種の鑑別を行う AI モデルを作成している(3)。本研究では下顎大臼歯を対象とし，抜去歯の画像を 3 方向に分けて学習させた 3 通りのモデルを作成した。さらに下顎大臼歯を鑑別する際の AI による特徴の捉え方と歯科医師による特徴の捉え方の比較を行った。

２．大臼歯の歯種鑑別モデル

モデル作成には，**図 1** のような下顎大臼歯の抜去歯を使用した。本研究では第三大臼歯は含めず，左右側第一第二大臼歯の計 4 種類を対象とした。学習データおよびテスト用データの作成のために，回転台に試料を乗せ動画の撮影を行った。その後，動画をフレームごとに静止画に変換したものにクロマキー処理を施して学習画像を作成した。撮影時の光の影響を排除するために撮影環境は壁で囲い，常に同じ方向からのみ照明の光が当たるようにした。**図 2** に撮影方向を示す。撮影方向による特徴量の検討を行うために, 歯冠側を中心に近心側から遠心側まで 60°**(歯冠モデル)**, 歯根面を中心に近心側から遠心側まで 60°**(歯根モデル)**, 側面を中心に近心側から遠心側まで 60°**(側面モデル)** の 3 方向を設定した。下顎第一大臼歯と第二大臼歯ともに，左右を(L，R)，歯種を示す番号(6～7)として表す。画像の枚数はそれぞれ，L6，L7，R6，R7 において学習用を 2800 枚，検証用を 800 枚，テスト用を 400 枚とした。

図 1 下顎大臼歯

Fig.1.Lower of Molar Teeth

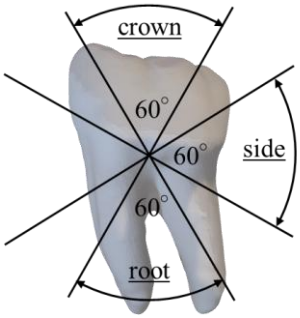


図 2 撮影方向

Fig.2.Shooting Direction

３．テスト結果・考察

作成したモデルのテスト結果をそれぞれ**表 1，2，3** に示す。 各セルには，「一致率」の行に示した歯種について，テスト歯種をその歯種と鑑別した割合を示す。表における赤文字は左右を含む歯種を正しく鑑別した割合，青文字は左右を問わずに歯種を正しく鑑別した割合となる。オレンジはテスト歯種について割合が最も高く判定された歯種を示している。歯冠モデル（**表 1**）では，左右を含めた歯種を正しく鑑別する割合の平均が 44.08%，左右を問わずに歯種を正しく鑑別する割合の平均が 93.44%となった。歯根側モデル（**表 2**）では，左右を含めた歯種を正しく鑑別する割合の平均が 57.16%，左右を問わずに歯種を正しく鑑別する割合の平均が 75.84%となり，特に L7,R7 の一致率の割合が高くなった。歯冠モデルは歯根モデルよりも，左右を問わずに歯種を正しく鑑別する割合が高くなっていることから，歯冠モデルは歯種のみの鑑別には有効であることが確認できた。一方歯根モデルは，完全一致率が歯冠モデルより高くなっていることから，左右の鑑別には歯根モデルのほうが有効であることが確認できた。側面モデル（**表 3**）では，左右を含めた歯種を正しく鑑別する割合の平均が 37.30%，

©2026 IEE Japan

左右を問わずに歯種を正しく鑑別する割合の平均が 63.58%となった。歯冠モデルや歯根モデルと比較して，完全一致率および歯種一致率が両方とも低い。以上のことから AI における歯種の鑑別や左右の認識は歯の咬頭部分の特徴や歯根の特徴を使用していると考えられる。

表 1 歯冠モデルにおける鑑別結果

Table 1. Differential Diagnosis Results for Crown Models

		テスト歯種			
		L6	L7	R6	R7
一致率	L6	46.53%	0.00%	65.57%	0.02%
	L7	1.18%	100.00%	30.30%	73.53%
	R6	58.34%	0.00%	3.39%	0.04%
	R7	1.37%	0.00%	0.73%	26.40%
				完全一致	44.08%
				歯種一致	93.44%

表 2 歯根モデルにおける鑑別結果

Table 2. Differential Diagnosis Results for Root Models

		テスト歯種			
		L6	L7	R6	R7
一致率	L6	45.86%	0.00%	71.04%	0.01%
	L7	55.92%	99.98%	28.95%	0.86%
	R6	2.81%	0.00%	0.00%	16.32%
	R7	2.84%	0.01%	0.00%	82.81%
				完全一致	57.16%
				歯種一致	75.84%

表 3 側面モデルにおける鑑別結果

Table 3. Differential Diagnosis Results for Side Models

		テスト歯種			
		L6	L7	R6	R7
一致率	L6	2.15%	0.44%	0.34%	0.51%
	L7	96.21%	71.03%	0.07%	73.70%
	R6	2.72%	0.18%	70.30%	20.05%
	R7	6.34%	28.35%	29.37%	5.75%
				完全一致	37.30%
				歯種一致	63.58%

図 3，4，5 はそれぞれの歯種を推論する際の特徴マップを示す。赤に近い色の箇所ほど鑑別結果において強く影響したことを示している。特徴マップの画像から，どのモデルも歯の凹凸や外形を特徴量として鑑別を行っていることが分かる。歯冠面，歯根面および側面全てにおいて歯冠部分と歯根部分の形態が，強く影響していることが分かった。歯学的見地からは歯冠側から鑑別を行う場合，咬頭数や近心と遠心の歯冠形態の差に注目する。しかし，特徴マップでは歯冠や歯根の外形，歯冠部分と歯根部分におけるコントラスト差を強く捉えており，歯学的知見と AI の鑑別の違いが確認できる。歯根側から鑑別を行う場合，歯学的知見では歯根の遠心傾斜や歯冠の外形の近遠心的な非対称性などに注目する。特徴マップでは歯冠・歯根全体の外形を捉えており，歯根側においては歯学的知見と AI による鑑別が一致している。側面では舌側咬頭と頬側咬頭の形態が確認できる。しかし歯種（6 と 7）の鑑別に必要な近心と遠心の違いがわからず，さらに左右の鑑別に有効な歯根の遠心傾斜が見えないことから，歯種・左右の両方の鑑別結果が低下したと考えられる。

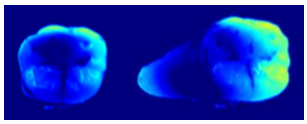


図 3 歯冠モデルの特徴マップ

Fig.3.Feature Images of the Crown Side Models

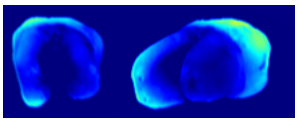


図 4 歯根モデルの特徴マップ

Fig.4.Feature Images of the Root Side Models

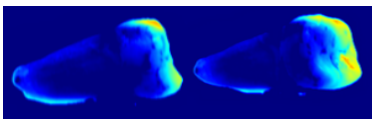


図 5 側面モデルの特徴マップ

Fig.5.Feature Images of the Side Models

４．結言

本稿では，単独歯鑑別 AI の精度向上を目的とし，撮影方向による特徴量の捉え方の違いを検討するため、「歯冠側 60°・歯根側 60°・側面 60°」の各方向から撮影を行い，AI による鑑別精度と歯科医師による歯科所見との比較を行った。今後，大臼歯の画像データの増加や転移学習ありでモデル作成を行い，さらなる精度向上を目指す。

５．謝辞

本稿の研究の一部は，科研費 22K06415 の助成を受けたものである。

文　　献

(1) 咲間 彩香ら：「日本の災害時において歯科身元判明率が向上しない要因に関する検討」，Japanese Journal of Disaster Medicine，Vol.26，No.1，pp1-10，2021．
(2) 森下拓水ら:「歯科パノラマ X 線画像における深層学習を用いた歯列の認識手法」，信学技報，Vol.119，No.399，pp.73-74，2020.
(3) 貴田宇宙ら：「大臼歯の画像認識に有効な特徴量の検討」5 年度　日本大学理工学部　学術講演会予稿集，Vol.67，pp.ROMBUNNO.G-23，2023.

©2026 IEE Japan

SIFT-SVM および CNN による海底画像の基質自動判別の比較

具志　美智也*，野崎　真也（琉球大学）
坂巻　隆史（東北大学）

Comparison of SIFT-SVM and CNN for Automatic Substrate Classification in Seafloor Images

Michiya Gushi*, Shinya Nozaki (University of the Ryukyus)
Takashi Sakamaki (Tohoku University)

１．まえがき

サンゴの生態調査は，海洋生態系の健全性および多様性の維持に対する知見を得るために不可欠であり，環境科学や生態学における重要な研究テーマである。

従来のサンゴの生態調査では，コドラート法が使われてきた。コドラート法では，撮影された海底画像から，一定の大きさの領域を切り取り，基質を判別した結果を集計することで，サンゴ礁の分布を推定する。しかしながら，現在のコドラート法では，基質の判別を目視に依存しており，作業者への負担が大きいことが課題となっているため，自動化が必要である。

先行研究[(1)(2)]では，海底画像から切り取った画像でデータセットが作られ，Convolutional Neural Network(CNN)による学習および推論が行われてきた。しかしながら，海底画像に対する CNN の分類の傾向は十分に考察されていない。

本研究の目的は，基質自動判別における CNN の特性を解明することである。そのために，CNN と従来の手法の性能を 5 分割交差検証で比較し，海底画像に対する各手法のアルゴリズムの動作を考察した。CNN としては，VGG16 モデルを使用し，従来の手法としては，SIFT-SVM[(3)]を用いた。

２．SIFT-SVM

＜2・1＞SIFT 記述子の抽出

SIFT-SVM では，画像の局所的な領域から特徴量を抽出する。今回は特徴抽出として，Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)を使った。SIFT で抽出された特徴量は SIFT 記述子と呼ばれ，画像から多数検出される。

＜2・2＞特徴量ヒストグラムの作成

1 枚の画像ごとに抽出された SIFT 記述子からヒストグラムを作成する。本研究で取り扱う画像は輪郭が複雑なものとなっており，SIFT で得られた局所的な特徴量も複雑になるため，これらを用いて特徴空間に散布してクラスタリングを行う必要がある。そこで学習用画像から得た SIFT 記述子を特徴空間に散布して K-means クラスタリングを行い，各クラスタの中心を局所特徴について代表するベクトルとした。画像 1 枚当たりの SIFT 記述子と，代表ベクトルとの距離をそれぞれ算出し，代表ベクトルに近い SIFT 記述子の個数を算出した。算出された個数が成分となる特徴量ヒストグラムを学習用画像および評価用画像から作成した。

＜2・3＞SVM による分類

学習用画像から作成した特徴量ヒストグラムから分類を行うが，本研究では非線形 SVM を用いて分類モデルを構築した。そして，評価用画像から作成した特徴量ヒストグラムを非線形 SVM に入力し，分類した結果から画像を判別した。

3．実験結果

実験で使用した画像の枚数を表 1 に示す。岩は 3450 枚とした。サンゴは形状により 5 種類に分け，それぞれ 1150 枚とした。サンゴは種類により細分化されるので，岩の枚数を各種のサンゴよりも多くした。

表 1　実験で使用した画像の枚数

Table 1.　Number of Images for the experiment.

クラス	画像の数[枚]
岩	3450
枝状サンゴ	1150
被覆状サンゴ	1150
塊状サンゴ	1150
ソフトコーラル	1150
葉状サンゴ	1150
合計	9200

本研究で用いた SIFT ベースの非線形 SVM(SIFT-SVM)および VGG16 を用いた 5 分割交差検証における F 値の平均を表 2 に示す。これらの結果および各サンゴの形状の特徴などを踏まえながら，本報告では被覆状サンゴ，ソフトコーラル，そして葉状サンゴについて考察する。

©2026 IEE Japan

表 2 SIFT-SVM および VGG16 による F 値

Table 2. F-scores of SIFT-SVM and VGG16.

	SIFT-SVM	VGG16
岩	0.88	0.94
枝状サンゴ	0.86	0.94
被覆状サンゴ	0.65	0.92
塊状サンゴ	0.76	0.87
ソフトコーラル	0.80	0.90
葉状サンゴ	0.78	0.95
平均	0.79	0.92

4. 考察

＜4・1＞被覆状サンゴ

SIFT-SVM による分類において，被覆状サンゴの F 値は，平均よりも低い。これは，被覆状サンゴのデータセットが，様々な外見の画像を含んでいるためだと考えられる。クラス内で外見にばらつきがあるため，特徴空間において，特徴量同士の距離が大きくなっている可能性が高い。このため，特定の被覆状サンゴの特徴量が，他のクラスの特徴量と近い距離にある可能性が高い。この非線形な分布をした特徴量を分類するために，SVM を使う際はカーネル法を用いた。しかし，カーネル法による非線形変換を適用したとしても，被覆状サンゴの特徴量の分布を十分に表現できなかったと考えられる。

一方で，被覆状サンゴの分類において，CNN の F 値は平均的である。これは，CNN における多数の非線形変換により，被覆状サンゴの複雑な特徴量の分布を表現できることを示している。

＜4・2＞ソフトコーラル

ソフトコーラルの分類において，SIFT-SVM の F 値は平均よりも高い。この理由は，ソフトコーラルが，微細で均質な要素が高密度に分布する外見をもつためだと考えられる。局所的な特徴のパターンが少ないため，ソフトコーラルの画像から抽出された SIFT 記述子が特定のクラスタに偏り，特徴量ヒストグラムが特徴空間で線形分離しやすくなると考えられる。

一方で，ソフトコーラルの分類において，VGG16 の F 値は平均よりも低い。これは，ソフトコーラルの画像から特徴抽出する際の，最大プーリングによる情報の損失が大きいためだと考えられる。各領域の局所的なパターンが似通っており，畳み込み演算から得られる特徴マップの値が，それぞれの領域で共通したものになる。この特徴マップに対して最大プーリングが繰り返されることにより，情報が大量に消失し，精度の低下を招いたと考えられる。

＜4・3＞葉状サンゴ

葉状サンゴの分類において，SIFT-SVM の F 値は平均よりも低い。これは，葉状サンゴから検出される特徴点の数の少なさが影響していると考えられる。SIFT では，輝度の変化が大きい領域を特徴点として検出し，特徴量を記述する。しかし，葉状サンゴの領域は局所的な輝度の変化が小さく，検出される特徴点の数が少ない。そのため，葉状サンゴの画像中に他のクラスの領域が含まれているとき，他のクラスの領域から抽出された SIFT 記述子の割合が増加する。これにより，特徴量ヒストグラムがノイズを多く含み，特徴空間で線形分離しづらくなると考えられる。

一方で，葉状サンゴの分類において，VGG16 の F 値は平均よりも高い。これも，最大プーリングが関係していると考えられる。葉状サンゴは，広い範囲における輝度の変化が大きい。そのため，特徴マップの値が領域ごとに異なる値となり，最大プーリングによる情報の損失が少なくなると考えられる。

以上のことから，葉状サンゴのような，滑らかな外見をもつサンゴの判別において，CNN は高い優位性をもつと考えられる。

5. あとがき

本稿では，海底画像の基質自動判別における深層学習の特性を調べるために，SIFT-SVM と CNN を比較検証した。検証の結果，CNN を使ってソフトコーラルから特徴抽出する際，最大プーリングの過程で発生する情報の損失が高くなっていることが示唆された。この結果をフィードバックして，より効率的な CNN を用いた基質自動判別法の改良を行う。今後は，最大プーリングの影響のさらなる検証のため，最大プーリングをする前と後の特徴量の分布を可視化し，識別性を検証していく。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25K15159 の助成を受けたものです。

文 献

(1) B Shahzadi: A. Sakai, S. Nozaki, T. Sakamaki : “Classification of Matrices in Quadrat Images by Using Convolutional Neural Network and Gaussian Filter,” Journal of Advances in Computer Networks, pp. 10-13 (2021).

(2) 太田 守人：「CNN によるコドラート画像内の多点基質判別に向けた batch size の影響」，電気・情報関係学会九州支部連合大会，pp. 350-351 (2022).

(3) G. Csurka, C. R. Dance, L. Fan, J. Willamowski, and C. Bray : “Visual Categorization with Bags of Keypoints” Proc. Workshop on Statistical Learning in Computer Vision (SLCV), in European Conference on Computer Vision (ECCV), pp. 1–22 (2004).

©2026 IEE Japan

害獣を含む動物８種を識別するモデルの開発

藤嶋　教彰*，川上　楓介（松江工業高等専門学校）

Development of a Model for Identifying Eight Animal Species Including Pests

Noriaki Fujishima, Fusuke Kawakami (National Institute of Technology, Matsue College)

１．まえがき

害獣による農作物被害防止の負担およびリスクの軽減は農業を支えるうえで重要であり，対策や駆除を農業者の代わりに行う自動害獣検出･駆除システムが求められる。著者らはエッジコンピュータ Jetson 搭載のドローンを定期的に自動飛行させ，識別した害獣にスプレー噴射を行うことで害獣を田畑から追い払う方法を検討している。現在は自動害獣検出手法の開発について，RGB カメラ 1 台を用いて取り組んでいる。

農林水産省によると，猪，鹿，猿，烏，熊による農業被害が大きい[(1)]。よって，これらについては識別の対象としたい。加えて，誤ってスプレーを噴射させないように，人や，飼っている動物が害獣と誤識別される可能性を限りなく減らすことが重要である。ゆえに，人と，飼育率の高い犬猫は識別が必要である。

よって本研究では，これら 8 種類の動物を識別するモデルである動物識別器を開発する。

２．動物識別器

物体検出モデル YOLO の第 8 世代である YOLOv8 の l モデル[(2)]を転移学習させることで動物識別器を得る。l モデルは標準モデルのうち 2 番目に精度が高く，動作が遅いモデルである。入力は 1 辺 640 ピクセルの正方形画像であり，出力は識別された各対象物体のクラス番号，物体を囲む矩形枠の左上座標と幅および高さのデータである。データは数値が書き込まれたテキストファイル，および入力画像にデータを描画（クラス番号は識別物体名に置換）した画像ファイルの 2 つが出力される。物体の検出数を定める信頼度の閾値は 0.6 としている。

３．開発環境

コンピュータが 2 台と Jetson Xavier NX 1 台を用いて開発している。動物識別器の開発，すなわち YOLOv8l モデルの構築および訓練は Intel Xeon Gold 6234 2 個，メモリ 256 GB，NVIDIA V100S 搭載の松江工業高等専門学校ディープラーニングサーバで行われる。動作を命令するプログラムを書いてサーバへジョブを投入する作業，および訓練によって得られた動物識別器を 10W 駆動の Jetson へ転送する作業は GPU 非搭載のデスクトップコンピュータで行う。Jetson は動物識別器の検証，すなわち識別器に訓練で使用されていない画像を入力して推論する過程で用いられる。

プログラム言語は Python，深層学習フレームワークは PyTorch を使用している。サーバの場合 venv で，Jetson の場合 Docker で，実行に必要な環境を構築している。

４．動物画像データセット

動物画像データセットは収集効率や画質，企業などとの連携による商業利用への転化を踏まえで構築されている。画像は Flickr[(3)]と O-DAN[(4)]，COCO[(5)]から収集されている。Flickr と O-DAN については著作権放棄の画像および商用利用可能な画像が収集されている。収集された画像が正方形でない場合は，短辺側に白色の画像を連結して正方形画像に変換された後，640 ピクセルの正方形画像になるようにリサイズされている。これは YOLO に非正方形画像を入れた際に行われる内部処理と同じである。Flickr からは長辺が 640 ピクセルの画像のみを収集している。画像の例を図 1 に示す。アノテーションデータは Flickr と O-DAN の場合，アノテーションツール labelImg を用いて目視による手作業で作成する。COCO の場合，ダウンロードで取得する。

図 1　データセットに含まれる画像の例
Fig.1 An example of images in a dataset

使用時には 3 つのデータセットに分割される。具体的には，モデル訓練課程におけるパラメータの調整で用いる train，訓練状態のモニタリングで用いる validation，動物識別器の検証過程で用いる test に分割される。

train および validation は，Flickr と COCO から取得したもので構成されている。Flickr からは猪，鹿，猿，烏を，COCO からは熊，人，犬，猫を収集している。画像とデータのペア数は train が各動物 700 ペア，validation が各動物 300 ペアである。検証で使用する test は Flickr から各動物 60 ペア，O-DAN から各 40 ペア取得している。

©2026 IEE Japan

５．検証実験

＜5・1＞実験内容　　COCO 学習済み YOLOv8l を train と validation で転移学習し，動物識別器を作成した。ハイパーパラメータや関数は標準である。その後，Jetson に識別器を転送し，test を用いて識別・検出性能を検証した。

訓練時のバッチサイズは 32 とし，訓練回数はアーリーストッピング法で自動決定した。これは 1 エポック訓練が終了するごとに validation を用いて誤差損失の変化をチェックし，連続でn回損失が低下しなければ，最小損失となっているモデルを採用する手法である。本研究では$n = 100$とした。これを 3 回行い，3 つの動物識別器を作成した。

検証では，各識別器で test データセットを入力とした推論を行い，識別結果を描画した画像とアノテーションデータ，すなわち正解データを比較することにより，識別が成功か失敗かを確認した。そして，以下で述べる 3 種類の指標により推論時における識別および検出の性能を評価した。

1 つ目は識別成功率であり，識別能力の高さを表す指標である。画像中に写る動物の総数の内，正しく識別できた数の割合である。正しく，とは推論された動物のクラス番号がアノテーションのクラス番号と一致し，かつ存在位置にも誤りがないことである。表 1 は test に含まれる各動物の総個体数である。個体数が異なるのは 1 枚の画像に複数の動物が含まれる場合があるためである。

表 1　test データセットに含まれる各動物の総数
Table.1 Total number of each animal included in the test dataset

猪	鹿	猿	烏
203	307	196	238
熊	人	犬	猫
150	316	140	167

2 つ目は未検出率であり，対象動物の見逃しやすさを評価する指標である。各動物の総数に対する見逃した個体数の割合と定義している。

3 つめは誤識別率であり，識別の誤りやすさを評価する指標である。各動物の総数に対する種類の識別を誤った個体数の割合と定義している。

＜5・2＞実験結果　　識別成功率は表 2 のとおり，4 種類の動物で 90%以上である。一方，それ以外の動物は成功率を大きく下げ，特に人間は 40.0%と低い識別精度である。

未検出率は表 3 のとおり，最も低い熊で 5%を超えている。すなわち未検出が識別精度低下に影響を及ぼしている。傾向として，図 2 の左半分のように複数個体を 1 個体とカウントしてしまう場合や，対象動物と背景が類似色で領域が曖昧になる場合に生じている。各動物 100 枚のテスト画像のうち，1 個体も識別できなかった画像数は平均で人が 42 枚，烏が 20 枚，猫が 9 枚あった。人の識別成功率を大きく落としており，人の識別精度低下の主原因である。

表 2　識別成功率
Table.2 Identification success rate

動物名	平均±SD (%)	動物名	平均±SD (%)
猪	90.3 ± 1.24	熊	93.6 ± 2.52
鹿	80.9 ± 0.94	人	40.0 ± 1.24
猿	90.0 ± 3.24	犬	73.6 ± 2.38
烏	71.4 ± 1.46	猫	93.1 ± 1.25

表 3　未検出率
Table.3 Undetected rate

動物名	平均±SD (%)	動物名	平均±SD (%)
猪	8.70 ± 1.14	熊	5.33 ± 2.40
鹿	18.2 ± 1.17	人	57.6 ± 3.02
猿	9.35 ± 3.40	犬	21.4 ± 0.714
烏	28.3 ± 1.75	猫	27.7 ± 1.92

表 4　誤識別率
Table.4 False identification rate

動物名	平均±SD (%)	動物名	平均±SD (%)
猪	0.985 ± 0.492	熊	1.11 ± 0.385
鹿	0.868 ± 0.376	人	2.43 ± 0.659
猿	0.680 ± 0.295	犬	5.00 ± 1.24
烏	0.280 ± 0.485	猫	9.18 ± 3.01

図 2　未検出または誤識別した動物が含まれる画像
Fig.2 Images that contain undetected or misidentified animals

誤識別率は表 4 のとおり，未検出率と比較して低い。すなわち，全体的に識別成功率改善の鍵は未検出を減らすこととわかる。特に多い失敗は猫を犬と誤識別した場合が平均で 10 件，犬を鹿と誤検出した場合が平均 4 件である。人，犬，猫が害獣と誤識別された件数は人が平均 2 件，犬が平均 8 件，猫が平均 4 件である。

なお，Jetson での推論は画像 1 枚につき 200 ミリ秒を要した。実時間処理実現には TensorRT 形式変換による処理時間高速化(6)が必要である。この際，モデルの構造や計算の有効桁数に変化が生じるため，先行研究(6)では有意差が認められなかったものの，若干の精度変化が生じる可能性がある。

６．むすび

対象動物をある程度識別できているが精度や速度に大きな課題が残った。YOLO11 以降への世代変更や TensorRT 形式へのモデル変換を行うことで，この課題に取り組む。

文　献

(1) 農林水産省，農作物被害状況 (2024)
(2) https://docs.ultralytics.com/ja/models/yolov8/
(3) https://www.flickr.com/groups/japanese/
(4) https://o-dan.net/
(5) https://cocodataset.org/
(6) 藤嶋教彰・小林悠人：高専シンポジウム, G-10 (2024)

©2026 IEE Japan

設備の復帰点検 DNN 学習における データ拡張による環境変動対応

今村　柊斗*，渡邉　柚華，青木　公也（中京大学），
武村　順三(中部電気保安協会)

Adaptation to Environmental Variations via Data Augmentation in DNN(Deep Neural Network) Training for Equipment Inspection

Shuto Imamura, Yuzuka Watanabe, Kimiya Aoki (Chukyo University)
Junzou Takemura (Chubu Electrical Safety Services Foundation)

１．まえがき

電気設備の点検作業前には安全のため電源を遮断する必要があり，レバーやスイッチが OFF 状態に操作され，一部の配線端子も一旦切断される．点検作業後には，これらを確実に復帰させるとともに，作業中に使用した工具も設備内に取り残されないよう留意する必要がある．復帰確認は複数人でチェックシートや設備写真を活用して人手により行われているが，復帰ミスは重大事故に繋がる可能性があるため[1][2]，画像処理・AI 技術を活用した自動化が強く求められている．そこで著者らの研究グループでは，点検作業前後に取得した電気設備画像を用いて，復帰点検部位の状態を判定し，復帰作業が適切に行われたかを確認する復帰点検システムの研究を進めている[3][4]．このシステムでは，前処理となる点検部位の検出に物体検出 DNN(Deep Neural Network)を用いる．本研究では，復帰点検システムの実運用化に向けて，このシステムの有効性を支える DNN の汎用性の担保について検討する．具体的には，DNN の学習時にデータ拡張を適用することで，異なる撮影条件や点検現場においても有効に機能するかを，点検部位の検出精度の観点から実験的に確認する．

２．自動点検システムの概要と基本方針

著者らの研究グループで検討している復帰点検システムの概要について説明する．先ず，作業前後の電気設備画像から物体検出 DNN を用いて点検部位を検出し，検出領域を ROI(Region of Interest)とする．次に，「スイッチ」や「レバー」といった検出ラベル毎に予め設計された画像処理を ROI に対して適用し，状態を判定する．最後に，作業前後における部位の状態を比較することで復帰作業が適切に行われたかを確認する．例えば，本研究の実験で取り扱うスイッチであれば，電気設備画像全体から「スイッチ」というラベルと共に位置・領域を検出する．検出領域である ROI に対しては，HSV カラーモデルにおける色相判定に基づく画像処理を適用することで，ON/OFF を判定する．

図 1 角度変動の一例

Fig.1. Example of angle variation

表 1 データセットの撮影条件

Table 1. Photography conditions for the dataset

項目	条件
天候	曇天
撮影角度	±40 度 (5 度刻み)
撮影距離	1, 2, 3m

表 2 デフォルトのデータ拡張設定

Table 2. Default data augmentation

データ拡張項目	パラメータ
Hsv_h	0.015
Hsv_s	0.7
Hsv_v	0.4
Translate	0.1
Mosaic	1.0
Scale	0.5
Shear	0.0
Perspective	0.0

一般的に DNN は想定される対象の状態を網羅的に学習する必要があるが，点検対象の状態を含めると学習データの収集に手間がかかる．一方で，ルールベースの画像処理は，ROI が適切に設定されていれば，ロバストかつ論理的に対象の状態を判定することができる．以上の通り，復帰点検システムでは DNN と部位特性に応じた画像処理を効果的に組み合わせることで，復帰点検部位の状態を正確に判

©2026 IEE Japan

表 3 実験結果

Table 3. Experimental results

	角度変動			距離変動		位置変動		日照変動		
	Baseline	Shear:1.0	Perspective:0.0001	Baseline	Scale:1.0	Baseline	Translate:0.5	Baseline	Hsv_s:0.9	Hsv_v:0.9
Confidence *score*	0.85	0.84	0.87	0.85	0.87	0.89	0.90	0.79	0.82	0.86
Precision	0.96	1.00	1.00	0.90	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Recall	0.92	1.00	0.92	0.58	0.88	0.97	0.99	0.79	0.83	0.96
F1-Score	0.94	1.00	0.958	0.70	0.94	0.98	0.99	0.88	0.91	0.98

表中の赤字は Baseline より向上した箇所を示す

定できる．つまり，復帰点検を正確に行うためには，ROI を適切に設定することが重要となる．

本研究で想定する復帰点検システムの運用では，予め任意の電気設備画像を用いて学習し，点検現場でカメラによって撮像された画像に対して推論する．しかし，電気設備は設置環境や撮影条件が現場毎に大きく異なる場合もあり，また点検作業の長時間化に伴って，日照条件や照明環境も変動する．また，効率化のために複数の電気設備の復帰状態を同時に点検する場合には，カメラとの距離・角度・位置関係が一定とならず，スイッチ等の点検部位の見え方が変化する．図 1 に角度による見え方の違いを一例として示す．このような環境変動下では，学習時と異なる条件で撮影された画像に対して DNN の検出性能が低下し，ROI が適切に設定されない可能性がある．これに対して本研究では，環境変動を復帰点検システムの実運用化に向けた技術的課題として位置付ける．その上で，DNN の学習時におけるデータ拡張を精査・整理し，環境変動に対して有効なデータ拡張を実験によって明らかにする．

3．実験

＜3・1＞実験概要　本研究では，運用時に想定される環境変動として，電気設備に対するカメラ光軸の角度，設備とカメラの距離，画像中の電気設備の位置，そして日照条件の 4 種類を取り上げる．これらの環境変動による影響を評価するため，表 1 に示す撮影条件の下で取得した電気設備画像を用いて，学習用・推論用データの分布に意図的な不均衡を設け，各環境変動を再現したデータセットを構築する．角度変動については，学習データに電気設備を正面視点から撮影した画像を，推論データに斜め視点から撮影した画像を用いることで再現する．距離変動については，学習データに電気設備を遠距離から撮影した画像を，推論データに近距離から撮影した画像を用いることで再現する．位置変動についても，学習データに電気設備が画面中央に配置された画像を，推論データに画面端に配置された画像を用いることで再現する．日照変動については，学習データに表 1 に示す電気設備を曇天時に撮影した画像を，推論データに別日の晴天時に撮影した画像を用いることで再現する．

以上の 4 種類の環境変動を再現したデータセットに対し，物体検出 DNN モデルとして YOLOv8 を用いてスイッチを検出する．YOLOv8 では，表 2 に示す汎用性を重視して設計されたデフォルトのデータ拡張設定が自動的に適用される．これは環境変動下には対応し得ない可能性がある．そこで本研究では，各データセットに対し，このデフォルト設定で学習したモデルで推論した場合の検出精度を Baseline と位置付け，各種データ拡張パラメータを変更して学習したモデルでの検出精度と比較する．これにより，4 種類の環境変動下に対してどのデータ拡張が検出精度の向上に寄与するかを確認する．

＜3・2＞実験結果　表 3 に実験結果を示す．各列は，表 2 に示すデータ拡張のうち特定のパラメータを変更して学習したモデルによる推論結果であり，Baseline と比較した．実験結果より，特定のデータ拡張パラメータを変更し，学習することで，Baseline を上回る平均信頼度スコアと検出精度を示すようなデータ拡張項目が存在することを 4 種類の環境変動を再現したデータセットに対して確認することができた．例えば，角度変動については，せん断変換(Shear)を 1.0，あるいは遠近法変換(Perspective)を 0.0001 というパラメータで学習したモデルで推論すると，Baseline より高い検出精度を示しており，撮影角度の変化に対する有効性が確認された．これらの結果から，学習時とは異なる条件で撮影された画像に対しても，環境変動に応じた適切なデータ拡張を選択・調整することで，復帰点検部位検出 DNN の性能を向上し得ることが示された．

4．今後の展望

本研究での実験により，環境変動下におけるデータ拡張の有効性が確認されたことから，復帰点検システムは実運用においても多様な現場環境に適応し得る汎用性を備えていると考えられる．今後は，実際の点検現場での検証を進めるとともに，スイッチ以外の点検対象についても同様の実験を行い，システムの実用化を目指す．

文　献

(1)武村　他，令和 4 年電気学会全国大会論文集，100~101，(2022)
(2)豊田　他，電気設備学会誌，Vol.28，No.2，115~118，(2008)
(3)酒井　他，令和 6 年電気学会全国大会論文集，81~82，(2024)
(4)今田　他，動的画像処理実利用化ワークショップ DIA2024 論文集，89~93，(2024)

©2026 IEE Japan

広視野計測における点群位置合わせの精度向上のための輝度値の有効性

小松　晴雄*(明治大学)，坪井　勇政(SICK 株式会社)，井口　幸洋(明治大学)

Demonstrating the Effectiveness of Intensity in Point Cloud Registration for Wide-Field Measurement

Haruo Komatsu(Meiji University), Yusei Tsuboi(SICK K.K.), Yukihiro Iguchi(Meiji University)

１．はじめに

3D データが取得可能な 3D カメラには，様々な計測原理が存在するが，Time-of-Flight(ToF)技術を用いた TOF カメラが昨今注目されている。TOF カメラは点群データに加えて，点ごとの輝度値を得ることができる。TOF カメラの性能は年々向上しており，高分解能になるだけでなく，価格についても安価になってきている[1]。3D カメラを複数移動ロボットに搭載すれば，高付加価値で，広視野を持った視覚として利用できる。複数の 3D カメラで広視野を実現するには，他のカメラで得られた点群データを，ワールド座標系などの一つの座標系に再配置（位置合わせ）しなければならない。この位置合わせを精度高く実現するには，点群を再配置するための変換行列を計算する必要がある。これは一般的に困難な課題であるとされるが，比較的精度の高い従来手法として Iterative Closest Point(ICP)[1]が有名である。また，昨今では，深層学習を用いた Deep Closest Point (DCP)[2]がこの分野において成果を上げている。DCP では，与えられた点群の各点の特徴を抽出し，その特徴に基づいて点群間の対応点を予測する。予測された対応点から 2 つの点群間の変換行列を推定する。これらの手法は点群データの座標のみを用いた手法である。著者らは，さらなる精度向上を目的として，従来では使われていない，輝度値について注目している。異なる位置にある複数のカメラで同一の対象物を取得した場合，どのカメラにおいても，輝度値の特徴は類似していると仮定する。その類似した特徴を深層学習によって抽出できれば，位置合わせの精度向上に有効ではないかと考えた。

本研究では，従来手法である DCP の入力に輝度値を追加し，DCP の精度を向上させる手法を提案する。データセットには，TOF カメラで取得した室内環境のデータを用いる。精度検証には，輝度値ありと輝度値なしで学習したモデルで比較し，それぞれの平均二乗誤差計算することで，本手法の有効性を示す。

２．検証に用いるモデル

DCP は以下の 3 つのモジュールからなる深層学習を用いた，位置合わせを予測するモデルである。

・特徴抽出を行う Dynamic Graph DNN(DGCNN)[3]

・点群間のソフトな点の対応を予測する Pointer Network を含むアテンション機構[4]

・変換行列を予測する微分可能な特異値分解層

点群からの特徴の抽出に DGCNN とアテンション機構を用いる手法は他の位置合わせのモデルでも用いられているため，単純なモデルである DCP を検証に採用する。

３．検証

＜3・1＞　DGCNN の拡張

本節では，点群から座標に加えて輝度値を含ませて特徴を抽出するために DGCNN を拡張する手法を提案する（図１）。

DCP では 2 つの点群間の対応点を得るために点ごとの特徴を抽出する。N 個の点を持つ点群Xは$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \subseteq R^3, x_i = \{x_i, y_i, z_i\}$で表される。特徴を抽出する DGCNN の層の合計数を L とすると点群 X の最終的な特徴F_Xは$F_X = \{x_1^L, x_2^L, \dots, x_N^L\}$となる。DGCNN を用いて点群から座標のみの特徴を抽出する場合，まず入力点群 X に対して 3 次元空間上の距離に基づいて k 近傍法から近傍グラフ G が構築される。そして近傍グラフ G の端点に対して多層パーセプトロン(Multi-Layer Perceptron, MLP)で実装される非線形関数h_θ^lを適用し，点ごとに max などの集約関数fを実行することで点群 X の点ごとの特徴が得られる。したがって第l層における点x_iの特徴は EdgeConv 操作[3]によって次のように計算される

$$x_i^l = f(h_\theta^l(x_i^{l-1}, x_j^{l-1}) \; \forall j \in N_i$$

ここでN_iはグラフ G におけるx_iの近傍点である。

輝度値をもつ点群 P は $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \subseteq R^4, p_i = \{x_i, y_i, z_i, I_i\}$で表せられる。$p_i$には 3 次元の座標である$x_i, y_i, z_i$と輝度値$I_i$が含まれる。輝度値を持つ点群から DGCNN を用いて特徴を抽出する場合，まず点群の座標の値のみを用いて k 近傍法から近傍グラフ G を構築し，グラフの端点に対して非線形関数を適用，点ごとに集約関数を実行することで座標に加えて輝度値もつ点群の特徴が抽出できる。

＜3・2＞　検証方法

DCP における特徴抽出機構である DGCNN の入力次元を拡張し，座標と輝度値から特徴を抽出するモデルと，座標のみから特徴を抽出するモデルの位置合わせの予測の誤差を比較する。位置合わせの誤差には平均二乗誤差(MSE)を用いる。回転行列と並進ベクトルの誤差は回転行列の真値R_{True}，回転行列の予測値R_{Pred}，並進ベクトルの真値t_{True}，並進ベ

©2026 IEE Japan

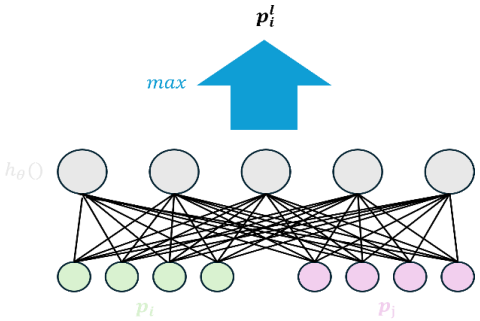


図 1:DGCNN による輝度値を含めた特徴抽出
Figure1:Feature extraction including intensity using DGCNN

クトルの予測値t_{Pred}，評価用のデータ数nを用いて MSE はそれぞれ以下の式で計算される。

$$MSE(R) = \frac{1}{n}\sum(R_{True} - R_{Pred})^2 \qquad (1)$$

$$MSE(t) = \frac{1}{n}\sum\{t_{True} - t_{Pred})^2 \qquad (2)$$

＜3・3＞　検証に用いるデータ

ToF 技術を用いたカメラによって得られた室内環境の 140 個の点群データに対して以下の処理を加える。図２に取得点群の一例を示す。

1. Farthest Point Sampling　(FPS)　を用いて未処理の点群を 8192 点までダウンサンプリングを行う。
2. ダウンサンプリングされた点からランダムに 1 つ点を選びその点から 1024 点の近傍点をサンプリングする。これを各データに対して 4 回行う。
3. 2.で得られた点群に各軸に対して[0°，30°]の範囲で回転，[-5，5]の範囲で並進の処理を行う。

以上の操作で得られた 560 個のデータを 1 つのデータセットとし，データセットのうち 80%を学習データとして使用し，20%を評価用のデータとして用いる。

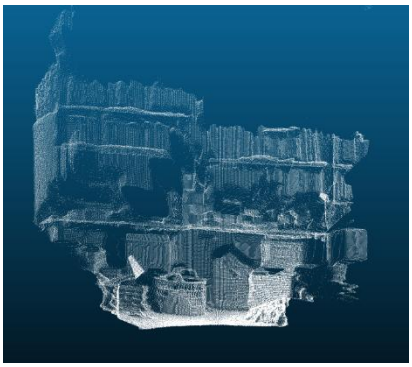
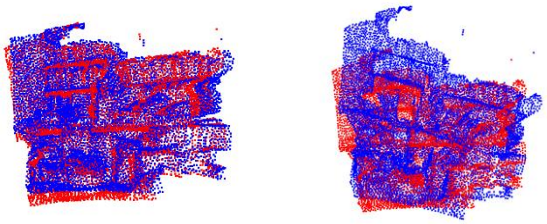


図２:実験に用いる点群データの一例
Figure2: An example of pointcloud used in the experiment

４．結果

テストデータにおける点群位置合わせ結果の例を図３に示す。また室内環境の点群データ 112 個の評価データについて式(1)，(2)を用いて求められる予測誤差を表 1 に示す。提案手法のほうがどちらも誤差が小さく良い結果を出していることがわかる。



(a)　　(b)

図３:位置合わせの実験結果
(a):輝度値を用いたモデルの位置合わせ
(b):輝度値を用いていないモデルの位置合わせ
Figure3: Result of Registration
(a): Result of the model using intensity
(b): Result of the model using coordinates

表 1:　評価データにおける位置合わせの予測誤差
Table1: Prediction error in registration on test data

モデル	MSE(R)	MSE(t)
DCP(輝度値あり)	24.3	0.418
DCP(輝度値なし)	51.4	0.917

５．考察

点の特徴の抽出に座標に加えて輝度値を用いることで変換行列の真値と予測値の MSE が半分以下に減少し，図 3 より点群位置合わせにおいても精度が向上していることが確認できる。位置合わせのための点群の輝度値の特徴の抽出が位置合わせに有効であることが示された。

６．参考文献

[1]https://www.sick.com/jp/ja/products/machine-vision-and-identification/machine-vision/visionary-t-mini/visionary-t-mini/c/g555625
[2]Y. Wang and J. Solomon, "Deep Closest Point: Learning Representations for Point Cloud Registration," 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 2019, pp. 3522-3531, doi: 10.1109/ICCV.2019.00362.
[3] Yue Wang, Yongbin Sun, Ziwei Liu, Sanjay E. Sarma, Michael M. Bronstein, and Justin M. Solomon. 2019. Dynamic Graph CNN for Learning on Point Clouds. ACM Trans. Graph. 38, 5, Article 146 (October 2019), 12 pages. https://doi.org/10.1145/3326362
[4] A. Vaswani et al., “Attention is all you need,” in Proc. 31st Int.Conf. Neural Inf. Process. Syst., 2017, pp. 5998-6008.
[5] P. J. Besl and N. D. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, pp. 239-256, Feb. 1992, doi: 10.1109/34.121791.

©2026 IEE Japan

深層学習と画像処理を用いた単一画像による道路交通標識の距離推定法

林　健也*，髙橋　佑徳，浅井　佑仁，米山　淳（青山学院大学）

Distance estimation of road traffic signs from a single image using deep learning and image processing

Kenya Hayashi, Yutoku Takahashi, Yuto Asai, Jun Yoneyama (Aoyama Gakuin University)

１．はじめに

自動運転では,人間ではなくシステムによって周囲の状況を把握し,自動車の制動,駆動を制御することが必要となる.周辺情報の検知には,道路に存在しうる対象物に対する距離の計測が不可欠である.現状提案されている Lidar やステレオカメラでの距離推定方法はコスト面の懸念がある.そこで本研究では,深層学習による深度推定,及び画像処理技術を活用することによって,単一画像のみでの距離推定を行う.

２．提案手法

本研究では，道路標識の認識を，物体検出アルゴリズム YOLOv8(You Only Look Once) [1]で行う．特定の標識を認識させるために画像のどこにどの標識があるかをラベル付けしたデータセットを用意し,YOLOv8 で学習させる．得られた標識認識モデルによって他の画像でも，標識に対する情報を Bouding Box という矩形で予測範囲を示すとともに，どの標識なのかを確率を用いて識別する.また，深度推定を行うために，物体の奥行や前後関係をグレースケールの明暗で相対的に表現された画像を出力する Depth Anything V2[2]を用いる.得られた相対深度画像の情報から絶対距離にスケーリングし,画像処理を用いて一時停止標識までの距離を推定する数理モデルを構築する.実験に用いるデータは標識から 3m の場所から 3m 間隔で 30m までの計 10 枚を 1 地点として合計 5 地点分の 50 枚での画像である.各距離に対する推定と実際の距離との誤差から,モデル評価を行う.

３．絶対距離スケーリングモデル

深度推定で得られた画像は図 1 に示すように,相対深度で表している.ここから実際の距離を推定するために,相対深度から絶対距離へのスケーリングが必要である.本研究では, YOLOv8 で得られた Bounding Box の情報から認識した標識の中心座標画素でのグレースケール値Pを取得する.次にフィッティングにより相対深度から絶対距離へスケーリングを行うための数理モデルを算出する.図 2 で示すように,70 枚分の止まれ標識までの実際の距離Lとグレースケール値Pの関係式から，推定距離$\hat{L}$として，絶対距離スケーリングモデル(1)を構成する.

$$\hat{L} = 122.36P^{-0.679} \tag{1}$$

Depth Anything V2 による深度推定結果は天候や道路状況によってロバスト性が欠ける.ここで実験の撮影データに関しては実際の車載システムを想定し,カメラの角度は地面に対して水平,高さは 170cm である.これらの条件下では撮影された画像の中央下部分の距離は一定とみなすことができ,計測によって 2.3m であると分かった.このことから,画像中央下部分の予測距離を$\hat{L}_{ground}$とし,実際の距離 2.3m との比較から,深度推定のロバスト性を確保するため補正済の距離推定モデル式(2)を得る．$\hat{L}_{ground}$は深度推定結果図の中央下ピクセルのグレースケール値を参照し，式(1)に代入することで求められる.

$$\hat{L} = 122.36P^{-0.679} \times \frac{\hat{L}_{ground}}{2.3} \tag{2}$$

図 1 深度推定

Fig.1. Depth Estimation

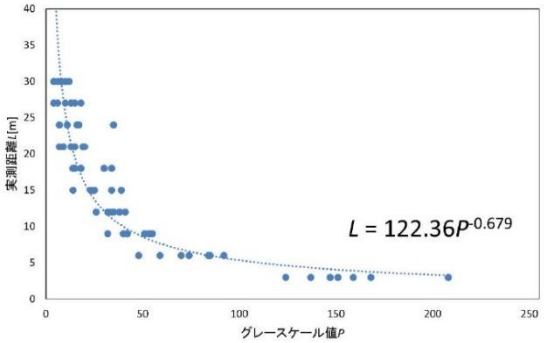


図 2 フィッティング結果

Fig.2. Result of fitting

©2026 IEE Japan

４．画像処理

距離推定を行うために,標識用支柱の根本の座標を取得する.そこで,Bouding Box で得られた情報から,標識面を囲む矩形を下に複数個分プロットすることで,標識用支柱を表示させる.画像内の任意の画素座標(x,y)に対しての RGB カラー関数を$I(x,y)$すると,赤,青,緑の 3 成分から構成され,

$$I(x,y) = [R(x,y), G(x,y), B(x,y)] \quad (3)$$

$$R(x,y), G(x,y), B(x,y) \in [0,255] \quad (4)$$

となる.標識用支柱のみを表示するために,画像内の白い成分の画素を抽出する条件式(5)を設ける.

$$\begin{aligned} R(x,y) &\geq 150 \\ G(x,y) &\geq 150 \\ B(x,y) &\geq 150 \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)の条件に当てはまる画素は白($I(x,y) = [255,255,255]$),それ以外の画素は黒($I(x,y) = [0,0,0]$)とする,2 値化画像を生成する.また,画像内の抽出された他の白成分画素(壁や道路の白線)の除去を行うために,モルフォロジー処理を行う.この処理では縦に長い成分のみを抽出することで,標識用支柱を検出することができる.図 3 にこれらの処理を施した 2 値化画像を示す.以上より求まった支柱の根本部分の座標より,Depth Anything V2 での深度推定結果からグレースケール値Pを求めることができ,式(2)に代入することで,標識までの距離予測を行う.

また Depth Anything V2 における深度推定において,標識が遠距離にある場合だと,背景と同化してしまう.そこで標識の Bouding Box の横幅BB_{width}に対して,$19BB_{width}$となるようし,アスペクト比一定で，標識が中央に位置するよう元画像を拡大する.拡大画像から深度推定を行ったのち，その推定距離に対して式(6)に示す拡大率αを式(2)に乗算し,補正する．画像を拡大する条件として,BB_{width}が 55 ピクセル以下の場合とする.

$$\alpha = \frac{2213}{19BB_{width}} \quad (6)$$

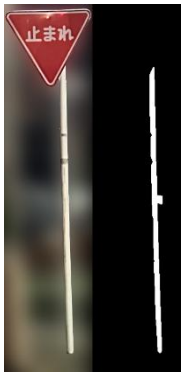


図 3 画像処理によるポール抽出

Fig.3. Pole extraction using image processing

５．実験結果

モデル評価として,平均絶対誤差MAEと,平均相対誤差MREを計算する.ここで,各距離データは,5 個である．各距離に対する実験結果を表 1 に示す.9m 以上でのMREは 10%程度となっているが,それよりも近いと誤差が大きくなっていることが分かる.

$$MAE = \left(\frac{1}{5}\right)\Sigma_{i=1}^{5}\left|L - \hat{L}_i\right| \quad (7)$$

$$MRE = \left(\frac{1}{5}\right)\Sigma_{i=1}^{5}\left|\frac{L - \hat{L}_i}{L}\right| \quad (8)$$

表 1 推定距離と誤差結果

Table1. Results of distance estimation and error

真値 L[m]	平均絶対誤差 MAE[m]	平均相対誤差 MRE[%]
3	1.68	56
6	1.24	21
9	0.90	10
12	0.54	5
15	1.48	10
18	1.56	9
21	2.14	10
24	2.90	12
27	2.96	11
30	1.30	4

６．考察

撮影地点が近いほど,標識に対する観測角度が大きくなり,画像と空間の幾何学的要素による誤差が大きくなることから,平均相対誤差が他の箇所に比べて大きくなったと考察する.よって幾何学的要素を考慮した数理モデルを近距離帯で適用し,推定距離精度を高める必要がある.

７．おわりに

本研究では,提案手法によって道路交通標識までの距離推定結果を概ね誤差を抑えながら推定することができた.また,高価な機器を用いることなく単眼画像のみから実験を行うことで,コスト面を抑えられた距離推定システムを構築することができた.今後は精度が悪かった近距離の推定結果を考察で述べた手法で改善するのとともに,リアルタイム処理性能を向上させるためのシステム全体の見直しに着手したいと思う.

文　献

(1)Ultralytcs: “YOLOv8,”https://github.com/ultralytics/ultralytics (accessed 2025-4-30).

(2)L.Yang et al.: “Depth Anything V2,” arXiv preprint, arXiv:2406.09414, 2024.

©2026 IEE Japan

縮退の対処機能を有する解空間の階層構造に基づく多点型組合せ最適化手法の検討

大澤　希仁*，田村　健一，安田　恵一郎（東京都立大学）

Study of Multi-Point Combinatorial Optimization Methods Based on Hierarchical Structures of Solution Spaces with Degeneracy-Handling Mechanism

Kihito Osawa*, Kenichi Tamura, Keiichiro Yasuda (Tokyo Metropolitan University)

1. はじめに

近年，システムの設計・運用・制御に対する要求は高度化しており，高い探索性能と汎用性を備えた最適化手法の開発が重要な課題となっている [(1)]。とりわけ，離散構造を有する実問題の多くは組合せ最適化問題として定式化できる一方，計算困難である場合が多く，厳密解の獲得よりも実用的な時間内に準最適解を得ることが重視される。加えて，計算資源の増大により発見的近似解法の適用範囲が拡大していることから，メタヒューリスティクスが注目されている。我々は，解空間の階層構造を利用する多点型メタヒューリスティクスとして,「解空間の階層構造に基づく多点型組合せ最適化手法」（HS-MCOM）を提案した [(2)]。しかし，探索の進行に伴い探索点が縮退して多様性が低下し，探索性能が劣化するという課題がある [(3)]。そこで本研究では，HS-MCOM に探索点の置換を導入し，代表的な問題例に対してその有効性を検討することを目的とする。

2. HS-MCOM

我々が提案した HS-MCOM では，Local Search[(4)]（以下 LS）により同一の局所最適解へ収束する解集合を引き込み領域とし，引き込み領域集合（上位構造）と通常の解空間（下位構造）を階層化して探索戦略を切り替える。上位構造では，距離の概念に基づく近傍制限を用いて探索を行い，下位構造（引き込み領域内）では LS により探索を行う。提案手法の有用性は，代表的なメタヒューリスティクスである Tabu Search との比較により確認されている。

3. 探索点の縮退

HS-MCOM では，複数の探索点が同時に同一の引き込み領域へ移動した場合，LS により同一の局所最適解へ収束し，以降の探索過程が重複する現象が生じる。本研究では，この現象を探索点の縮退と定義する [(3)]。縮退が発生すると，探索点が同一の軌跡を辿るため，実質的な探索点数が減少し，探索の多様性が低下する。さらに，重複探索により計算資源が浪費される。したがって，縮退は探索性能を低下させる要因であり，これに対処することは探索性能向上のために不可欠である。

4. 提案手法

本研究では，縮退した探索点のうち一つを残し，残りを別の解に置換する手法を提案する。本手法は，縮退への対処以外の探索機構を極力変更せず，有用性が確認されている HS-MCOM の基本構造に与える影響を最小化できるという利点を有する。

＜4･1＞アルゴリズム 前節で提案した置換戦略を HS-MCOM の Step2 に組み込んだアルゴリズムを以下に示す。

【提案手法】

Step 0:[準備]　最大反復回数 $T_{\max}$，探索点数 $m \geq 2$，脱出領域サイズ $v \geq 2$，最大記憶数 $l_{\max} \geq m$ を与える。

Step 1:[初期化]　反復回数 $t = 0$，各反復における移動回数 $k_i = 0 \ \ (i = 1, 2, \cdots, m)$ とし，初期点 $\boldsymbol{x}_i{}^{(0,0)}$ とする。探索済み局所的最適解集合 $H = \phi$ とする。

Step 2:[領域内探索と探索点の置換]　$\boldsymbol{x}_i{}^{(t,*)} = \mathrm{LS}(\boldsymbol{x}_i{}^{(t,k_i)})$ により，局所的最適解 $\boldsymbol{x}_i{}^{(t,*)}$ を得る。
探索点の縮退を確認し，もし探索点 j が縮退していれば $\boldsymbol{x}_j^{(t,*)} := \underset{\boldsymbol{x} \in H \backslash X}{\mathrm{argmax}}\{d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}_j^{(t,*)}) |\ f(\boldsymbol{x}) < \max\ f(X)\}$ のように置換する。ただし，X は探索点の集合とする。$H := H \cup \{\boldsymbol{x}_i{}^{(t,*)}\}$ とする。H の記憶数が $l_{\max}$ より多い場合，古い順に削除する。

Step 3:[終了判定]　$t = T_{\max}$ ならば探索を終了する。
さもなければ $t := t + 1$，$k_i = 0$，$\boldsymbol{x}_i{}^{(t+1,0)} := \boldsymbol{x}_i{}^{(t,*)}$ として **Step 4** へ移行する。

Step 4:[領域間の移動]

Step 4-1:[利用情報の選出]　$H_i = H \backslash \{\boldsymbol{x}_i{}^{(t,0)}\}$ とする。H_i から $\boldsymbol{x}_i{}^{(t,0)}$ との距離が近い順に v 個の解集合を近接集合 $\hat{H}_i$ とし，直径対 $\{\boldsymbol{x}_{(\alpha,i)}, \boldsymbol{x}_{(\beta,i)}\} = \mathrm{argmax}\{d(\boldsymbol{y}_1, \boldsymbol{y}_2) | \boldsymbol{y}_1, \boldsymbol{y}_2 \in \hat{H}_i\}$ を得る。さらに非近接集合 $\check{H}_i = H_i \backslash \hat{H}_i$ から目標解 $\boldsymbol{x}_i{}^{\star} = \mathrm{argmin}\{f(\boldsymbol{y}) | \boldsymbol{y} \in \check{H}_i\}$ を設定する。

Step 4-2:[移動方向の限定と更新]　近傍を制限し，移動方向 $N_i = N_{(1,i)} \cap N_{(2,i)} \cap N_{(3,i)}$ を与える。

$$N_{(1,i)} = \{\boldsymbol{y} \in N(\boldsymbol{x}^{(t,k_i)}) \mid d(\boldsymbol{x}^{(t,k_i)}, \boldsymbol{x}^{(t,0)}) < d(\boldsymbol{y}, \boldsymbol{x}^{(t,0)})\}$$

$$N_{(2,i)} = \{\boldsymbol{y} \in N(\boldsymbol{x}^{(t,k_i)}) \mid d(\boldsymbol{x}^{(t,k_i)}, \boldsymbol{x}_{(\alpha,i)}) + d(\boldsymbol{x}^{(t,k_i)}, \boldsymbol{x}_{(\beta,i)}) < d(\boldsymbol{y}, \boldsymbol{x}_{(\alpha,i)}) + d(\boldsymbol{y}, \boldsymbol{x}_{(\beta,i)})\}$$

$$N_{(3,i)} = \{\boldsymbol{y} \in N(\boldsymbol{x}^{(t,k_i)}) \mid d(\boldsymbol{x}^{(t,k_i)}, \boldsymbol{x}_i{}^{\star}) > d(\boldsymbol{y}, \boldsymbol{x}_i{}^{\star})\}$$

$\boldsymbol{x}_i^{(t,k_i+1)} = \mathrm{argmin}\{f(\boldsymbol{y}) | \boldsymbol{y} \in N_i\}$ として $k_i := k_i + 1$ とする。

©2026 IEE Japan

Step 4-3:[脱出判定]
$f(\boldsymbol{x}_i{}^{(t,k_i)}) < f(\boldsymbol{x}_i{}^{(t,k_i-1)})$ ならば **Step 2** へ，さもなければ **Step 4-2** へ移行する。

また，理論上条件を満たす解が存在しない可能性もあるが，そのような状況は限定的であるため，この手法の大きな問題にはならない。その状況が発生した場合には置換は行わず，次の反復においてもう一度置換を試行すればよい。

5. 数値実験

代表的なベンチマーク問題を用いて，提案手法の性能を HS-MCOM と比較評価する。本実験で用いるベンチマーク問題は，ナップサック問題（KP），巡回セールスマン問題（TSP），二次割当問題（QAP）である。各問題の近傍は，KP では Hamming 距離 1 の近傍，TSP では 2-opt 近傍，QAP では交換近傍を用いた。各問題に対し，異なる初期解を用いて HS-MCOM および提案手法（Proposed Method）をそれぞれ 50 回適用した。その他の実験条件を表 1 に示す。実験結果について，評価値の平均値 (Mean)，最良評価値 (Best)，最悪評価値 (Worst) および標準偏差（SD）を表 2 に示す。表 2 の括弧内の数値は大域的最適解に対する誤差率を表し，良好な結果には色を付している。

表 1: 実験条件
Table 1. Numerical Experiment Condition

問題		最適解 $f(\boldsymbol{x}^*)$	m	v	$l_{\max}$	Function Calls
KP	100bit	2053	30	4	1000	3.0×10^5
	500bit	10490	30	4	1000	6.0×10^6
TSP	att48	10628	20	4	1000	2.0×10^6
	st70	675	15	4	1000	1.5×10^7
QAP	Tai20a	703482	20	4	1000	2.0×10^6
	Tai30a	1818146	30	4	1000	2.0×10^7

表 2 より，数値実験で扱ったすべての問題において，提案手法は評価値の平均を改善した。したがって，少なくとも本研究で検討したベンチマーク問題に対して，探索点の縮退に起因する性能低下の抑制に有効であることが確認できる。HS-MCOM では，一度縮退が発生すると探索点が同一の引き込み領域に集約され，LS により同一の局所最適解へ収束するため，以降の探索は必然的に重複する。一方，提案手法では探索点の置換により，縮退点から距離的に離れた解情報を導入できるため，探索の多様性が維持され，より広い領域を探索可能となる。その結果として性能向上が得られたと考えられる。

6. おわりに

本研究では，HS-MCOM における探索性能低下の要因である探索点の縮退に着目し，探索点の置換を導入することで縮退に対処した。今後の課題として，置換戦略の多様化（評価値・距離以外の指標の導入を含む），より多様な問題クラスへの適用と検証，および提案手法を基盤とした更なる改良手法の構築が挙げられる。

表 2: 実験結果
Table 2. Numerical Experiment Results

			$f(\boldsymbol{x})$	
			HS-MCOM	Proposed Method
KP	100bit	Mean	2052.12 (0.04 %)	2053 (0.00 %)
		Best	2053 (0 %)	2053 (0 %)
		Worst	2046 (0.34 %)	2053 (0 %)
		SD	1.60 (0.08 %)	0.00 (0.00 %)
	500bit	Mean	10481.52 (0.08 %)	10483.14 (0.07 %)
		Best	10489 (0.01 %)	10489 (0.01 %)
		Worst	10469 (0.20 %)	10469 (0.20 %)
		SD	5.33 (0.05 %)	4.92 (0.05 %)
TSP	att48	Mean	10631.50 (0.03 %)	10629.40 (0.01 %)
		Best	10628 (0 %)	10628 (0 %)
		Worst	10688 (0.56 %)	10653 (0.24 %)
		SD	10.75 (0.10 %)	5.63 (0.05 %)
	st70	Mean	675.54 (0.08 %)	675.20 (0.03 %)
		Best	675 (0 %)	675 (0 %)
		Worst	682 (1.04 %)	681 (0.89 %)
		SD	1.67 (0.25 %)	1.01 (0.15 %)
QAP	Tai20a	Mean	709064.48 (0.79 %)	708084.36 (0.65 %)
		Best	703482 (0 %)	703482 (0 %)
		Worst	715808 (1.75 %)	714904 (1.62 %)
		SD	2839.01 (0.40 %)	2548.31 (0.36 %)
	Tai30a	Mean	1833774.00 (0.86 %)	1833242.52 (0.83 %)
		Best	1818146 (0 %)	1818146 (0 %)
		Worst	1845946 (1.53 %)	1845552 (1.51 %)
		SD	6325.36 (0.35 %)	6038.34 (0.33 %)

文 献

(1) 安田恵一郎:「メタヒューリスティクスの現在と未来」，計算と制御，Vol. 47, No. 6, pp. 453–458, (2008)
(2) 落合広樹, 田村健一, 安田恵一郎：「解空間の階層構造に基づく多点探索型組合せ最適化手法」，電気学会電子・情報・システム部門誌，Vol. 134, No. 7，pp. 999–1000，(2014)
(3) 吉野惇，田村健一，安田恵一郎：「解空間の階層構造と長期探索に基づく適応的組合せ最適化手法」，電気電子・情報・システム部門誌，vol. 142, No 12，pp1336-1347，(2022)
(4) R. J. M. Vaessens, E. H. L. Aarts, and J. K. Lenstra: "A local search template"，*Computers Ops Res*，Vol.25, No11，pp.969-979，(1998)

©2026 IEE Japan

発電機の稼働直後・停止直前の運転制約を考慮した水力発電所の最適運転の計算法

桐生　智志*，長田　悠人，大嶋　真広，
川口　繭子，鈴木　聡，飯坂　達也(富士電機)

A Calculation Method for Hydropower Plant Optimal Operation Considering Operational Constraints of Generators Startup and Shutdown

Satoshi Kiryu, Yuuto Osada, Masahiro Oshima,
Mayuko Kawaguchi, Satoshi Suzuki, Tatsuya Iizaka(Fuji Electric Co., Ltd.)

１．はじめに

現在，温室効果ガスの削減は地球全体で取り組むべき課題となっており，2050 年カーボンニュートラルの達成に向けて，安定性に優れた脱炭素電源である水力発電の重要性が増している(1)。そのため，水力発電所の効率的な運転方法に関する研究が，近年活発に行われている(2),(3)。たとえば文献(2)では，ルールベースによる運転支援システムが提案されている。また文献(3)では，強化学習を用いた運転支援技術が提案されている。しかしながら，ルールベースや強化学習による方法では，発電所の効率を最大化する運転を常に計算することが難しい。そのため最適化技術を用いて，より効率的な運転方法を計算する方法も提案されている(4)(5)。

今後これら最適化技術を活用した方法の実適用を進めていくには，より実際の運転に即した制約を考慮していく必要がある。具体的にはこれまでの方法では考慮されていなかった，発電機の稼働直後および停止直前の運転方法に関する制約も考慮することが重要である。なぜなら実際の水力発電所の運転においては，発電機の保守の観点から，稼働直後および停止直前においては，投入する発電水量を最小にして運転したい場面が存在するためである。

そこで本稿では水力発電所の最適運転計画問題に対して，発電機の稼働直後および停止直前には，発電機を最小の発電水量で運転する制約条件を追加する定式化について述べる。また，その効果を簡易な例題で検証する。

２．稼働直後および停止直前の運転制約

水力発電所ではダムのゲート放流量を削減しつつ，水位を高く保つことで，発電量を最大化可能である。そこで本稿では，水位$h(t)$，n番目の発電機の発電水量$x_n(t)$，ゲート放流量$y(t)$として，

$$\sum_{t=1}^{T}(\sum_{n=1}^{N}(a_n \cdot x_n(t)) + b \cdot h(t) - c \cdot y(t)) \quad (1)$$

という目的関数を用いる。この目的関数は水位が高く発電水量が多く，かつゲート放流量が少なくなるほど値が大きくなるため，最大化することによりT時刻先までの最適な運転計画を作成することが可能である(4)。

この目的関数の最適化における制約条件として，これまでに発電水量の上下限や放流量の変化量の制約などが提案されている(4),(5)。本稿ではこれらの制約条件だけでなく，発電機の稼働直後および停止直前に関する制約条件を付け加える。そのため，はじめに

$$z_n(t) \cdot L_n \le x_n(t) \le z_n(t) \cdot H_n \quad (2)$$

という制約条件を加える。ここで$z_n(t)$は発電機の稼働停止状態を表すバイナリ変数で，L_n, H_nは発電水量の上下限である。この制約条件によって決定変数$z_n(t)$が発電機稼働時は$z_n(t) = 1$となり停止時は$z_n(t) = 0$となる。

この稼働停止の情報を使用して，稼働停止の切り替わりを表現することが可能である。具体的には停止から稼働に切り替わったことを表現するバイナリ変数$z_n^u(t)$を導入し，

$$z_n^u(t) \le 1 - z_n(t-1) \quad (3)$$

$$z_n^u(t) \le z_n(t-1) + z_n(t) \quad (4)$$

$$z_n^u(t) \ge -z_n(t-1) + z_n(t) \quad (5)$$

という制約条件によって，稼働直後の場合は$z_n^u(t) = 1$，それ以外の場合は$z_n^u(t) = 0$とする。加えて時刻 t が停止から稼働への切り替え後S時間以内にあることを表現するバイナリ変数$z1_n^u(t)$を導入し，

$$z_n^u(t-s) \le z1_n^u(t), s = 0,1,2,\dots,S \quad (6)$$

$$z1_n^u(t) \le \sum_{s=0}^{S} z_n^u(t-s) \quad (7)$$

という制約条件によって，稼働直後は$z1_n^u(t) = 1$，そうでなければ$z1_n^u(t) = 0$とする。そして，$z1_n^u(t)$を用いて，

$$z1_n^u(t) * L_n \le x_n(t) \quad (8)$$

$$x_n(t) \le L_n * z1_n^u(t) + H_n * \left(1 - z1_n^u(t)\right) \quad (9)$$

によって，$z1_n^u(t) = 1$の場合は$x_n(t) = L_n$とする。これら(2)式～(9)式によって発電機の稼働直後は最低の発電水量での運転が可能となる。

本稿では停止直前に関しても同様に

$$z_n^d(t) \le 1 - z_n(t) \quad (10)$$

$$z_n^d(t) \le z_n(t-1) + z_n(t) \quad (11)$$

$$z_n^d(t) \ge z_n(t-1) - z_n(t) \quad (12)$$

©2026 IEE Japan

$$z_n^d(t+s) \le z1_n^d(t), s = 0,1,2,\dots,S \quad (13)$$
$$z1_n^d(t) \le \sum_{s=0}^{S} z_n^d(t+s) \quad (14)$$
$$L_n * z1_n^d(t) \le x_n(t) \quad (15)$$
$$x_n(t) \le L_n * z1_n^d(t) + H_n * (1 - z1_n^d(t)) \quad (16)$$

という制約条件により，停止直前も最低の発電水量での運転を実現する。

3．シミュレーション

文献(4)の例題に対して，提案法の有効性の検証を行った。シミュレーションの対象として想定する水力発電所の概要を図 1 に示す。1 つのダムに対して二つの発電機が接続され，河川からの流入量の予測値が与えられたもとでダムのゲート放流と発電水量の配分を最適化する。

この問題に対して稼働直後・停止直前に関する制約条件を入れずに最適化した結果を図 2 に，制約条件を入れて最適化した結果を図 3 に示す。図 2 では発電機の稼働直後に，すぐに発電水量を上昇させ，停止直前も発電水量を最低の

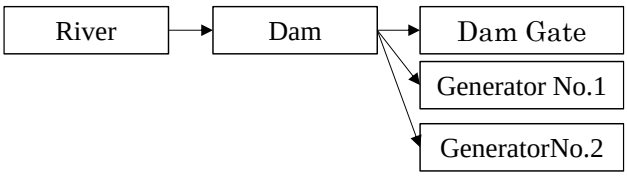


図 1 対象水力発電所の水の流れ
Fig. 1 Water flow of target hydropower plant

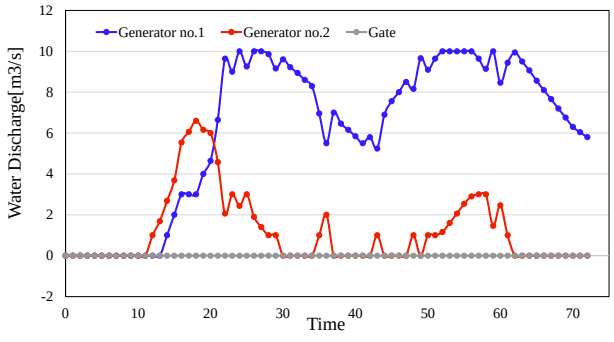


図 2 稼働停止の制約条件なしでの最適化結果
Fig. 2 Optimization results without proposed constraints

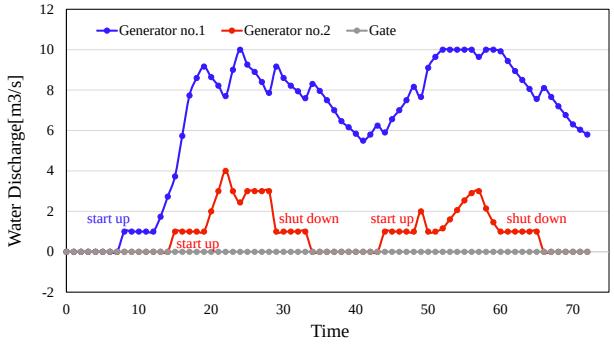


図 3 稼働停止の制約条件を加えた最適化結果
Fig. 3 Optimization results with proposed constraints

表 1 発電水量・ゲート放流量・目的関数値の比較
Fig. 1 Comparison of generator water, gate discharge, objective function

method	generator water (average)	gate discharge (average)	objective
conventional	7.5 [m3/s]	0.0 [m3/s]	100.0%
proposed	7.5 [m3/s]	0.0 [m3/s]	100.0%

流量として運転を行っていない。一方，図 3 では制約条件によって稼働直後および停止直前の一定期間は最低の発電水量での運転をしている。

制約条件の追加前後での$t = 1,\dots,T$での発電水量の平均値，ゲート放流量の平均値，目的関数値を比較した結果を表 1 に示す。ここで，目的関数値は制約がない場合の目的関数値を 100.0%としている。表 1 に示すように今回制約を追加しても，目的関数値ほとんど変化していない。これは制約を追加してもゲート放流量は常に 0.0[m3/s]であり，制約追加前と同じ水量（平均：7.5[m3/s]）を発電に使用する，無駄のない運転が計算できているためである。

4．おわりに

本稿では水力発電所の最適運転を実現するため，発電機の稼働直後および停止直前の発電水量に関する制約条件を提案した。この制約条件によって発電機の稼働直後および停止直前に，最低の発電水量で運転しつつ，水を無駄にしない運転が計算可能となることを簡易な例題によって検証した。今後は本技術の有効性を実際の発電所に適用することによる検証を進めていく。

文　献

(1) 資源エネルギー庁電力基盤整備課，2050 年カーボンニュートラル達成に向けた水力発電活用拡大の方向性 ver1.0，経済産業省資源エネルギー庁ホームページ(https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/pdf/202310vision.pdf)
(2) 小池俊雄，他：発電ダムの洪水調節と発電操作支援システム，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 77, No. 2, pp. I_79-I_84 (2021)
(3) 田中友紀子，他：電力ダム操作における強化学習型シンボルグラウンディングによる意思決定支援に関する検討, 2018 年度人工知能学会全国大会(2018)
(4) 桐生智志，他：利水と治水の両立を考慮したダムの運用最適化，令和 7 年 電気学会 電力・エネルギー部門大会(2025)
(5) 関口珠生，他：Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization による連接水系最適運用，電気学会研究会(2025)

©2026 IEE Japan

ドロネー三角形分割を用いたMP-IDCSOによる災害時における緊急支援物資の配送計画

Liang　Mingqi*　　福山　良和（明治大学）

Capacitated Vehicle Routing in Case of a Natural Disaster Using Delaunay Triangulation by Multi-population Improved Discrete Cat Swarm Optimization

Mingqi Liang*, Yoshikazu Fukuyama, (Meiji University)

1. はじめに

日本は地震が多発する国であり，近年では東日本大震災や能登半島地震に加え，直近でも青森県東方沖を震源とする地震が発生している。さらに，将来的には南海トラフ巨大地震や首都直下地震の発生可能性が高いと予測されている。これらの地震発生時に，被災者のもとへ緊急支援物資を公平かつ効率的に届けることは，被災者の生命に直結する極めて重要な課題である。この課題に対応するため，緊急支援物資ロジスティクスの構築に関する研究が進められてきた[1]。緊急支援物資の配送においては，2次集積所の数の最適化，2次集積所位置の最適配置，各2次集積所が分担する配送エリアの最適化，配送エリア内の各避難所へ緊急支援物資を配送する際の配送計画の最適化という 4 つの最適化問題が相互に影響し合う。そのため，この 4 つの最適化問題を同時に解く必要がある[2]。

これら 4 つの最適化問題を同時に最適化するため，著者らは緊急支援物資ロジスティクスの配送計画に対してmulti-population を導入した IDCSO（以下，MP-IDCSO）を適用し，解の改善を確認した[2]。

しかし，従来手法[2]では，平面上の避難所データに対して，避難所間を直線で結んだリンクをルートとして扱うが，リンクが平面上で交差する箇所において，道路寸断を適切に表現できないという課題がある。そこで本研究では，ドロネー三角形分割に基づく道路生成手法を適用することで，交差を含まない道路ネットワークを近似的に構築し，そのネットワーク上で道路寸断を生成する方法を導入した配送計画を提案する。

提案法は，実際に千葉市が災害時に使用予定の避難所データを用いてシミュレーションを行い，有効性を検証した。

2. 災害時における緊急支援物資配送計画の定式化

<2･1>決定変数　　以下に決定変数を示す。

y_{ij}：エリアiの車両jの配送順序を表し，避難所番号を格納したベクトル。

$x_{ijp}^{k} \in \{0,1\}$：エリアiの車両jがp番目に避難所kに配送するなら 1，配送しないなら 0 を取るバイナリー変数。

<2･2>目的関数　　以下に目的関数を示す。

$$\min\left(\alpha_1 \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} T\left(y_{ij}\right) + \alpha_2 Max\left(T\left(y_{ij}\right)\right)\right) \quad (1)$$

ここで，I:配送エリア数，J:トラックの総台数，α_1，α_2:目的関数の重み係数($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$)，$T\left(y_{ij}\right)$: 道路寸断エリアiの車両jの対象とするすべて配送ルートの配送時間の合計。

<2･3>制約条件　　以下に制約条件を示す。

$$\sum_{k\in K_i} x_{ijp}^{k} = 1 \quad \left(i = 1,\dots,I, j = 1,\dots,J_i, p = 1,\dots,P_{ij}\right) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i}\sum_{p=1}^{P_{ij}} x_{ijp}^{k} = 1 (i = 1,\dots,I, k \in K_i') \quad (3)$$

$$\sum_{k\in K_{ij}^{m}} req_k \le cap_{ij} \quad \left(i = 1,\dots,I, j = 1,\dots,J_i, m = 1,\dots,M_{ij}\right) \quad (4)$$

$$x_{ij}^{k_{SD_i}} + x_{ijP_{ij}}^{k_{SD_i}} = 2 (i = 1,\dots,I, j = 1,\dots,J_i) \quad (5)$$

$$\sum_{p=1}^{p_{ij}} x_{ijp}^{k_{SD_i}} = M_{ij} + 1 (i = 1,\dots I, j = 1,\dots,J) \quad (6)$$

ここで，K_i:エリアi内の避難所の集合，P_{ij}:エリアiの車両jの訪れる避難所の数，K_i':エリアi内の 2 次集積所になる避難所を除いた避難所の集合，K_{ij}^{m}:エリアiの車両jのm回目の配送経路に含まれる 2 次集積所となる避難所以外の避難所の集合，req_k:避難所kの緊急支援物資の需要量，cap_{ij}:エリアiの車両jの 最大積載量，M_{ij}エリアiの車両j の配送回数，k_{SD_i}:エリアiの 2 次集

©2026 IEE Japan

積所になる避難所。

3. ドロネー三角形分割を用いた MP-IDCSO による災害時における緊急支援物資の配送計画

<3･1>ドロネー三角形分割を用いた道路生成手法　配送計画問題を解くにあたり，2 次集積所および避難所の位置を集合として定義する。これらの地点間を結ぶ経路を構築する際，全ての地点を直接結ぶ完全グラフでは計算コストが極大化し，現実的でない経路も含まれる。そこで，幾何学的に最適な隣接関係を定義できるドロネー三角形分割[3]を適用する。

<3･2>ドロネー三角形分割を用いた MP-IDCSO による災害時における緊急支援物資の配送計画　3.1 節で述べたドロネー三角形分割により構築された道路網に対し，災害時における緊急支援物資の最適配送計画を決定するため，文献(2)と同様に，MP-IDCSO を適用した。Fig.1 に，MP-IDCSO を用いた災害時における緊急支援物資の配送計画最適化アルゴリズムを示す。ここで，N_c:猫の数，N_g:集団の数，N_{gc}:集団内猫の数，k:世代数，$L_{pbest_{gc}}$: 集団g内，猫cと猫cの近傍内の猫の現在の世代数までの最良配送計画，MR^k: k 世代の時，TM 又は SM の適用を決める変数，MR_{min}:変数MRの最小値，MR_{max}:変数MRの最大値，t:曲線の傾きを調整できるパラメータ，$eval_nums_max$：評価回数の最大値，$eval_nums$:現在の評価回数，r:0 から 1 の一様乱数，$miter$：migration を実施する世代間隔。なお，Tracing Mode と Seeking Mode の説明は文献(3)を参照されたい。

Algorithm 1: MP-IDCSO Algorithm

Generate N_c cats, Namely, generate a initial capacitated vehicle routing randomly;
Divide N_c cats into N_g groups, with $N_{gc} = N_c/N_g$;
Set the number of iteration $k = 0$;
Assign the initial capacitated vehicle routing of each cat to $L_{pbest_{gc}}$ $(g = 1, \ldots, N_g,\ c = 1, \ldots, N_{gc})$;
Set the best $L_{pbest_{gc}}$ as the global best capacitated vehicle routing;
Set $MR^k \leftarrow MR_{\min}$;
for $k = 0$ **to** $KMAX$ **do**
  for $g = 1$ **to** N_g **do**
    for $c = 1$ **to** N_{gc} **do**
      Generate a uniform random number r;
      if $MR^k < r$ **then**
        Apply the Seeking Mode algorithm[4];
      else
        Apply the Tracing Mode algorithm[4];
  Updating MR^k by the following equation: ;
  $MR^k = MR_{\min} + (MR_{\max} - MR_{\min}) \times \frac{eval_nums}{eval_nums_max}$
  if $k = miter$ **then**
    Perform migration among groups based on the migration policy;
  if *the best capacitated vehicle routing among all cats is better than the global best capacitated vehicle routing* **then**
    Update the global best capacitated vehicle routing;
Output the global best capacitated vehicle routing as the final capacitated vehicle routing;

Fig.1. The MP-IDCSO based algorithm for capacitated vehicle routing in case of natural disasters[2]

4. シミュレーション

<4･1>シミュレーション条件　実際の千葉市が災害時に使用予定の避難所データを使用した。対象とするエリアの避難所数は 166 箇所であり，配送に使用するトラックは 9 台とした。各トラックの最大積載量は 2 トン，平均走行速度は 40[km/h]と設定した。また，災害時の道路寸断を表現するため，各避難所間の道路をランダムに 10 本選び，距離を 100 倍とした。シミュレーションプログラムはC言語で開発し，サーバー(CPU：Intel Xeon Gold 6338 2GHz/3.2GHz，gcc version：11.3.0)を用いて実行した。パラメーター設定は文献(2)と同様とした。

<4･2>シミュレーション結果　Fig.2 に示したように，従来法[2]と比べて，提案法の方は，交差無く，最適配送計画を生成することができることを確認した。

(a) The capacitated vehicle routing by the conventional method [2]　(b) The capacitated vehicle routing by the proposed method

Fig.2. Comparison of capacitated vehicle routing between the conventional method [2] and the proposed method

5. まとめ

本論文では，より現実的な道路環境を再現するため，ドロネー三角形分割を用いた道路網生成手法を提案した。実際の千葉市が災害時に使用予定の避難所データを使用したシミュレーションにおいて，提案手法を用いることで，経路の交差が発生しない最適な配送計画を生成できることを確認した。

今後は，緊急支援物資ロジスティクスにおける多様なシナリオを考慮し災害時の道路寸断状況を考慮した配送計画手法を検討していく。

文　献

(1) 田中照久:「緊急支援物資ロジスティクス システムの構築に向けて」日本情報経営学会誌 Vol.32 No.2 2012 pp.20~pp.32 (2012)
(2) M. Liang・阿部拓海・福山良和：「Multi-population Improved Discrete Cat Swarm Optimization による災害時における最適配送計画」電気学会 C 部門大会 GS10-2 (2024)
(3) M. de Berg, et al. : Computational Geometry: Algorithms and Applications, Springer, pp.191~218 (1997)
(4) T. Abe, et al. : “Improved Discrete Cat Swarm Optimization for Optimal Multi-Trip Vehicle Routing in Case of a Natural Disaster”, Proc. of IEEE Congress of Evolutionary Computation(CEC) (2024)

©2026 IEE Japan

勤務計画と巡回計画を考慮した昇降機向け保守スケジューリング技術の研究

冨田　将嗣*，榊原　静（株式会社　東芝）
木下　英治，長坂　真理(東芝エレベータ株式会社)

Research on Maintenance Scheduling Method for Elevators Considering Shift Schedules and Routing Plans

Masashi Tomita, Shizu Sakakibara (Toshiba Corporation)
Eiji Kinoshita, Mari Nagasaka (Toshiba Elevator and Building Systems Corporation)

１．はじめに

昨今の建設ラッシュにより昇降機の設置台数が増加し、保守員 1 人当たりが担当する昇降機台数が増加している。一方で、企業間の人材獲得競争の激化に伴い、保守員の人材確保が喫緊の課題となっている。これらの影響により、保守事業では、計画的に保守物件の巡回や昇降機の点検をするとともに、昇降機のトラブルや地震等の緊急時に対応できるように勤務体制を整える必要がある。具体的には、勤務計画・巡回計画の作成時に、保守物件の訪問時間等が指定された客先制約や保守員の勤務可能日時の制約、作業スキルの制約など様々な制約を考慮する必要がある。現状は、様々な制約を満たす計画を人手で作成しているが、計画と実績のずれにより再計画が生じるため、計画の作成と再作成を行う計画作成業務に多くの時間を要している。また、保守人員を確保するために、保守員の柔軟な働き方を実現する勤務計画・巡回計画を作成する必要がある。これまでの研究では、勤務計画の立案を高速に行うシフトスケジューリング(1)や、巡回計画の作成を高速に行う配送計画問題(2)に取り組んでいる研究は多いものの、両者を同時に考慮したスケジューリングを行う文献は少ない(3)。また、計画作成を混合整数計画問題で求解する場合、実用的な計算時間で求めることは容易ではない。これらの背景から様々な制約の遵守、計算の高速化及び柔軟な働き方の推進を可能とするスケジューリング技術の開発に取り組む必要がある。

本研究では、保守計画作成業務の効率化及び保守員負荷の低減を目的とした勤務計画・巡回計画を作成するため、様々な制約を段階的に考慮することで高速に計画を立案する保守スケジューリング手法を開発し、計画立案精度を評価した。また、保守員負荷の低減効果として柔軟な働き方の有無による作業時間を評価した。検証対象は、ある営業所における1か月分の勤務計画及び巡回計画の立案である。

２．問題設定と保守スケジューリング手法

本稿で考慮する制約条件と要請を表１に示す。客先日時制約は客先の要望または契約上定められている訪問時間帯・週・曜日に関する制約で、定められている客先日時制約を満たす必要がある。作業範囲期限及び作業インターバルは、定期的な保守作業を行うための条件を指す。例えば、昇降機ごとに定期的な保守点検を行うことが義務付けられており、作業範囲期限は保守作業を完了するまでの期日を指す。また、作業インターバルは契約で定めた点検を実施するにあたっての、計画作業の実施頻度を指す。作業の割当は、計画作業を実施する資格を有する保守員に作業を割当することを指す。また要請として、トラブルや地震発生時の昇降機の復旧対応等に対応するため、割当作業数をあらかじめ平準化することで突発対応が可能な体制を構築する。加えて、保守員の勤務負荷の軽減のため、作業間の待機時間の極小化を行う。また、他保守員の業務支援にあたる回数を適正化することにより、管轄外の現場での不慣れな作業の発生回数を管理・調整する。

表 1. 本稿で考慮する制約条件と要請
Table1. List of conditions and requirements

分類	項目	条件
制約条件	物件・作業関連	客先日時制約
		作業範囲期限
		作業インターバル
		移動時間
	保守員関連	作業の割当
	柔軟な働き方関連	勤務予定
要請	突発事象への対応	割当作業数の平準化
	勤務負荷の削減	待機時間の極小化
	応援回数の削減	応援回数の適正化

これらの条件を考慮した保守スケジューリング手法の概要を図 1 に示す。一度にすべての条件を考慮することは難しいため、三段階に分けて勤務計画及び巡回計画を作成する。第一段階では、作業の週次割当てにおいて、勤務負荷及び作業範囲期限・作業インターバル等を考慮して 1 か月分の計画を週次作業に割当する。第二段階では、日次割当

©2026 IEE Japan

てにおいて、優先作業・割当作業数の平準化等を考慮し、週次計画を日次作業に割当する。第三段階では、巡回計画作成において、客先日時制約や移動時間等を考慮して順序のない日次作業から一日の中での巡回計画を作成する。このような時間粒度の粗い単位から細かい単位へ段階的に解くことで、制約の段階的な考慮を行うことができる。

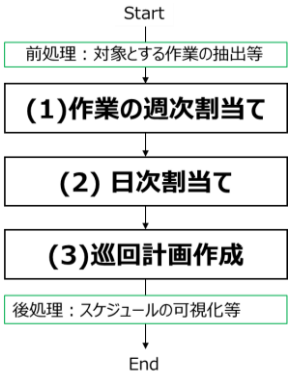


図 1. 保守スケジューリング手法の概要
Fig1. Overview of maintenance scheduling method

第一段階における作業の週次割当てでは、作業の週次割当を二値変数で表し、週コストの平均からの偏差を最小化しつつ、週当たりの作業上限を満たす一般化割当問題として定式化し、混合整数線形計画として求解している。なお、作業ごとの週別コストは作業期限及び作業インターバルの加重和として定義したものを用いている。第二段階では、日ごとに作業を割当する処理に貪欲法を用いる。貪欲法では予め優先ルールを設定し優先度が高い作業から、条件を満たす中で最も作業が少ない保守員及び曜日を選択し作業を割当する。第三段階では、客先日時制約内に訪問物件が巡回されるように、時間制約付き挿入法を用いて巡回順序を決定している。

３．評価検証

ある営業所における 1 か月分の作業データ（約 500 件）を用いて、保守スケジューリング手法の評価検証を行った。評価項目は計画作成時間を使用する。また、手法の評価指標として、制約充足率及び保守員の作業時間を用いる。

まず、計画作成時間では、人手で計画を作成すると概ね 1 か月分の計画を約 2.5 時間程度かけて作成している。保守スケジューリング手法の計算時間は 1 か月・1 営業所の評価で 2 分以内のため、計画立案時間を大幅に削減できることが分かった。

客先日時制約の充足を評価する制約充足率の定義は次のとおりである。

$$\text{制約充足率}[\%] = \frac{w_{satisfied}}{w_{all}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、$w_{satisfied}$は客先日時制約を満たす件数、w_{all}は全作業件数である。開発手法では、制約充足率が 98.6%と客先制約を概ね満たす計画を作成できることが分かった。

さらに、柔軟な勤務を最大限実施した際の一人一日当たりの保守員の作業時間の平均と従来通りの作業時間を算出し手法の評価を行った。図 2 のとおり、柔軟な勤務を導入しない場合作業時間が 4 時間 3 分と算出され、柔軟な勤務を導入する場合では作業時間が 3 時間 14 分と、導入により作業時間を 49 分削減できることが分かった。

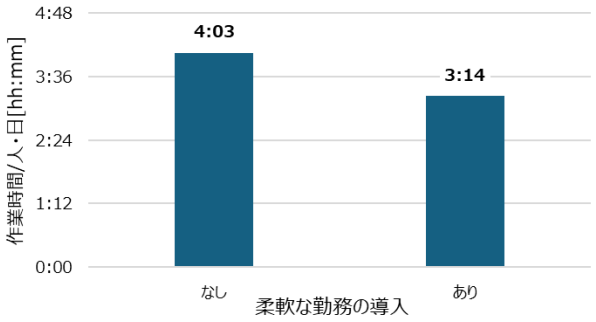


図 2.柔軟な勤務導入有無による保守員の作業時間の算出
Fig2. Calculation of working hours based on implementation of split-shift scheduling

４．終わりに

本研究では、保守計画業務の効率化及び保守員の勤務負荷の低減のため、時間粒度の粗い単位から細かい単位に段階的に計画を決定する手法を開発し、検証した。開発手法を評価した結果、開発した保守スケジューリング手法により、計画立案にかかる時間を削減し業務効率化を達成できる見込みであること、顧客制約を概ね満たすこと及び柔軟な働き方の導入により作業時間を削減できることを確認した。今後は、開発手法の実地検証に加えて、移動手段の考慮や一つの作業を複数人で作業する場合を踏まえた保守スケジューリング手法の開発に取り組む予定である。

文　献

(1) Ernst, Andreas T., et al. "Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models." European journal of operational research 153.1 (2004): 3-27.

(2) Laporte, Gilbert. "Fifty years of vehicle routing." *Transportation science* 43.4 (2009): 408-416.

(3) 福永峻, and 細田順子. "巡回保守作業の作業割付・巡回経路計画における作業場所の特徴に合わせた計画パラメータの提案." 生産システム部門講演会講演論文集 2022. 一般社団法人 日本機械学会, 2022.

©2026 IEE Japan

複数集団改良型 Discrete Cat Swarm Optimization を用いた災害時における最適配送計画の最適ハイパーパラメータの検討

片岡　日翔*，福山　良和（明治大学）

Optimal Hyper-Parameters of Multi-population Improved Discrete Cat Swarm Optimization for Capacitated Vehicle Routing in Case of Natural Disasters

Haruto Kataoka, Yoshikazu Fukuyama (Meiji University)

１．はじめに

近年，東日本大震災や能登半島地震などの大地震が発生している(1)。また，南海トラフ地震などの大規模自然災害の発生確率が将来的にも高いと考えられている(2)。災害時における緊急支援物資の配送は被災者の生死に関わるため，迅速かつ公平な配送が求められている。この課題に対して，緊急支援物資ロジスティクスの構築が検討されている(3)。支援物資の２次集積所から避難所への配送計画を構築する際，２次集積所の数，各２次集積所の配送エリア，２次集積所の配置，配送エリア内の配送計画の４要素が互いに影響し合うため，これらを同時に最適化する必要がある(4)。

この４つの問題の中の、配送エリア内の配送計画問題に対して、著者らはドロネー三角形分割と Multi-population Improved Discrete Cat Swarm Optimization(以下，MP-IDCSO)を適用した手法の有効性を確認している(4)。進化計算において Multi-population を適用する時，使用する各種ハイパーパラメータが解の質に大きく関係するため，対象問題に応じて適切なパラメータを選択する必要がある。しかし，文献(4)ではその検討が不十分であった。

本論文では，MP-IDCSO を用いた災害時における最適配送計画のハイパーパラメータを調整し，シミュレーションを実施した結果を報告する。

２．災害時における最適配送計画の定式化

１章で示した 4 つの最適化問題の中の配送エリア内の配送計画問題についての定式化を示す。

＜2・1＞決定変数　　以下に決定変数を示す。

$x_{ijp}^{k} \in \{0,1\}$：エリアiの車両jが配送するとき，p番目に避難所kに配送する場合は 1，配送しない場合は 0 を取る 0-1 変数。

y_{ij}：避難所番号を格納し，エリアiの車両jの配送順序を表す行列。

＜2・2＞目的関数　　以下に目的関数を示す。

$$\min\left(\alpha_1 \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J_i} T(y_{ij}) + \alpha_2 Max\left(T(y_{ij})\right)\right) \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで、α_1, α_2：重み係数$(\alpha_1 + \alpha_2 = 1)$，$T(y_{ij})$：エリア$i$の車両$j$が、担当する全避難所へ配送するまでの合計時間，$I$：エリア数，$J_i$：エリア$i$のトラック台数。

＜2・3＞制約条件　　以下に制約条件を示す。

$$\sum_{k\in K_i} x_{ijp}^{k} = 1 \quad (i = 1,\dots,I, j = 1,\dots,J_i, p = 1,\dots,P_{ij}) \quad \cdots\cdots (2)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i}\sum_{p=1}^{P_{ij}} x_{ijp}^{k} = 1 \quad (i = 1,\dots,I, k \in K_i') \quad \cdots\cdots (3)$$

$$\sum_{k\in K_{ij}^{m}} req_k \le cap_{ij} \quad (i = 1,\dots,I, j = 1,\dots,J_i, m = 1,\dots,M_{ij}) \quad \cdots\cdots (4)$$

$$x_{ij1}^{k_{SD_i}} + x_{ijP_{ij}}^{k_{SD_i}} = 2 \quad (i = 1,\dots,I, j = 1,\dots,J_i) \quad \cdots\cdots (5)$$

$$\sum_{p=1}^{p_{ij}} x_{ijp}^{k_{SD_i}} = M_{ij} + 1 \quad (i = 1,\dots,I, j = 1,\dots,J_i) \quad \cdots\cdots (6)$$

ここで，K_i:エリアiに含まれる避難所集合，P_{ij}:エリアiの車両jが配送する避難所数，K_i':エリアiに含まれる，二次集積所となる避難所を除いた避難所集合，K_{ij}^{m}:エリアiの車両jのm回目の配送経路に含まれる，二次集積所となる避難所を除いた避難所集合，req_k:避難所kの支援物資需要量，cap_{ij}:エリアiの車両jの最大積載量，M_{ij}:エリアiの車両jの配送経路数，k_{SD_i}:エリアiの二次集積所となる避難所。

３．MP-IDCSO を用いた災害時における最適配送計画のアルゴリズム

MP-IDCSO では，進化論の一説である Punctuated Equilibria の考え方を用いて，IDCSO の解の質の向上を行う。これは，生物の進化は急激な変化と一定の安定期間を繰り返すことで進行したというものである。この考え方を進化計算アルゴリズムとして導入するために，複数の集団が独立して探索を行い，定期的に集団間で解を移動させる migration を行うことで，解を更新する処理を取り入れている。Fig.1 に，MP-IDCSO を用いた災害時における最適配送計画のアルゴリズムを示す。ここで，N_c:猫の数，N_g:集団数，N_{gc}:集団内の猫数，k:世代数，$L_{pbest_{gc}}$：集団g内，猫cと猫

©2026 IEE Japan

Algorithm 1: The MP-IDCSO based capacitated vehicle routing Algorithm

Generate N_c cats, Namely, generate initial capacitated vehicle routing randomly
Divide N_c cats into N_g groups, with $N_{gc} = N_c/N_g$
Set the number of iteration $k = 0$
Assign the initial capacitated vehicle routing of each cat to $L_{pbest_{gc}}$ $(g = 1, \ldots, N_g, c = 1, \ldots, N_{gc})$
Set the best $L_{pbest_{gc}}$ as the global best capacitated vehicle routing
Set $MR^k \leftarrow MR_{\min}$
for $k = 0$ **to** $KMAX$ **do**
  for $g = 1$ **to** N_g **do**
    for $c = 1$ **to** N_{gc} **do**
      Generate a uniform random number r
      if $MR^k < r$ **then**
        Apply the Seeking Mode algorithm(4)
      else
        Apply the Tracing Mode algorithm(4)
  Updating MR^k by the following equation:
  $MR^k = MR_{\min} + (MR_{\max} - MR_{\min}) \cdot \frac{\ln(1+t\cdot\frac{eval_nums}{eval_nums_max})}{\ln(1+t)}$
  if $k = miter$ **then**
    Performing migration among groups(4)
  if *the best capacitated vehicle routing among all cats is better than the global best capacitated vehicle routing* **then**
    Update the global best capacitated vehicle routing
Output the global best capacitated vehicle routing as the final capacitated vehicle routing

Fig.1. The MP-IDCSO based algorithm for capacitated vehicle routing in case of natural disasters

cの近傍内の猫の現在の世代数までの最良配送計画，MR^k ：k世代の時，Tracing Mode または Seeking Mode の適用を決める変数，MR_{min} ：MRの最小値，MR_{max} ：MRの最大値，t ：曲線の傾きを調整するパラメータ，$eval_nums_max$ ：評価回数の最大値，$eval_nums$ ：現在の評価回数，r :0 から 1 の一様乱数, $miter$:migration を実施する世代間隔である。なお, Tracing Mode または Seeking Mode による更新, migration の詳細は文献(4)を参照されたい。

４．シミュレーション

＜4・1＞シミュレーション条件　　千葉市で実際の災害時に使用される避難所データ(5)を用いて，シミュレーションを行う。対象エリア内の避難所数は 166 か所とし，配送に用いるトラックについて，台数は 9 台，最大積載量は 2 トン，平均走行速度は 40[km/h]とした。また，災害時の道路寸断状況を表現するため，ランダムに選択した 10 個のルートについて距離を 100 倍とした。各ハイパーパラメータの組み合わせにおいて 30 回の試行を行い，組合せ間で公平な比較とするため，評価回数の上限を 30,000,000 回とした。シミュレーションは C 言語(gcc version 15.2.0)で行った。

以下に，MP-IDCSO で比較するハイパーパラメータとその範囲を示す。

・ネットワーク構造：ring(N_g: 4, 8, 16)，pyramid(N_g: 4)，cube(N_g: 8)，4 次元 hypercube(N_g: 16) ・$miter$：10, 30, 50 ・N_c：128, 256, 512 ・SMP(Seekig Mode の探索量を決定するパラメータ)：8, 16, 32

＜4・2＞シミュレーション結果　　Table1 に，各パラメータの組合せの中で目的関数値の平均値が小さい組合せ上位 20 個について，30 回試行した目的関数値の最大値，最小値，平均値，標準偏差を示す。Table1 より，個体数, miter, SMP については，明確に解の質が向上する傾向は確認されなかった。しかし，ネットワーク構造については，ring 型は二つの隣り合う集団とのみ migration が可能であり，良い解が全体の集団に波及していくのに時間がかかる。つまり多様性が最も高い構造となっている。また，集団数が最も多数の 16 が上位にあることから，集団数も多いことが良質な解を得るためには必要なことが分かる。

５．まとめ

本論文では，MP-IDCSO を用いた災害時における最適配送計画について，ハイパーパラメータの調整を行い，多様性の高い ring 型の 16 集団の場合が最も良い結果が得られることを確認した。

今後は，最適配送計画を含めた 4 つの最適化問題に対して，道路寸断などの不確定性を考慮した緊急支援物資ロジスティクスの構築を目指す。

Table 1. The maximum, the minimum, average values, and standard deviations of objective function values using various hyper-parameters of top 20 combinations by the MP-IDCSO based method

Rank	Hyper-parameters					Objective function values			
	Net.top.	N_g	N_c	miter	SMP	Min.	Max.	Ave.	Std
1	ring	16	256	50	16	124.656	130.101	127.255	1.295
2	ring	16	512	50	32	122.761	133.100	127.497	2.130
3	ring	16	256	50	8	125.484	130.621	127.523	1.496
4	ring	16	512	50	16	125.269	131.320	127.557	1.435
5	ring	16	512	10	16	123.630	134.023	127.676	2.235
6	ring	16	512	30	16	125.652	134.352	127.791	1.764
7	ring	16	256	30	32	125.054	131.875	127.822	1.496
8	ring	16	256	30	8	124.408	133.397	127.847	2.035
9	ring	16	512	50	8	124.050	131.358	127.851	1.875
10	ring	16	256	10	16	123.968	131.850	127.880	1.808
11	ring	16	256	30	16	124.510	131.987	127.945	2.020
12	ring	8	256	50	8	124.819	131.391	127.996	1.782
13	ring	16	512	10	8	123.553	134.419	128.070	2.571
14	ring	16	512	30	32	124.724	134.596	128.101	2.388
15	ring	16	512	30	8	123.729	133.514	128.140	2.038
16	ring	16	128	30	32	125.005	132.782	128.144	2.009
17	cube	8	256	10	8	124.558	135.310	128.161	2.177
18	ring	16	128	50	8	124.348	136.267	128.207	2.371
19	hypercube	16	128	50	32	124.538	131.943	128.213	1.963
20	hypercube	16	512	50	8	124.076	131.911	128.311	1.963

文　献

(1)内閣府:「令和７年版 防災白書」https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r07/honbun/index.html (2025)
(2)内閣府:「南海トラフ地震臨時情報防災対応ガイドライン（令和７年８月改訂）」https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/honbun_guideline2.pdf (2025)
(3)田中照久:「緊急支援物資ロジスティクスシステムの構築に向けて」日本情報経営学会誌 Vol.32 No.2 2012 pp.20~pp.32 (2012)
(4) Liang Mingqi・福山良和:「ドロネー三角形分割を用いた MP-IDCSO による災害時における緊急支援物資の配送計画」電気学会全国大会(投稿済み) (2026)
(5)千葉市:「指定緊急避難場所・指定避難場所・広域避難場所に関する情報」 https://www.city.chiba.jp/sogoseisaku/kikikanri/bosai/hinanbasyo ichiran.html (2025)

©2026 IEE Japan

Multi-population Bonobo Optimizer による スマートシティ全体最適化

大原　智博*，福山　良和（明治大学）
渡辺　拓也，石橋　直人，飯坂　達也（富士電機）

Comprehensive Optimization of Smart City
by Multi-population Bonobo Optimizer
Chihiro Ohara*, Yoshikazu Fukuyama, (Meiji University)
Takuya Watanabe, Naoto Ishibashi, Tatsuya Iizaka, (Fuji Electric Co., Ltd.)

１．はじめに

2025 年上半期，世界の電源構成に占める再生可能エネルギーの割合が石炭を初めて上回るなど，脱炭素社会の実現に向けた転換期に直面している(1)。このような状況より，世界各地ではスマートシティ（以下、SC）と呼ばれる社会システムの実証実験が進展している。SC とは，先進技術を取り入れることで都市・地域の機能やサービスをより効率的かつ高度に運用し，社会的課題の解決を図るとともに，快適性や利便性などの新たな価値を提供する都市形態である(2)。SC の導入は，エネルギー需給の最適化，コスト削減，CO_2 排出量の抑制を可能とし，地球温暖化防止への貢献が期待されている(2)。

このような SC 全体の持続可能性の評価について，各種モデルによる検証が実施されてきた。著者らは，電気学会の SC 実現検討特別研究グループが作成した SC 全体を通してエネルギー消費や環境負荷を計算できるモデル(3)に対し，Bonobo Optimizer(4)（以下，BO）など，多様な進化計算手法を用い，質の高い解が得られることを確認してきた。また，進化計算において，生物が急激な進化とのちの安定を繰り返すことによって進化したという Punctuated Equilibria のアナロジーを用いた手法である，静的複数集団型の適用が提案された(5)。このアルゴリズムを適用することで，解の質を向上させることが，様々な問題で確認されている。

以上のような背景により，本論文では，SC 全体最適化に対し，BO に Multi-population（以下，MP）を適用した MP-BO を SC 全体の最適化に適用することを提案する。提案法を適用した結果と，従来法の改良型 Spider Monkey Optimization（以下，ISMO-MV）による手法(6)，BO による手法(4)と比較をすることで，提案法の有効性を確認した。

２．SC 全体最適化の定式化

＜2･1＞決定変数　　例として，以下に産業分野の決定変数を以下に挙げる。すべての決定変数については，文献（５）を参照されたい。

産業分野：ガスタービン起動停止・ガス入力，ボイラ起動停止，ターボ冷凍機起動停止・熱出力，蒸気吸収式冷凍機起動停止・熱出力，蓄電池充放電量

＜2･2＞目的関数　　以下に，目的関数を示す。

$$min\{w_1 \sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}(BuyG_{nt} \times GU_{nt} + BuyE_{nt} \times EU_{nt}) + w_2 \sum_{n=1}^{N}\sum_{t=ps}^{pe}(EL_{nt}) + w_3 \sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}(BuyG_{nt} \times GC + BuyE_{nt} \times EC)\} \quad (1)$$

ここで，w_1, w_2, w_3：各関数に対する重み係数$(w_1 + w_2 + w_3 = 1)$，N：電力･ガス以外の分野数，T：１日の時間数(=24)，$BuyG_{nt}$：分野nの時間tのガス購入量，GU_{nt}：分野nの時間tのガス単価，$BuyE_{nt}$：分野nの時間tの電気購入量，EU_{nt}：分野nの時間tの電気単価，ps：実電力負荷のピーク時間帯開始時間，pe：実電力負荷のピーク時間帯終了時間，EL_{nt}：分野nの時間帯tの実電力負荷，GC：購入ガス量から CO_2 排出量への変換係数，EC：購入電力量から CO_2 排出量への変換係数

＜2･3＞制約条件

(1) エネルギーバランス　　各分野において考慮するエネルギーの時間ごとの需給はバランスする必要がある。

(２) 設備特性　　各設備の効率関数は等式制約，各設備の出力上下限値範囲は不等式制約として記述する。

(３) 運用制約　　運用上の制約として，各設備の連続運転･停止時間下限値を設定する。

３．SC 全体最適化に対する MP-BO の適用

＜3･1＞提案する MP-BO の概要　　本論文では，文献（５）にて適用された BO に対し，Multi-population を適用する。BO は，ボノボの４つの異なる生殖戦略を模倣した多点探索型進化計算手法である。Multi-population は，生物が急激な進化と後の安定を繰り返すことによって進化を繰り返したという説である Punctuated Equilibria のアナロジー(5)を用いており，多様な進化計算手法への適用において質の高い解

©2026 IEE Japan

を生成することが確認されている。複数の集団が独立して探索を行い，定期的に Migration と呼ばれる各集団間の情報交換を行うことで，解の質の向上を実現する。

＜3･2＞MP-BO による SC 全体最適化のアルゴリズム

Fig.1 に提案手法である MP-BO による SC 全体最適化アルゴリズムを示す。ここで，NUM_POP : 集団数，$Itermax$: 最大反復回数，α-$bonobo$: 各集団内最良個体である。（１）式を用いて，エネルギーコスト，ピーク時間帯実電力負荷，CO_2 排出量を考慮し，各個体の目的関数値を計算することで，分野ごとの最適な運用方法を求める。

４．シミュレーション

＜4･1＞シミュレーション条件　　従来法である ISMO-MV，BO と提案法である MP-BO による手法を比較する。富山市を想定し，施設数は各分野で，産業：15，業務：50，家庭：45000，上水道：1，下水道：1，鉄道：1 とした。以下にシミュレーション条件を示す。

- 共通パラメータ　　目的関数の評価回数: 25600 回，試行回数: 30 回，w1: 0.33333, w2: 0.33333, w3: 0.33333
- 提案法である MP-BO のパラメータ　　全個体数: 320，$Itermax$: 80 回，p_{p_init} :0.5，p_{xgm_init} :0.3，$tsgs_{factor_max}$:0.011，$scab$:1.7，$scsb$:1.6，$rcpp$:0.12，NUM_POP :16，migration policy: worst-best-policy，migration 間隔:4，ネットワーク構造:超立方体型
- ISMO-MV のパラメータ　　全個体数: 320，$Itermax$: 80 回，LLL_k:5，GLL:10，pr1max:0.85，pr1min:0.4，pr2:0.6，migration policy: worst-best-policy，migration 間隔:5，ネットワーク構造:リング型，MNg_{max}:5，MNg_{min}:2
- BO のパラメータ　　全個体数: 1280，$Itermax$: 20 回，p_{p_init}: 0.5，p_{xgm_init}: 0.3，$tsgs_{factor_max}$: 0.011，$scab$: 1.7，$scsb$: 1.6，$rcpp$: 0.12

Algorithm .1: Algorithm for MP-BO-based method with static multi-population for the comprehensive optimization of the entire SC

Initialization of all individuals, populations, and parameters:
  Divide all bonobos into NUM_POP separate populations;
  Considering energy cost, actual electrical load, and CO_2 emissions to calculate the objective function values for all bonobos according to Eq. (1);
for $iter = 1$ **to** $Itermax$ **do**
  for *each population* **do**
    for *each bonobo in the population* **do**
      Generating subgroups and selecting other individuals for updating:
      Updating individuals within the population using BO strategies:
      Evaluating new individuals and updating the population α**−***bonobo*:
    Adjusting a parameter:
  Migrating between populations at constant migration intervals(tetrahedral topology):
return the global α−bonobo among all populations, considering energy cost, actual electrical load, and CO_2 emissions according to Eq. (1);

Fig. 1.　An algorithm for MP-BO-based method for the comprehensive optimization of the entire SC.

シミュレーションプログラムは PC(Windows 11 Home, Intel Core i7-1185G7 CPU @3.00GHz)上の C 言語(gcc version 11.3.0)で開発した。

＜4･2＞シミュレーション結果　　Table.1 に，従来法である ISMO-MV[6]の目的関数値を 100 とした場合の，ISMO-MV，BO，MP-BO の目的関数値の平均値，最大値，最小値，標準偏差を示す。提案法である MP-BO による手法は，平均値，最大値，標準偏差において，従来法より良質な解を得られた。特に，標準偏差が小さくなっており，様々なシナリオに対して試行回数を少なくしても，安定して良質な解が得られることを確認できた。

５．まとめ

本論文では，SC 全体最適化に対し，MP-BO による手法の適用を提案した。その結果，従来法による手法よりも，提案法の適用により，安定して良い解を得られることを確認した。今後は，電気自動車などを考慮した実用的な SC モデルの構築や，更なる効率的な最適化手法の開発を目指す。

Table 1.　Comparison of average, the maximum, the minimum, and standard deviation of the objective function values by the ISMO-MV based method[6], and the proposed MP-BO based method and a p-value by the Friedman Test

	Ave.	Max.	Min.	Std.	p 値
ISMO-MV[6]	100	102.604833	98.014514	1.09557	4.04E-12
BO[4]	98.366992	107.732560	97.550825	2.25346	
MP-BO	**97.550818**	**97.550833**	**97.550816**	**3.8E-06**	

文　献

(1) EMBER:「Global Electricity Mid-Year Insights 2025」https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-mid-year-insights-2025/
(2) 国土交通省：「スマートシティ官民連携プラットホーム」https://www.mlit.go.jp/scpf/index.html
(3) 安田恵一郎：「スマートコミュニティの定義とモデル構築」，平成 27 年電気学会全国大会，1-H1-2 (2015)
(4) 大原・福山他：「Bonobo Optimizer によるスマートシティ全体最適化」，電気学会電気系統/システム/スマートファシリティ研究会，PSE-25-214, ST-25-043, SMF-25-063 (2025)
(5) J. P. Cohoon, et al.: “Punctuated Equilibria: A Parallel Genetic Algorithm,” Proc. of ICGA, pp.148-154 (1987)
(6) 大原・福山他：「Migration と可変最大グループ数を用いた改良型 Spider Monkey Optimization によるスマートシティ全体最適化」，電気学会 C 部門大会，PS5-3 (2025)

©2026 IEE Japan

ABC アルゴリズムをオプティマイザとする VQE のノイズ環境下でのロバスト性初期評価

山田　大陽*，飯村　伊智郎，森山　賀文（熊本県立大学），中山　茂（鹿児島大学）

Initial Evaluation of Robustness under Noisy Environment for VQE Using Artificial Bee Colony Algorithm

Taiyo Yamada, Ichiro Iimura, Yoshifumi Moriyama (Pref. Univ. of Kumamoto), Shigeru Nakayama (Kagoshima Univ.)

１．はじめに

現在，ノイズあり中規模量子（NISQ）デバイスにおける変分量子固有値法（VQE）の実用化には，ノイズ環境下でも安定して動作するオプティマイザが不可欠である。しかし，既存の勾配法や直接探索法は，ノイズによる勾配消失や局所解への停留が課題となる。我々はこれまで，勾配を用いない群知能の 1 つである人工蜂コロニー（ABC）アルゴリズムを VQE のオプティマイザに適用し，ノイズがない理想的な環境下でその基本的な特徴を明らかにした[1]。本稿ではノイズモデルを用いたシミュレーションにより代表的な既存手法との比較実験を行い，そのロバスト性を初期評価する。

２．評価実験の方法

本研究では，組合せ最適化問題の 1 つである数値分割問題（NPP）を対象とする。N個の整数集合$S = \{n_1, n_2, \cdots, n_N\}$を 2 つの部分集合に分割し，それぞれの和の差を最小化する問題をイジングハミルトニアン$\mathcal{H}$に変換し，VQE により基底状態を探索する。Nは 4 および 8 とした。量子回路（Ansatz）には，Ry ゲートと CNOT ゲートから構成される Qiskit SDK の real-amplitudes 2-local circuit を採用した。回路深度とノイズ耐性の関係を評価するため，エンタングルメント層の繰り返し回数N_Lを 0，1，2 の 3 段階に設定した。$N_L = 0$は量子もつれを含まない積状態に対応する。実装には Qiskit SDK を使用し，オプティマイザとして提案手法である ABC アルゴリズムに加え，比較対象として，量子化学計算等のベンチマークにおいてノイズ耐性が報告されている[2] SPSA，COBYLA および一般的な ADAM を用いた。最大評価回数は探索空間の規模を考慮し，$N = 4$で 5,000 回，$N = 8$で 10,000 回とした。評価環境は Qiskit Aer シミュレータを用い，理想環境とノイズ環境の双方でそれぞれ 10 回試行し評価した。ノイズモデルには GenericBackendV2 を採用し，実機同様のゲート誤差および読み出し誤差を模擬した。

３．評価実験の結果と考察

表 1 に，10 回試行の平均値としての最終エネルギー期待値を示す。まず勾配降下法の ADAM は，収束せず期待した性能を示さなかった。これは，設定した最大評価回数内では十分な探索が行えなかったことが主因である。したがって，

表 1　最終エネルギー期待値の平均値（理想環境下 / ノイズ環境下）
Table 1.　Average values of final energy expected values (Ideal / Noisy)

N	N_L	ABC algo.	ADAM	SPSA	COBYLA
4	0	$<10^{-4}$ / $<10^{-4}$	11.5 / 9.94	1.40 / 1.02	0.800 / 1.60
	1	0.0118 / 0.145	9.38 / 7.94	0.821 / 0.921	$<10^{-4}$ / 0.257
	2	0.0582 / 0.368	10.3 / 11.9	0.313 / 0.752	$<10^{-4}$ / 0.255
8	0	0.0117 / 0.00513	29.4 / 55.5	2.65 / 4.71	3.20 / 3.20
	1	0.997 / 2.36	65.9 / 55.9	4.02 / 5.91	1.00 / 2.51
	2	1.89 / 6.39	78.3 / 74.5	5.34 / 6.59	0.401 / 3.81

以後は SPSA，COBYLA，および ABC アルゴリズムの比較に焦点を当てる。全体傾向として COBYLA は深い回路（$N_L = 2$）において優れた探索性能を示した。一方，ノイズ環境下での浅い回路（$N_L = 0, 1$）に着目すると，SPSA や COBYLA が局所解に停留する中，ABC アルゴリズムは高い探索性能を維持する傾向が見られた。特に$N = 8$，$N_L = 0$のノイズ環境下では，COBYLA の 3.20 に対し，ABC アルゴリズムは 0.00513 と優位性を示した。次に，探索成功回数を評価した。$N = 8$のノイズ環境下において，既存手法は回路の深さに応じて脆弱性を示した。具体的には，N_Lが 0，1，2 の順に，SPSA が 6/10 回，3/10 回，9/10 回，COBYLA は 5/10 回，7/10 回，10/10 回であった。対して ABC アルゴリズムは，全てのN_Lにおいて 10/10 回の探索成功を示した。以上より，ABC アルゴリズムは，浅い回路かつノイズ環境下において，他手法と比べてロバスト性を有することが確認された。

４．おわりに

評価実験の結果，既存手法がノイズ環境下の浅い回路で局所解へ停留した一方，ABC アルゴリズムは全条件で最適解へ到達し，その高いロバスト性が示唆された。

謝辞　本研究は JSPS 科研費 23K11220 の助成を受けたものである。

文　献

(1) K. Murayama, Y. Moriyama, I. Iimura, and S. Nakayama: Fundamental Research on Applying Artificial Bee Colony Algorithm to an Optimizer in Variational Quantum Eigensolver, J. Sig. Proc., Vol. 29, No. 1, pp. 1-10 (2025). doi: 10.2299/jsp.29.1.
(2) H. Singh, S. Majumder, and S. Mishra: Benchmarking of Different Optimizers in the Variational Quantum Algorithms for Applications in Quantum Chemistry, J. Chem. Phys., Vol. 159, No. 4 (2023). doi: 10.1063/5.0161057.

©2026 IEE Japan

航空産業における容量投資と価格設定の 2 段階ゲームモデル

藤田 真衣 *, 高橋里司（電気通信大学）

A Two-Stage Game Model of Capacity Investment and Pricing in the Airline Industry

Mai Fujita, Satoshi Takahashi (The University of Electro-Communications)

1 はじめに

近年の航空市場における規制緩和は、ローコストキャリア（LCC）の参入を促進し、フルサービスキャリア（FSC）との非対称な競争環境を生み出した。航空産業は固定費が高く、在庫を持ち越せない特性を持つため、需要に応じた収益管理が企業の存続を左右する。また、航空会社はコードシェア便等を通じてネットワークを拡張しており、共同運航便の収入をどのように配分するかは、アライアンスの安定性において重要な課題であり、様々な研究が行われてきた。本研究では、FSC と LCC が競合しつつ共同運航を行う状況を、容量決定と市場均衡の 2 段階ゲームとしてモデル化し、その理論的特性と数値的均衡を分析する。このシミュレーションによって, LCC などの新規参入などの経営の意思決定に使うことを提案する。

2 モデルの定式化

本研究では、FSC と LCC が、直行便および乗り継ぎ便を提供する市場を想定する。

1. **第一段階**: 各航空会社は、競合他社の容量と、それが市場価格に与える影響を考慮し、自社の利益を最大化する容量 C_k を決定する。
2. **第二段階**: 第一段階で決定された容量制約の下で、市場メカニズムにより需給が調整され、各社の運賃 p_k と販売量 x_k が決定される。

2.1 第一段階

各航空会社 k は、競合他社の容量 C_{-k} を所与として、自社の利益 π_k を最大化する容量 C_k を決定する。

$$\pi_k(C_k, C_{-k}) = \underbrace{\sum_{i \in I_k^{\text{own}}} p_i^* x_i^*}_{\text{自社便収入}} + \underbrace{\beta_k(p_3^* x_3^*)}_{\text{共同便配分}} - \underbrace{s_k C_k}_{\text{運航コスト}} \tag{1}$$

ここで s_k は単位容量あたりのコストである。

2.2 第二段階

商品集合を $I = \{1, 2, 3\}$ とし、需要関数 $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{p}$ を仮定する。ここで $\boldsymbol{B}$ は価格感応度行列であり、非対角成分は代替性 (Substitutability) を表す。各社の容量 $\boldsymbol{C} = [C_1, C_2]^\top$ が与えられたとき、市場全体の総収入を最大化する価格 $\boldsymbol{p}$ と需要 $\boldsymbol{x}$ が決定される。

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{p}, \boldsymbol{x}} \quad & \sum_{i \in I} p_i x_i \\ \text{s.t.} \quad & \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{p} \quad \text{(需要制約)} \\ & \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \le \boldsymbol{C} \quad \text{(容量制約).} \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、指示行列 $\boldsymbol{A}$ は各商品がどの航空会社のリソースを消費するかを示す。最適解における容量制約のラグランジュ乗数 $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \mu_2]^\top$ は、座席のシャドープライスを意味する。

2.3 収入配分メカニズム

共同運航便の運賃収入は、Hu et al. (2013)[2] に基づき、以下の比率 β_k で配分される。

$$\beta_k = \begin{cases} \dfrac{\mu_k}{\sum_{j \in K} \mu_j} & \text{if } \sum \mu_j > 0, \\ \dfrac{1}{|K|} & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{3}$$

これにより、ボトルネックとなっている区間を提供する会社に多くの収入が還元される。

3 ナッシュ均衡の解析

本研究では乗り継ぎ便を考慮しない容量競争モデルにおける純粋戦略ナッシュ均衡の存在性と一意性を理論的に証明した。

3.1 存在性の証明

逆需要関数 $\boldsymbol{p}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{B}^{-1}(\boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{x})$ を用いると、総収入関数 $f(\boldsymbol{x})$ のヘッセ行列は $\nabla^2 f = -(\boldsymbol{B}^{-1} + (\boldsymbol{B}^{-1})^\top)$ となる。$\boldsymbol{B}$ が正定値であれば $f(\boldsymbol{x})$ は凹関数であり、これに伴い最適値関数 $V(\boldsymbol{C})$ も凹となる。各社の利得関数 π_k が戦略変数 C_k に関して準凹であることを示すことで、Glicksberg[4] よりナッシュ均衡の存在が保証される。

3.2 一意性の条件

各社の最適反応関数の傾きを $\left|\frac{dr_k}{dC_{-k}}\right|$ とすると、これが 1 未満であれば均衡は一意である。線形需要モデル $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{C}$ において、一意性条件は次のように表せる。

$$d_{k,-k} < 2d_{kk} \tag{4}$$

(1) Raza, S. A., & Akgunduz, A. (2008). An airline revenue management pricing game with seat allocation. *International Journal of Revenue Management*, 2(1), 42-62.
(2) Hu, X., Caldentey, R., & Vulcano, G. (2013). Revenue sharing in airline alliances. *Management Science*, 59(5), 1177-1195.
(3) Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). Convex Optimization. Cambridge University Press.
(4) Glicksberg, I. L. (1952). A further generalization of the Kakutani fixed point theorem, with application to Nash equilibrium points. Proceedings of the American Mathematical Society, 3(1), 170-174.

©2026 IEE Japan

Echo State Network を用いたTD3による高次元部分観測制御タスクの検証

松本 卓巳*，松木 俊貴（防衛大学校）

Performance Evaluation of TD3 with Echo State Network in High-Dimensional Partially Observable Control Tasks
Takumi Matsumoto, Toshitaka Matsuki (National Defense Academy of Japan)

1. 序　論

深層強化学習（DRL）は，ロボット制御等の複雑なタスクにおいて著しい成果を上げている．一般に DRL は環境の状態が完全に観測可能であるマルコフ決定過程（MDP）を仮定する[(1)]．しかし，実世界ではセンサの限界や障害物，ノイズなどにより，エージェントが環境の真の状態を直接観測できない部分観測マルコフ決定過程（POMDP）となることも多い．POMDP 環境下での学習には，過去の観測履歴から現在の情報の不完全な部分（速度等）を推定するメモリが必要となる．メモリを持つモデルとして，LSTM などの RNN を用いた手法が一般的である[(2)]．しかし，これらは Back Propagation Through Time (BPTT) を必要とし，学習時の計算コストやメモリ消費量が大きいという課題がある．これに対し著者らは先行研究において，リザバーネットワークの一種である Echo State Network (ESN)[(5)] を Twin Delayed Deep Determinisitic Policy Gradient (TD3)[(3)] に統合した ESN-TD3 を提案し，1 自由度の振り子タスク（Pendulum）において低計算コストで学習が可能であることを示した[(4)]．本研究では，ESN-TD3 の適用範囲と限界を明らかにするため，より高次元かつ複雑な接触挙動を含む MuJoCo ベンチマークタスクに対して，速度情報を欠落させた条件下での検証を行う．

2. 提案手法（ESN-TD3）

本研究では，連続値制御に適した学習アルゴリズムである TD3[(3)] に ESN を統合した ESN-TD3 を用いる．ESN は，単純化された学習機構によって，非常に少ない計算コストで時系列データ処理能力を持つモデルとして広く研究されている．その基本構造は，入力層，固定された重みを持つリザバーと呼ばれる中間層，そして学習対象となる出力層から構成される．リザバー内ではユニットがランダムに結合され，学習を通じて結合重みが更新されることはない．そして，リザバーは入力時系列を非線形変換し，過去から現在までの入力情報を集約した埋め込みベクトルを生成する．そして，その埋め込みベクトルを所望の出力へ変換する出力層のみを学習する．この時，時刻 t における観測 o_t に対し，リザバーの内部状態 x_t は次式で更新される．

$$x_t = \tanh(W^r x_{t-1} + W^{in} o_t + b) \qquad (1)$$

ここで，tanh は活性化関数，W^r は固定された相互結合重み値，W^{in} は固定された入力重み値，b はバイアスベクトルである．なお，W^r はスペクトル半径が 0.95 かつ 10% の割合で値をもつランダム疎行列であり，W^{in} は $(-1, 1)$ の範囲の一様乱数により値が決められたランダム行列である．エージェントは，現在の観測 o_t とリザバー状態 x_t を結合したベクトル $[o_t; x_t]$ を Actor および Critic ネットワークへの入力として用いる．また各 NN の学習は，その時刻 t における文脈情報を埋め込んだ経験 $e_t = (o_t, x_t, a_t, r_t, o'_t, x'_t)$ を蓄えたリプレイバッファからサンプリングされたデータに基づいて行われる．これにより，BPTT を用いることなく，過去の履歴情報を考慮した行動決定が可能となる．

本研究は，環境として Gymnasium MuJoCo(v5) を用い，部分観測制御タスクとして角速度・角加速度を観測不能にした Remove Velocity タスクを用いて ESN-TD3 がどの程度難しいタスクまで学習可能であるか検証を行う．

3. 結　果

〈3･1〉 実験設定　検証には InvertedPendulum, InvertedDoublePendulum, HalfCheetah, Ant, Hopper の 5 つの環境を用いた．また，比較のため，提案手法を含む以下の 3 つの条件で学習を行った．1. TD3 with MDP：通常の TD3 による標準的タスクの学習（基準値）．2. TD3 with POMDP：通常の TD3 による POMDP タスクの学習．3. ESN-TD3 with POMDP：ESN-TD3 による POMDP タスクの学習（提案手法）．

〈3･2〉 結果と考察　各タスクにおける学習曲線（20 シード平均）を図 1 に示す．青線で示す TD3 with MDP の学習曲線から，TD3 は全てのタスクにおいて順調に報酬を獲得していることがわかる．これは，通常の TD3 によって標準的な MuJoCo タスクを学習した場合の基準的性能を示す学習曲線である．一方，橙線で示す TD3 with POMDP の学習曲線から，TD3 はどの POMDP タスクにおいても獲得報酬が上がらず学習に失敗していることがわかる．これは，速度情報が欠落した状態において，RNN 層を持たない通常の TD3 では，現在の観測のみから適切な制御則を構築することが不可能であることを示している．

これに対し，緑線が示す ESN-TD3 with POMDP は全てのタスクにおいて TD3 with POMDP を上回る性能を示した．特に，(a) InvertedPendulum および (b) InvertedDou-

©2026 IEE Japan

blePendulum においては，TD3 with MDP と同等の性能を達成した．これらのバランス制御タスクでは，位置の変化から角速度を推定することが比較的容易であり，ESN-TD3 が十分な精度で状態推定を行えたと考えられる．

一方で，(c) HalfCheetah, (d) Ant, (e) Hopper といった高次元かつ接触を伴う移動タスクにおいては，提案手法は RNN 層を持たない橙線のスコアを有意に上回ったものの，完全観測である青線の性能には及ばなかった．これらは自由度が高く，かつ地面との接触によりダイナミクスが非連続に変化するなどより学習が困難なタスクである．そのため，標準的な ESN では，制御に必要な高次の動的特徴を十分に抽出・表現しきれなかった可能性が示唆される．

4. 結　論

本研究では，ESN を導入した TD3 アルゴリズムを，速度情報が欠落した MuJoCo ベンチマークタスクに適用し，その有効性と限界を検証した．実験の結果，ESN-TD3 は倒立振子のような低次元のタスクにおいては完全観測時と同等の性能を発揮し，計算コストを抑えつつ部分観測問題に対処できることを確認した．一方で，高次元かつ複雑な接触を伴うタスクにおいては，学習性能は限定的となった．今後の課題として，リザバーパラメータの最適化や，リザバーの深層化や並列化などの導入により，複雑なタスクにおける性能向上を目指していくことが挙げられる．

謝　辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K17969,JP22KK0159 の助成を受けたものです．

文　献

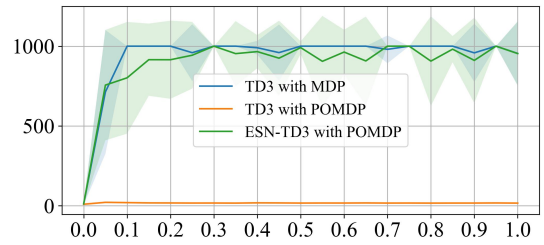
（1） R. S. Sutton, and A. G. Barto: ”Reinforcement learning: An introduction”, MIT Press (2018)

（2） L. Meng, R. Gorbet, D. Kulić: ”Memory-Based Deep Reinforcement Learning for POMDPs”, Int’l conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.5619-5626 (2021)

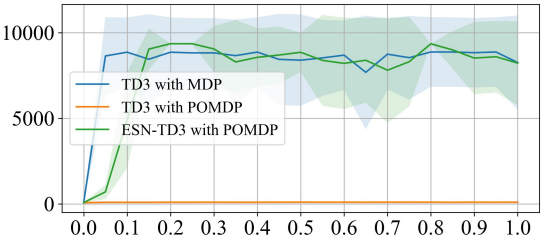
（3） S. Fujimoto, H. Hoof, and D. Meger: ”Addressing function approximation error in actor-critic methods”, Int’l conf. on machine learning, PMLR, pp.1587-1596 (2018)

（4） T. Matsuki, R. Harada: ”Reinforcement learning for partially observable control tasks with reservoir network, The papers of Technical Meeting on Control, IEE Japan, CT-25-027, pp. 19-24 (2025) (in Japanese)
松木俊貴・原田 理識:「リザバーネットワークを用いた部分観測制御タスクの強化学習」, 電気学会制御研究会「スマートシステムと制御技術シンポジウム 2025」予稿集, pp19-24 (2025)

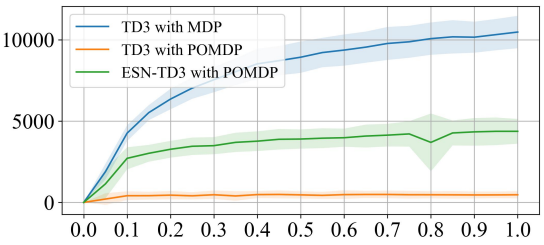
（5） M. Lukoševičius and H. Jaeger: ”Reservoir computing approaches to recurrent neural network training”, Computer Science Review, Vol.3, Issue 3, pp.127-149 (2009)



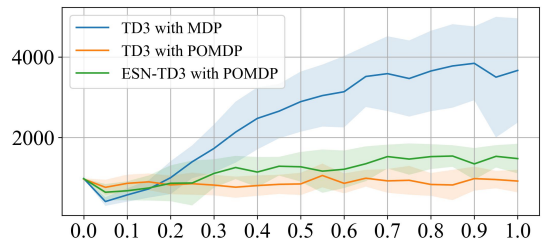
(a) InvertedPendulum



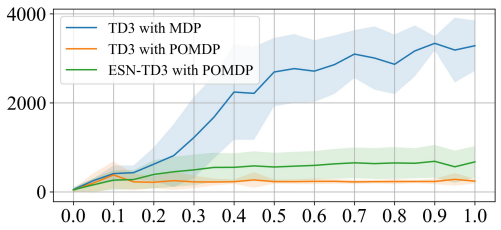
(b) InvertedDoublePendulum



(c) HalfCheetah



(d) Ant



(e) Hopper

図 1: 学習曲線
Fig. 1: Learning curves

©2026 IEE Japan

ニューラルネットワークを用いた環境適応型電気モータのサーボ制御

Ce Lei，黄　慶九（工学院大学）

Servo Control of Environment Adaptive Electric Motor using Neural Network

Shogo Ogasawara, Qingjiu Huang (Kogakuin University)

1. はじめに

いままでの電気モータのサーボ制御には負荷に合わせるためのパラメータの調整がユーザーにとって容易ではない。そのため、本研究では負荷が変化してもサーボ制御のパラメータの調整を必要としない、ニューラルネットワークを用いた環境適応型電気モータのサーボ制御を提案する。

2. 理論

2.1 極配置法

制御対象の伝達関数が既知であるので、閉ループの極を任意の伝達関数の応答となるよう極を配置する[1]。

制御対象の 2 次遅れ系の伝達関数は次式である。

$$P(s)=\frac{K}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)} \tag{2}$$

閉ループ伝達関数 $G_{cl}(s)$は、次式に示す。

$$G_{cl}=\frac{P(s)C(s)}{1+P(s)C(s)} \tag{3}$$

減衰係数ζと各周波数ωnに関連した 2 つの極と$-\alpha\omega_n$実数の極を有する 3 次の閉ループの伝達関数は次式に示す。

$$(s+\alpha\omega_n)(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)=0 \tag{4}$$

式(3)の分母と式(5)を比較し、PID パラメータは次式となる。

$$K_p=\frac{a\omega_n^2(2\zeta\alpha+1)}{b} \tag{5}$$

$$T_i=\frac{2\zeta\alpha+1}{a\omega_n^3} \tag{6}$$

$$T_d=\frac{\omega_n(2\zeta\alpha+1)-\frac{1}{a}}{\omega_n^2(2\zeta\alpha+1)} \tag{7}$$

2.2 ニューラルネットワーク制御

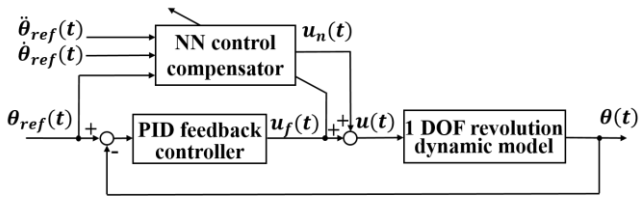


図 1 Neural Network を用いたモータ制御

制御のブロック線図は図 1 に示す。

今回は目標軌道を入力としフィードバック信号$u_n(t)$がニューラルネットワークの誤差信号とし、入力信号$u(k)$をニューラルネットワークの教師信号として学習するフィードバック誤差学習方法を用いる。制御対象には$u(t)$が与えられ、$u_n(t)$は誤差信号として働くとともに、学習後に制御対象や外乱を認識することができる[2]。

入力層と中間層の重みは$W(i,j)$、中間層と出力層の重みはV(j,k)、各層のユニット間の入出力関係は、次式で

$$x_1=\theta_{ref}(t),\ x_2=\dot{\theta}_{ref}(t),\ x_3=\ddot{\theta}_{ref}(t) \tag{8}$$

$$y(j)=f\{\textstyle\sum_{i=1}^{6}W(i,j)x(i)\} \tag{9}$$

$$u_n(k)=f\{\textstyle\sum_{j=1}^{3}V(j,k)y(j)\} \tag{10}$$

シグモイド関数は次式に示す。

$$f(x)=\frac{2}{1+e^{-x}}-1 \tag{11}$$

誤差の収束式は次式を用いる。

$$\mathrm{E}=\frac{1}{2}\textstyle\sum_{k=1}^{1}\{u_n(k)-u(k)\}^2=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{1}\{-u_f(k)\}^2 \tag{12}$$

3. シミュレーション

シミュレーションの制御系は Matlab/Simulink で設計し、回転角の正弦波追従制御を行う。

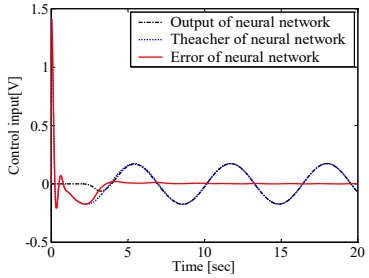
極配置法は、1/4 減衰を制御仕様にしているため希望する応答になるよう K_p, T_i, T_d を設計する。

ニューラルネットワークの学習係数は 0.01 とする。それぞれの入力には、周期 1.0s、振幅 1.0V の正弦波を目標値とする。3 相ブラシレスモータ、ドライバーICL6299 を用いる。本実験の制御対象の伝達関数は、次式に示す。

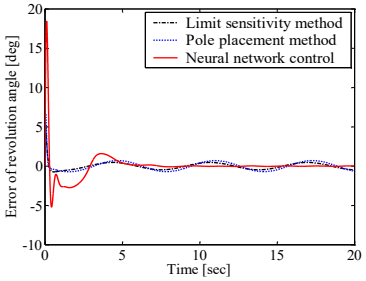
$$P(s)=\frac{1}{0.021s^2+0.018s} \tag{13}$$

4. シミュレーションの結果と考察

シミュレーション結果を図 2 に示す。図 2(a)は、ニューラルネットワークの出力、教師信号、誤差を比較したものである。図 2(b)は回転角の誤差を限界感度法、極配置法、ニューラルネットワークで比較したものである。



(a) 制御入力



(b) 回転角の誤差

図 2 正弦波応答への追従制御の解析結果

図 2(a)では、ニューラルネットワークの誤差は、出力と教師信号が与えられると次第に収束していくことが分かる。図 2(b)は限界感度法、極配置法は手動で調整し最適な値となっているためオーバーシュートが小さく応答性が良くなっている。それに比べ、ニューラルネットワークでは初め学習していないため、エラーが大きいが、6 s で学習が終わり、次第に誤差収束していくのが分かる。

6. おわりに

本研究では、電気モータのサーボ制御に対して、負荷が変化しても制御のパラメータの調整を必要としないニューラルネットワーク制御を用いた環境適応型サーボ制御を提案した。また、電気モータの角度追従制御のシミュレーションの結果によって、本研究手法の有効性を確認した。

7. 参考文献

[1]横山修一ほか，基礎と実践制御工学入門，コロナ社.
[2]黄慶九，ニューラルネットワークを用いた多足歩行ロボットの知的制御に関する研究，千葉大学博士学位申請論文，2003 年.

©2026 IEE Japan

内部モデル原理と最適制御に基づく AC サーボモータの歪波外乱抑制

萩原　琢斗*，黄　慶九（工学院大学）

Suppression of Distorted Wave Disturbances in AC Servo Motors Based on Internal Model Principle and Optimal Control

Takuto Hagiwara, Qingjiu Huang (Kogakuin University)

１．はじめに

近年、産業用ロボットや自動化ライン等の分野において、ACサーボモータによる高精度な速度・角度制御は不可欠である。しかしながら,ACサーボモータの駆動時には,磁極と電機子間の吸引力に起因するコギングトルクや,センサから混入する周波数成分を有した外乱が発生することが避けられない.これらの外乱はモータの出力トルクに脈動を引き起こす主原因となり,その影響によって,速度や角度を目標値に対して高精度に追従させることが困難になるという課題が存在する.

そこで本論文では,これらの周期的外乱を効果的に抑制,ロバストな制御性能を実現することを目的として,AC サーボモータの状態空間モデルおよび内部モデル原理に基づいた新たな制御手法を提案する.具体的には,最適制御理論を適用することで,外乱の影響を最小化するサーボシステムを設計する.さらに,提案手法の有効性を検証するために,数値シミュレーションによる解析を行い確認する.

２．状態空間に基づく内部モデル原理

制御対象は，式(1)のような外乱$d(t)$がある１入出力の線形時不変システムとする.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + b\{u(t) + d(t)\}\ y(t) = cx(t) \qquad (1)$$

$x(t) \in R^n$：状態変数，　$u(t) \in R^p$：操作量，

$y(t) \in R^p$：制御量

式(1)のシステムへの目標値と外乱によって，生じる定常偏差を低減させるための補償器を用いたサーボシステムの構成は図１のようになる.

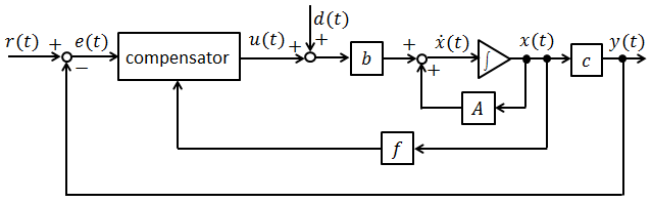


図１　サーボシステムの構成

つぎに，目標値に対する補償器のモデルを考える場合は,積分器を扱うため，状態空間モデルに直列に接続し，周期外乱に対する補償器の出力の積分を行う構成とする．また、今回の外乱は,24, 48, 72hz の歪波とする。これにより，図１のサーボシステムに用いる補償器の構成は，図２のようになる.

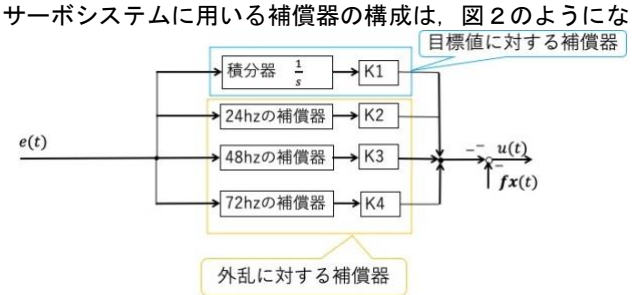
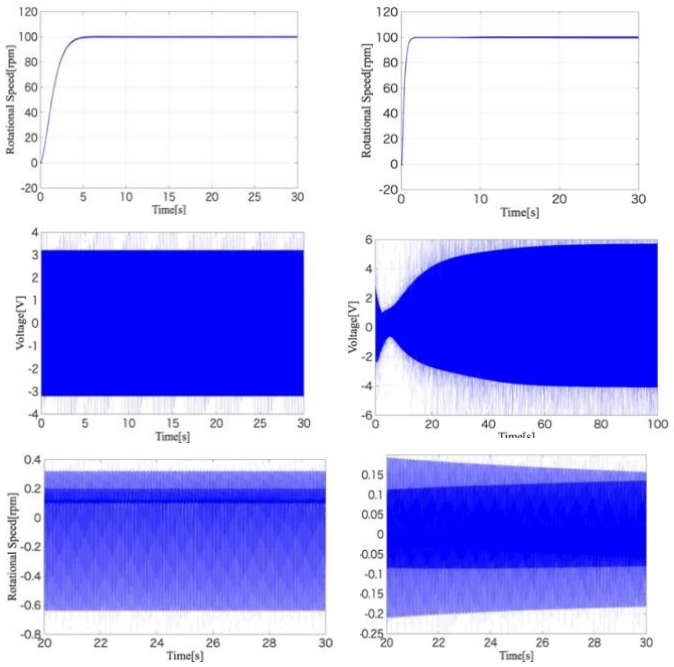


図２　補償器の構成

３．シミュレーションの解析結果

出力波形を比較すると，積分型のサーボシステムと周期外乱の補償器を用いたサーボシステムではステップ信号に対する追従性などの制御性能には．入力電圧においては，過渡状態となった際，周期外乱の補償器を用いたサーボシステムが入力電圧の値が大きいことがわかる．これは，周期外乱の補償器の一つ一つの出力と積分器からの出力と足し合わさって制御入力を作り出しているためである．定常偏差より，周期外乱の補償器を用いたサーボシステムが，積分型のサーボシステムの周期外乱の振幅と比べて 1/2 程度低減できていることがわかる．これにより，シミュレーションの解析結果から内部モデル原理に基づいた周期外乱の補償器の有効性を確認することができた.



（１）補償なし　　（２）補償あり

図３　シミュレーションの解析結果

４．おわりに

周期外乱に関して，内部モデル原理に基づく周期外乱を抑制するサーボシステムを設計した．その設計により得られた制御系を用いてシミュレーションを行い，周期外乱の補償器の有効性を確認することができた.

５．参考文献

[1] 海老原大樹，電気機器，共立出版，pp.135-136，1998.
[2] 齋藤貴志，黄慶九，外乱周波数特性を考慮した AC モータのサーボシステム，第 16 回システムインテグレーション部門講演会(SI2015)予稿集，pp.419-422，2015.

©2026 IEE Japan

周波数応答を用いた H_∞ ループ整形法における開ループ特性の周波数帯別最適化による固定構造重み関数設計

佐藤　慧*，弓場井　一裕，矢代　大祐，駒田　諭（三重大学）

Fixed-Structural Weighting Function Design by Frequency-Band-Wise Optimizing of Open-Loop Characteristics in H_∞ Loop Shaping Using Frequency Responses

Satoshi Sato*, Kazuhiro Yubai, Daisuke Yashiro, Satoshi Komada (Mie University)

1. 緒　　言

産業界で幅広く用いられている制御器設計法の 1 つとして，モデルベース制御器設計法がある。しかし，実際の制御対象が持つ高次特性や非線形性，あるいは特性変動により制御対象の特性を正確にモデリングすることは困難である。このような課題点に対し，モデル化誤差が存在する状態においても安定性と性能を保証したロバスト制御の考え方が有効的である。ロバスト制御手法の 1 つに，H_∞ ループ整形法 [1] がある。この手法では，制御対象の入力側と出力側から見た感度関数や相補感度関数を含めた 4 つの閉ループ特性からなる伝達行列の H_∞ ノルムを評価する。そのため，制御対象の入出力端でバランスのとれた整形が可能であり，適切な重み関数が設計されれば，良好な追従性や安定性，外乱抑圧性能が達成される。しかし，H_∞ ループ整形法は制御対象のモデルを必要とし，また，重み関数の明確な設計指標は確立されていない。

このような背景の元，周波数応答を用いた重み関数の設計方法が研究されてきた [2],[3]。本研究では，各周波数帯毎に開ループ整形に基づいた評価関数を設定し，各周波数点で最適化を行う重み関数設計法 [4] に着目する。これは，周波数帯を 3 つに分割し，安定性が損なわれやすいゲイン交差周波数を含む中周波数帯でロバスト安定余裕を最大化する最適化問題を導入している。続いて，低周波数帯においては，外乱抑圧特性を向上させるために，開ループゲインの下界を最大化する。また，高周波数帯では，ロバスト安定性の確保や雑音除去のため，開ループゲインの上界を最小化する。さらに，所望の開ループゲイン領域や望みの制御対象モデルを必要としないため，開ループゲインを直接最適化可能となる。一方で，最終的な重み関数の導出にはフィッティングを必要とし，設計者の技量次第では性能劣化を招くという問題がある。

以上の背景から，本稿では，周波数応答を用いた H_∞ ループ整形法において所望の特性をもつ数式モデルを必要としない固定構造重み関数の設計方法を提案する。また，文献 (5) の 2 段アクチュエータ HDD に関するベンチマーク問題を用いた性能評価を行う。

2. 提案手法

本節では，固定構造重み関数を用いて，数式モデルを使用せず開ループゲインを直接最適化する設計問題を示す。提案手法では，前置重み $\boldsymbol{W}_1$ と後置重み $\boldsymbol{W}_2$ を交互に設計する。

〈2･1〉 重み関数の構造　　設計にあたり，重み関数 $\boldsymbol{W}_1(s)$，$\boldsymbol{W}_2(s)$ を (1)，(2) 式のように設計パラメータ $\boldsymbol{\rho}_1$，$\boldsymbol{\eta}_1$，$\boldsymbol{\rho}_2$，$\boldsymbol{\eta}_2$ を用いて定義する。

$$\boldsymbol{W}_{1(s,\boldsymbol{\rho}_1,\boldsymbol{\eta}_1)} = \frac{1}{D_{1(s,\boldsymbol{\eta}_1)}} \boldsymbol{N}_{1(s,\boldsymbol{\rho}_1)} = \frac{1}{\boldsymbol{\eta}_1{}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\phi}_{D_1(s)}} \boldsymbol{\rho}_1{}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\phi}_{\boldsymbol{N}_1(s)} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{W}_{2(s,\boldsymbol{\rho}_2,\boldsymbol{\eta}_2)} = \frac{1}{D_{2(s,\boldsymbol{\eta}_2)}} \boldsymbol{N}_{2(s,\boldsymbol{\rho}_2)} = \frac{1}{\boldsymbol{\eta}_2{}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\phi}_{D_2(s)}} \boldsymbol{\rho}_2{}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\phi}_{\boldsymbol{N}_2(s)} \quad (2)$$

ここで，$D_1(s,\boldsymbol{\eta}_1)$，$D_2(s,\boldsymbol{\eta}_2)$ は共通分母多項式，$\boldsymbol{N}_1(s,\boldsymbol{\rho}_1)$，$\boldsymbol{N}_2(s,\boldsymbol{\rho}_2)$ は分子多項式であり，$\boldsymbol{\phi}_{D_1}(s)$，$\boldsymbol{\phi}_{D_2}(s)$，$\boldsymbol{\phi}_{\boldsymbol{N}_1}(s)$，$\boldsymbol{\phi}_{\boldsymbol{N}_2}(s)$ はそれぞれの分母多項式および分子多項式における基底関数ベクトルである。また，分母多項式 $D_1(s,\boldsymbol{\eta}_1)$，$D_2(s,\boldsymbol{\eta}_2)$ の最高次数の係数は 1 とする。このようにパラメトライズすることにより，分母多項式と分子多項式の両方を調整可能な重み関数となる。

〈2･2〉 設計問題　　文献 (4) で提案された手法をベースに，設計問題を定式化する。提案手法では，3 つの周波数帯における評価値に周波数重みを用いて重み付けし，その総和を最小化する最適化問題を設定する。

提案手法における評価式は，(3) 式で表す。ただし，$\underline{\theta}$ は低周波数帯における開ループゲインの下界，γ はロバスト安定余裕 $b(\boldsymbol{G},\boldsymbol{C}_\infty)$ の逆数であり，$\gamma \equiv 1/b(\boldsymbol{G},\boldsymbol{C}_\infty)$ の関係が成り立ち，$\overline{\theta}$ は高周波数帯における開ループゲインの上界である。

$$\min_{\boldsymbol{\rho},\boldsymbol{\eta}} \quad \max(W_l \underline{\theta}_r(\omega_l)^{-2} + W_m \gamma_r(\omega_m)^2 + W_h \overline{\theta}_r(\omega_h)^2) \quad (3)$$

$$\forall \omega_l < \omega_{lb},\ \forall \omega_m \in [\omega_{lb}, \omega_{ub}],\ \forall \omega_h > \omega_{ub}$$

$$\underline{\theta}_r(\omega_l) = \frac{\underline{\theta}_k(\omega_l)}{\underline{\theta}_0(\omega_l)},\ \gamma_r(\omega_m) = \frac{\gamma_k(\omega_m)}{\gamma_0(\omega_m)},\ \overline{\theta}_r(\omega_h) = \frac{\overline{\theta}_k(\omega_h)}{\overline{\theta}_0(\omega_h)}$$

ここで，W_l, W_m, W_h は，各評価値を重み付けするための周波数重みであり，この周波数重みを調整することで周波数帯ごとに評価の重要度を変えることが可能である。また，k は最適化における繰り返し回数，$\underline{\theta}_r, \gamma_r, \overline{\theta}_r$ は初期の重み関数を用いたときの評価値 $\underline{\theta}_0, \gamma_0, \overline{\theta}_0$ と現在の最適化における評価値との変化率を表しており，各評価値は $[0,1]$ の範囲となる。そのため，評価値同士のスケールを合わせることができ，周波数重みの選択が容易となる。

〈2･3〉 中周波数帯における制約　　中周波数帯の評価値 γ に関する制約は，ロバスト安定余裕の定義から (4) 式で表される。

$$\sigma_{\max}(\boldsymbol{H}(j\omega_m,\boldsymbol{\rho},\boldsymbol{\eta})) < \gamma_k(\omega_m) \quad (4)$$

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{G} \\ \boldsymbol{I} \end{bmatrix} (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{C}_\infty \boldsymbol{G})^{-1} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{C}_\infty & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \quad (5)$$

上記の制約式を周波数応答を用いた制約式として書き換えると，(6) 式となる。

$$\gamma_k(\omega_m)^2 \boldsymbol{I} - \boldsymbol{H}(j\omega_m,\boldsymbol{\rho},\boldsymbol{\eta})^* \boldsymbol{H}(j\omega_m,\boldsymbol{\rho},\boldsymbol{\eta}) > 0. \quad (6)$$

ここで，$\boldsymbol{W}_2$ を固定し，$\boldsymbol{W}_1$ の分母多項式 D_1 と分子多項式 $\boldsymbol{N}_1$ を使用して (6) 式における $\boldsymbol{H}$ をパラメータ $\boldsymbol{\rho}_1$，$\boldsymbol{\eta}_1$ に対して線形な行列 $\boldsymbol{Z}_{1m}, \boldsymbol{Y}_{1m}$ を用いて書き換えると，(7) 式となる。なお，引数の ω_m，$j\omega_m$，$\boldsymbol{\rho}_1$，$\boldsymbol{\eta}_1$ は，表記を簡略化

©2026 IEE Japan

するため省略する。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H} &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{G}(-\boldsymbol{C}_\infty) & \boldsymbol{G} \\ -\boldsymbol{C}_\infty & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}-\boldsymbol{G}\boldsymbol{C}_\infty & 0 \\ 0 & \boldsymbol{I}-\boldsymbol{C}_\infty\boldsymbol{G} \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1(-\boldsymbol{C}_\infty) & \boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1 \\ D_1(-\boldsymbol{C}_\infty) & D_1 \end{bmatrix} \cdot \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} D_1-\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{C}_\infty & 0 \\ 0 & D_1-\boldsymbol{C}_\infty\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1 \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \boldsymbol{Y}_{1m}\boldsymbol{Z}_{1m}^{-1} \end{aligned} \tag{7}$$

よって，(6) 式は，行列 $\boldsymbol{Z}_{1m}, \boldsymbol{Y}_{1m}$ に対する QMI 制約として記述できる。一般的に，QMI 制約を含む最適化問題の求解は困難であるものの，この QMI 制約を反復的に LMI 制約を解く形として記述する方法が提案されている [6]。この方法に基づき (6) 式を変形すると，(8) 式と等価となる。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{Z}_{1m}^*\tilde{\boldsymbol{Z}}_{1m} + \tilde{\boldsymbol{Z}}_{1m}^*\boldsymbol{Z}_{1m} - \tilde{\boldsymbol{Z}}_{1m}^*\tilde{\boldsymbol{Z}}_{1m} & \boldsymbol{Y}_{1m}^* \\ \boldsymbol{Y}_{1m} & {\gamma_k}^2\boldsymbol{I} \end{bmatrix} > 0 \tag{8}$$

以上の関係から，元の制約式を LMI 制約として記述可能となる。また，導出される解は元の制約を満たし，繰り返し最適化により評価値は単調収束する。

〈2･4〉 低・高周波数帯における制約 固定構造重み関数を用いた評価値 $\underline{\theta}$，$\overline{\theta}$ に関する制約を記述する。$\boldsymbol{W}_2$ を固定し，分母多項式 D_1 と分子多項式 $\boldsymbol{N}_1$ を用いて，開ループゲインの下界 $\underline{\theta}$ を最大化する最適化問題における制約式および，開ループゲインの上界 $\overline{\theta}$ を最小化する最適化問題における制約式はそれぞれ (9)，(10) 式となる。

$$D_1^* D_1 {\underline{\theta}_k}^2 < (\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{C}_\infty)^*(\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{C}_\infty) \tag{9}$$

$$(\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{C}_\infty)^*(\boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{C}_\infty) < D_1^* D_1 {\overline{\theta}_k}^2 \tag{10}$$

上記の式は，$\boldsymbol{Z}_{1l} = \boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{C}_\infty$，$\boldsymbol{Y}_{1l} = D_1$，$\boldsymbol{Z}_{1h} = D_1$，$\boldsymbol{Y}_{1h} = \boldsymbol{W}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}_1\boldsymbol{C}_\infty$ とすることで，行列 $\boldsymbol{Z}_{1l}$，$\boldsymbol{Y}_{1l}$ および $\boldsymbol{Z}_{1h}$，$\boldsymbol{Y}_{1h}$ に対する QMI 制約として記述され，反復 LMI 制約として変形すると，(11)，(12) 式となる。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{Z}_{1l}^*\tilde{\boldsymbol{Z}}_{1l} + \tilde{\boldsymbol{Z}}_{1l}^*\boldsymbol{Z}_{1l} - \tilde{\boldsymbol{Z}}_{1l}^*\tilde{\boldsymbol{Z}}_{1l} & \boldsymbol{Y}_{1l}^* \\ \boldsymbol{Y}_{1l} & {\underline{\theta}_k}^{-2}\boldsymbol{I} \end{bmatrix} > 0 \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{Z}_{1h}^*\tilde{\boldsymbol{Z}}_{1h} + \tilde{\boldsymbol{Z}}_{1h}^*\boldsymbol{Z}_{1h} - \tilde{\boldsymbol{Z}}_{1h}^*\tilde{\boldsymbol{Z}}_{1h} & \boldsymbol{Y}_{1h}^* \\ \boldsymbol{Y}_{1h} & {\overline{\theta}_k}^2\boldsymbol{I} \end{bmatrix} > 0 \tag{12}$$

また，$\boldsymbol{W}_2$ 設計時には $\boldsymbol{W}_1$ を固定し，〈2･3〉節および本節で示した方法と同様の手順で定式化可能である。

3. シミュレーション

本節では，上記の設計方法を用いて重み関数設計を行い，提案手法の有効性を示す。また，文献 (5) の 2 段アクチュエータ HDD に関するベンチマーク問題における性能評価を行う。

〈3･1〉 シミュレーション条件 制御対象は，文献 (5) から引用した VCM と PZT アクチュエータであり，重み関数の構造は 2 次の伝達関数とする。周波数点は，100～25100Hz の区間で対数的に等間隔な 300 点とし，低周波数帯は 1～129 点目（100～1085Hz），中周波数帯は 130～180 点目（1085～2740Hz），高周波数帯は 181～300 点目（2740～25100Hz）としている。また，周波数重み W_l, W_m, W_h は，それぞれの周波数帯でのみ値を持ち，その値は $2, 1, 2$ としている。

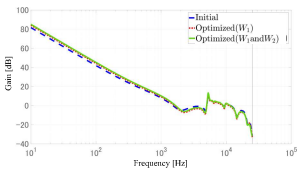


図 1 開ループゲイン
Fig.1. Open-loop gain

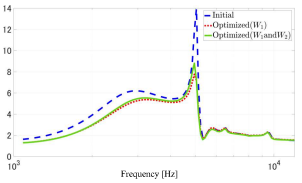


図 2 $\boldsymbol{H}$ の特異値
Fig.2. Singular values of $\boldsymbol{H}$

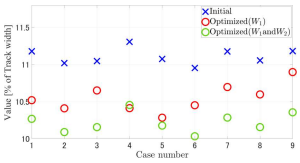


図 3 3σ 値
Fig.3. 3σ value

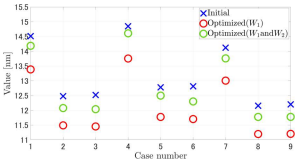


図 4 PZT の変位
Fig.4. Displacement of PZT

〈3･2〉 シミュレーション結果 整形前と整形後の開ループゲインを図 1 に示す。低周波数帯において，初期値に対して $\boldsymbol{W}_1$ のみの設計では約 2.4dB，$\boldsymbol{W}_1, \boldsymbol{W}_2$ の両方を設計した場合では約 3.4dB 大きい値を示している。一方，高周波数帯では，初期値に対して $\boldsymbol{W}_1$ のみの設計では約 1.3～2.0dB，$\boldsymbol{W}_1, \boldsymbol{W}_2$ の両方を設計した場合では約 1.1～3.2dB 小さい値を示していることが確認される。また，図 2 は，中周波数帯における (5) 式の行列 $\boldsymbol{H}$ の特異値を示している。初期値と比較して $\boldsymbol{H}$ の特異値が小さくなっていることがわかる。よって，低周波数帯での開ループゲイン増加，中周波数帯でのロバスト安定余裕の確保，高周波数帯での開ループゲイン減少が実現されたと考える。

続いて，HDD ベンチマーク問題における評価として，制御量の 3σ 値を図 3 に示す。初期値を用いたときの 3σ 値における最悪値は 11.31 %であり，提案手法において，$\boldsymbol{W}_1$ および $\boldsymbol{W}_1, \boldsymbol{W}_2$ の両方を設計したときの 3σ 値における最悪値は，それぞれ 10.90 %，10.46 %となった。初期値の値に対して $\boldsymbol{W}_1$ の設計により最悪値は改善し，$\boldsymbol{W}_2$ の設計により最悪値がさらに改善された。最後に，図 4 で表される PZT アクチュエータの変位より，50nm 以下の制約を満たしている。

4. 結 言

本稿では，数式モデルを使用せず固定構造重み関数を用いて，開ループゲインを直接最適化する設計問題により，H_∞ ループ整形法における重み関数設計法を提案した。また，シミュレーションにより，有効性を示した。

今後の課題としては，HDD ベンチマーク問題における性能評価を改善するために外乱データを用いた評価の追加が挙げられる。

文 献

(1) D. McFarlane and K. Glover:IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.37, No.6, pp.759-769, 1992
(2) A. Lanzon:Automatica, Vol.41, No.7, pp.1201-1208, 2005
(3) S. Katayama et al.:IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.56, No.10, pp.3854-3863, 2009
(4) M. Osinuga et al.:International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.23, No.8, pp.919-931, 2013
(5) T. Atsumi:IFAC-PapersOnLine, Vol.56, No.2, pp.8790-8796, 2023
(6) S. Boyd et al.:International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol.26, No.8, pp1718-1731, 2016

©2026 IEE Japan

Transformer を用いたサーボモータのフィードバック誤差学習

重松　昇吾*　黄　慶九，（工学院大学）

Transformer-Based Feedback Error Learning in Servo Motor Control Systems

Shogo Shigematsu, Qingjiu Huang(Kougakuin University)

１．序論

近年，産業機器やロボット分野においてサーボモータは，高精度な位置決めや速度制御を担う重要な要素となっている。一般に，サーボモータ制御には PID 制御が広く用いられており，構成が簡潔で実装が容易であるという利点を有する。一方で，外乱や負荷変動，非線形特性を含む実環境においては，パラメータ調整が難しく，十分な制御性能を維持できない場合がある。そこで本研究では，Transformer を PID 制御と組み合わせることで，誤差特性の学習によるパラメータ調整の容易化および並列的なデータ処理能力の活用を図り，制御性能向上の可能性を検討する。

２．Transformer

Transformer は，並列的に時系列データを処理できる点に特徴を有しており、従来の RNN や LSTM は，時系列データを逐次的に処理する構造を持つため，長期的な依存関係の学習や計算効率の面で制約が生じる場合がある。Transformer は，エンコーダおよびデコーダから構成される。エンコーダは，過去のフィードバック誤差系列を入力として(1)式を受け取る。

$$e = \{e_1, e_2, e_3, \cdots\cdots e_T\} \tag{1}$$

エンコーダ内部において自己注意機構により各時刻の特徴量を計算する。(2)式に示す。

$$H = Attention(e) \tag{2}$$

デコーダは，エンコーダの出力Hを基に，将来の誤差値を逐次的に予測する式を次式に示す。

$$\dot{e}_{t+1} = f_{dec}(H) \tag{3}$$

この構造により，過去誤差の特徴抽出と未来誤差の生成を分離して扱うことが可能となり，制御における誤差予測に適したモデル構成となっている。

自己注意機構においては，各時刻の重要度を表す注意重みを算出するために，Softmax 関数が用いられる。各時刻に対する注意重み α_iは，次式で定義される。

$$\alpha_i = \frac{\exp(z_i)}{\sum \exp(z_j)} \tag{4}$$

３．提案手法

Transformer により予測された次時刻の誤差を用いて補償信号を生成し，これを PID 制御の出力に加えることで，最終的な制御入力を構成する。この構成により，従来のフィードバック制御に予測的要素を導入し，制御性能の向上を図る。最終的な制御入力を次式に示す。

$$u(t) = u_{PID}(t) + ke_{t+1} \tag{5}$$

４．シミュレーション結果

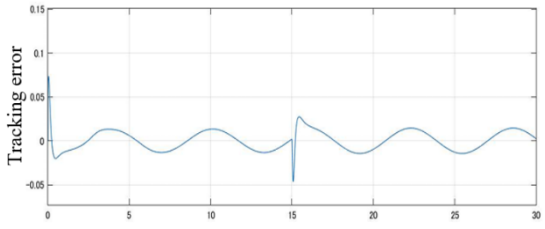


図 1 シミュレーション結果
Fig.1.figures of simulation

オンライン・オフライン統合型ニューラルネットワーク制御手法(1)と比較した結果，提案手法は誤差幅が小さく，特に制御開始直後において良好な追従特性を示した。このことから，Transformer を用いた誤差予測に基づく補償は，初期応答における誤差低減に有効であることが確認された。

５．まとめ

本研究では，Transformer による誤差予測と PID 制御を統合した制御手法を提案した。その結果，オンライン学習型ニューラルネットワーク制御と比較して誤差幅が小さく，特に初期応答において良好な制御性能を示した。今後はモデル構造の最適化や実機システムへの適用を通じて，本手法の有効性を検証する。

文　献

(1) M. Morita・Q. Huang・M. Morishita : Online-Offline Learning Method of the Neural Network Control for a Servo System,

(2) J. Kim・S. Lee・Y. Park : PIDformer: Transformer-based Control.IEEE

(3) A. Vaswani・N. Shazeer・N. Parmar・J. Uszkoreit・L. Jones・A. N. Gomez・Ł. Kaiser・I. Polosukhin : Attention Is All You Need

©2026 IEE Japan

不確実性を考慮した
埋込磁石型同期モーターの高精度制御

西　暖*，黄　慶九（工学院大学）

High-Precision Control of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Uncertainty

Dan Nishi, Qingjiu Huang (Kogakuin University)

１．序論

埋込磁石型同期モータ（IPMSM）は，高効率かつ高出力を有することから，広く用いられている．一方で，非線形性を有しており，制御性能の低下を引き起こす要因となる．従来の PID 制御は実用性に優れるものの，非線形性等への対応には限界がある．本研究では，不確実性を定量化可能なベイジアンニューラルネットワーク（BNN）に着目し，PID 制御と組み合わせた IPMSM 制御手法を提案する．シミュレーションにより，不確実性条件の違いが制御性能に与える影響を比較し，BNN が有効となる条件について検討する．

２．IPMSM の制御

IPMSM の電磁トルクは,dq軸座標系より次式で表される

$$T = P_n\{\psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q\} \quad (1)$$

ここで、P_nは極対数, ψ_aは永久磁石磁束, i_d，i_qはdq軸電流, L_d，L_qはdq軸インダクタンスである．右辺は突極性に起因するリラクタンストルクを表し，磁気飽和や温度変化によりパラメータが変動する．これは制御性能に影響を与えるため，本研究では不確実性を考慮した制御手法を検討する．

３．ベイジアンニューラルネットワーク

BNN は，ネットワークの重みを確率変数として扱い，出力と同時に予測の不確実性を推定できる手法である．本研究では，モーターの非線形性やパラメータ変動に起因するモデル誤差を学習的に補償するため，BNN を制御系に導入する．推定された不確実性は，制御入力の調整や状態監視に利用可能であり，単なる追従性能の向上にとどまらず，安全性やロバスト性の向上に寄与する点が特徴である．

４．提案手法

本研究では，PID 制御により目標値追従の基本性能を確保し，BNN は IPMSM の非線形性やパラメータ変動に起因するモデル誤差を補償する役割を担う．BNN は状態量を入力として補償トルクを推定し，その出力を PID 制御入力に加算する構成とした．さらに，BNN が推定する不確実性を監視することで，制御対象の状態変化や異常兆候を把握可能な点が本手法の特徴である．

５．シミュレーション実験

提案手法の有効性を検証するため，IPMSM の非線形モデルに対して位置指令追従制御のシミュレーションを行い，PID，従来 NN，提案 BNN を比較した．評価指標として追従誤差の RMSE および最大誤差を用い，あわせて制御入力の挙動と BNN による不確実性推定値の時間推移を確認した．実験条件として，摩擦非線形，位置依存負荷トルク，温度変化に伴うパラメータ変動，摩耗による時変特性を設定し，これらを重畳した複合不確実性条件を最終評価として用いた．本稿では，特に不確実性推定結果に着目して結果を示す．

６．シミュレーションの結果と考察

複合不確実性条件下における BNN の不確実性推定結果を図１に示す．

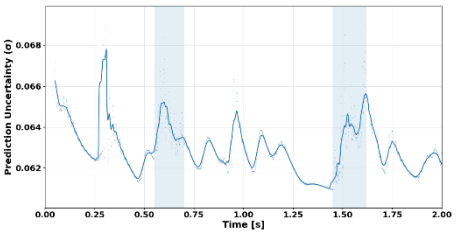


図 1BNN の予測不確実性
Fig.1. Prediction Uncertainty of BNN

外乱およびパラメータ変動が加わる区間(青帯)において，不確実性指標が急激に増加していることが確認できる．これは，提案 BNN がモデル化誤差や未学習領域に対して予測分布を拡張し，自己の信頼度低下を表現していることを示している．一方，外乱の弱い区間では概ね不確実性は低い値に保たれている。以上より，提案手法は制御性能の向上に加え，状態監視指標として有用な不確実性情報を提供できることが示された．

７．結論

本研究では，不確実性を考慮した IPMSM の高精度制御を目的として，BNN を用いた制御手法を提案し，提案手法は制御性能を維持しつつ，不確実性の増大を定量的に捉えられることを確認した．今後の状態監視や安全性評価への応用可能性が示された．

文　献

(1)増田葉太:ベイジアンニューラルネットワークを用いたサーボシステムのフィードバック誤差学習, (2023)

©2026 IEE Japan

性能境界ケースに基づくロバストPID調整手法

大野　正夫*（IHI）

A Robust PID Tuning Method Based on Performance Boundary Cases

Masao Ono (IHI)

１．はじめに

PID 調整では，ロバスト性確保のために過剰な変動を想定すると，平均的な性能が低下する。これに対し，熟練者は低評価な応答から最小限の変動を特定し，平均的な性能改善を図る。本稿では，熟練者評価が低い一方，他手法では高評価となる場合を「性能境界ケース」と定義し，これを最小限の変動として PID 調整を行う手法を提案する。

２．問題設定

例題を 2 次遅れ系G に対する PID ゲイン$\theta = (K_\mathrm{P}, K_\mathrm{I}, K_\mathrm{D})$の調整とする。制御対象集合は表 1 に示す固有角周波数ω，減衰係数ζ，ゲインk，むだ時間Lの組合せにより定義する。

表 1 制御対象Gの変数設定

Table 1. Plant Parameters

変数	設計ケース	検証ケース
ω	[1.0, 2.0, 3.0]	[1.5, 2.5, 3.5]
ζ	[0.7, 1.0, 1.3]	[0.6, 0.9, 1.2]
k	[1.0, 1.5, 2.0]	[1.2, 1.7, 2.2]
L	[0.00, 0.10, 0.20]	[0.05, 0.15, 0.25]

熟練者評価は，ステップ応答におけるオーバーシュート量 OS [%]と整定時間 Ts [s]（2%以内）に基づく 5 段階評価で模擬する。条件を以下に示す（該当なしは 2 点とする）。

・5 点：(OS ≤ 3%)　かつ　(Ts ≤ 7s)
・4 点：(OS ≤ 5%)　かつ　(Ts ≤ 8s)
・3 点：(OS ≤ 10%) かつ　(Ts ≤ 9s)
・1 点：(OS > 20%) または (Ts > 10s)

３．提案手法および数値例

最適なロバスト PID ゲインθ^*は，次式で求める。

$$\theta^* = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \max_{G \in \mathcal{P}} \{z(G,\theta) - \tilde{\mu}\}^T \tilde{\Sigma}^{-1} \{z(G,\theta) - \tilde{\mu}\} \quad (1)$$

ここで，z は性能指標ベクトル（OS，Ts，積分絶対誤差），$\tilde{\mu}$ と$\tilde{\Sigma}$は，目標平均ベクトルと分散共分散行列を表す。$\mathcal{P}$ は設計ケースから定義する制御対象集合であり，提案手法では性能境界ケースに限定することで，性能改善を図る。

性能境界ケースを求めるために，LLM（GPT-5 mini[(1)]）にステップ応答画像と性能指標(OS, Ts)を入力し採点した(プロンプトは既往研究[(2)]を参考に較正)。表 2 に，初期ゲイン$(1.0, 0.5, 0.1)$ に対する設計ケースの採点結果を示す。なお，以降, 熟練者評価を評価 1, LLM 評価を評価 2 と記載する。

表 2 設計ケースの採点結果（混同行列）

Table 2. Scoring Results for Design Case (Confusion Matrix)

		評価 2: LLM による採点			
		5	4	3-2	1
評価 1: 熟練者模擬	5	3	4	1	0
	4	0	5	7	0
	3-2	0	6	28	1
	1	0	2	20	4

次に(1)式によりθ^*を求める。$\tilde{\mu}$ と$\tilde{\Sigma}$は「両評価が 5 点」のケースから算出した。$\mathcal{P}$は「評価 1 が 2 点以上」を対象に，「両評価が 4 点」と以下の各 6 ケースで定義した。

・ベースライン：「評価 1 が 3~2 点」から 6 ケース抽出
・提案手法：「評価 1 が 3~2 点」のうち「評価 2 が 4 点」

なお, ベースラインでは過剰な変動を避けるため, ケース数を制限した。表 3 に, PID 調整結果を示す(a が初期ゲイン, b はベースライン, c は提案手法)。提案手法は，高評価の比率を改善し，結果として低評価の比率も低減した。

表 3 PID 調整結果（初期ゲインでの割合[%]に対する差分[pt]）

Table 3 Results of PID Tuning

	設計ケース			検証ケース		
得点	a[%]	b[pt]	c[pt]	a[%]	b[pt]	c[pt]
5-4	24.7	+2.5	+6.2	12.3	+8.7	+17.3
3-2	43.2	-6.2	+1.2	38.3	+2.4	+6.2
1	32.1	+3.7	-7.4	49.4	-11.1	-23.5
合計	100.0	±0.0	±0.0	100.0	±0.0	±0.0

※a: 初期ゲイン，b: ベースライン，c: 提案手法

４．まとめ

本稿では, 熟練者評価が低い一方, 他手法では高評価である「性能境界ケース」に対する PID 調整手法を提案した。簡易的な数値例により，性能向上の可能性を示した。

文　献

(1) OpenAI, GPT-5 mini model, https://platform.openai.com/docs/models/gpt-5-mini (2025.12.23 アクセス)
(2) Levi, E., et al., Intent-based prompt calibration: Enhancing prompt optimization with synthetic boundary cases, ICLR 2024 Workshop on Navigating and Addressing Data Problems for Foundation Models (2024)

©2026 IEE Japan

BLDC 駆動車輪型倒立振子による動的量子化器のデータ駆動設計手法の実験的評価

今塩屋　怜来*(兵庫県立大学)，荻尾　優吾（大阪大学），南　裕樹(兵庫県立大学)

Experimental Evaluation of a Data-Driven Design Method for Dynamic Quantizers Using a BLDC-Driven Wheeled Inverted Pendulum

Riku Imashioya (University of Hyogo), Yugo Ogio (The University of Osaka), Yuki Minami (University of Hyogo)

１．はじめに

近年，制御対象のハードウェア制約や省エネ化を背景として，量子化を考慮した制御系設計に関する研究が行われている．先行研究[1]では，動的量子化器のデータ駆動型設計アルゴリズムが提案されている．しかし，そのアルゴリズムの実験的検証は十分に行われていない．

一方で，実機検証においては，倒立振子のような不安定なメカトロニクス系がよく用いられるが，不感帯やバックラッシュといったモデル化の難しい非線形要素の存在によって，量子化器の性能を正確に評価できないことがある．

そこで本研究では，ブラシレス DC モータ（BLDC）を用いた車輪型倒立振子を構築し，動的量子化器のデータ駆動型設計アルゴリズムの実験的検証を行う．BLDC を用いることで，不感帯などの非線形要素の影響を最小限に抑え，シミュレーションに近い条件下での実験が可能となる．

２．BLDC 車輪型倒立振子

製作した BLDC 車輪型倒立振子を図 1 に示す．BLDC モータは，Roller485-Lite であり，制御用マイコンには，M5Stack FIRE を用いた．

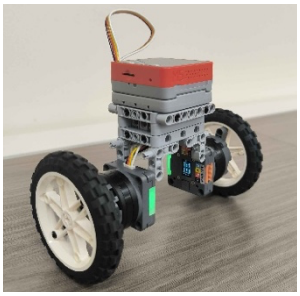


図 1 BLDC 車輪型倒立振子
Fig.1. Inverted Pendulum with BLDC

３．動的量子化器のデータ駆動設計アルゴリズム

＜3・1＞動的量子化器　　本研究で対象とする動的量子化器は，一様な静的量子化器と線形フィルタから構成されるものである．静的量子化器の量子化幅はdとし，事前に与えられるものとする．一方，線形フィルタの次数やパラメータは設計変数である．

＜3・2＞データ駆動設計アルゴリズム　　先行研究[1]では，制御対象の入出力データから動的量子化器の線形フィルタの設計パラメータを決定するデータ駆動設計アルゴリズム D４Q が提案されている．本研究では，これを利用する．

４．D4Q の実験的検証

図 2 は，状態フィードバック制御系において静的量子化器を用いたときの制御実験の結果である．上段が入力，下段が出力（ボディの角度）であり，青線が量子化器を用いない場合，赤線が量子化器を用いた場合の結果である．そして，この入出力データを用いて，D4Q で動的量子化器を設計し，それを用いて制御実験をした結果が図 3 である．両者を比較すると，動的量子化器の方が性能が良いことがわかり，D4Q によってうまく設計できていることが確認できる．

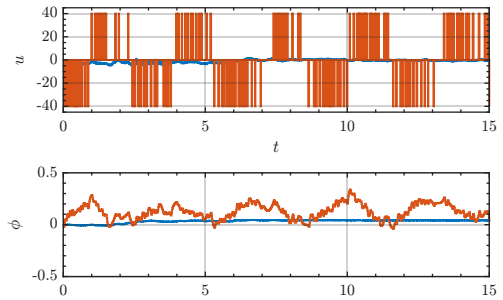


図 2 静的量子化器を用いた制御実験の結果
Fig.2. Experimental result with static quantizer

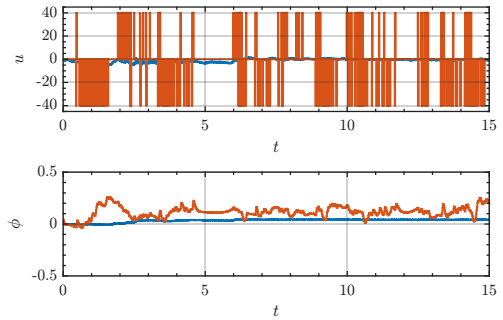


図 3 動的量子化器を用いた制御実験の結果
Fig.3. Experimental result with dynamic quantizer

謝辞：本研究の一部は，JSPS 科研費 JP23K28369 の助成を受けたものです．記して感謝を表します．

文　献

(1) Y. Fujimoto and Y. Minami: D4Q: Data-Driven Design of Dynamic Quantizer — Proposal of Method and Experimental Validation –, IEEE Transactions on Automatic Control (2025)

©2026 IEE Japan

多色光を用いた移動ロボットの外部刺激型速度制御・経路誘導

西村　卓隼*(兵庫県立大学)，荻尾　優吾（大阪大学），南　裕樹(兵庫県立大学)

External Stimulus-Driven Speed Control and Path Guidance of a Mobile Robot Using Multicolor Light

Takuto Nishimura (University of Hyogo), Yugo Ogio (The University of Osaka),
Yuki Minami (University of Hyogo)

１．はじめに

先行研究[1]では，交通インフラの一つであるペースメーカーライトの仕組みに着想を得て，移動ロボットの速度制御を行う手法を提案している．これは，外部環境から与えられる光刺激を利用した非接触型の制御手法である．しかしながら，先行研究では，単色 LED による光刺激を用いた速度制御問題に限定しており，多色 LED の活用や経路誘導問題については検討されていなかった．

そこで本研究では，多色光を外部刺激として用いることでロボットの速度や運動モードを切り替える制御問題に取り組む．具体的には，各色の光にあらかじめ異なる速度や動作を制御則として割り当てることで，停止，直進，方向転換などの挙動を外部から制御する．さらに，多色光の空間的配置を設計することにより，移動ロボットの速度制御および経路誘導を実現するアプローチについて検討する．

２．光刺激型制御システムの概要

本研究で用いる光刺激型制御システムを図 1 に示す．このシステムは，移動ロボットと LED ラインテープから構成されている．移動ロボットは差動二輪型の Pololu 3pi+ 32U4 であり，ロボットには，光センサ TSL2591 が取り付けられている．また，LED ラインテープは SSCI-013994 であり，フルカラーの LED が一定間隔に配置されている．

図 1 光刺激型制御システム
Fig.1. Light stimulus-driven control system

３．速度制御・経路誘導アルゴリズム

本研究では，白（W），赤（R），青（B）の３色の光と消灯（N）を組み合わせることで移動ロボットを制御する．移動ロボットの並進速度をv，旋回速度をωとしたとき，ロボットの制御則を表 1 のように与える．つまり，ロボットが光を検知しないときは並進速度v_0で直進し，白色を検知したときには，並進速度v_1で直進する．そして，赤色を検知したときは，旋回速度ω_0で左旋回，青色を検知したときは，旋回速度ω_0で右旋回をする．

このとき，LED の消灯と LED の白色点灯のパターンを適切に決定することで，並進速度を制御する．一方，経路誘導においては，白色，赤色，青色の点灯パターンを生成する．

表 1 移動ロボットの制御則
Table 1. Control raw for mobile robot

LED	並進速度$\boldsymbol{v}$	旋回速度$\boldsymbol{\omega}$
消灯（N）	v_0	0
白色（W）	v_1	0
赤色（R）	0	ω_0
青色（B）	0	$-\omega_0$

４．速度制御実験

本稿では紙面都合上，速度制御実験の結果のみを示す．生成した LED 点灯パターンとロボットの平均移動速度を表 2 に示す．ただし、$v_1 = 2.5v_0$とした．また，白色（W）を○，消灯（N）を●で表す．これより，点灯パターンを変えることで，速度調整がある程度実現できることが確認できる．

表 2 点灯パターンとロボットの速度
Table 2. Lighting pattern and robot speed

LED パターン	速度$\boldsymbol{v}$ [m/s]
○○○○○○○○○○○○	0.368
○●○●○●○●○●○●○	0.269
○○●○○●○○●○○●○	0.298
○○○●○○○●○○○●○	0.327
○●●○●●○●●○●●○	0.183
○○●●○○●●○○●●○	0.249
○○○●●○○○●●○○○	0.256

謝辞：本研究の一部は，JSPS 科研費 JP23K28369 の助成を受けたものです．記して感謝を表します．

文　献

(1) 三谷，鈴木，南，石川：ペースメーカーライトを利用した移動ロボットの速度制御，日本機械学会論文集，Vol. 89, No. 918, 22-00250 (2023)

©2026 IEE Japan

プラント特性変動に対する予測指向型ロバスト制振学習制御 [1]

寺本 匠汰，前田 佳弘（名古屋工業大学）

Prediction-Oriented Robust Vibration Suppression Learning Control for Plant Variations

Shota Teramoto, Yoshihiro Maeda (Nagoya Institute of Technology)

1. 緒　　言

産業用メカトロニクスにおける精密位置決め機構の高速・高精度制御において，機構共振振動の抑制およびプラント特性変動に対するロバスト化は，生産性と生産品質に直結する重要な制御設計課題である。本論文では，単一の位置決め動作データ (学習データ) を用いてプラント特性変動時の応答を予測し，ロバストな制振性能を実現するフィードフォワード (FF) 補償器を設計する，データ駆動型ロバスト制振学習制御法を提案する。提案法は，応答予測をパラメトリックモデルに基づいて行う点に特徴があり，経験指向型アプローチ [(1)(2)] と比べて学習データ取得のための実験工数を削減するとともに，予測指向型アプローチの従来法 [(3)] では困難であったトルク定数以外のパラメータ変動に対するロバスト化を可能とする。提案法の有効性は，ガルバノスキャナを用いた実験により検証する。

2. 問題設定

〈2･1〉 ガルバノスキャナ　本研究では，プリント基板レーザ加工機に用いられるガルバノスキャナを制御対象とする。ガルバノスキャナでは，エンコーダによりモータ角変位を検出し，これをフィードバック (FB) 信号として，モータ軸端に接続されたミラー角変位をセミクローズド制御する (制御周期 $T_\mathrm{s} = 20\ \mu$s)。高加減速駆動時には，モータとミラーの連成による共振振動が生じる [(4)]。また，自己発熱や周囲温度変化によりトルク定数および共振周波数が変動し，位置決め精度の低下を招く [(5)]。恒温機により周囲温度を変化させた場合のガルバノスキャナにおける，制御入力からモータ・ミラー角変位 [2] までの周波数特性を図 1 に示す。モータとミラーは異なる共振モード特性を有しており，周囲温度の変化に伴ってトルク定数および共振周波数が変動していることが確認できる。35 °C をノミナル条件とした場合，±5 °C の温度変化に対するトルク定数および各共振周波数の変動率は，±0.5 ～ ±0.6 % 程度である。

本研究における目標制御仕様は，周囲温度が 30 ～ 40 °C の範囲で変化し，プラント特性変動が生じる状況下において，ストローク 6.6 mrad の位置決め動作を行った際に，モータとミラーの両方に対して，0.7 ms 以内に整定精度 ±23.1 μrad，ならびに 1.7 ms 以内に整定精度 ±9.9 μrad を達成することと定義する。

[1] 本研究の一部は科研費 24K04545 の助成を受けたものである。また，本研究で使用した実験装置はビアメカニクス株式会社より提供されたものである。

[2] ミラー角変位は，評価用として PSD を用いて観測している。制御設計には用いていない。

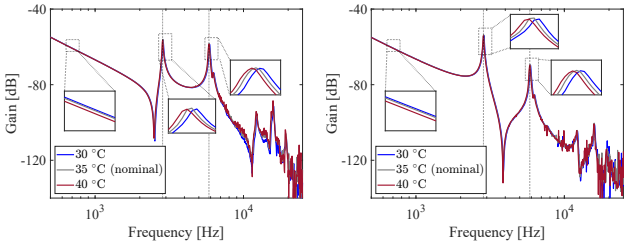


図 1　温度変化時のガルバノスキャナの周波数特性: (a) モータ; (b) ミラー

Fig. 1.　Frequency characteristics of the galvano scanner under temperature variations: (a) motor; (b) mirror

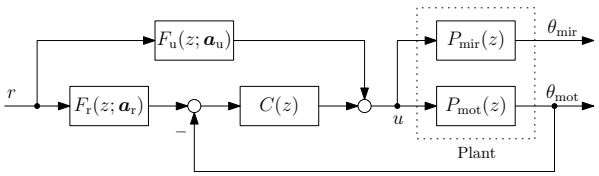


図 2　2 自由度位置決め制御系のブロック線図

Fig. 2.　Block diagram of the two-degree-of-freedom position control system

〈2･2〉 位置決め制御系　本研究で用いる位置決め制御系のブロック線図を図 2 に示す。図中，r：ステップ角変位指令，u：制御入力，$\theta_\mathrm{mot}, \theta_\mathrm{mir}$：モータおよびミラーの角変位，$P_\mathrm{mot}(z), P_\mathrm{mir}(z)$：モータおよびミラーの伝達特性，$C(z)$：FB 補償器，$F_\mathrm{r}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{r}), F_\mathrm{u}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{u})$：FF 補償器，$\boldsymbol{a}_\mathrm{r}, \boldsymbol{a}_\mathrm{u} \in \mathbb{R}^{36}$：FF 補償器パラメータベクトルである。設計対象となる $F_\mathrm{r}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{r}), F_\mathrm{u}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{u})$ は次式で定義される。

$$\begin{aligned} F_\mathrm{r}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{r}) &= \begin{bmatrix} 1 & z^{-1} & \cdots & z^{-35} \end{bmatrix} \boldsymbol{a}_\mathrm{r} \\ F_\mathrm{u}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{u}) &= \begin{bmatrix} 1 & z^{-1} & \cdots & z^{-35} \end{bmatrix} \boldsymbol{a}_\mathrm{u} \end{aligned} \tag{1}$$

FF 補償器設計の目的は，目標制御仕様を満足する $\boldsymbol{a}_\mathrm{r}$ および $\boldsymbol{a}_\mathrm{u}$ を，ノミナル条件下で取得した単一の位置決め動作データ (学習データ) $\mathcal{D} = \{r(t), \theta_\mathrm{mot}(t)\}, t = [0, 175] \in \mathbb{Z}$ を用いてデータ駆動設計することである。

3. 提案法の理論概要

〈3･1〉 設計問題　提案法では，プラント特性変動に対してロバストな FF 補償器を設計するために，次式で定義される予測指向型ロバスト最適化問題を考える。

$$\begin{aligned} &\min_{\boldsymbol{a}_\mathrm{r}, \boldsymbol{a}_\mathrm{u}} \ \mathcal{J}_\mathrm{e}(\boldsymbol{a}_\mathrm{r}, \boldsymbol{a}_\mathrm{u}) + w_\mathrm{u}\mathcal{J}_\mathrm{u}(\boldsymbol{a}_\mathrm{u}) + w_\mathrm{rob}\mathcal{J}_\mathrm{rob}(\boldsymbol{a}_\mathrm{r}, \boldsymbol{a}_\mathrm{u}) \\ &\text{s.t.} \ \ \mathcal{C}_\mathrm{s}(\boldsymbol{a}_\mathrm{r}) \end{aligned} \tag{2}$$

©2026 IEE Japan

ここで，$\mathcal{J}_\mathrm{e}$: 連成振動制振のための目的関数，$\mathcal{J}_\mathrm{u}$: FF 制御入力の Jerk 最小化のための目的関数，$\mathcal{J}_\mathrm{rob}$: プラント特性変動に対するロバスト化のための目的関数，$\mathcal{C}_\mathrm{s}$: $F_\mathrm{r}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{r})$ の定常特性に対する等式制約，$w_\mathrm{u}, w_\mathrm{rob} \in \mathbb{R}$: 重み係数である。$\mathcal{J}_\mathrm{e}, \mathcal{J}_\mathrm{u}, \mathcal{C}_\mathrm{s}$ の詳細は文献 (3) (4) を参照されたい。

〈3･2〉 パラメトリックモデルベース応答予測 プラント特性変動時の応答予測に用いるモータ側プラントモデル $\tilde{P}_\mathrm{mot}(z;\boldsymbol{\rho})$ は，s 領域伝達関数で表現すると，次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\tilde{P}_\mathrm{mot}(s;\boldsymbol{\rho}) &= \tilde{K}_\mathrm{t} e^{-\tilde{L}_\mathrm{mot} s} \sum_{i=0}^{3} \frac{\tilde{k}_{\mathrm{mot}i}}{s^2 + 2\tilde{\zeta}_i\tilde{\omega}_i s + \tilde{\omega}_i^2} \\ \boldsymbol{\rho} &= \Big[\tilde{K}_\mathrm{t} \quad \tilde{L}_\mathrm{mot} \quad \tilde{k}_{\mathrm{mot}0} \quad \tilde{\zeta}_0 \quad \tilde{\omega}_0 \\ &\qquad \cdots \quad \tilde{k}_{\mathrm{mot}3} \quad \tilde{\zeta}_3 \quad \tilde{\omega}_3\Big]^\top \in \mathbb{R}^{14}\end{aligned} \tag{3}$$

ここで，$\tilde{K}_\mathrm{t}$: トルク定数，$\tilde{L}_\mathrm{mot}$: 等価むだ時間，$\tilde{k}_{\mathrm{mot}i}, \tilde{\zeta}_i, \tilde{\omega}_i$: i 次共振モードのモーダルゲイン，減衰係数，共振角周波数である。モデルパラメータベクトル $\boldsymbol{\rho}$ は，ノミナル温度条件で取得した学習データ $\mathcal{D}$ に対する時間領域のカーブフィッティングを行って同定する。本研究では，協調型最適化手法 [6] を応用して同定を行った。

プラント特性変動時のモータ角変位応答の予測値 $\hat{\theta}_\mathrm{mot}(t)$ は，事前知識に基づいて設定した N_γ 通りの変動パラメータ $\boldsymbol{\rho}^{\langle\gamma\rangle}, \gamma = [1, N_\gamma] \in \mathbb{Z}$ を，(3) 式のモデルに与えることで獲得する。これにより，時間区間 $t = [T_1, T_2] \in \mathbb{Z}$ における変動応答の抑圧問題として，$\mathcal{J}_\mathrm{rob}$ を次式で定義する。

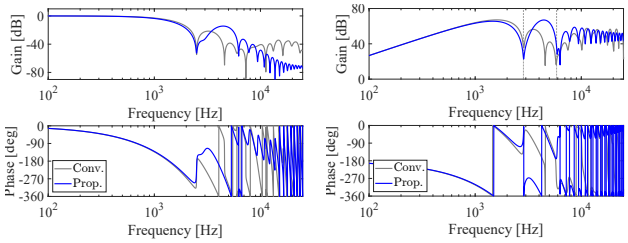
$$\mathcal{J}_\mathrm{rob}(\boldsymbol{a}_\mathrm{r}, \boldsymbol{a}_\mathrm{u}) = \frac{1}{N_\gamma} \sum_{\gamma=1}^{N_\gamma} \sum_{t=T_1}^{T_2} \Big(r(t) - \hat{\theta}_\mathrm{mot}(t; \boldsymbol{\rho}^{\langle\gamma\rangle}, \boldsymbol{a}_\mathrm{r}, \boldsymbol{a}_\mathrm{u})\Big)^2 \tag{4}$$

(4) 式は，$\boldsymbol{a}_\mathrm{r}$ および $\boldsymbol{a}_\mathrm{u}$ の二次形式として定式化でき，(2) 式は等式制約付き最小二乗問題として求解可能である。

4. 位置決め実験評価

周囲温度を $\{30, 35, 40\}$ °C と変化させることでガルバノスキャナの特性変動を実際に発現させ，提案法および従来法 [3] により設計した FF 補償器によるロバスト制振性能を評価する。提案法におけるロバスト目的関数の定義に際して，変動を仮定するモデルパラメータは事前知識に基づいて $\{\tilde{K}_\mathrm{t}, \tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \tilde{\omega}_3\}$ とし，各パラメータをノミナル値から ±0.6 % の範囲で変動させた計 $N_\gamma = 16$ 条件の変動応答の予測を行った。変動応答の評価区間は $T_1 = 36, T_2 = 105$ とし，(2) 式中における重み w_u ならびに w_rob は予測応答を確認しながら調整した。

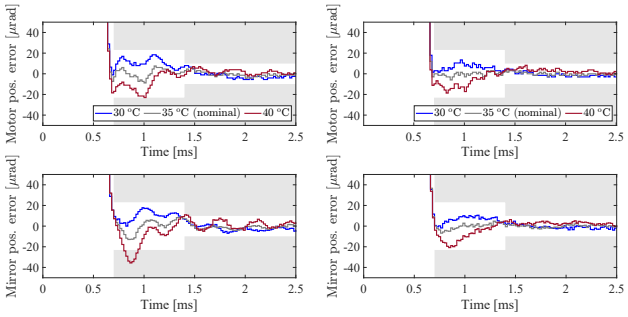
設計した FF 補償器 $F_\mathrm{r}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{r}), F_\mathrm{u}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{u})$ の周波数特性を図 3 に示すと共に，位置決め動作時におけるモータおよびミラーの角変位偏差応答 $r(t) - \theta_\mathrm{mot}(t), r(t) - \theta_\mathrm{mir}(t)$ を図 4 に示す。図 3 より，提案法は従来法と比較して，共振モードが存在する周波数帯のゲインを抑制する FF 補償器特性を有している。その結果，図 4 に示す位置決め応答では，特に 1 次共振モード起因の共振振動がモータならびにミラーの両方で低減されており，全ての温度条件において目標制御仕様を満足する位置決め性能が実現されている。



(a) (b)

図 3 FF 補償器の周波数特性: (a) $F_\mathrm{r}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{r})$; (b) $F_\mathrm{u}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{u})$

Fig. 3. Frequency characteristics of the FF compensators: (a) $F_\mathrm{r}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{r})$; (b) $F_\mathrm{u}(z;\boldsymbol{a}_\mathrm{u})$



(a) (b)

図 4 温度変化時のモータ・ミラー角変位偏差応答波形: (a) 従来法; (b) 提案法

Fig. 4. Waveforms of the motor and mirror angular position errors under temperature variations: (a) conventional method; (b) proposed method

5. 結 言

本論文では，プラントのトルク定数ならびにモーダルパラメータの変動に対するロバスト制振学習制御法を提案した。提案法は，パラメトリックモデルに基づいてプラント特性変動時の応答を予測することにより，従来法と比較して，より多様なプラント特性変動に対してロバストな FF 補償器設計を可能とする。提案法の有効性は，ガルバノスキャナを用いた位置決め実験により検証された。

文 献

（1） A. Cordoba-Pacheco et al., IEEE Trans. Control Syst. Technol., Vol. 33, No. 5, pp. 1757–1770, 2025
（2） Y. Maeda et al., Proc. IFAC Symp. Mechatron., 2025
（3） 山口 他 : 電学研資, CT-25-015, pp. 55–60, 2025
（4） S. Teramoto et al., Proc. IEEE Int. Conf. Mechatron., 2025
（5） Y. Maeda et al., IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 70, No. 10, pp. 10466–10475, 2023
（6） Sato et al., IEEE Open J. Ind. Electron. Soc., Vol. 706, 309–319, 2025

©2026 IEE Japan

姿勢適応ダイナミックインピーダンス制御と相対速度補償を統合したロボットアーム動的壁面追従システム

細山　快聖*，黄　慶九 准教授(工学院大学大学)

Dynamic Wall-Following Control Based on
Posture-Adaptive Dynamic Impedance Control and Relative Velocity Compensation of Robot arm

Hosoyama Kaisei, Qingjiu Huang(Kogakuin University)

1. はじめに

産業用ロボットは製造業を中心に幅広く活躍しているが、動的に変化する環境への適応性が課題となっている。特に、振動する壁面や移動する対象物への力制御においては、環境の動きを考慮した制御手法が必要である。振動する壁面に対する高精度な力制御を実現するため、姿勢適応ダイナミックインピーダンス制御と相対速度補償を統合した制御手法を提案する。

2. 6 自由度ロボットアームの構造

今回、6 自由度ロボットアームは PUMA 型ロボットアームである DENSO PUMA VP シリーズ 6242[1] を使用する。

3. 姿勢適応ダイナミックインピーダンス制御

ダイナミックインピーダンスを用いた 6 自由度ロボットアームのハイブリッド制御のブロック線図を図 2 に示す。

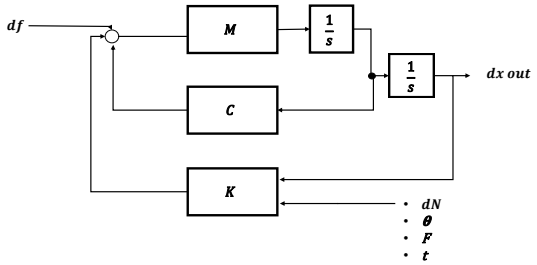


図 1. インピーダンス制御のブロック線図

定常偏差の最小値定理によって剛性行列K_iを式(1)のように求められる。また、2 次形式の過渡応答によって、インピーダンスのダイナミック慣性行列M_iを式(2)、ダイナミック粘性行列C_iを式(3)のように求められる。

$$K_i \gg \left|a\frac{D}{J^T}\right|,\ K_i = \left|\frac{1}{J^T}\right| \times K \times D \quad \cdots (1)$$

$$M_i = \left|\frac{1}{J^T}\right| \times \frac{K \times D}{\omega_n^2} \quad \cdots (2)$$

$$C_i = 2 \times \zeta \times \left|\frac{1}{J^T}\right| \times \frac{K \times D}{\omega_n} \quad \cdots (3)$$

ここで、ζは減衰係数、ω_nは固有振動数であり、それらの値は$\zeta = 0.707, \omega_n = 100[\mathrm{Hz}]$とした。

4. ヤコビアン行列 (Jacobian Matrix)

逆ヤコビアンを用いて手先の目標速度から関節角速度を計算する際に使用する為、関節速度と手先速度の関係を表す 6×6 のヤコビアン行列を計算する。DH 法[2]に基づく変換行列から各関節の回転軸ベクトルと位置ベクトルを抽出し、外積演算により線速度成分を計算する。さらに、特異点近傍での数値不安定性を回避するため、減衰最小二乗法[3]を適用した擬似逆行列により安定した制御を実現している。減衰最小二乗法を式(4)に示す。

$$J^*(\theta) = J^T(JJ^T + KI)^{-1} \quad \cdots (4)$$

5. 相対速度補償

動的環境下での力制御において、ロボットと壁の相対速度を考慮することが重要である。従来の制御ではロボット速度のみを用いていたため、壁が振動している場合に正確な減衰力を計算できなかった。本研究では、8 つの接触点それぞれにおいて相対速度を計算し、減衰項に適用した。

6. フィードフォワード制御

壁の振動を予測補償するため、フィードフォワード制御を導入した。フィードフォワード・フィードバックのそれぞれで得られた、壁の変位、速度情報を用いて、 目標力に対する補償量を事前計算することで、追従精度の向上に繋げた。

7. シミュレーション

MATLAB/Simulink を用いて 6 自由度ロボットアームで動的壁面の押しつけ動作のシミュレーションを行った。この実験の目的としては追従制御だけでなく今回提案した制御手法の有効性を示すものである。図 3 には追従制御のみの結果を、図 4 には今回提案した姿勢適応ダイナミックインピーダンス制御と相対速度補償を統合した動的壁面追従システム適応後の結果を示す。実験内容としては壁の振動は 15 秒から始まるものとする。壁は X 方向にも Y 方向にも 同時に 30 度ずつ傾いている壁であり、振動は振幅 0.05ｍ、周波数 0.5rad/sec の余弦波で位置変化をいている。目標値は 5N である。

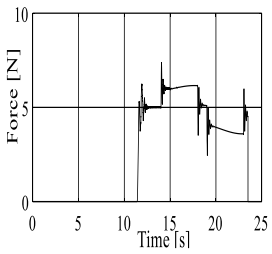


図.2 追従制御のみの力

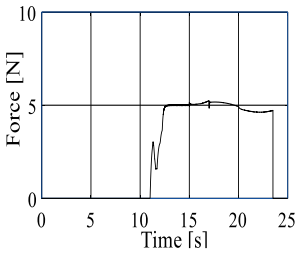


図.3 提案法の力

8. まとめ

本研究では、姿勢適応ダイナミックインピーダンス制御、相対速度補償、フィードフォワード制御を統合した動的壁面追従システムを提案した。DENSO PUMA VP シリーズ 6242 6 自由度ロボットを用いたシミュレーションにより、従来の固定パラメータ制御に追従制御を加えたものだと、シミュレーションを通して、最大で約 1.5N の差がついているのに対して、提案した制御手法であれば最大でも 0.5N 差に収まっており、大幅に追従性能が向上したことを確認した。今後の課題として、実機実験による検証、様々な振動パターンへの対応、機械学習を用いたパラメータ最適化などが挙げられる。

9. 参考文献

[1] 花房拓哉、令和 1 年工学院大学電気電子工学専攻卒業論文。
[2] 中嶋駿、令和 2 年工学院大学電気電子工学科卒業論文。
[3] Yoshihiko Nakamura, Hideo Hanafusa, 1986, Inverse Kinematic Solutions With Singularity Robustness for Robot Manipulator Control.

©2026 IEE Japan

単純適応制御系の適応ゲインの CGT 解への収束条件とパラメータ推定への応用

川名俊旭，黄 慶九（工学院大学）

Convergence Conditions of Adaptive Gains to CGT Solutions in Simple Adaptive Control and Their Application to Parameter Estimation

Tosiaki Kawana, Huang Qingjiu (Kogakuin University)

1. はじめに

単純適応制御(SAC)系の適応ゲインの収束値は一般には特定の値にはならないが、規範モデルと制御対象が同一の次数であること、どちらも可観測標準形とすること、零点が一致することなどの条件のもとでは理想的なフィードフォワードゲインであるコマンドジェネレータトラッカ(CGT)解に収束することを示した。また、この性質を用いることで、零点の一致または近接という非常に限定的な状況に限るものの、適応ゲインの定常値から制御対象のパラメータを推定できることをシミュレーションによって確認した。

2. 単純適応制御と CGT 解

n次の 1 入出力制御対象と規範モデルについて、SAC 系により出力誤差が 0 となる条件の 1 つとして、CGT 解 $\tilde{K}_x, \tilde{K}_u$が存在するという条件[2]がある。通常、SAC 系の適応ゲインはその CGT 解とは一致しない[1]が、この研究では ASPR な 3 次系までの場合について、一致する条件としてシステムを可観測標準形で実現すること、入力信号を十分に複雑(PE)にすること、規範モデルと制御対象の零点が一致または十分に近いことなどがあることを示せた。CGT 条件式と 2 次系の場合の推定式を以下に示す。

$$\begin{pmatrix} A_p & B_p \\ C_p & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} S_a & S_b \\ \tilde{K}_x & \tilde{K}_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_a A_m & S_a B_m \\ C_m & 0 \end{pmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -a_{m_{22}}k_{x_{11}} + k_{x_{12}} & a_{m_{12}}k_{x_{11}} \\ 0 & 1 & k_{x_{11}} & k_{x_{12}} \\ 0 & 0 & -b_{m_{21}}k_{x_{11}} + k_{u_{11}} & b_{m_{11}}k_{x_{11}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_{p_{12}} \\ a_{p_{22}} \\ b_{p_{11}} \\ b_{p_{21}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m_{12}} \\ a_{m_{22}} \\ b_{m_{11}} \end{bmatrix}$$

適応制御によって適応ゲインが CGT 解と一致すれば、制御対象の零点(B 行列)が既知とできる場合には推定式を用いて規範モデルと適応ゲインからすぐにA_p, B_pを推定できるが、B 行列を未知とした場合この式は未知数が式より多くなるため、2 組の規範モデルを用い、得られた式を疑似逆行列を用いて解く。零点の一致は未知プラントの推定時には困難になるが、制御対象の構造などによって満たせる場合には以上の手順で推定できると考えられる。その推定法の構成を図 1 に示す。

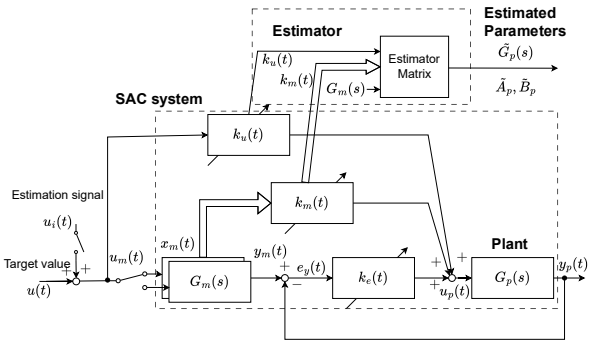


図 1 推定器を組み込んだ単純適応制御系

3. シミュレーション

MATLAB/Simulink を用い、パラメータ推定のシミュレーションを行った。ただし、2 次系の場合は制御対象の零点は既知として制御対象と規範モデルの零点を非常に近く設定した。

(1) 1 次系および 2 次系

制御対象が 1 次系、および ASPR な 2 次系の場合、適応ゲインは理論的な CGT 解に対し誤差 1%未満で収束した。1 次系での 2 種類の入力とそれぞれの場合の適応ゲインのグラフを図 2 に示す。定値入力状態ではk_x, k_uは変化しないこと、異なる入力信号でも一定値に収束していくことがわかる。2 次系については不安定極を 1 つ設けたが、安定化と出力追従を行いながら問題なく推定できた。パラメータ推定の結果は真値に対する誤差は数%以内に収まった。

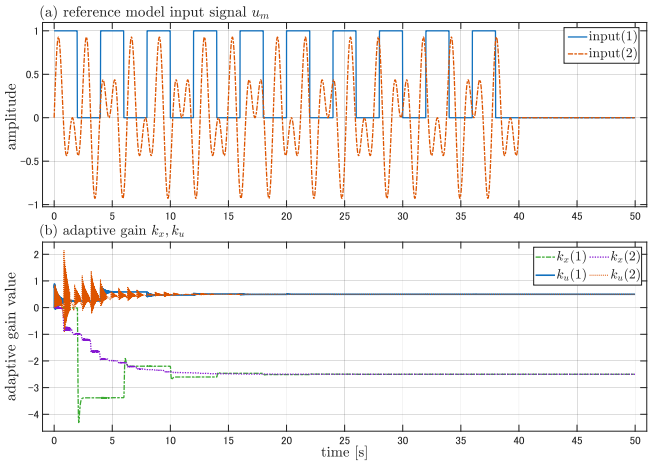


図 2 1 次系での入力信号と適応ゲインのグラフ

(2) 3 次系(PFC 付加 2 次遅れ系)

ASPR 条件を満たさない 2 次遅れ系に対し、並列フィードフォワード補償器[2] (PFC) を付加して ASPR な 3 次系とした対象について検証を行ったところ、適応ゲインの収束は遅く、かつ CGT 解への収束精度が低下した。推定結果は最大 50%近い誤差が生じた。追従偏差はほぼ 0 であり、適応ゲインの細かな振動や急激な変化が現れたことから、零点の不一致などのほかに数値的な不安定性が影響している可能性がある。また、零点はn次方程式の解であるため、3 次以降では零点の位置関係を明確に表すことが難しくなる。

4. おわりに

推定式の形から、この推定法は零点が既知の場合に極を推定できる手法であると考えられる。収束条件の 1 つである制御対象とモデルの零点の一致は一般には未知プラントに対しては困難であり、また推定可能な場合でも推定精度や速度は従来の RLS 法と比較して低い。一方、本手法は SAC 系の構成をほぼそのまま使え、不安定系についても安定化しつつ推定が可能な利点がある。零点条件の緩和の可能性などについて今後さらに調査する必要がある。

参考文献

[1]Barkana, Itzhak: *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 19 (1): 13–40. (2005)
[2]岩井善太,水本郁朗,大塚弘文:単純適応制御 SAC, 森北出版(2008)

©2026 IEE Japan

応答推定法に基づく時間領域線形制約付きデータ駆動型制御器調整法

伊藤　金次郎*，弓場井　一裕，矢代　大祐，駒田　諭（三重大学）

Data-Driven Controller Tuning Method Based on Response Estimation Time-Domain Linear Constraints

Kinjiro Ito*, Kazuhiro Yubai, Daisuke Yashiro, and Satoshi Komada (Mie University)

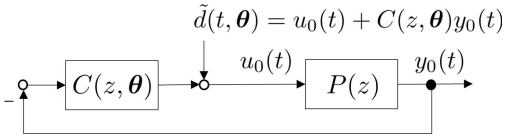


図１　疑似外乱信号概念図
Fig.1.　Concept of fictitious disturbance signal

1. 緒　　言

近年，データ駆動型制御器調整法は熱心に研究されている。この方法は，制御対象から得た時系列入出力データを用いて直接制御器を調整するため，制御対象のモデル化の手間を省くことができ，短時間かつ低コストで制御器の最適化を行うことができる。これまでに VRFT[(1)](Virtual Reference Feedback Tuning) や FRIT[(2)](Fictitious Reference Iterative Tuning) など，多くのデータ駆動型制御器調整法が提案されているが，大半の手法では制御対象の推定を行わないため，最適化後に得られる制御器の性能を，実機に実装するまで事前に確認できないという欠点がある。その結果，得られた制御器によっては，実機実装時に所望の性能を達成できない可能性や制御系が不安定化する恐れがあった。

上記の問題点を改善するために，Sakatoku らは応答推定法 [(3)] を提案し，制御対象の１組の時系列入出力データから制御対象のインパルス応答を直接推定することを可能とした。この手法により，ステップ入力などの特定の入力に対する応答の推定値に制約を設けることで，実際の運用時の応答が時間領域における制約を満足する制御器を調整することが可能となった。また，参照モデルを必要とする従来手法では，最適化後の制御系が不安定になった場合，参照モデルを変更した上で，再度最適化を行う必要があった。これに対し，応答推定法は参照モデルを必要とせず，推定値に基づいて最適化を行うため，このような再設定は不要である。しかし，応答推定法にも問題点が存在する。この手法により得られる推定値系列は制御器パラメータに対して非凸となるため，推定値系列に対する上下限制約付き最適化問題は非線形最適化問題となってしまう。

そこで本稿では，応答推定法によって得られる推定値系列を繰り返し最適化における前回の解まわりで一次のテイラー展開により線形近似し，この近似系列を用いて設計問題を定式化することで，設計問題全体を線形制約付き最適化問題として扱うことを可能とし，上記の問題点を改善する。最後に，シミュレーションを通して提案手法の有効性を示す。

2. 応答推定法

本節では，文献 [(3)] で提案された疑似外乱信号を用いた閉ループ応答推定法について簡潔に説明する。この方法は，制御対象 $P(z)$ の 1 組の時系列入出力データ $\{u_0(t), y_0(t)\}(t = 1, 2, ..., N)$ から，(1) 式で定義される疑似外乱信号 $\tilde{\boldsymbol{d}}(\boldsymbol{\theta}) = [\tilde{d}(1,\boldsymbol{\theta})\ \tilde{d}(2,\boldsymbol{\theta})\ ...\ \tilde{d}(N,\boldsymbol{\theta})]^{\mathrm{T}}$ を導入することによって，任意の制御器 $C(z,\boldsymbol{\theta})$ を含む閉ループ系に参照値 $\boldsymbol{r} = [r(1)\ r(2)\ ...\ r(N)]^{\mathrm{T}}$ を与えた時の信号系列 $\hat{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\theta}) = [\hat{u}(1,\boldsymbol{\theta})\ \hat{u}(2,\boldsymbol{\theta})\ \cdots\ \hat{u}(N,\boldsymbol{\theta})]^{\mathrm{T}}$ と $\hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}) = [\hat{y}(1,\boldsymbol{\theta})\ \hat{y}(2,\boldsymbol{\theta})\ \cdots\ \hat{y}(N,\boldsymbol{\theta})]^{\mathrm{T}}$ を推定する。

ここで，疑似外乱信号は以下のように定義する。

$$\tilde{d}(t,\boldsymbol{\theta}) = u_0(t) + C(z,\boldsymbol{\theta})y_0(t) \tag{1}$$

$\tilde{d}(t,\boldsymbol{\theta})$ を図１のように印加したとき，制御対象 $P(z)$ の入出力は任意の制御器 $C(z,\boldsymbol{\theta})$ に対して，それぞれ $u_0(t)$ と $y_0(t)$ に固定される。また，$\tilde{d}(t,\boldsymbol{\theta})$ から $y_0(t)$ までの入出力関係は $y_0(t) = P(z)/(1 + P(z)C(z,\boldsymbol{\theta}))\tilde{d}(t,\boldsymbol{\theta})$ であるから，参照値 $\boldsymbol{r}$ に対して，$w(t,\boldsymbol{\theta}) = P(z)/(1 + P(z)C(z,\boldsymbol{\theta}))r(t)$ を満たす系列 $\boldsymbol{w}(\boldsymbol{\theta}) = [w(1,\boldsymbol{\theta})\ w(2,\boldsymbol{\theta})\ \cdots\ w(N,\boldsymbol{\theta})]^{\mathrm{T}}$ は $\tilde{d}(1,\boldsymbol{\theta}) \neq 0$ ならば (2) 式のように計算できる。

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{w}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{Y}\tilde{\boldsymbol{D}}(\boldsymbol{\theta})^{-1}\boldsymbol{r} \qquad (2)\\
&\tilde{\boldsymbol{D}}(\boldsymbol{\theta}) = [\tilde{\boldsymbol{d}}_1(\boldsymbol{\theta})\ \tilde{\boldsymbol{d}}_2(\boldsymbol{\theta})\ \cdots\ \tilde{\boldsymbol{d}}_N(\boldsymbol{\theta})]\\
&\tilde{\boldsymbol{d}}_k(\boldsymbol{\theta}) = [0_{1\times k-1}\ \tilde{d}(1,\boldsymbol{\theta})\ \tilde{d}(2,\boldsymbol{\theta})\ \cdots\ \tilde{d}(N-k+1,\boldsymbol{\theta})]^{\mathrm{T}}\\
&\qquad (k = 1, 2, ..., N)
\end{aligned}$$

つまり，参照値 $\boldsymbol{r}$ に対する制御量 $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{\theta})$ は $\boldsymbol{w}(\boldsymbol{\theta})$ を制御器 $C(z,\boldsymbol{\theta})$ に通すことで以下のように推定できる。

$$\hat{y}(t,\boldsymbol{\theta}) = \frac{P(z)C(z,\boldsymbol{\theta})}{1 + P(z)C(z,\boldsymbol{\theta})}r(t) = C(z,\boldsymbol{\theta})w(t,\boldsymbol{\theta})$$

同様にして，参照値 $\boldsymbol{r}$ に対する制御入力 $\hat{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\theta})$ も推定することができる。

3. 提案手法

本節では，応答推定法の問題点を改善するため，推定値系列を繰り返し最適化における前回の解周りで一次のテイラー展開をし，その近似系列を用いた設計問題を定式化する。

〈3･1〉 設計問題に用いる表記　制御器調整に用いる参照値系列を $\boldsymbol{r}_{\mathbf{e}} = [r_{\mathrm{e}}(1)\ r_{\mathrm{e}}(2)\ \cdots\ r_{\mathrm{e}}(N)]^{\mathrm{T}}$，評価として用いる制約式の上界を ε とし，時間領域での設計仕様から実現したい閉ループ応答の上限を $\boldsymbol{y_U} = [y_U(1)\ y_U(2)\ ...\ y_U(N)]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{u_U} = [u_U(1)\ u_U(2)\ ...\ u_U(N)]^{\mathrm{T}}$，下限を $\boldsymbol{y_L} = [y_L(1)\ y_L(2)\ ...\ y_L(N)]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{u_L} = [u_L(1)\ u_L(2)\ ...\ u_L(N)]^{\mathrm{T}}$ とする。また，用いる制御器 $C(z,\boldsymbol{\theta}^i)$ はパラメータ $\boldsymbol{\theta}^i = [\theta_1^i, \theta_2^i, \ldots, \theta_n^i]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^n$ によってパラメトライズされ，以下のように定義する。

$$C(z,\boldsymbol{\theta}^i) = \frac{\theta_1^i z^\ell + \cdots + \theta_{\ell-1}^i z + \theta_\ell^i}{z^m + \theta_{\ell+1}^i z^{m-1} + \cdots + \theta_{n-1}^i z^1 + \theta_n^i}$$

ただし，上付き文字 i は最適化における繰り返し回数とする。

また，$\hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i) = [\hat{y}_{\mathrm{lin}}(1,\boldsymbol{\theta}^i)\ \hat{y}_{\mathrm{lin}}(2,\boldsymbol{\theta}^i)\ ...\ \hat{y}_{\mathrm{lin}}(N,\boldsymbol{\theta}^i)]^{\mathrm{T}}$，$\hat{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i) = [\hat{u}_{\mathrm{lin}}(1,\boldsymbol{\theta}^i)\ \hat{u}_{\mathrm{lin}}(2,\boldsymbol{\theta}^i)\ ...\ \hat{u}_{\mathrm{lin}}(N,\boldsymbol{\theta}^i)]^{\mathrm{T}}$ を線形近似された推定値系列とする。

〈3･2〉 設計問題　本稿の目的を達成するため，以下のような設計問題を考える。

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} && \varepsilon\\
&\text{subject to} && \{\boldsymbol{r}_{\mathbf{e}} - \hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}^{\mathrm{i}})\}^{\mathrm{T}}\{\boldsymbol{r}_{\mathbf{e}} - \hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}^{\mathrm{i}})\} < \varepsilon^2 \qquad (3)\\
&&& \boldsymbol{y_L} \leq \hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}^i) \leq \boldsymbol{y_U} \qquad (4)\\
&&& \boldsymbol{u_L} \leq \hat{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\theta}^i) \leq \boldsymbol{u_U} \qquad (5)
\end{aligned}$$

(3) 式は，参照値 $r_{\mathrm{e}}(t)$ とそれに対する出力推定値 $\hat{y}(t,\boldsymbol{\theta})$ の差の二乗和に対する制約式を表しており，制約の上界を最小化することで，参照モデルを用いずに立ち上がりの速い

©2026 IEE Japan

制御器を得ることを目的としている。(4)，(5) 式は，参照値 $r_{\mathrm{e}}(t)$ に対する入出力推定値系列に対する上下限制約を表しており，設計者の所望の応答となるように任意に設定することができる。

ここで，(3) 式を応答推定法を用いて記述すると，

$$\{\boldsymbol{r}_{\mathbf{e}} - \boldsymbol{Y}\tilde{\boldsymbol{D}}(\boldsymbol{\theta}^i)^{-1}C(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{r}_{\mathbf{e}}\}^{\mathrm{T}}\{\boldsymbol{r}_{\mathbf{e}} - \boldsymbol{Y}\tilde{\boldsymbol{D}}(\boldsymbol{\theta}^i)^{-1}C(\boldsymbol{\theta}^i)\boldsymbol{r}_{\mathbf{e}}\} < \varepsilon^2 \tag{6}$$

となる。行列 $\tilde{\boldsymbol{D}}(\boldsymbol{\theta}^i)$ の要素がパラメータ $\boldsymbol{\theta}^i$ に関して線形な式になっていることに注意すると，(6) 式は $\boldsymbol{\theta}^i$ に関して非凸となる。(4)，(5) 式についても同様である。文献 [3] ではこれらを評価関数もしくは制約式として用いていたため，非線形最適化問題を解く必要があった。

ここからは，繰り返し最適化における前回の解に基づき，推定値系列を一次のテイラー展開によって線形近似し，この近似値系列を用いた設計問題を定式化する。まず，線形近似した制御出力の推定値系列 $\hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i)$ は前回の解 $\boldsymbol{\theta}^{i-1}$ を用いて以下のように求めることができる。

$$\hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i) \approx \hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}^{i-1}) + \sum_{j=1}^{n} \left.\frac{\partial \hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j}\right|_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}^{i-1}} (\theta_j^i - \theta_j^{i-1})$$

また，線形近似した制御入力の推定値系列 $\hat{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i)$ についても同様である。ただし，近似系列 $\hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i)$，$\hat{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i)$ は，線形近似した推定値系列にすぎないため，解の更新量 $\Delta\theta_j^i = \theta_j^i - \theta_j^{i-1} (j = 1, 2, ..., n)$ が大きいと，近似前後での誤差 $\hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}^i) - \hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i)$ が大きくなり，設計に悪影響を及ぼす恐れがある。そのため，近似が成立する条件として，微小な正数 γ_j に対し，$|\Delta\theta_j| \leq \gamma_j$ の条件を追加することで，$\hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}^i) = \hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i)$，$\hat{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\theta}^i) = \hat{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i)$ とみなすことができるため，上記の設計問題を近似的に以下のように定式化することが可能となる。

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} && \varepsilon \\
&\text{subject to} && \{\boldsymbol{r}_{\mathbf{e}} - \hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i)\}^{\mathrm{T}}\{\boldsymbol{r}_{\mathbf{e}} - \hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i)\} < \varepsilon^2 \\
& && \boldsymbol{y}_{\boldsymbol{L}} \leq \hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i) \leq \boldsymbol{y}_{\boldsymbol{U}} \\
& && \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{L}} \leq \hat{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^i) \leq \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{U}} \\
& && |\Delta\theta_j| \leq \gamma_j
\end{aligned}$$

この設計問題において，従来のデータ駆動型制御器調整法に見られる参照モデルが用いられていないことや制御器構造を任意に決定できることに注意されたい。また，$|\Delta\theta_j| \leq \gamma_j$ のために，最適化問題で得られる解は，初期解あるいは前回の解まわりでの最適化であるため大域的最適解を保証できない。しかしながら，$|\Delta\theta_j| = 0$ に収束するまで繰り返し解を更新することで準最適な解の導出が可能となる。

4. シミュレーション

数値シミュレーションにより提案手法の有効性を検証する。

〈4･1〉 シミュレーション条件 サンプリングタイム T は 0.01s，データ長 N は 201，制御対象は $\frac{0.001213z+0.001177}{z^2-1.912z+0.9139}$，制御器 $C(z,\boldsymbol{\theta})$ は PID 制御器 $\theta_1 + \theta_2\frac{T}{1-z^{-1}} + \theta_3\frac{1-z^{-1}}{T}$，初期パラメータは $\boldsymbol{\theta}^0 = [\theta_1^0 \ \ \theta_2^0 \ \ \theta_3^0]^{\mathrm{T}} = [1.1 \ \ 2.33 \ \ 0.054]^{\mathrm{T}}$，制御対象に印加する初期入力データは 0〜1 のランダム信号とした。制約条件は (7)，(8)，(9) 式とし，図 2，3 中の青色の斜線が禁止領域を表しており，解の更新量に対する制約は $|\Delta\theta_j^i| \leq 0.2$ とした。

$$y_U(t) = \begin{cases} 1.1 & (0\ \mathrm{s} \leq t < 1\ \mathrm{s}) \\ 1.02 & (1\ \mathrm{s} \leq t < 2\ \mathrm{s}) \end{cases} \tag{7}$$

表 1 評価値 ε^i の遷移
Table 1 Transition of evaluation values ε^i

ε^0	ε^1	···	ε^{17}	ε^{18}	ε^{19}
28.73	24.27	···	12.01	11.99	11.99

表 2 パラメータ $\boldsymbol{\theta}^i$ の遷移
Table 2 Transition of parameters $\boldsymbol{\theta}^i$

i	θ_1	θ_2	θ_3
0	1.100	2.330	0.054
⋮	⋮	⋮	⋮
17	3.213	5.328	0.267
18	3.210	5.328	0.267
19	3.210	5.328	0.267

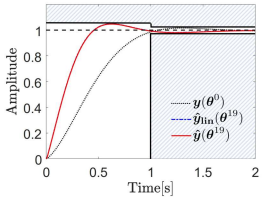


図 2 $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{\theta}^0)$, $\hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$, $\hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$
Fig.2. $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{\theta}^0)$, $\hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$, $\hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$

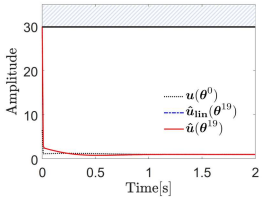


図 3 $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{\theta}^0)$, $\hat{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$, $\hat{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$
Fig.3. $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{\theta}^0)$, $\hat{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$, $\hat{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$

$$y_L(t) = 0.98 \quad (1\ \mathrm{s} \leq t < 2\ \mathrm{s}) \tag{8}$$

$$u_U(t) = 30 \quad (0\ \mathrm{s} \leq t < 2\ \mathrm{s}) \tag{9}$$

〈4･2〉 シミュレーション結果 繰り返し最適化における評価値の遷移を表 1 に示し，パラメータの遷移を表 2 に示す。これらより 18 回目以降の解は収束していることを確認できる。 解の更新量に対する制約を適切に設けることで解が収束し，図 2，図 3 の推定値 $\hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$，$\hat{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$ と線形近似された $\hat{\boldsymbol{y}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$，$\hat{\boldsymbol{u}}_{\mathbf{lin}}(\boldsymbol{\theta}^{19})$ がよく一致し，どちらも制約を満足したと考えられる。また，最適化後の応答が制約の範囲内で初期応答よりも立ち上がりの速い応答となっていることも確認できる。

解の更新量を限定すると局所解に陥る可能性が懸念されるが，本手法は初期制御器が制約を満足していることを前提としているため，局所解に陥るリスクは低く，準最適な解を導出できると考えられる。

5. ま と め

本稿では，制御対象の時系列入出力データから応答を推定し，実運用時に用いる参照値に対する推定値系列を評価することで，実際の制御系が時間領域における制約を満足するデータ駆動型制御器調整法を提案した。さらに，設計問題全体を線形制約付き最適化問題とすることで準最適解を導出可能であることを示した。

一方で，線形近似の精度をどのように保証するかについては依然として課題が残っており，今後の検討が必要である。近似精度の保証手法を確立した後には，本手法を 2 自由度制御系や MIMO 系へと拡張する予定である。

文 献

(1)M.C.Campi, et al.: *Proc. 39th IEEE Conf. Decision Control*, Vol.38, pp.1337–1346 (2002)
(2) 相馬将太郎 他：システム制御情報学会論文誌, Vol.17, No.12, pp.528–536 (2004)
(3)T.Sakatoku, et al.: *IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering*, Vol.16, pp.1397–1406 (2021)

©2026 IEE Japan

CAD ベースの 6 脚ロボットの胴体姿勢に関する解析

PEIQI WANG*，黄　慶九（工学院大学）

Analysis on Fuselage Posture of CAD-Based 6-Legged Robot

PEIQI WANG, Qingjiu Huang (Kogakuin University)

1. はじめに

本研究では、DH 法を用いた順運動学と逆運動学で、6 脚ロボットの姿勢制御の実現を目的とする。また、6 脚ロボットのモデルを MATLAB & Simulink 上に構築して、姿勢制御のシミュレーションによって、本研究手法の有効性を確認する。

2. 6 脚ロボット

6 脚ロボットのモデルを CAD 上で作製しそれぞれのリンク長をl_1=0.11[m], l_2=0.22[m], l_3=0.30[m]とし、胴体の寸法の長さをh_x=0.42[m], h_y=0.72[m], h_z= 0.22[m]と設定した。

3. 姿勢の RPY 角表示

これは飛行機などの運動を表すために用いられる表記法である。機体の前進方向に x 軸を取り、 翼方向に y 軸を、それらと右手系をなすように z 軸をとる。このとき、x 軸周り、y 軸周り、z 軸周りの回転角 α, β, γ はそれぞれロール角、ピッチ角、ヨー角と言われる。これは回転速度ベクトルなどを用いて物体の運動を考察するときに便利である。

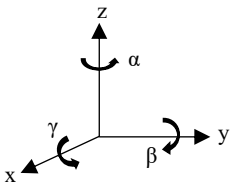


図 1　RPY 角表現

4. 3D ダイナミック CAD モデル

Autodesk Inventor という 3 次元 CAD ソフトウェアを用いて実際のロボットの寸法をもとに 3D-CAD モデルを作成した。作成した 3D-CAD モデルを MATLAB & Simulink に取り込みダイナミクスシミュレーションを行う。

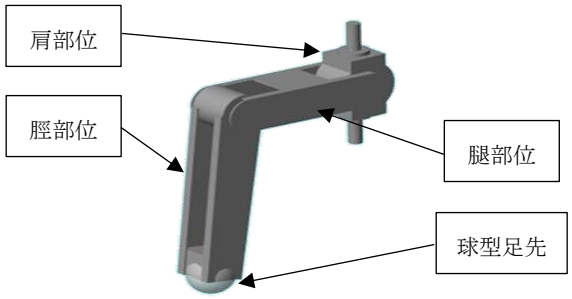


図 2　脚のモデル

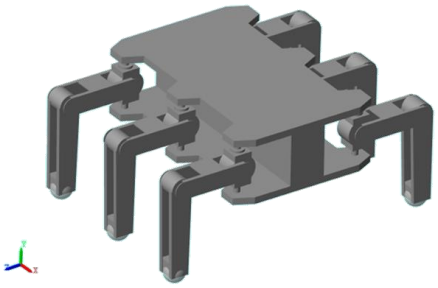


図 3　部品を組み合わせたロボットモデル

5. 脚の運動学

運動学には順運動学と逆運動学があり、これらの解析法を用いてロボットの脚の位置や関節角を決める。順運動学は脚部の先端位置と姿勢を決定する解析法である。逆運動学は脚部の先端位置と姿勢から各関節角を決定する解析法である。これにより脚部の各関節角をそれぞれθ_1,θ_2, θ_3として、脚部の先端位置から各関節角を求めると、

$$\theta_1=atan2(P_y, P_x)$$
$$\theta_2=atan2(P_z-l_1-l_3S_\zeta, b-l'_1-l_3c_\zeta)$$
$$\theta_3=\zeta-\theta_2$$

で表すことができる。ここで、

$$b=P_x c_1+ P_y S_1 \quad \zeta=\theta_2+\theta_3=atan2(c, \pm\sqrt{1-c^2})-\eta$$
$$\eta=atan2(l'_1-b, l_1-P_z)$$
$$c=\frac{l_2^2-b^2-P_z^2-l_1^2-l'^2_1-l_3^2+2bl'_1+2P_z l_1}{2\sqrt{(l'_1 l_3-bl_3)^2+(l_1 l_3-P_z l_3)^2}}$$

である。

ただし、本研究で用いる 6 脚ロボットは第一関節と第二関節の軸が同位置にあるためl'_1=0.0[m]とした。

6. 解析結果

逆運動学の解から MATLAB & Simulink を用いて 6 脚ロボットのシミュレーションを行った。

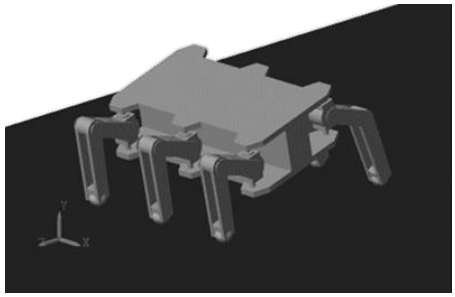


図 4　胴体をロール方向に変化させた 6 脚ロボットのモデル

ロボットの胴体をロール方向に姿勢を変化させた際、脚部の目標値 Pr に誤差が生じる。その誤差を三角関数の公式を用いて導出し、目標値 Pr に加算することで脚部の先端を地面に接地できる。これらの公式を MATLAB & Simulink に代入することによってロール方向への姿勢変化の際、脚部の位置を変えることなく胴体の姿勢を変えることが可能となる。

7. おわりに

本研究では、6 脚ロボットの 3D ダイナミック CAD モデルを作成し、MATLAB & Simulink 上で逆運動学を用いて 6 脚ロボットのロール方向の姿勢制御を行った。今後はこの運動学モデルを用いて他方向の姿勢制御のシミュレーションを行い、坂道や段差など不安定な足場でも姿勢を変化させることで胴体を地面に水平になるよう制御することを目標とする。

8. 参考文献

[1] John J.Craig, ロボティクス，―機構・力学・制御―，共立出版株式会社，1991.

©2026 IEE Japan

適応的三段階ベイジアンニューラルネットワーク（ATS-BNN）による計算効率と不確実性推定精度の動的最適化

村松　直幸*，黄　慶九（工学院大学）

"ATS-BNN: Adaptive Three-Stage Bayesian Neural Networks for Efficient Uncertainty Quantification"

Muramatsu Naoyuki, Qingjiu Huang, (Kogakuin University)

１．まえがき

自動運転やロボット制御など、AI が安全性の重要な分野で利用される際、予測の不確実性推定が不可欠である。ベイジアンニューラルネットワーク（BNN）は不確実性を推定できるが、計算コストが高く実用化が困難という課題がある。本研究では、入力の難易度に応じて計算量を動的に調整する適応的三段階 BNN（ATS-BNN）を提案し、計算効率と推定精度の両立を目指す。

２．提案手法

入力画像の信頼度に基づき、3 段階のカスケード推論を行う：入力 → [Stage 1: 軽量 CNN] → 信頼度高？ → 出力 (目標 70%)

↓ 否

[Stage 2: MC Dropout] → 信頼度中？ → 出力 (目標 20%)

↓ 否

[Stage 3: 完全 BNN] → 精密推定 → 出力 (目標 10%)

３．実験設定

データセット: CIFAR-10（10 クラス、32×32 RGB 画像）

予備実験: 訓練 5,000 枚、テスト 1,000 枚、3 エポック（計算時間短縮のため）

比較手法: Standard CNN、MC Dropout、Full BNN、ATS-BNN（提案）

評価指標: Accuracy（精度）、ECE（キャリブレーション誤差）、NLL（対数尤度）、推論時間

４．実験結果

表 1: 性能比較

手法	Accurary	ECE	NLL	推論時間	Stage 使用率
Standard CNN	36.5%	0.03	1.66	0.11s (1×)	-
MC Dropout	30.5%	0.10	1.94	3.18s (28×)	-
FullBNN	35.4%	0.07	1.75	0.15s (1.3×)	-
ATS-BNN	33.5%	0.08	1.82	3.32s (29×)	S1:0%, S2:0%, S3:100 %

主要な知見:

- Standard CNN が最高精度だが不確実性推定不可。MC Dropout はキャリブレーション不良（ECE>0.1）
- 提案手法は実用的な ECE（0.08）を達成したが、現状全サンプルが Stage 3 に到達
- 原因: 3 エポックでは閾値パラメータが学習不足。本実験（30 エポック）で改善見込み

5. 考察と制御系への応用

提案手法の利点:

1. 計算効率: 簡単なケース（70%）を高速処理し、難しいケース（10%）のみ精密推定
2. 適応性: 学習可能な閾値により、タスクごとに最適な計算配分を自動獲得
3. 実用性: リアルタイムシステムでの不確実性推定が可能

制御系への応用例:

- ロボット制御: 通常動作時は Stage 1 で高速認識（<10ms）、異常時は Stage 3 で詳細評価し安全側の制御を選択
- 自律移動: 既知環境では高速処理、未知環境では慎重判断
- プラント監視: 効率的な常時監視と異常時の精密診断を両立

文　献

(1) Blundell, C., et al. (2015). Weight uncertainty in neural networks. ICML.
(2) Gal, Y., & Ghahramani, Z. (2016). Dropout as a Bayesian approximation. ICML.

©2026 IEE Japan

ユーザー嗜好の変化に対応した最適行動制御

鈴木 昌和（東海大学）

Optimal behavioral control according to changes in user preferences

Masakazu Suzuki (Tokai University)

１．はじめに

近い将来，個々人が汎用人工知能(Artificial General Intelligence, AGI) を活用して，画期的に充実した日常を送れると期待される．特に，個人ユーザーが携帯・活用するにつれて自律進化してカスタマイズされるパーソナル AGI (personal AGI, 以降 pAGI) とも言える行動知能が，長期活用後は認知機能の低下に応じて提案・助言から支援・保護へと役割を変えることができれば大変有用と考えられる．

筆者はオブザーバ-ベースト-最適制御の考え方の汎用性/拡張性が pAGI のモデルとしても有用と考え，知能ロボットの行動知能構成を主目的とした知的合成行動制御法[1] における行動知能を拡張オブザーバ-ベースト-最適制御 (Extended Observer-based Optimal Control, EOOC) と見なして活用するために，状況・環境を含めた拡張された状態を扱うシステムモデルを提案した[2]．EOOC は，従来型の状態に加えて状況，システムモデルや評価規範をも推定対象とする．

pAGI の実現に向けて人の行動制御の詳細を検討するため，人が認識・計画を包含した行動制御をどのように実現しているかを検討する基礎的な例題として簡単な走行ルート最適選択問題を定式化して問題解決(意思決定)の過程を例示した[3]．そして，行動知能が環境情報の取得から，問題解決の進行に応じて，状況状態をどのように変化させ，離散的な行動空間における最適制御を実現するかを示した[4]．

ユーザーにカスタマイズするためにはユーザーの嗜好の反映が重要である．そこで，交通状況のみであった状況状態に気象状況と疲労度を加えると共に行動知能へ取り込むべきユーザーの嗜好を検討し，そのとき嗜好が状況状態や評価関数にどのように反映されるかを示した[5]．本稿では，まず，本研究で想定している行動制御の枠組みと高速道路渋滞対処問題への適用例の概要を示した上で，嗜好の変化により行動制御がどのように変化するかを示す．

２．状況・環境を含むシステムモデルと行動制御

状況・環境を含むシステムモデルにおいては，従来の状態 $\boldsymbol{x}$ に加えて状況状態 $\boldsymbol{s}$，環境状態 $\boldsymbol{e}$ を加えた無限次元の状態 $\boldsymbol{X}(t)=(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{s}(t), \boldsymbol{e}(t))$を考える．そしてこのシステムに対する EOOC を状況認識知能 $\boldsymbol{\mathcal{I}}_{\mathrm{R}}$，行動計画知能 $\boldsymbol{\mathcal{I}}_{\mathrm{P}}$，行動制御知能 $\boldsymbol{\mathcal{I}}_{\mathrm{C}}$ で構成し，認識・計画を包含した行動制御を実現する．問題解決のための行動制御は，一連の行動列

$$\boldsymbol{\mathcal{A}} = \{\, [\boldsymbol{A}^1, \boldsymbol{a}^1], [\boldsymbol{A}^2, \boldsymbol{a}^2], \ \cdots \ [\boldsymbol{A}^N, \boldsymbol{a}^N] \,\}$$

の最適化によりなされる．ここに $\boldsymbol{A}^n$, $\boldsymbol{a}^n$ は n 番目の行動ラベルとその内容を規定する行動パラメータを表す．

３．高速道路渋滞対処における評価/判断

高速道路を走行中に，走行予定の ExpwyA の渋滞開始を知った時点から，迂回 ExpwyB 経由で目的地近くの IC で出るまでの対処行動を考える(図１)．ここでは渋滞対処行動列をルート検討是非 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{P}}/\boldsymbol{A}_{\phi}$ とその場所 $\boldsymbol{a}_{\mathrm{P}}$ の決定，迂回是非の決定 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{C}}/\boldsymbol{A}_{\phi}$，高速を出る($\boldsymbol{A}_{\mathrm{E}}$)際の出口 IC $\boldsymbol{a}_{\mathrm{P}}$ の選択とした．行動列候補は $2\times2+2\times2\times2=12$ 通りとなる．行動列の評価基準 $J(\boldsymbol{\mathcal{A}})$ は "できるだけ早く，楽に帰りたい" とし，所要時間(帰宅時刻) T，走行距離(通行料) L，および心身への影響など運転の快適度 C を主要要因とし，それぞれの増分の線形和

$$\Delta J_{\mathrm{S}} = \alpha_T \Delta T + \alpha_L \Delta L + \alpha_C \Delta C \qquad (1)$$

を評価する．実際には経験知識や随時のシミュレーション結果から推定される増分の期待値と最大値の重み付け和を評価することで最悪時のリスク回避を図る．

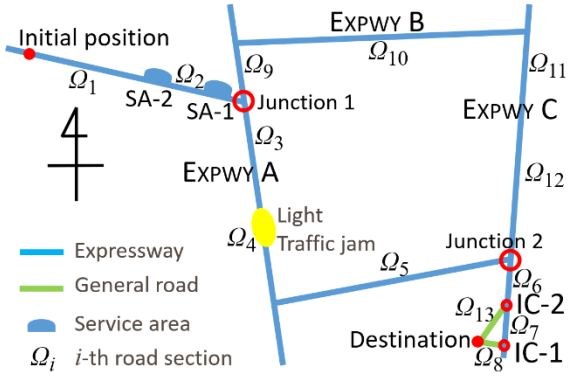


図１ 高速道路渋滞対処問題

状況の推定，評価値の推算，行動の決定等，EOOC 各部，特に行動計画知能 $\boldsymbol{\mathcal{I}}_{\mathrm{P}}$ 部分の機能を実装するために，人の行動計画プロセス詳細を検討した．行動者の嗜好までを含めた状況を反映した行動計画となるよう各種設定を行い，EOOC により行動列の最適決定，すなわち最適行動制御ができることを確認している．

４．状況状態と嗜好の反映

状況状態と対象とする嗜好 渋滞レベルに加えて気象状

©2026 IEE Japan

況と疲労度を加えた状況状態 $\boldsymbol{s}=[\boldsymbol{s}_\gamma \ \boldsymbol{s}_\mu \ s_\phi]$ を考える．$\boldsymbol{s}_\gamma$ は走行予定各区間の渋滞レベル，$\boldsymbol{s}_\mu$ は各区間の気象状況(降雨強度)，s_ϕ はユーザーの疲労度である．嗜好の取込みによる AGI のパーソナル化は，パラメータ化した嗜好を要素とする嗜好ベクトルを設計変数とし，その探索点近傍に対応する行動列を複数提案してその採否/評価に基づいてユーザーの嗜好を反映した行動評価関数を構成することが妥当と言える．対象とする嗜好は，高速道路渋滞対処に限っても階層の異なる様々な嗜好が検討対象となりうる．

下位レベルの嗜好としては，どれ程の運転時間でどれ程の疲労を感じるか(運転時間-疲労間の比例係数 c_t)，黄昏時/夜間に日中と比べてどれ程疲労が増すか(暗さによる疲労増分の比例係数 c_d)，雨天等悪天候時に好天と比べてどれ程疲労が増すか(悪天候による疲労増分の比例係数 c_r)が考えられ，下位嗜好ベクトルを $\boldsymbol{\rho}_\ell=[c_\mathrm{t} \ \ c_\mathrm{d} \ \ c_\mathrm{r}]$ と表す．

中位レベルのものとしては，所要時間期待値にどれ程最長所要時間を加味した時間を評価対象と考えるか(期待値最小化と最大リスク最小化の重み係数である慎重度 κ)に加え， 空腹時の運転をどれ程避けたいと感じるか，家族など同乗者の感情をどれ程気にするか，そして疲労感，空腹感，同乗者感情などのどれがどれ程運転の快適度を下げるかを決める快適度低下における重み係数 c_f, c_h, c_fdc が考えられ，中位嗜好ベクトルを $\boldsymbol{\rho}_m=[\kappa \ \ c_\mathrm{f} \ \ c_\mathrm{h} \ \ c_\mathrm{fdc}]$ と表す．

上位レベルのものとしては，帰宅運転のための行動計画において時間，費用，快適度のそれぞれをどれほど重要視するか，すなわち (1) における各項の重み係数が考えられ，上位嗜好ベクトルを $\boldsymbol{\rho}_u=[\alpha_T \ \ \alpha_L \ \ \alpha_C]$ と表す．

嗜好変化に対応した最適行動　ユーザーの嗜好を適当に仮定して嗜好ベクトルを

$\boldsymbol{\rho}_\ell=[0.01\ 1.5\ 20]$, $\boldsymbol{\rho}_m=[0.5\ 20\ 10\ 100]$, $\boldsymbol{\rho}_u=[50\ 1\ 1]$

と固定した行動評価関数に対して得られた最適行動列は，$\boldsymbol{\mathcal{A}}^*=\{[\boldsymbol{A}_\mathrm{P}, \text{SA-2}], [\boldsymbol{A}_\mathrm{C}, \text{ExpwyB}], [\boldsymbol{A}_\mathrm{E}, \text{IC-1}]\}$，すなわち SA-2 に停車して経路を検討して当初計画の ExpwyA から ExpwyB へ経路変更して迂回し IC-1 から出るというものであった．

この結果は，慎重度 $\kappa=0.5$ と仮定し渋滞の悪化が遅延を大きくするリスクを重要視した影響が大きい．そこで，$\kappa=0.1$ として慎重度を下げて行動列を評価すると，当初計画のままの $\boldsymbol{\mathcal{A}}_0=\{[\boldsymbol{A}_\phi, \phi], [\boldsymbol{A}_\mathrm{E}, \text{IC-1}]\}$，すなわち停車しての検討も迂回もせずに IC-1 から出る行動列が最適となった．

状況変化(雨天)への対応　状況変化の一例として，ExpwyC に強い雨が降ると予想される状況を与えた．これにより降雨区間での走行速度低下と走行時の快適度低下が予想され，結果として元の $\boldsymbol{\mathcal{A}}_0$ が最適行動列となった．

雨天での運転による疲労増分の比例係数 c_r の影響を確認するため $c_\mathrm{r}=20$ を $c_\mathrm{r}=15$ としたところ，快適度低下が軽減されて再び $\boldsymbol{\mathcal{A}}^*$が最適行動列となった．

以上のようにユーザー嗜好の変化により最適行動が複雑に変化することが確認された．

５．おわりに

本稿では，ルート検討場所，迂回是非，出口 IC 選択という簡単な行動列最適決定を例題として，状況・環境を含むシステムモデルに基づく拡張オブザーバ-ベースト-最適制御により認識・計画を包含した最適行動制御を行った結果を示すと共に，行動主体(pAGI ユーザー)の嗜好の変化により評価関数が変化し，その結果として最適行動も複雑に変化することを示した．

疲労度が高ければ休憩，事故等を想定すれば早い段階での一般道走行等ここでは考えられていない行動が選択肢に加わり，行動列自体がより複雑化し，ユーザー嗜好の影響も一段と複雑化する．

現段階では筆者の嗜好に基づいて決まった行動評価関数に対して渋滞対処問題を解いており，今後は AGI のパーソナル化へ向け行動評価関数自体の最適化を行う．ここで示した結果はその準備として，嗜好ベクトルを変化させた時に最適解(最適行動列) がどのように変化するかを例示したものである．

実際には pAGI が提示した行動列候補からユーザーがどの行動列を採用したかの情報から pAGI がユーザーの嗜好ベクトルを推定してユーザー嗜好の反映された行動評価関数が構築されなければならない．

初期状態から目標状態へ至る候補行動列集合を生成するための２点境界値問題の解法，行動選択による動特性の変化や経験知識をどのように行動知能に反映させるか等の検討，更には状況を含む状態の推定誤差と行動最適性との関係を明らかにすることも課題として挙げられる．

文　献

(1) 鈴木: 行動知能の漸次構成による複雑ロボットタスクの実現, システム/制御/情報，54-12, pp.450/456, 2010
(2) 鈴木: 認識・計画を包含した行動制御のための状況と環境を考慮したシステムモデリング, 2023 年電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集，pp.1027-1031, 2023
(3) M. Suzuki: System modeling considering situation and environment for action control including awareness and planning, Proc. SICE Annual Conference 2024, Kochi, pp.556-563, 2024
(4) M. Suzuki: On the Optimal Control as A Framework of Action Intelligence, Proc. SICE Annual Conference 2025, Chiang Mai, Thailand, pp.505-511, 2025
(5) 鈴木: エージェント嗜好を含むシステムモデルに基づく行動最適制御，第 68 回自動制御連合講演会論文集, pp.508-511，名古屋, 2025

©2026 IEE Japan

目的地を仮定することによる船舶追跡手法

美野輪　眞大*，矢野　浩仁　（株式会社日立製作所）

Vessel Tracking Method Based on Assumed Destination

Mahiro Minowa, Kojin Yano (Hitachi, Ltd.)

１．はじめに

海上交通において，衝突回避，交通流管理，港湾運用最適化といった広範な場面で，船舶の位置や速度を継続的に把握することは重要である。一般に，船舶の追跡には自動船舶識別装置（AIS: Automatic Identification System）が活用されている。AIS は船舶固有の識別子（MMSI）とともに，位置，針路，対地速度などの情報をブロードキャストするため，船舶の追跡に適している。しかし，小型船舶には AIS の搭載義務がないこと，機器故障により発信が停止することなどにより，全ての船舶を常時追跡できるわけではない。

AIS の代替として，レーダの反射信号に基づき船舶を検出する方法があり，AIS 非搭載船を含む幅広い船舶を捕捉できる。しかし，地形，電波環境，設備配置などの要因から全ての海域を連続的にカバーしているわけではなく，観測の空白地帯では船舶の追跡が断絶する。船舶を継続して追跡するためには断絶前後の船影を同定する必要があるが，レーダ観測では AIS の MMSI のような識別子は得られない。

識別子が得られない条件下において船舶を同定するため，従来研究では断絶前に観測された船舶のデータから現在の位置を予測し，その近傍で特徴の類似する船舶を探索する方法がとられている。船舶の現在の位置の予測には過去航跡を用いたクラスタリング[1]や深層学習[2]によるアプローチがなされているが，十分な過去航跡の蓄積を前提とするため，船舶が新たな目的地に向かう場合などの未知の航路に対しては予測精度が低下する。

本稿ではこの限界を回避するため，船舶の現在の位置の予測にあたり，まず目的地を仮定する手法を提案する。以降 2 章では提案手法を述べ，3 章ではその性能を評価する。

２．提案手法

本章では，提案手法の手順について述べる。

（1）目的地の仮定

追跡が断絶した船舶（以降，断絶船舶）について，複数の目的地を仮定する。目的地には，港湾，漁場，航路の分合流点などの船舶が向かう可能性がある地点を列挙する。

（2）A*アルゴリズム[3]による航路予測

A*アルゴリズムにより，断絶船舶の最後の観測点から仮定した目的地のそれぞれへ向かう場合の予測航路を生成する。断絶船舶の最後の観測点における対地速度でそれぞれの予測航路上を移動したものとして，任意時刻における対象船舶の位置を予測する。

（3）同一船舶候補の抽出

一定の期間内に観測された船舶群について，それぞれの観測時刻における断絶船舶の予測位置を参照し，距離を計算する。仮定した目的地ごとに距離が近い上位 5 船舶をノミネートし，候補集合を構成する。候補集合について，候補船舶の特徴量（全長，幅，喫水など）の全てが断絶船舶に類似している船舶に絞り込む。

（4）最終同定

絞り込んだ候補船舶の中から，断絶船舶の予測位置との距離が最も小さい船舶を同一船舶として同定する。候補船舶が存在しない場合には同一船舶なしとする。

３．提案手法の性能評価

本章では，第 2 章で提案した目的地仮定に基づく航路予測および同定手法の性能を評価する。

＜3・1＞評価条件　　評価には，MarineTraffic による 1 時間間隔の AIS データ[4]をレーダ観測の代替として使用する。この AIS データには，MMSI，観測時刻，全長，幅，喫水，船種，対地速度が含まれる。評価では，同定成否の判定にのみ MMSI を用い，候補抽出や同定処理は MMSI 非依存で行う。これにより，レーダ観測のように識別子が得られない状況を模擬しつつ，真値との突合による成功判定を可能にする。

評価に用いるデータセットは以下のように構成する。対象期間は 2023 年 4 月 1 日から同年 4 月 20 日まで，対象範囲は北緯 32.5 度から北緯 35.0 度，東経 133.0 度から 138.2 度とする。この条件において，3 時間超かつ 12 時間以下の断絶を含む航跡を抽出する。抽出された航跡は 1705 であり，断絶の総数は 2208 である。図 1 に航跡と断絶の例を示す。折れ線が途切れている部分が断絶に相当する。

提案手法の適用は次の手順で行う。本検証において仮定する船舶の目的地は，船舶によらず図 2 に赤点で示す 23 の港湾とする。欠測直前に観測された最後の点から 23 の目的地に対して A*アルゴリズムで航跡を予測する。ここでは，Natural Earth の 50m スケールの海岸線データ[5]を参照し，陸地を航行不可として経路探索を行う。各予測航路について，航跡上を欠測直前の対地速度で移動すると仮定し，任意の時刻での予測位置を算出する。

©2026 IEE Japan

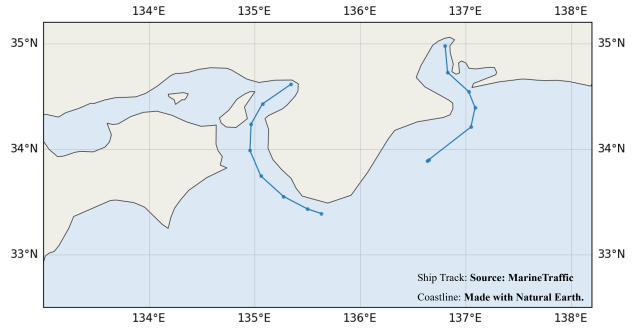


図１　航跡と断絶の例
Fig.1. An example of ship trace and discontinuity

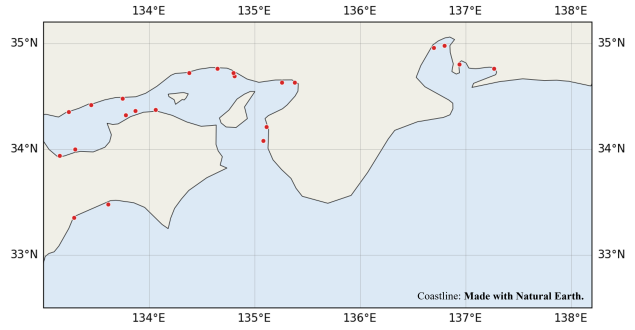


図２　目的地の一覧
Fig.2. Destinations

次に，それぞれの目的地について，観測された船舶群の位置と同時刻におけるその目的地に向かう場合の予測位置との距離を計算し，距離が近い上位 5 船舶を同一船舶の候補として抽出する。目的地は 23 通り存在するため，1 つの欠測に対して最大で 23×5=115 船舶が候補となる。

次の候補の絞り込みでは，2 つの条件で性能評価を行う。

条件①　船舶の形状で絞り込み

候補船舶の全長，幅，喫水について，各々が断絶船舶の値の 95–105%の範囲に入るものに絞り込む。これはレーダ観測における船影の大きさの誤差を考慮しつつ，形状の類似した船舶に絞り込むことに相当する。

条件②　船舶の形状と船種で絞り込み

条件①に加えて，船種が一致しているものに絞り込む。これは，衛星画像などを利用して船種を特定し，船種が一致している船舶に絞り込むことに相当する。

最後に，予測位置との距離が最小の船舶を同一と判定し，候補が存在しない場合は「該当なし」と判定する。

評価は 2 つのパターンで実施する。パターン 1 では，欠測終了から 1 時間にわたり観測された船舶分布を対象として候補抽出・同定を行う。この設定では，真に同一の船舶が必ず存在するため，同一 MMSI の船舶を同一と判定できれば成功と定義する。パターン 2 では，欠測終了の 1 時間前から欠測終了直前までの船舶分布を対象に同様の処理を行う。この設定では真に同一の船舶が必ず存在しないため，判定が「該当なし」となる場合に成功と定義する。

＜3・2＞評価結果　　絞り込み条件①における結果を表 1 に示す。パターン 1 では，同一 MMSI の船舶を同一と判定した成功の割合は 66.2%であった。パターン 2 では，該当なしと判定した成功の割合は 65.1%であった。次に，絞り込み条件②における結果を表 2 に示す。パターン 1 では，同一 MMSI の船舶を同一と判定した成功の割合は 75.3%，パターン 2 では，該当なしと判定した成功の割合は 82.7%であり，船舶の形状のみを考慮する条件①に比べていずれのパターンでも成功の割合が改善した。

表１　条件①で絞り込む場合の結果
Table 1. Result under filtering condition 1

	MMSIが同一の船舶を同一と判定	MMSIが異なる船舶を同一と判定	該当なしと判定
パターン１	1462 (66.2%)	524 (23.7%)	222 (10.1%)
パターン２	0 (0.0%)	771 (34.9%)	1437 (65.1%)

表２　条件②で絞り込む場合の結果
Table 2. Result under filtering condition 2

	MMSIが同一の船舶を同一と判定	MMSIが異なる船舶を同一と判定	該当なしと判定
パターン１	1662 (75.3%)	227 (10.3%)	319 (14.4%)
パターン２	0 (0.0%)	382 (17.3%)	1826 (82.7%)

４．おわりに

本稿では，目的地を仮定した航路予測により算出した船舶の現在の位置と観測されている船舶群の位置を比較して類似した船舶を探索することにより，従来手法で求められる過去航跡の蓄積がなくとも一定の精度で船舶を同定できることを確認した。

今後の課題は次の 2 点である。第一に，航路予測では陸地のみを航行不可としたが，より正確な予測には暗礁や潮流などを考慮する必要がある。第二に，船舶の特徴量には形状や船種に加えて船籍，色，貨物量などがあり，同一船舶候補の抽出に用いる特徴量のさらなる検討が必要である。

文　献

(1) B.Murray et al.:Ship behavior prediction via trajectory extraction-based clustering for maritime situation awareness, Journal of Ocean Engineering and Science, Vol.7, No.1, pp.1-13, 2022.
(2) H.Li et al.:Ship trajectory prediction based on machine learning and deep learning: A systematic review and methods analysis, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.126, 107062, 2023.
(3) P.E.Hart et al.:A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol 4, No.2, pp.100-107, 1968.
(4) Source: MarineTraffic
(5) Natural Earth ホームページ, https://www.naturalearthdata.com/, Accessed 2025/12/08.

©2026 IEE Japan

モビリティデータの動的可視化が混雑状況の「質」の把握に与える影響の検証

山口　泰生*，神戸　英利(東京電機大学)

Evaluation of the Impact of Dynamic Visualization of Mobility Data on the Qualitative Assessment of Congestion

Taiki Yamaguchi ,Hidetoshi Kambe (Tokyo Denki University)

１．研究背景・課題

近年,混雑緩和に向けたモビリティデータの活用と行動変容の促進が求められている.しかし,従来の集約型可視化（ヒートマップ）は「密度」の把握には優れるものの,「流動」か「停滞」といった混雑の「質」までは伝達できない.対照的に 3D アバター（エージェント型）は「質」を表現できる可能性があるが,情報過多による判断の遅れが懸念され,このトレードオフの定量的評価が未解決である. 既存研究でも「流れ」や「滞留」の重要性は指摘されているが(1),これらをエンドユーザーにどう提示すれば直感的に伝わるかという,可視化手法と認知に関する比較検証は未だ不十分である.

２．研究目的

本研究の目的は,混雑回避といった行動変容を促進するための,最適な（＝判断の「速さ」と「正確さ」を両立する）可視化手法を設計・提案することにある.

上記目的を達成するための第一歩として, 本研究では,最も基本的な 2 つの可視化手法（集約型とエージェント型）が持つ「認知のトレードオフ（判断速度 vs 判断精度）」をユーザスタディによって定量的に測定し, 今後の最適化研究（例: 複合型手法の設計）に不可欠なベースラインを確立することを目的とする.

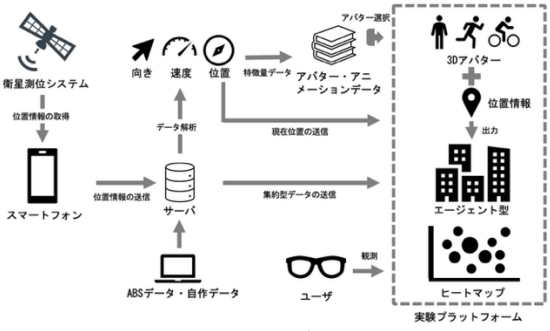


図 1 システム概要図
Fig. 1.　System Overview Diagram

３．提案手法

＜3・1＞トレードオフ仮説

本研究で検証する仮説は,可視化手法の「速さ」と「正確さ」に関する以下のトレードオフである.

【トレードオフ仮説】(A)集約型（ヒートマップ）は,(B) エージェント型 (3D アバター) よりタスク完了時間が短いが,混雑の「質」（流動性・停滞）の正答率が低い. (B) エージェント型は,(A) 集約型より正答率が高いだが,情報過多によりタスク完了時間が長くなると予想される.

＜3・2＞比較フレームワーク

本仮説を検証するため,以下の 2 つの可視化手法を比較対象とする.

(A) 集約型可視化: 密度情報のみを色彩で表現するヒートマップ.

(B) エージェント型可視化: 密度,移動速度,方向を反映する 3D アバター .

＜3・3＞評価タスク設計

混雑の「質」の識別能力を測定するため,被験者には以下の 2 つの異なるシナリオを提示し,状況（「流れている」か「停滞している」か）を判断させるタスクを設計する.(シナリオ 1: 高密度・高流動性,シナリオ 2: 高密度・高停滞)これら 2 つのシナリオは,(A)集約型（ヒートマップ）では「高密度（例：赤色）」として同一に表示される可能性が高いが,(B) エージェント型では明確に区別できると想定され,仮説検証に最適である.

＜3・4＞評価指標の定義

以下の客観指標および主観指標を用いて,トレードオフを定量化する.

1.タスクパフォーマンス（客観指標）:

・ 正答率: 被験者がシナリオ 1 と 2 を正しく識別できたか.

・ タスク完了時間: 判断に至るまでの時間.

2.UX 評価（主観指標）:

・ 「状況把握の容易性」「情報の信頼性」「回避行動への動機付け」などに関するアンケート評価.

4．実装

＜4・1＞実装済みの基盤と技術的制約

本研究の基盤として,実装したシステム概要を Fig2 に示す.

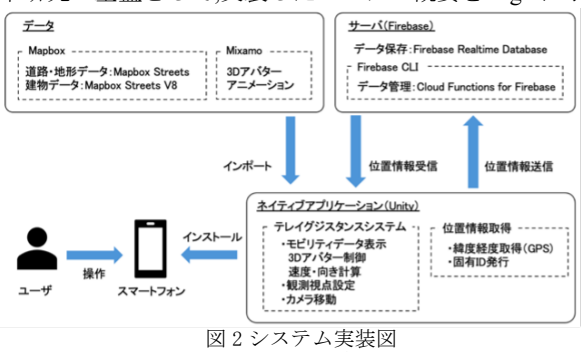


図 2 システム実装図
Fig. 2.　System Architecture

©2026 IEE Japan

・データ収集・管理
Unity で開発したスマホのネイティブアプリによる GPS 位置情報の取得と,Firebase Realtime Database / Cloud Functions を用いたリアルタイムなデータ管理 .
・基本可視化
Mapbox による 3D マップ（道路・建物）の生成と,Unity 上での 3D アバター（Mixamo）のアニメーション表示機能 .
・パフォーマンス最適化
スケーラビリティに対応した. 将来的なリアルデータ利用を想定し, 個人情報保護の観点から, サーバに保持する生データ(緯度経度)はユーザごとに最新 10 秒間のみとし, 古いデータは逐次削除する.
・サーバーサイド
膨大な位置情報の更新負荷を軽減するため,Cloud Scheduler と Cloud Tasks を用い,処理を 10 秒間隔で分散実行する.また,Geohash Meta でデータ数を計測し,混雑地帯（例:10 人以上）のみ処理・可視化対象とする.Fig 3 に処理の概要図を示す.

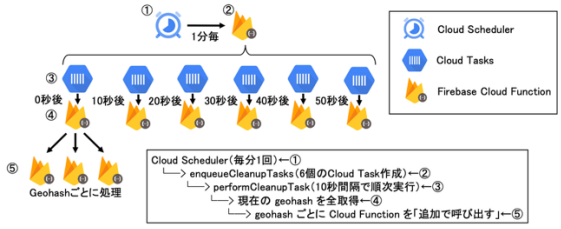


図 3 Cloud Function 処理

Fig 3. Cloud Function Process

・クライアントサイド
描画負荷に対応するため, マップの Zoom レベルと連動した LOD (Level of Detail) 制御を実装. データ取得は Geohash で周辺範囲のみの高速クエリを行い, Zoom レベルに応じてタイル（描画範囲）内の計算のみを行う.
＜4・2＞本研究で実装予定の機能
実験(3.)のため,基盤(4.1.)に以下の機能を追加する.
1. 評価用データシミュレータ 制御されたシナリオ（高流動・高停滞）を提示するため,リアルタイム収集機構は用いず,定義済みデータを Firebase へ生成・送信するシミュレータを構築する.
2. (A) 集約型可視化（ヒートマップ）機能
Firebase 上の Geohash ごとの密度データを基に,3D マップへ重畳するヒートマップ機能を実装する.
3. (B) エージェント型可視化の改良
データの即時破棄という制約下で「滞留」を可視化するため,Geohash Meta に「滞留カウンター」を実装する.Cloud Functions で位置移動がない場合にカウンターを加算し,その値でアバターの色を変えることで,プライバシー保護と滞留表現の両立を図る.

5. 評価

本研究の提案手法（3.）の有効性を検証し,トレードオフ仮説(3.1.)を定量化するため,4.2.で実装予定の機能が完成した後,以下のユーザースタディを実施する計画である.
実験では,被験者（例: 大学生 N=10〜20 名）を募集する.被験者には,4.で実装した実験プラットフォーム（Unity）を用い,3.1.で定義した(A)集約型と(B)エージェント型の両方の可視化手法を,順序効果を相殺するためランダムな順序で体験させる.
各手法において,4.2.のシミュレータが生成する「シナリオ 1（高流動)」と「シナリオ 2（高停滞)」を提示し,被験者は提示された状況が「流れている」か「停滞している」かを（できるだけ速く正確に)回答するタスクを行う.この際,3.3.で定義した客観指標である「正答率」と「タスク完了時間」を計測する.また,タスク完了後,「状況把握の容易性」や「判断の自信度」などに関する主観評価アンケートを実施する.収集したデータは統計的に分析し,(A)と(B)の手法間に「速さ」と「正確さ」の有意な差が存在するかを検証する.本評価は未着手であり, 今後の課題である.

6. まとめ・今後の展望

本研究では,混雑回避などの行動変容を促す最適な可視化手法の設計,という最終目的に向けた第一歩として,既存の(A)集約型と(B)エージェント型の可視化手法が持つ「認知のトレードオフ（速さ vs 正確さ)」を定量化するアプローチを提案した.
その検証のため,「流動」と「停滞」の 2 シナリオを識別させるユーザスタディを設計した.また,その実装において, プライバシー保護（10 秒ルール）と滞留検知（カウンター）を両立させる技術的アーキテクチャ(4.2.)を提案した点に本研究の独自性がある.
今後は,4.2.で示した実装予定の機能（ヒートマップ,滞留表現,シミュレータ）の構築を完了させ,5.で計画したユーザスタディを実施することが最優先の課題である.その評価結果に基づき,複合型可視化手法の設計・最適化へと研究を発展させる.

文　献

(1) Shimizu Ko. Promotion Of Town Development Through Human Flow Simulation At Sports-Related Facilities. : Journal Management Teknologi , August 2025. ページ: 151-166. 第 24(2) 巻

©2026 IEE Japan

時空間情報に基づく災害時の SNS におけるフェイクニュース検出

加藤　弘子*，神戸　英利(東京電機大学)

Spatio-Temporal Information–Based Fake News Detection on Social Media During Disasters

Hiroko Kato, Hidetoshi Kanbe(Tokyo Denki University)

１．はじめに

近年、SNS が普及し、情報の収集を目的として用いられる場面も増えてきた。そんな中、フェイクニュースが問題となっている。日本国内で度々フェイクニュースが問題となるのは災害時であり、2024 年 1 月の能登半島地震では多くのフェイクニュースが投稿され問題となった。また、従来の手法では内容ベースでのフェイクニュース検出が行われている。しかし生成 AI が発達していることから内容ベースでの判定は難しくなる可能性がある。

２．研究目的

本研究では、投稿内容への依存を最小化した時間的・地理的特徴量に基づき、災害時 SNS におけるフェイクニュース検出の可能性を検証することを目的とする。

3. 仮説

本研究では統計的傾向としての差異に着目する。災害発生時において、被災地付近にいる人々は自分の安否確認や周囲への状況共有を目的とし災害発生直後から SNS に投稿を行うことが報告されている。[1]一方、収益化や承認欲求を目的としたフェイクニュース投稿は、被災地外から行われる場合が多く、情報収集や内容生成を要するため、投稿までに時間を要すると考えられる。このような差は災害発生時刻から投稿時間の遅延時間や投稿地点と被害範囲との地理的距離として観測可能である。

以上より、本研究では、被害範囲から離れた地点から比較的遅れて投稿された情報ほど、フェイクニュースである可能性が高まるという仮説を立てる。

4. 提案手法

＜4・1＞システム概要　　本研究では、災害発生時における投稿行動の差が、投稿時刻および投稿位置に表れるという仮説に基づき、SNS 投稿を時間軸および空間軸上で評価する手法を提案する。そこで、公的機関の投稿から災害発生時刻・被害範囲を取得し、一般の投稿に対しては投稿時間・投稿位置の収集を行う。得られた情報から、災害発生時刻から投稿時刻までの遅延時間および、投稿地点と被害範囲との地理的距離を算出し、これらを特徴量としてフェイクニュースの真偽判定を行う枠組みを検討する。図 1 に本手法の概要を示す。

図 1 提案手法の概要
Fig.1. Overview of the proposed method

＜4・2＞時間的特徴量　　災害発生時刻をT、投稿時間をtとし、災害発生時刻から投稿時間までの遅延時間Δtと定義する。このときΔtは式 1 で与えられる。

$$\Delta t = t - T \qquad (1)$$

本研究ではΔtを時間的特徴量として用いる。Δtが大きいほど、フェイクニュースである可能性が高まると考えられる。

＜4・3＞地理的特徴量　　公的機関の投稿から複数の被害地点を取得し、それらの座標の平均を被害範囲を代表する中心点cとする。次に、cから各被害地点までの距離を算出し、その最大値を被害範囲の半径 Rと定義する。これにより，被害範囲Dを、中心c、半径Rの円状領域として近似する。一般の SNS 投稿については、Exif 情報は削除または偽造の可能性があるため用いず、投稿内容に基づく位置情報推定を行う。推定された投稿位置をpとし、中心cとの距離を式 2 で定義する。

$$r = ||p - c|| \qquad (2)$$

投稿位置が被害範囲の境界に対してどの程度内側または外側に位置しているかを表す地理的特徴量δを、式(3)で定義する。

$$\delta = R - r \qquad (3)$$

本研究ではδを地理的特徴量として用いる。$\delta < 0$の場合、投稿位置は被害範囲Dの外部に位置し、$\delta \geq 0$の場合、投稿位置は被害範囲 D の内部に位置していることが示される。

5. 実装

＜5・1＞実装概要　　本研究では提案手法の実現可能性を確認するため SNS 投稿データを対象とした処理の一部を実

©2026 IEE Japan

装した。公的機関および一般投稿から取得した情報に基づき、時間的特徴量Δtおよび地理的特徴量δを算出する。現在、音声からの位置情報推定については実装および予備実験を完了しており、テキストからの位置情報推定については実験を進めている段階である。一方、画像からの位置情報推定は今後の課題とする。

＜5・2＞音からの位置情報推定　　音からの位置情報推定では、災害時に SNS に投稿された動画中に含まれる市区町村名を含む防災アナウンスの取得を目的とし、音声認識により得られたテキストから地名を抽出して投稿位置推定に用いる。一方、災害時の動画には揺れや崩落音、雨音などの強い環境雑音が含まれるため、音声認識モデルがこれらの条件下で地名を正しく認識できるかは明らかでない。そこで本研究では、Whisper の large モデルが災害環境下で地名抽出に適用可能かを確認するため、災害音を重畳した音声を用いた予備実験を行い、STOI および WER により評価した。この結果を図 2 に示す。

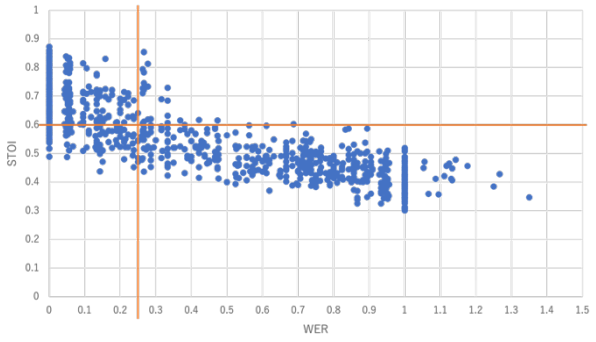


図 2 災害音を重畳した条件下における STOI と WER の関係
Fig.2. Relationship between STOI and WER under conditions with overlapping disaster sounds

その結果，人が音声内容を理解可能とされる基準（STOI ≥ 0.6［2］，WER ≤ 0.25［3］）を満たす音声は検証対象の 93%を占め，Whisper の large モデルが災害環境下における地名抽出に適用可能であることを確認した。音声認識後のテキストに対しては表記揺れによる誤認識を低減するためひらがな変換を行い、国土地理院資料に基づく地名辞書との照合により、一致した地名の経緯度を投稿位置の候補として取得する。

＜5・3＞テキストからの位置情報推定　　テキストからの位置推定では災害時に SNS に投稿された投稿文に含まれる地名、住所の取得を目的とする。そのため、本研究では PyGeoNLP と Jageocoder を用い、テキスト文からの地名、住所抽出および経緯度変換を行う。現在、PyGeoNLP に対して偽の住所が入力された場合の挙動について予備的な検証を行っている。偽の地名のみを含む住所を入力した場合、PyGeoNLP は地名として抽出を行わない挙動を示した。一方で、実在する地名と偽の番地や自然地名が混在する場合の挙動については，現在検証を進めている段階である。

＜5・4＞画像からの位置情報推定　　画像からの位置情報推定では、投稿に含まれる画像および動画を対象として位置情報の取得を行うことを目的とする。本研究では、ランドマーク検出および OCR を用いた位置情報推定を想定しており、Google Cloud Vision API を用いた実装を予定している。画像からの位置情報推定については、推定精度や適用可能範囲に関する検証が必要であると考えられるため、今後の課題とする。

6. 評価

本研究では、提案手法の有効性を検証するため、位置情報推定の精度および投稿の真偽判定性能の 2 点から評価を行う予定である。位置情報推定については，音声・テキスト・画像から推定した位置座標と，報道情報や公的記録に基づく被災地点との距離誤差を評価指標とする。また，時間的特徴量および地理的特徴量を用いた分類については，混同行列および AUC-ROC を用いて性能評価を行うことを想定している。評価に用いる正解ラベルは、災害対応の現場で活用されている Spectee Pro に掲載された投稿を，実務的に信頼可能な参照データとして付与する。

7. 考察

現時点で実装済みである音からの位置情報推定において、一部の地名で誤認識が確認された。この要因として、音声認識後のひらがな変換において、「町」の読みが誤って変換され、別の地名と一致した可能性が考えられる。この対処法として、辞書側に複数の読みを保持させることで、音声認識に起因する読みの揺れに対する耐性向上が期待される。

また、本研究では、災害発生時には被災地付近の利用者が正確な情報を投稿するという仮説を前提としているが、実際には被災者自身が誤った情報を投稿する可能性も考えられる。このようなケースについては、本手法のみでは区別が困難であり、今後の課題である。

8. まとめ、今後の展望

本研究では、時間および地理情報を用いた災害関連フェイクニュース検出手法を提案し、音声からの位置情報推定についてその適用可能性を確認した。今後は、テキスト・画像からの位置情報推定の実装に加え、震度分布や雨雲レーダーを用いた被害範囲推定への拡張を検討する。

文　献

(1) 佐藤翔輔・邑本俊亮・立木茂雄：自然災害科学（J. JSNDS），41-2，107–120 (2022)

(2) C. H. Taal・R. C. Hendriks・R. Heusdens・J. Jensen：Proc. ICASSP，4214–4217 (2010)

(3) 川原繁人：マルチメディア教育研究，9-1，S1–S8 (2012)

©2026 IEE Japan

専門語彙と文章難易度に基づく理解度推定を用いた RAG 対話システムの一検討

安海　夕愛*，佐藤　駿一，福田　卓海，高橋　聖（日本大学）

A Study on a RAG-Based Dialogue System Using Comprehension Estimation Based on Technical Vocabulary and Text Difficulty

Yume Azumi, Shunichi Sato, Takumi Fukuda, Takahashi Sei(Nihon University)

１．まえがき

近年，大規模言語モデル（Large Language Model，以下 LLM）の発展により，対話型システムは意味理解や，応答生成，知識参照の能力が向上し，話者との自然な対話を実現している．特に，外部知識を動的に参照する検索拡張生成（以下，RAG）技術の導入は根拠に基づく柔軟な応答生成を可能にした．一方で，RAG が参照する情報は専門的な内容が多く，既存の対話システムが生成する応答は専門性が高くなる傾向がある．その結果，初学者や非専門家に対して難解な回答となり，補足説明を求める再質問が必要になるなどの，対話の冗長化が課題となっている．

そこで本研究では，話者の発話から理解度を推定し，その結果をもとに応答生成を動的に調整する RAG ベースの対話システムを提案する．本システムでは，文章難易度および専門語彙の難易度に基づいて話者の理解度を推定し，説明の専門性や情報量を段階的に制御することで，対話の冗長化を抑制することを目的とする．前報では，本システムの基本構成および理解度管理機構の設計について検討を行ったが，理解度推定結果の妥当性に関する定量的な評価までは行えていなかった[1]．本研究では，既存の文章難易度指標や LLM 単体による推定との比較を通じて，理解度推定手法の妥当性を評価し，提案手法の有効性を示す． 本研究では応用例として，著者が所属する研究室の研究内容を対象とした紹介システムを構築し，提案手法の有効性について検証を行う．

２．方法

＜2・1＞システム概要　本研究では，話者の理解度に応じて応答内容や表現を動的に最適化する対話システムの構築を目的とする．本システムは，先行研究[2]のシステム構成を参考に，情報検索機構，理解度管理機構，LLM 応答生成機構の 3 つの機構を新たに設計した（図 1）．

情報検索機構では，研究室の修士論文を事前に登録した RAGDB を用い，話者質問と意味的に類似する情報チャンクを検索する．本機構は，RAG を用いた情報検索として実装されており，基本的な検索性能は RAGChecker により確認されている．理解度管理機構では，発話に含まれる専門語彙難易度および文章難易度に基づき，話者理解度を「低・中・高」の 3 段階で推定する．本研究では，この理解度管理機構を応答生成に介在させることで，話者の知識レベルに応じた情報提示を実現する点を特徴とする．LLM 応答生成機構では，推定された理解度および検索結果をもとに，理解度に応じた応答を生成する．

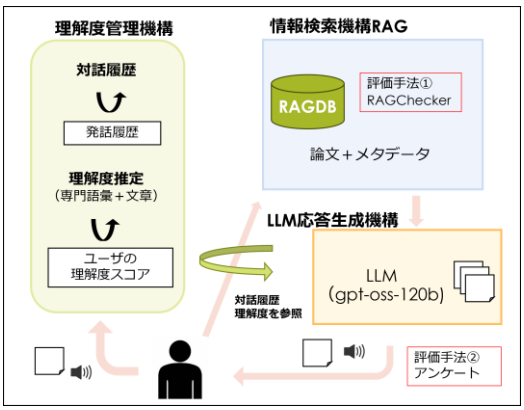


図 1 システム構成図

Fig.1. System Architecture

＜2・2＞理解度管理機構　理解度管理機構では，話者発話の理解度を定量的に推定するため，専門語彙難易度および文章難易度の 2 指標を用いる．文章難易度は文構造の複雑さを捉える指標である一方，専門語彙に起因する理解負荷を十分に反映できない場合がある．一方，専門語彙難易度のみでは，文全体の説明構造や表現の平易さを評価することが困難である．本研究では，これら 2 指標を相補的に用いることで，より実際の理解負荷に近い理解度推定を行う．

専門語彙難易度の算出には，対象ドメインに基づいて構築した専門語彙難易度辞書を用いる．辞書中の語彙は，論文集合における出現頻度に基づき 3 段階の難易度に分類する．入力文に対して固有表現抽出を適用し，抽出された専門語彙に対応する難易度を取得する．複数の専門語彙が含まれる場合には，高難易度語彙の影響を過小評価しないため，加重平均を用いて文全体の専門語彙難易度を算出する．単純平均では，少数の高難易度語彙が含まれる場合でも全体の難易度が低く見積もられる可能性があるため，本研究

©2026 IEE Japan

では高難易度語彙の寄与を強調する加重平均を採用し，専門語彙に起因する理解負荷を反映する設計とした．

文章難易度の推定には，日本語文章難易度判別システム（jreadability）を指標として難易度ラベルを付与した文章難易度辞書を用いる．入力文をベクトル化し辞書内文章との類似度に基づいて文章難易度を推定する．これら 2 指標を統合し，話者理解度を低・中・高の 3 段階で判定する．

＜2・3＞LLM 応答生成機構　LLM 応答生成機構では，情報検索機構から得られた検索チャンクと，理解度管理機構によって推定された理解度レベルを統合し，話者理解度に応じた応答を生成する．本システムでは，理解度レベルに基づいて応答表現の専門性や情報量を段階的に制御する設計とする．理解度が低い場合には専門用語の使用を抑えた平易な説明を行い，理解度が中の場合には必要最小限の専門用語を補足説明とともに用いる．理解度が高い場合には，専門用語を前提とした詳細な説明を生成する．これにより，話者の理解度に対して過不足のない情報提示を行い，対話の冗長化を抑制することを目指す．

３．評価手法

本研究では，提案システムの有効性を検証するため，理解度管理機構における理解度推定精度の評価を行った．評価には，客観的な文章難易度指標である jreadability を用い，理解度推定結果との対応関係を確認した．評価用のテストケースは，「低理解度」および「高理解度」に対応する入力文を各 10 問ずつ用意し，jreadability により初級と判定された文章を「理解度：低」，上級と判定された文章を「理解度：高」とする正解ラベルを付与した．比較手法として，提案する辞書ベースの理解度推定手法に加え，入力文のみを LLM に与えて理解度を推定する LLM 単体による手法を用いた．なお，jreadability は一般的な日本語文章を対象とした難易度指標であり，本研究では理解度推定の正解としてではなく，推定結果が文章難易度の観点から極端に乖離していないかを確認するための外部基準として用いた．

４．結果

表 1 に示す結果より，本研究で用いた辞書ベースの理解度推定手法は，客観的な文章難易度指標である jreadability による難易度判定結果と高い一致を示している．すなわち，本手法は入力文の文章難易度を適切に捉えた上で理解度を推定できているといえる．一方，LLM 単体による推定では，低理解度の入力文に対して中間的または高理解度と判定される場合が見られた．これは，LLM が文意理解に優れる一方で，文章難易度そのものを明示的に評価する基準を持たないことに起因すると考えられる．

LLM 応答生成機構では，理解度推定結果に基づき，応答生成時の表現および情報量を段階的に調整する設計としている．理解度が低の場合には専門用語を避けた平易な説明を行い，理解度が中の場合には補足説明を伴って専門用語を用いる．理解度が高の場合には，専門用語を前提とした詳細な説明を行う．このような応答制御により，話者の理解度に応じた情報提示が可能となり，会話における冗長性の抑制が期待される．

表 1 テストケース（各 10 問）の結果
Table1.Test Case Results

	LLMのみ	推定結果
テストケース（理解度：低）	6問	9問
テストケース（理解度：高）	6問	10問

また，専門語彙を含む入力文に対する判定結果を確認したところ，文章難易度指標のみでは適切に評価できない事例が確認された．例えば，「EEG 信号を用いて脳状態を分類する」という入力文に対し，jreadability は一般語彙を中心とした形態素解析結果に基づいて難易度を判定するため，「EEG」のような専門語彙が一般語として扱われ，結果として中程度の難易度と判定された．一方，本研究の理解度管理機構では，「EEG」「分類」などの専門語彙が抽出され，高理解度として判定された．この結果は，文章構造に基づく難易度評価では捉えられない専門性を，本手法が補完できていることを示している．

以上より，本研究で提案する辞書を用いた理解度推定手法は，入力文の文章構造および専門語彙の両面を考慮した理解度判定を可能とし，LLM 単体による推定と比較して高精度な理解度推定を実現できる．さらに，推定結果を応答生成に反映することで，話者の理解度に応じた情報提示の制御が可能であり，専門的知識を扱う対話システムにおいて有効であるといえる．

５．まとめ

本研究では，話者の理解度推定を応答生成に反映する RAG ベース対話システムを構築し，評価を行った．推定された理解度に応じて応答中の専門語彙の使用や説明の詳細度が段階的に変化することを確認し，話者の理解度に応じた応答制御が可能であることを示した．今後は，理解度に応じた応答生成が話者の理解や満足度に与える影響を，アンケートによる主観評価によって検証する予定である．

文　献

(1) 安海　夕愛，佐藤　駿一，福田　卓海，高橋　聖：話者の理解度を考慮した RAG による応答システムの提案，2025 年電気学会電子・情報・システム部門大会(2025)

(2) 中野雄斗：Yuto Nakano，Shinnosuke Nozue: Hagi bot: A Multimodal Dialogue System for Smooth Discussion with Human-like Behavior and LLM-based Dialogue State Tracking，人工知能学会研究会資料，東北大学，理化学研究所(2023.12.13)

©2026 IEE Japan

ストレスデータ提示形式の違いによるユーザーの健康意識改善に与える影響の調査

川村　輝喜*，古賀　怜，佐藤　優大，杉村　博（神奈川工科大学）

The Impact of Stress Data Display Formats on Users' Health Awareness

Teruki Kawamura, Ren Koga, Yudai Satou, Hiroshi Sugimura (Kanagawa Institute of technology)

１．背景

ウェアラブルデバイスの普及により生体情報の可視化は日常的な健康管理手法となった。数値やグラフによる提示は客観把握に適しているがデータ解釈を暗黙的に要求し，認知負荷が生じると指摘されている(1)。特にストレス値のような負の健康状態を示すコンディション情報の提示は，ユーザーの健康意識および対処行動の動機付け形成へ影響を与える可能性が報告されている(2)。アバターなどの擬人化提示は CASA 理論の心理的外在化作用の可能性が示されており，さらに情動反応を喚起し，対処可能性の認識へ繋がる心理的入口を作る可能性が報告されている(3)。

２．目的と課題

本研究の目的は同一の高ストレス状態を想定したダミーデータを用いて，提示形式の違いがユーザーの心理反応に生む分布傾向と個人差を記述比較することである。ストレス状態を自己評価ではなく調整対象として捉える視点の導入がグラフおよびアバター条件で状態認識の容易さ，情動の喚起とセルフケア行動意図の形成傾向へ，どのように寄与するかを行動変容ステージの観点と接続し整理する点を課題とした。

３．提案

本研究ではストレスデータの提示形式を比較する際の評価観点として外在化軸を導入した。この軸はユーザー自身の評価ではなく，コンディションを外部対象として観察し回復行動の必要性が生まれるかを観察するための比較軸である。

＜3・1＞直感的な状態理解の比較　　提示情報を受け取った瞬間に状態把握が成立する認知の入口を記述する軸として設定する。グラフ提示では数値変化の把握のしやすさ，アバター提示では表情からの即時認識の成立しやすさを観察し分布の集中域と分散幅を比較整理する。

＜3・2＞情動反応の比較　　状態把握直後の心理的な揺らぎの強度と反応層の広がりを比較する軸として設定する。グラフ条件では負の情報に対する冷静な反応または心理的圧迫感の喚起傾向を記述し，アバター条件では表情を介した心理的インパクトや安心感の喚起傾向を比較する。

＜3・3＞セルフケア意図への接続傾向の比較　　提示情報の認識と情動喚起が成立した後，回復行動を望む心理的入口が観察できるかを比較整理する軸として設定する。ここではスコアの高低ではなく，行動意図が発生した回答者の割合，反応しない回答者の割合，意図の分布の散らばり，無回答の発生率を中心に比較整理する。

4．システム

本研究で用いたシステム構成を図 1 に示す。システムはウェアラブルデバイスから生体データをサーバーへ蓄積するデータ取得部と，蓄積されたデータをフィードバックとして視覚提示するデータ提示部で構成される。ストレス推定値は心拍変動データの変動幅から生成されるという一般的なウェアラブル設計を想定し，Garmin vívosmart 5 が実際にユーザー向けアプリで提示している指標設計を研究モデルの前提として導入した。本実験では提示形式の差分のみを比較対象とするため，数値とグラフかアバターのいずれの条件でも完全に同一のダミーデータを用いる設計とした。これによりストレス値の高低による影響を排除し，視覚インターフェースの違いのみが心理反応の分布差を生むかを比較できる構造を確保した。

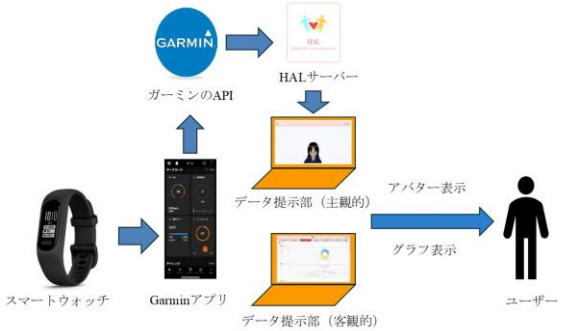


図 1　システム

Fig.1. System

©2026 IEE Japan

5. 実験

提示形式の違いがユーザーの心理的入口に生む影響を観察するため，同一の高ストレス状態を示すダミーデータをグラフ提示条件とアバター提示条件で閲覧させた。心理反応の記録には VAS（Visual Analog Scale）を採用した。これは心理的反応の強度を連続分布として記述でき，反応の集中域，分散幅，個人差の広がり，無回答の発生率を同一尺度で比較整理できるためである。被験者は提示画面を閲覧した直後にスコア入力を行い，状態認識の直感的理解，情動的覚醒，セルフケア行動意図，アバターへの共感投影に基づく改善意欲の４項目についてスコアを記述入力した。なお被験者数が限定的であるため，本実験では手法の優劣を断定せず，スコアの分布傾向と個人差の記述比較に重点を置いた。

6. 結果と考察

同一ダミーデータに対する VAS スコアの分布結果を示す。図 2 にはグラフ提示条件の結果を，図 3 にはアバター提示条件の結果を示した。本実験では心理反応の入口を測る 4 項目として，直感的状態理解(Q1)，情動的覚醒(Q2)，即時セルフケア行動意図(Q3)，共感的結びつきを介したセルフケア改善意欲(Q4)を設定した。これらを VAS スコアの分布として記述比較した。結果として Q1 ではグラフ提示条件で高スコア帯に回答が集中し，数値やグラフによる提示が直感的な状態理解の入口として作用しやすい心理層の存在が示唆された。Q2 では低から中域への集中が確認され数値基準が分析的把握や心理的圧迫感の入口として作用した層の存在が示唆された。アバター条件では Q1 と Q2 ともに中から高域へ広く分散し表情が情動的理解や対処可能性認識の入口となる層と解釈の個人差を強める層を含む可能性が示された。Q3 と Q4 では両条件でスコアが散乱し提示形式の変更のみでは行動意図へ一様に接続しない心理層の存在が確認された。これにより提示形式は認知や情動の入口形成に異なる層を生む一方で行動変換には追加の設計介入が必要であることが示唆された。

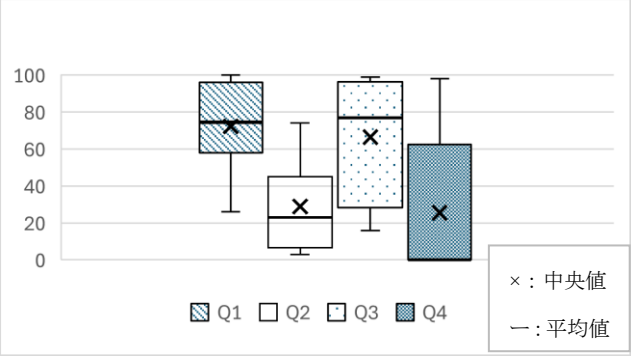


図 2　グラフ提示の結果
Fig.2. Results of the graph presentation

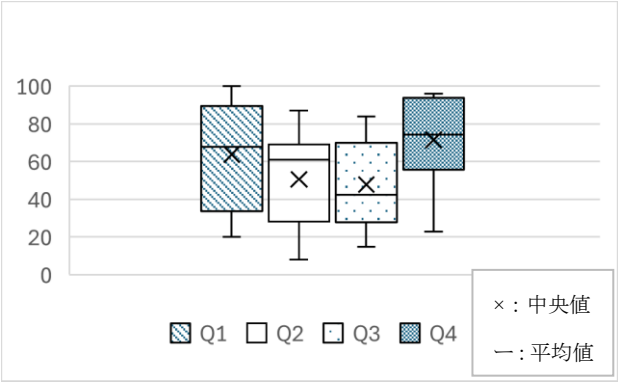


図 3　アバター提示の結果
Fig.3. Results of the Avatar presentation

7. まとめ

本研究では，ストレス情報の提示形式の違いが心理反応プロセスの入口と個人差分布へ与える影響を記述比較によって整理した。その結果，状態把握の認知的入口としてグラフ提示が作用しやすい層と，情動的入口としてアバター提示が作用しやすい層が確認された。一方で，セルフケア行動意図へ接続される層では個人差のばらつきが大きく，提示形式のみの選択では行動変換へ確実に接続できない心理的障壁の存在も示唆された。本研究の意義は，提示形式と心理反応の関係には個人差があり，行動意図への接続には提示設計に加えて評価構造と設計介入そのものの改善が必要であるという示唆を得た点にある。今後は，認知と心理的インパクトのバランスを保ちつつ行動意図へ接続する設計介入の実装と，評価指標の洗練が課題である。この研究は，神奈川工科大学のヒトを対象とした研究に関わる倫理審査委員会で承認されたもの（承認番号第 20250808-01）である。

文　献

(1) 岩本隆茂・久能弘道：認知負荷および情動反応の心理的入口に関する基礎的検討，北海道大学文學部紀要，36(2)，pp.101- 121，1988.

(2) Reeves， B.・Nass， C.：CASA（Computers Are Social Actors）理論 ― 人はコンピュータを社会的存在として扱う，The Media Equation（書籍），1996.

(3) 小林慧・河西哲子・村上悠樹・堀田千絵：負のコンディション情報提示に対する心理的防衛・回避反応の個人差分布の検討，認知心理学研究，20(1)，pp.670- 675，2022.

©2026 IEE Japan

自律移動ロボットの物体検出モデルに対する敵対的背景攻撃を用いた安全性評価

加藤　萌々子*，竹本　修，野崎　佑典，吉川　雅弥（名城大学）

Security Evaluation of Adversarial Background Attack in Object Detection Model for Autonomous Mobile Robots

Momoko Kato, Shu Takemoto, Yusuke Nozaki, and Masaya Yoshikawa (Meijo University)

１．はじめに

近年，自動運転を含む幅広い用途で自律移動ロボットが用いられるようになった。しかし，自律移動ロボットに搭載されている物体検出モデルは，敵対的攻撃の一つである敵対的背景攻撃[1]に脆弱であることが報告されている。敵対的背景とは，検出を妨害したい対象物の背景に敵対的なパターンを配置することで，対象物の検出を妨害する不正攻撃である。先行研究[1]では，固定カメラを想定して敵対的背景攻撃の脅威を評価しているが，物体検出モデルは移動体と対象物の距離や角度によってその精度が変化するため，移動体における評価が不十分である。そこで本研究では，自律移動ロボットを用いた実環境において，敵対的背景攻撃に対する物体検出モデルの耐性を評価する。

２．準備

＜2・1＞TurtleBot　　自律移動ロボット TurtleBot[2]は，ROS ベースの代表的なロボットプラットフォームであり，本研究では小型で拡張性の高い TurtleBot3 を用いる。TurtleBot3 は SLAM アルゴリズムによって同時自己位置推定と地図作成を行い，ナビゲーション機能で自律移動が可能である。TurtleBot と事前に接続したリモート PC からプログラムの開始指示を行う。

＜2・2＞YOLO　　YOLO[3]（You Only Look Once）は，リアルタイム物体検出のために設計された効率的なアルゴリズムである。このモデルは，画像全体を一度のニューラルネットワークの処理で検出可能なオブジェクトを抽出する仕組みを採用しており，高速性とシンプルさが特長である。YOLO は，物体そのものだけでなく，周囲の文脈情報を活用することで検出精度を向上させている。一方で，この文脈情報の利用は，敵対的攻撃への脆弱性を生む要因ともなり得る。

＜2・3＞敵対的背景攻撃　　敵対的背景攻撃は悪意を持った人が，検出を妨害したい対象物の背景に敵対的なパターンを張り付けることによって，対象物が検出できない，または検出精度を下げる攻撃手法である。敵対的背景の前にある複数の対象物に影響をもたらすため，複数の対象物が無差別に検出を妨害されるという特徴がある。

３．提案評価手法

本研究では，自律移動ロボットを用いた現実環境下における移動体に対する敵対的背景攻撃の評価手法を提案する。まず敵対的背景画像を生成し，印刷した背景画像を白い壁に貼る。その敵対的背景画像の前に検出対象物を配置し，自律移動ロボットとの距離 d・角度 θ を変更させて対象物の検出における信頼度スコアを評価する。提案評価手法を図 1，図 2 に示す。図 1 は距離 d を変化させる場合，図 2 は角度 θ を変化させる場合の評価手法である。

評価に使用する敵対的背景画像の生成手順を図 3 に示す。Pascal VOC データセットの縦横比を保持するように縦 416×横 416 ピクセルにリサイズした画像を用いて，縦 208×横 416 ピクセルの背景画像を生成する。生成時を含む物体検出は全て YOLOv5 を用いる。画像の検出結果に対する損失（$l_{model} = l_{obj} \cdot l_{cls}$）と，敵対的背景の滑らかさを保つための TV 損失（l_{tv}）を足し合わせた損失を最小化するように訓練する。このとき，オブジェクト検出確率損失（l_{obj}）を最小化する OBJ 背景画像，クラス検出確率損失（l_{cls}）を最小化する CLS 背景画像，オブジェクト確率とクラス確率の損失の積（$l_{obj} \cdot l_{cls}$）を最小化する OBJ-CLS 背景画像の 3 種類の敵対的背景を生成し評価する。また比較のために，背景を適用しない CLEAN，ランダムノイズ画像である NOISE 背景画像についても評価する。これらの背景画像を壁に貼り対象物を配置した後に，TurtleBot の Web カメラで撮影を行う。撮影データは ROS メッセージとしてリモート PC で受け取り，物体検出を行う。

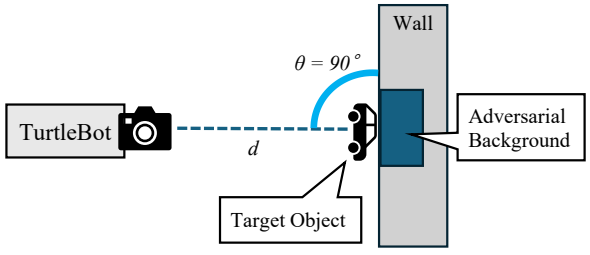


図 1　提案評価手法: 距離 d を変化させる場合
Fig.1. Proposed evaluation method: Changing distance

©2026 IEE Japan

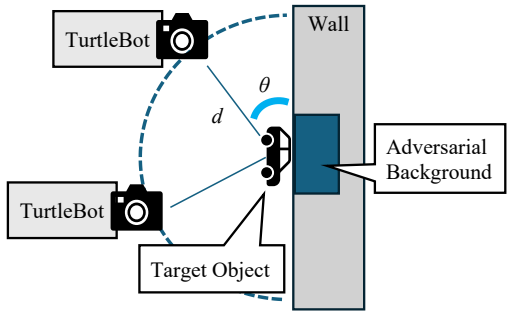


図２ 提案評価手法: 角度 θ を変化させる場合
Fig.2. Proposed evaluation method: Changing angle

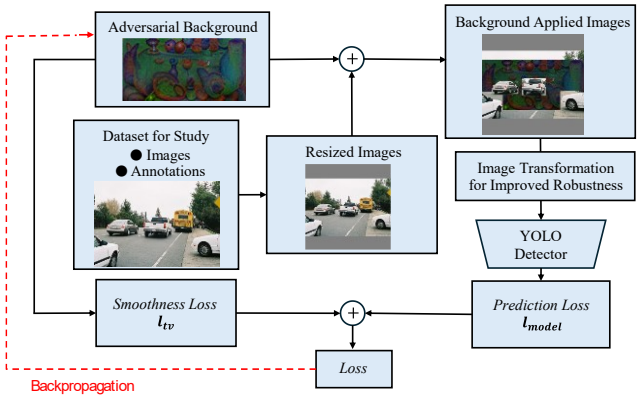


図３ 敵対的背景の生成手法
Fig.3. Adversarial background generation process

４．評価実験

＜4・1＞実験環境　　検出対象物と自律移動ロボット TurtleBot の距離と角度をそれぞれ変化させ，3 種類の敵対的背景画像について検出信頼度スコアを評価する。本研究では，検出対象物をミニカーとし，車クラスの信頼度スコアを評価する。実験環境イメージを図 4 に示す。敵対的背景は横 15cm×縦 7.5cm になるようにインクジェットプリンタで印刷し壁に貼り，長さ 7cm×高さ 2.5cm のミニカーを壁につけるように配置する。距離を変化させるとき，ミニカーと TurtleBot は直角（90°）に配置し，角度を変化させるとき，ミニカーと TurtleBot の距離は 50cm に配置した。評価に用いる，生成した敵対的背景画像を図 5 に示す。

＜4・2＞実験結果　　距離を変化させたときの信頼度スコアを表 1 に，角度を変化させたときの信頼度スコアを表 2 に示す。表 1 から分るように，距離を変化させるとき OBJ-CLS の信頼度が最低になることが多かった。一方表 2 のように, 壁と直角に近い 60 から 120° では OBJ-CLS の信頼度が最低になり，平行に近い 30° と 150° では OBJ が最低になった。これらより，壁と自律移動ロボットが直角に近い場合は, OBJ-CLS 背景画像に対して脆弱になりやすく，壁と自律移動ロボットが平行に近い場合は OBJ 背景画像に対して脆弱になりやすいと考えられる。また表 1，表 2 の全ての場合で, 3 種の敵対的背景のうち最低となった背景種類の信頼度スコアは，敵対的背景を貼っていない CLEAN, NOISE の信頼度よりも低く，敵対的背景により信頼度スコアが低下することを確認した。

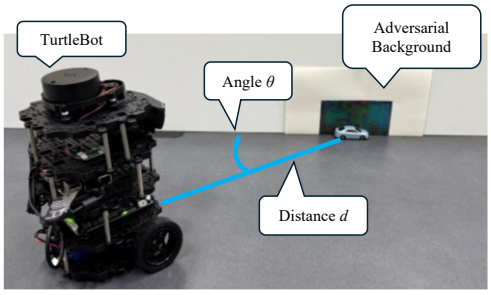


図 4　評価実験環境
Fig.4. Example of evaluation experiments

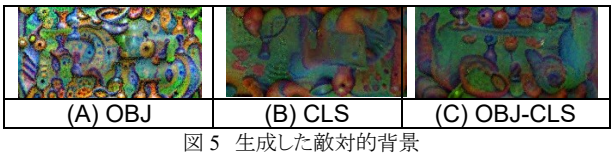


図 5　生成した敵対的背景
Fig.5. Generated adversarial backgrounds

表 1 距離 d を変化させたときの信頼度スコア[%]
Table 1. Confidence score for each distance

	距離 d [cm]			
背景種類	20	40	60	80
CLEAN	84.62	90.48	90.45	87.34
NOISE	85.78	90.04	88.72	69.79
OBJ	85.77	88.38	83.81	68.21
CLS	69.31	89.14	**67.63**	56.02
OBJ-CLS	**30.71**	**87.41**	82.78	**49.80**

表 2 角度 θ を変化させたときの信頼度スコア[%]
Table 2. Confidence score for each angle

	角度 θ [°]				
背景種類	30	60	90	120	150
CLEAN	83.89	89.70	91.08	90.53	64.15
NOISE	73.18	88.10	89.99	86.28	64.31
OBJ	**64.77**	80.02	83.78	61.25	**49.34**
CLS	79.22	84.75	82.05	68.92	73.51
OBJ-CLS	84.12	**62.71**	**73.35**	**50.38**	80.51

５．まとめ

本研究では，自律移動ロボットを用いて実環境における敵対的背景攻撃の評価を行い，物体検出モデルの脆弱性を明らかにした。今後，敵対的背景攻撃の対策手法を検討する予定である。

文　献

(1) 斧田洋人，他 ：敵対的背景を用いた歩行者検出妨害攻撃の提案と評価, SCIS 2025, no.3G4-1, pp.1-8(2025)

(2) TurtleBot , https://www.turtlebot.com/about/

(3) ultralytics , https://docs.ultralytics.com/

©2026 IEE Japan

マルチタスクモデルにおけるマハラノビス距離を用いた敵対的攻撃検知手法

沼田　瞳真*，竹本　修，野崎　佑典，吉川　雅弥（名城大学）

An Adversarial Attack Detection Method Using Mahalanobis Distance in Multi-Task Models

Toma Numata, Shu Takemoto, Yusuke Nozaki, and Masaya Yoshikawa (Meijo University)

１．はじめに

近年，マルチタスク学習は，自動運転や顔認識の分野において，1 つの分類器で 1 つのタスクを学習するシングルタスク学習よりも優れた性能を発揮することが報告されている。このようなマルチタスクモデルでは，公開タスクと非公開タスクがあり，非公開タスクのみ精度を低下させる敵対的サンプル[1]（AE）として Catastrophic Forgetting 攻撃[2]（CF 攻撃）及び CF delta 攻撃[2]が報告されている。非公開タスクはプライバシー情報を取り扱うことがあるため，その対策が重要であるが，筆者らの知る限り対策手法は報告されていない。そこで本研究では，マハラノビス距離を用いてヘッダ部分の異常を検知する検出器と，特徴抽出器の出力分布の異常を検知する 2 つの検出器を提案する。

２．マルチタスク学習

マルチタスク学習は，単一のモデルで関連する複数のタスクを同時に学習させ，各タスクの精度向上を図る手法である。具体的には，自動運転の分野では，セグメンテーション抽出と物体検出を同時に行うマルチタスクモデルなどが提案されている。図 1 に一般的なマルチタスクモデルの構成を示す。マルチタスクモデルは，共有のバックボーンBと固有のタスクヘッダHで構成する。本研究では，先行研究と同様に，全タスクの予測精度の最大化を目的とし，損失関数は，すべてのタスクの損失の和を用いる。

３．提案手法

本研究では，特徴抽出器の出力に着目した検出器（提案手法 1）と，ヘッダ部分に着目した検出器（提案手法２）のアルゴリズムの異なる AE 対策手法を提案する。

＜3・1＞提案手法 1: 特徴抽出器の出力に着目した検出器

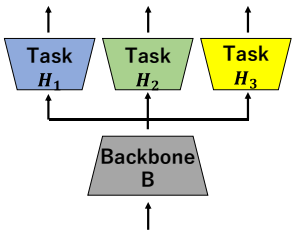


図 1: 一般的なマルチタスク分類器の構造
Fig.1. The architecture of a generic multi-task classifier

提案手法 1 では，シングルタスク用の出力に着目した検出器[3]を基に，CF 攻撃等により変化する特徴抽出器の出力を用いて検出する。先行研究[3]では，複数の層を用いてマハラノビス距離を計算していたが，提案手法 1 では，特徴抽出器の最終出力のみを用いて検出する。特徴抽出器の出力次元数をD，学習データに含まれる既知のクラス数をKとしたとき，本検出器の推論時の計算量は $O(K * D^2)$ と表すことができる。入力をx，平均をμ，共分散行列の逆行列をΣ^{-1}，マハラノビス距離をD_Mとしたとき，マハラノビス距離は式(1)で計算される。

$$D_M = \sqrt{(x-\mu)^T \Sigma^{-1} (x-\mu)} \tag{1}$$

提案手法 1 は下記の①から③で構成する（図 2）。

① 学習：事前に正常な画像データセットを使用し，特徴量を抽出する。ここで，マルチタスク学習におけるラベルの組み合わせ（例: 0_1_1_0_1）ごとの平均ベクトルμを計算する。また，全データから共分散行列の逆行列Σ^{-1}を算出する。

② 閾値の決定：①とは異なる正常な画像データセットから，各画像に対して式(1)に基づき，特徴抽出器の出力と最も近いクラス分布とのマハラノビス距離（最小距離）を計算し，95 パーセンタイル点を基準に正常とみなす距離の閾値を設定する。

③ 攻撃検知：検知対象の画像に対して同様に最小マハラノビス距離を計算する。この値が②で設定した閾値よりも大きい場合，その画像は正常な分布から逸脱しているとみなし，AE であると判定する。

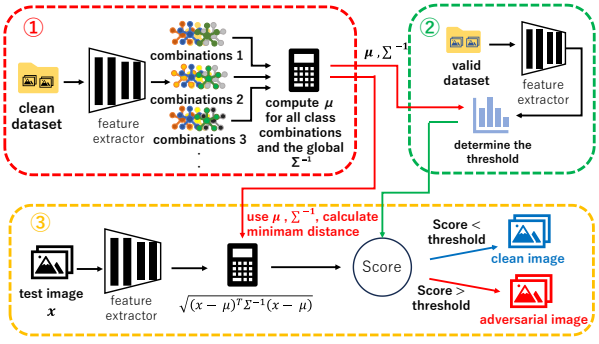


図 2: 提案手法 1 の概要
Fig.2. Overview of the proposed method 1

©2026 IEE Japan

＜3・2＞提案手法 2:ヘッダ部分の異常を検知する検出器

CF 攻撃及び CF delta 攻撃は，特定のタスクの精度のみを選択的に低下させるよう設計されている。この攻撃特性に着目し，提案手法 2 ではタスク間の出力の相関関係（一貫性）をマハラノビス距離によって定量化することで，AE を検知する。既存手法[4]では，物体検出とセグメンテーション抽出という特定のタスクペアに対し，領域の重なりやラベルの一致度に基づいて信頼度スコアを定義していた。対して提案手法 2 は，タスクの種類に依存せず，各タスクの最終出力の統計的性質のみを用いるため，汎用的に使用できる。提案手法 2 は下記の①から③で構成する（図 3）。

① 事前に攻撃を含まない正常な画像データセットをモデルに入力する。マルチタスクモデルがT個のタスクを持ち，各タスクが 2 値分類であると仮定すると，各タスクの出力をすべて結合した$L = 2T$次元のベクトル x を作成する。このベクトルxの平均 μ 共分散行列の逆行列Σ^{-1}を計算して保持する。

② 閾値の決定：①とは異なる正常な画像データセットに対し，同様に出力ベクトルを作成する。①で求めた平均μと共分散行列Σ^{-1}を用いて式(1)に基づき各画像のマハラノビス距離を計算し，その分布の 95 パーセンタイル点を閾値として決定する。

③ 攻撃検知：検知対象の画像に対しても②同様にマハラノビス距離を計算する。この値が②で設定した閾値よりも大きい場合，タスク間の出力整合性が取れていないとみなし，AE であると判定する。

この手法はロジットの総次元数をLとしたとき，推論時における計算量は$O(L^2)$と表すことができる。$D \gg L$であるため，$O(K * D^2)$に比べて計算コストが大幅に小さい。

4. 評価実験

実験では，ResNet-18 を対象に，顔画像データセット CelebA を学習させたマルチタスクモデルを使用した。ここで，モデルが判断するタスクは，男性であるか (a)，髪がうねっているか (b)，リップを塗っているか (c)，笑っているか (d)，髪が黒いか (e)の 5 つである。そして，このモデルを対象に CF 攻撃及び CF delta 攻撃によって AE を生成した。実験結果を表 1 に示す。表 1 は閾値を 95%に設定

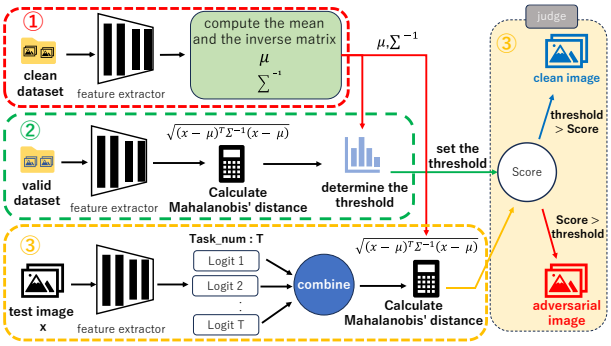


図 3: 提案手法 2 の概要
Fig.3. Overview of the proposed method 2

表 1：閾値を 95%に設定した際の検知率と AUROC (%)
Table1. Detection rate and AUROC (%) at a threshold of 95%.

	target-task	CF	CF delta beta : 20, gamma : 1
比較手法（MSP）	a	10.20 (57.50)	5.40 (44.05)
	b	6.80 (54.31)	2.40 (35.98)
	c	9.70 (54.59)	7.90 (48.27)
	d	11.30 (65.17)	1.80 (41.03)
	e	6.90 (54.73)	3.80 (41.80)
提案手法 1	a	2.40 (45.71)	74.10 (90.99)
	b	1.00 (36.42)	69.70 (88.88)
	c	1.40 (41.70)	69.20 (89.78)
	d	1.60 (42.00)	51.30 (78.82)
	e	1.00 (31.92)	58.30 (83.68)
提案手法 2	a	3.60 (40.35)	71.80 (86.29)
	b	2.00 (38.11)	70.80 (88.51)
	c	4.20 (41.73)	64.20 (81.52)
	d	3.50 (33.53)	47.40 (71.82)
	e	3.60 (37.33)	54.10 (80.87)

した際の AE の検知率及び括弧内に AUROC をそれぞれ示している。比較対象としては，モデルの Softmax 出力を監視して確信度が低い入力を AE とみなす「MSP（Maximum Softmax Probability）」を採用した。表 1 から比較対象の MSP では検知が困難であったのに対し，二つの提案手法は CF delta 攻撃の AE を有効に検知することができた。一方で CF 攻撃の AE に対して検知が不十分だった要因として，ヘッダの出力に基づく検出器では，ターゲットタスクへの微小な異常が他タスクの正常な挙動に相殺され，全体として正常と判定されたと考えられる。また，特徴抽出器に基づく検出器でも，攻撃による変化が自然な特徴の範囲内に留まり，正常分布に埋没したためと考えられる。CF delta 攻撃の AE は，人から見た精度維持のために特徴量を過剰操作しており，その結果，分布が正常範囲から大きく逸脱したため，2 つの検出器で検知できたと考えられる。

5. まとめ

本研究では，マルチタスクモデルに対する CF 攻撃及び CF delta 攻撃の対策として，マハラノビス距離に着目した 2 つの AE 検知手法を提案した。今後は，他の敵対的攻撃に対する有効性について評価していく予定である。

文　献

(1) I. J. Goodfellow, et al., Proc. of ICLR2015, 1～11 (2015)

(2) 永池　他：SCIS2024 講演論文集，4F1-1，1～8 (2024)

(3) L. Kimin, et al., Proc. of NeurIPS2018, 1～11 (2018)

(4) C. Cong, et al., Proc. of ICLR2025, 1～35 (2025)

©2026 IEE Japan

敵対的サンプルに対する Soft K-means によるリカラーリング対策手法とその評価

伊藤　楓香*，竹本　修，野崎　佑典，吉川　雅弥（名城大学）

A Recoloring Countermeasure Method Using Soft K-means for Adversarial Samples and Its Evaluation

Fuka Ito, Shu Takemoto, Yusuke Nozaki, and Masaya Yoshikawa (Meijo University)

１．はじめに

近年，様々な分野で導入されている画像推論 AI に対して，敵対的サンプル（Adversarial Example : AE）の脅威が顕在化している。AE は画像に微細なノイズを加えることで画像推論 AI の推論を誤らせる攻撃である。そのため AE に対する防御手法として，クラスタリング手法の一つである C-means を用いたリカラーリング手法[1]が提案されている。一方で，C-means ではソフトクラスタリングによって防御を行うが，これを採用している手法は他にも報告されており，これらの手法についての評価は不十分である。本研究では，Soft K-means に着目した AE 防御手法を提案する。

２．準備

＜2・1＞Fast Gradient Sign Method（FGSM）　FGSM[3]はニューラルネットワークの損失関数に対する入力画像の勾配情報を利用し，誤推論を引き起こす方向に摂動を付加する攻撃手法である。FGSM は単一ステップで摂動を生成するため計算コストが低く，最も代表的な AE である。

＜2・2＞AE 防御手法　先行研究[1]では AE の防御手法として C-means によるリカラーリングを用いた手法を提案している。この手法は主に C-means によるクラスタリングとリカラーリングの 2 つで構成される。クラスタリングでは画像に含まれる各画素の画素値を RGB 空間の 3 次元上にプロットして C-means の目的関数を最小化することでクラスタリングを行う。次に，リカラーリングでは，メンバーシップ値とクラスタの中心値を用いて RGB 値の更新を行う。新しい画素値は各クラスタの中心値と対応するメンバーシップ値を積和演算することで求められる。

３．提案手法

提案防御手法は，AE に付加されたノイズの影響を軽減することを目的として，クラスタリング処理とリカラーリング手法から構成される。提案手法の概要を図 1 に示す。まず，悪性なノイズが付与された AE に対し，クラスタリング処理である Soft K-means[2]を用いて対象画像の色情報を抽出する。Soft K-means はハードクラスタリングである K-means を拡張したソフトクラスタリング手法である。各画素点は複数のクラスタに同時に属することが可能であり，その所属度合いを確率的または重み付きの値w_{ik}として扱う。クラスタKへの所属度w_{ik}は，画素点x_iとクラスタ中心c_kの距離に基づき式(1)で定義される。

$$w_{ik} = \frac{\exp(-\beta\|x_i - c_k\|^2)}{\sum_{j=1}^{K}\exp\left(-\beta\left\|x_i - c_j\right\|^2\right)} \quad (1)$$

ここで，Kはクラスタ数，βは距離に対する感度を制御するパラメータである。また各クラスタ中心c_kは，所属度を重みとして式(2)により更新される。

$$c_k = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_{ik}x_i}{\sum_{i=1}^{N} w_{ik}} \quad (2)$$

以上の所属度計算とクラスタ中心更新を収束条件が満たされるまで反復することでクラスタリングを行う。その後，各画素において各クラスタの中心と対応するメンバーシップを積和演算して算出された値tを，後段のリカラーリング手法に伝搬させる。最後に，リカラーリング手法では先ほどの算出値tを新たな RGB の値として更新する。提案手法で生成された保護画像は AE によるノイズの影響が抑制でき，画像推論 AI の頑健性が向上する。

４．評価実験

＜4・1＞実験環境　評価用 AE は，ImageNet2012 の検証用データから 100 枚を用い，式(3)に示す FGSM[3]による AE を生成する。

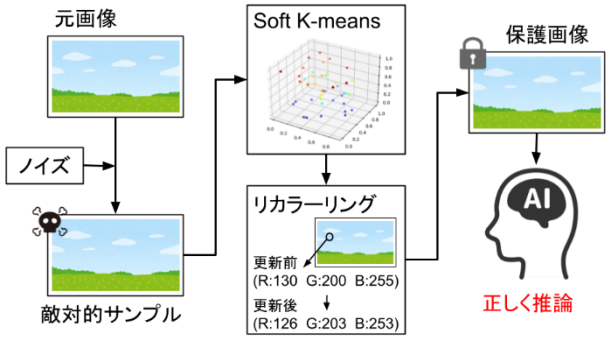


図 1 提案手法の概要

Fig.1. Overview of proposed methods

©2026 IEE Japan

$$x_{adv} = x + \varepsilon \mathrm{sign}\left(\nabla_x J(\theta, x, y)\right) \qquad (3)$$

FGSM の摂動の強さεは 0（元画像），1/255，4/255 の 3 種類とし，提案手法と従来手法[1]の頑健性を比較する。使用する画像推論モデルは ImageNet の訓練データを学習させた Inception-V3 を用いる。

＜4・2＞評価手法　本研究では，保護画像の推論成功確率と処理時間と画像の品質について評価する。推論成功率は 100 枚の画像に対して正しいクラスに推論した枚数を，処理時間ではクラスタリングおよびリカラーリングの処理に要する 1 枚当たりの平均処理時間を評価する。画像の品質について Peak Signal-to-Noise Ratio（PSNR），Structural Similarity Index Measure （SSIM），Learned Perceptual Image Patch Similarity（LPIPS）を用いて評価する。PSNR は，画素の平均二乗誤差を対数化した代表的な画像品質の指標（dB）であり，一般的に値が高いほど画像の品質が良い。SSIM は構造類似度を示し，エッジや局所コントラストの保存度が評価できる。一般的に値が 1 に近いほど二つの画像が類似していることを示す。LPIPS は，学習済みの CNN の特徴量差分で知覚的な違いを測る指標であり，一般的に値が 0 に近いほど画像間に知覚的差異がないことを示す。本研究では，提案手法のクラスタリング数$K = 32$として保護画像を生成する。また比較として従来手法 C-means を用い，先行研究と同一条件である$K = 16$で防御を行う。

＜4・3＞実験結果　推論成功率を表 1，処理時間を表 2，画像の品質評価を表 3 に示す。無対策の AE と提案手法を適用した保護画像が図 2 と図 3 である。表 1 から摂動強度が 1/255 の時，提案手法における推論成功率は 75%であり，提案手法は従来手法[1]と同等の AE 耐性を有することが分かった。また表 2 から，従来手法と比較して処理時間を短縮できることが分かった。これは，提案手法である Soft K-means のメンバーシップの更新におけるアルゴリズムが乗算と加算中心であるのに対し，従来手法である C-means ではべき乗計算が含まれるため，提案手法の計算量が従来手法よりも小さくなるからだと考えられる。表 3 より SSIM は 1 に近い数値であることから，提案手法によるリカラーリングにおいて適用前と適用後の画像間に差異が少なく，十分実用的である。図 2 と図 3 を比較した時，視覚的にも差異がほとんど見られない。したがって，提案手法は各指標と目視の両方で劣化が少ないため，汎用性が高いといえる。

表 1 各防御手法における推論成功率（%）

Table 1. Inference success rate for each defense method(%)

防御手法＼摂動強度	0(元画像)	1/255	4/255
無対策	100	48	31
提案手法	83	75	54
従来手法[1]	89	76	53

表 2 各防御手法に要する処理時間（s）

Table 2. Processing time for each defense method(s)

提案手法	27.9
従来手法[1]	56.7

表 3 画像の品質に対する評価

Table 3. Evaluation of image quality

	PSNR ↑	SSIM ↑	LPIPS ↓
提案手法	25.7	0.871	0.0899
従来手法[1]	26.6	0.902	0.0776

図 2 AE 画像

Fig.2. AE image

図 3 提案手法を適用した保護画像

Fig.3. Protected image using the proposed method

５．まとめ

本研究は，Soft K-means を用いた新たな AE 防御手法を提案した。今後は複数の AE 生成手法に対する評価が挙げられる。

文　献

(1)石田知勢，他，”リカラーリング手法に着目した敵対的サンプルへの対策手法” 信学技報，IEICE-CAS-123，no. 438，2024.

(2)C. Bauckhage, “Lecture notes on data science: Soft k-means clustering,” 2015.

(3)Ian J, et al. , “Explaining and Harnessing Adversarial Examples,” Proc. of the ICLR, 2015

©2026 IEE Japan

農作業の軽労化を目的とした収穫作業台車の作業者追従に関する研究
—複数作業者環境下における台車制御システムの構築—

種田 匠真 *，鳥井 昭宏，道木 加絵，元谷 卓（愛知工業大学）

Research on worker following by a harvesting cart for workload reduction in farm work
-Development of a cart control system in multi-worker environments-

Shoma Taneda, Akihiro Torii, Kae Doki, Suguru Mototani(Aichi Institute of Technology)

1 研究背景・目的

現在、日本の農業は深刻な労働力不足に直面している。そこで筆者らは、キャベツの拾い採り作業の軽労化に向け、作業台車（以下、台車）の知能化を目指してきた。従来、単独作業者環境下で 3 次元点群を用いた姿勢識別および距離に基づく台車制御システムを構築したが [(1)]、複数作業者が混在する環境下において特定の対象を誤認し、制御に支障をきたすおそれがある。そこで本稿では、複数作業者環境下で特定の作業者を正確に検出するための手法を提案する。

2 提案システム

図 1 に提案するシステムの概要を示す。

(1)Depth camara による点群取得

Intel 社製の RealSense Depth Camera D455 を台車の上方 2.0[m]、水平面に対して約 30[°] 下向きに固定し、物体の 3 次元座標を取得する。取得される生データは膨大であるため、計算負荷の軽減を目的とした前処理を行い、1 フレームあたり約 20,000 点の点群を取得する。

(2) 2 次元化と DBSCAN によるクラスタリング

取得した点群は、高さ情報（z 座標）を無視し、実空間の xy 平面上に投影する。ここで、各座標値はカメラを原点とした実空間の距離（単位：[m]）を示す。投影された 2 次元座標に対し、式 (1) に示すユークリッド距離 d[m] を用いた DBSCAN アルゴリズムを適用する。

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \qquad (1)$$

DBSCAN では、式 (1) からあらかじめ設定した近傍半径 ϵ[m] 以内にある点を同一クラスタと判定することで、ノイズ除去と作業者の分離を行う。

(3) 最短距離作業者の選定

分離された各クラスタの中から、追従対象となる作業者を選定する。台車のカメラ設置位置（原点）から各クラスタ内の各点への距離を算出し、その最小値が最も小さいクラスタを「識別対象の作業者」として選定する。

(4)PointNet による姿勢推定

選定された作業者の点群データは、PointNet へと入力される。学習モデルにより、作業者の姿勢状態を「収穫作業中（Harvesting）」または「移動中（Approaching）」のいずれかに識別する。

(5) 台車制御

識別された姿勢に基づき、台車を移動する。

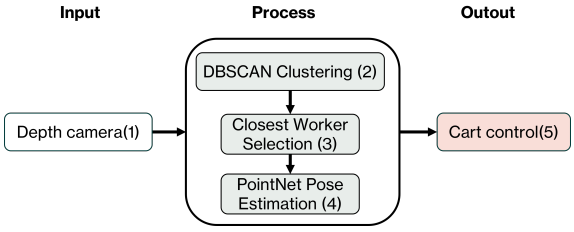


Fig. 1: Overview of the proposed system

Table 1: Successful detection rate (3-worker scenario)

	$Parameter\ \epsilon$ [m]			
$min_samples$	0.15	0.20	0.25	0.30
50	71.1%	69.0%	81.0%	79.8%
80	93.8%	89.9%	97.7%	88.3%

3 パラメータの選定と評価

〈3･1〉作業者検出率の定義

提案した複数作業者環境下におけるクラスタリング手法の有効性を検証するため、作業者 3 人が混在する環境下での検出率を評価した。ここで、検出率 R_{det} は以下の式で定義される。

$$R_{det} = \frac{N_{suc}}{N_{all}} \times 100 \quad [\%] \qquad (2)$$

ここで、N_{all} は全フレーム数、N_{suc} は視野内に存在する 3 名の作業者が DBSCAN によって正しく 3 つの独立したクラスタとして分離・抽出されたフレーム数である。本指標により、複数作業者環境下における作業者の検出精度を評価する。

〈3･2〉パラメータによる検出精度の比較

実空間座標（単位：[m]）に基づき、近傍半径 ϵ および最小点数 $min_samples$ を変化させた際の検出率の結果を表 1 に示す。実験の結果、$\epsilon = 0.25$ [m]、$min_samples = 80$ の設定において、97.7% という高い検出率が得られた。

4 まとめ

本稿では、複数作業者環境下で特定の作業者を正確に識別するための手法を提案した。実験の結果、複数作業者環境下における特定の作業者に対して、高い検出率を得られた。

文　献

（1） 高松昂洋他 ” 農作業の軽労化を目的とした収穫作業台車の作業者追従に関する研究 − 作業者状態を考慮した台車制御システムの構築 − ” 令和 7 年電気学会全国大会,3D5-09，2025 年

©2026 IEE Japan

敵対的学習条件に着目した水平連合学習の安全性評価

松原　麗那*，竹本　修，野崎　佑典，吉川　雅弥（名城大学）

Security Evaluation of Horizontal Federated Learning Focusing on Adversarial Training Conditions

Rena Matsubara, Shu Takemoto, Yusuke Nozaki, and Masaya Yosikawa (Meijo University)

１．はじめに

近年，プライバシー保護の観点から，複数のクライアントがそれぞれのデータを共有せずに分散したまま協調して学習を行う連合学習[1]が注目されている。一方で，連合学習は敵対的攻撃[2,3]に対して脆弱であることが指摘されており，その対策として敵対的学習[3]が提案されている。敵対的攻撃は，入力画像に微小な摂動を加えることで，モデルに誤った推論を引き起こさせる攻撃である。敵対的学習は，学習過程に敵対的サンプルを組み込むことで，敵対的攻撃に対する耐性向上を図る手法である。一方で，連合学習において，敵対的サンプルの生成手法の違いがモデルの推論精度に与える影響の評価は不十分である。

そこで本研究では，連合学習における敵対的学習を対象とし，敵対低サンプルの生成手法の違いが推論精度に与える影響を評価する。

２．準備

＜2・1＞連合学習　　連合学習[1]は，データを一箇所に集約することなく，各クライアントがデータを保持したまま協調してモデルの学習を行う手法である。

連合学習の流れを図 1 に示す。まず，サーバが初期モデルをクライアントに配布し，各クライアントは自身のデータを用いてモデルの学習・更新を行う。その後，各クライアントは学習後のモデルをサーバに送信し，サーバはそれらを加重平均により統合する。更新されたモデルは再びクライアントに配布され，この処理を繰り返すことで学習が進められる。

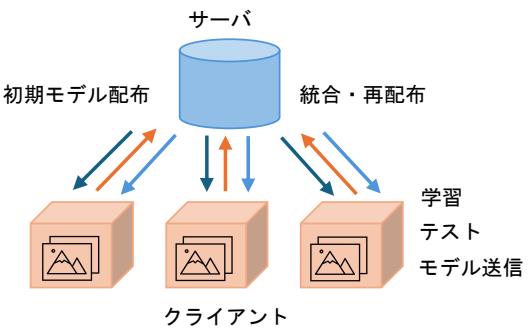


図 1 連合学習の概要
Fig.1 Overview of Federated Learning

＜2・2＞FGSM　　Fast Gradient Sign Method（FGSM）[2]は，入力画像に対する損失関数の勾配を利用して敵対的サンプルを生成する代表的な敵対的攻撃手法である。モデルのパラメータをθ，入力画像をx，正解ラベルをy，損失関数を$J(\theta,x,y)$とすると，FGSM による敵対的サンプルx_{adv}は式(1)で表される。

$$x_{adv} = x + \varepsilon * sign\left(\nabla_x J(\theta,x,y)\right) \tag{1}$$

ここで，$\nabla_x J(\theta,x,y)$は入力xに関する損失関数の勾配，$sign(\cdot)$は符号関数を表す。摂動強度εにより，入力に加える摂動の大きさを制御する。FGSM は 1 回の勾配計算で敵対的サンプルを生成できるため，高速な敵対的攻撃手法である。

＜2・3＞PGD　　Projected Gradient Descent（PGD）[3]は，FGSM を反復的に適用することで敵対的サンプルを生成する敵対的攻撃手法である。まず，入力画像xに対してεの範囲内でランダムな初期摂動を与え，初期値$x^{(0)}$を式(2)により生成する。

$$x^{(0)} = x + \delta, \qquad \delta \sim U(-\varepsilon,\varepsilon) \tag{2}$$

ここで，δは初期摂動を表し，$U(-\varepsilon,\varepsilon)$は区間$[-\varepsilon,\varepsilon]$の一様分布を表す。その後，各ステップにおいて，現在の入力$x^{(t)}$に関する損失関数の勾配を用いて，式(3)のように入力を更新する。

$$x^{(t+1)} = \Pi_\varepsilon\left(x^{(t)} + \alpha * sign\left(\nabla_x J\left(\theta,x^{(t)},y\right)\right)\right) \tag{3}$$

ここで，αは各ステップで入力を更新する際の大きさを表す係数，$\Pi_\varepsilon(\cdot)$は更新後の入力を元の入力xからの変化量がε以内となる範囲へ投影する操作を表す。この更新を指定のステップ数だけ繰り返すことで，最終的な敵対的サンプルを生成する。反復的な処理により，PGD は FGSM よりも強い攻撃となるが，計算量は増加する。

＜2・4＞敵対的学習　　敵対的学習[3]は，学習過程に敵対的サンプルを組み込むことで，敵対的攻撃に対するモデルの

©2026 IEE Japan

頑健性を向上させる手法である。学習時に通常データと敵対的サンプルを併用することで，モデルは入力に微小な摂動が加えられた場合でも誤分類しにくくなるよう学習される。

3．提案評価手法

本研究では，連合学習において FGSM[2]を用いた敵対的学習および PGD[3]を用いた敵対的学習の推論精度を評価する。

具体的な処理手順を図 2 に示す。各クライアントの学習時に FGSM および PGD を用いた敵対的学習をそれぞれ適用する。そして，テスト時に通常のデータに加えて，FGSM 攻撃および PGD 攻撃をそれぞれ行う。敵対的サンプルは，各クライアントが保持するデータを用いて生成し，学習とテストで用いる。敵対的学習では，クリーンデータと敵対的サンプルに対する損失の平均値に基づいてモデルを更新する。各クライアントにおける正解率の平均を用いて評価する。また，各クライアントが保持するデータは，同様の分布となるように分割する。

4．評価実験

実験では，クライアント数を 10，ラウンド数を 5 に設定し，データセットとして MNIST を用いた。総学習データ数は 48000 枚，総テストデータ数は 12000 枚である。各学習方法について，通常データ，FGSM 攻撃データ，PGD 攻撃データに対する推論精度を評価した。また，FGSM 攻撃および PGD 攻撃における摂動強度εを 0.1，0.2，0.3 と変化させた。PGD 攻撃では，ステップサイズαを$\varepsilon/10$，ステップ数を 10 に設定した。

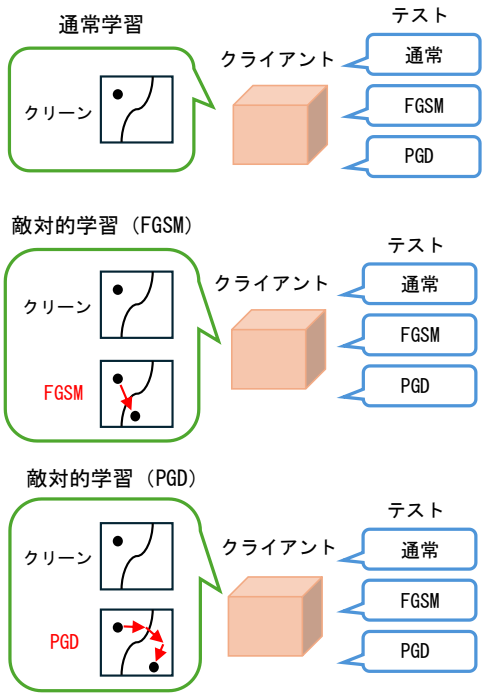


図 2 提案評価手法の概要
Fig.2 Overview of the Proposed Evaluation Method

表 1 通常データに対する正解率
Table 1. Accuracy on Normal Data

学習方法	正解率[%]
通常学習	98.08
敵対的学習（FGSM）	97.94
敵対的学習（PGD）	96.42

表 2 FGSM に対する正解率
Table 2. Accuracy under FGSM

学習方法	正解率[%]		
	$\varepsilon = 0.1$	$\varepsilon = 0.2$	$\varepsilon = 0.3$
通常学習	85.73	47.52	8.73
敵対的学習（FGSM）	92.59	82.82	66.83
敵対的学習（PGD）	91.66	83.43	72.64

表 3 PGD に対する正解率
Table 3. Accuracy under PGD

学習方法	正解率[%]		
	$\varepsilon = 0.1$	$\varepsilon = 0.2$	$\varepsilon = 0.3$
通常学習	76.41	4.38	0.00
敵対的学習（FGSM）	89.23	61.42	15.78
敵対的学習（PGD）	92.03	83.53	67.21

表 1 から表 3 に実験結果を示す。表 1 より，敵対的学習を行った場合においても，通常データに対する正解率は大きく低下しなかったことが確認できる。表 2 および表 3 より，敵対的学習を行うことで，FGSM 攻撃および PGD 攻撃下における正解率が，通常学習と比較して大きく向上したことがわかる。また，PGD を用いた敵対的学習では，FGSM 攻撃および PGD 攻撃の双方に対して高い正解率となる傾向が確認された。この傾向は，摂動強度が大きい場合において顕著である。さらに，PGD 攻撃下においては，$\varepsilon = 0.3$で，通常学習では正解率が 0%であったのに対し，PGD を用いた敵対的学習では約 67%まで正解率が向上した。以上のように，連合学習環境において，敵対的学習を導入することで攻撃耐性が向上することを明らかにした。

5．まとめ

本研究では，連合学習における敵対的学習の影響を評価した。その結果，敵対的学習に用いる敵対サンプル生成手法の違いが，攻撃下における推論精度に異なる影響を与えることを明らかにした。今後は，CIFAR-10 などのより多様なデータセットを用いた評価に加え，連合学習環境において有効な敵対的学習手法について検討する予定である。

文　献

(1) B. McMahan, et al., AISTATS, 2017

(2) I. J. Goodfellow, et al., ICLR2015, 2015

(3) A. Madry, et al., ICLR2018, 2018

©2026 IEE Japan

物体検出モデルの敵対的背景攻撃に対する画像分割を用いた対策手法

清家　陸人*，竹本　修，野崎　佑典，吉川　雅弥（名城大学）

A Countermeasure Using Image Segmentation Against Adversarial Background Attack in Object Detection Model

Rikuto Seike, Shu Takemoto, Yusuke Nozaki, and Masaya Yoshikawa (Meijo University)

１．はじめに

近年，深層学習を用いた物体検出モデルは，高精度化が進み，自動運転をはじめとした幅広い分野で必要不可欠な技術である。一方で，物体検出モデル YOLO（You Only Look Once）[(1)] に対しては，オブジェクトに特定の柄模様を貼付する敵対的パッチ攻撃の他，オブジェクトそのものではなく，バウンディングボックス領域外の背景領域にパッチを適用する敵対的背景攻撃によって検出精度が低下することが報告されている。これまでに敵対的パッチ攻撃における対策手法は提案されているが，敵対的背景攻撃に対しては筆者らの知る限りあまり報告されていない。そこで，本研究では敵対的背景攻撃が適用された画像に対して 3 段階で構成する検出アルゴリズムを用いた対策手法を提案し，その有効性について評価する。

２．関連研究

＜2・1＞敵対的パッチ攻撃

敵対的パッチ攻撃は，検出対象のオブジェクトに悪性な柄模様（パッチ）を貼付することにより，検出できないようにする，もしくは検出結果を誤らせる攻撃である。パッチは，検出モデルの損失関数が大きくなる方向に学習することで生成する。

＜2・2＞敵対的パッチ攻撃に対する対策手法

敵対的パッチ攻撃に対する代表的な対策手法として ObjectSeeker [(2)] が提案されている。ObjectSeeker は敵対的パッチが単一である状況下において画像の塗りつぶしにより敵対的パッチを画像上から除き，かつ検出対象の物体もしくはその一部が画像上に残る状況を作り出すことで検出モデルの精度を改善する。

＜2・3＞敵対的背景攻撃

敵対的パッチ攻撃は対象となるオブジェクトに柄模様を貼り付ける攻撃手法だったのに対し，敵対的背景攻撃は対象の背景部分に広くパッチを適用する。敵対的パッチとは異なりオブジェクトの上から適用する必要がないため，物理空間における無差別攻撃が容易という特徴をもつ。

適用範囲が敵対的パッチと比べて広いため，敵対的パッチと同じ手法を用いた対策は困難である [(3)]。

３．提案手法

本研究では，敵対的背景攻撃に対し，画像分割を用いた対策手法を提案する。提案手法は入力画像の領域に着目した 3 段階の処理を行うことで，正規の検出結果が得られるような検出用画像を生成する。

＜3・1＞手順 1: 画像の分割及び分割画像の検出

敵対的背景の影響を抑制するための前処理として，まず，入力画像を$N \times N$枚に分割する処理を行う。図 1 に$N = 3$の例を示す。ここでの分割の際は各分割画像同士に重複部分を持たせるため，分割画像の 25%分範囲を拡大して分割する。その後，分割した各画像に対して検出を行う。この処理での検出は敵対的背景以外の正規オブジェクトの探索を目的とした検出であるため，検出確信度の閾値tを通常の検出よりも低く設定する。ここで得られたバウンディングボッ

図 1: 分割画像検出処理（手順 1）

Fig.1. Segmented image detection processing（step 1）.

©2026 IEE Japan

クスの座標を手順 2 において用いる。

＜3・2＞手順 2: 各検出結果位置の統合および検出窓の作成

手順 1 から取得したバウンディングボックス座標を分割前画像内での座標に補正する。その後得たバウンディングボックスを手順 3 に利用する検出窓として統合を行う。図 2 に検出窓の例を示す。

＜3・3＞手順 3: 各検出窓の検出

手順 2 により得た各検出窓にpピクセルのマージンをとり，それ以外の領域を塗りつぶす。図 3 に塗りつぶし検出例を示す。これによって敵対的背景が塗りつぶされ，検出したいオブジェクトのみが残るため，敵対的背景の影響を小さくし，オブジェクトの検出精度を上げる。これにより得たバウンディングボックスを最終検出結果として利用する。

4. 評価実験

＜4・1＞実験環境

本研究では物体検出モデルとして YOLOv5 を用いる。対象クラスは Person クラスを設定し，データセットには Pascal VOC2010 [4] を用い，画像サイズを416×416ピクセルに変更したものを使用した。提案手法のパラメータとして，$t = 0.25$，手順 2 における窓の統合条件として Intersection over Union（IoU）の閾値uを 0.15，Intersection over Smaller（IoS）[5] の閾値sを 0.70，$p = 10$とした。

＜4・2＞評価手法

敵対的背景攻撃を適用したテスト画像に対して，提案対策手法を用いて検出し，対策手法なしの場合と比較する。ここでの検出成功判定には$u = 0.50$とした Average Precision 指標（AP）及び Recall60, 50, 30（検出確信度の閾値 0.60, 0.50, 0.30）[4] を用いる。

表 1 の結果から本対策手法を用いた場合の検出結果は AP 指標で 0.7960，Recall60 で 0.6529 となり，提案手法なしの場合と比べて大幅に検出率が向上した。また，Recall60 では元画像の検出結果と比較し，96%ほどの検出精度となった。従って提案手法は敵対的背景攻撃の対策手法として有効である。

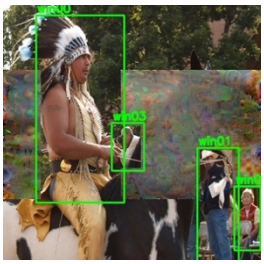


図 2: 検出の統合（手順 2）

Fig.2. Marge detection (step 2)

図 3: 塗りつぶし検出例（手順 3）

Fig. 3. Fill detection example (step 3)

4. まとめ

本研究では，敵対的背景における対策手法を提案した。評価実験から，画像分割を用いた敵対的背景攻撃に対する対策手法が有効な手法であることを実証した。今後の課題として，実環境における物体を用いた評価が挙げられる。

文　献

(1) J. Redmon et al.: You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 779-788（2016）

(2) C. Xiang, et al.: ObjectSeeker: Certifiably Robust Object Detection against Patch Hiding Attacks via Patch-agnostic Masking, Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy(S&P), pp.1329–1347（2023）

(3) 斧田，他：敵対的背景を用いた歩行者検出妨害攻撃の提案と評価，2025 年 暗号と情報セキュリティシンポジウム講演論文集，no. 3G4-1，pp.1-8（2025）

(4) M. Everingham et al.: The pascal visual object classes (voc) challenge, Proc. of the Int. J. of Computer Vision (IJCV), Vol. 88, no. 2, pp. 303–338（2010）

(5) J. BAI et al.: Area-based non-maximum suppression algorithm for multi-object fault detection, Frontiers of Optoelectronics, Vol. 13 Issue 4 , pp. 425-432（2010）

表 1: 検出結果

Table.1. Results of detection

	AP	Recall60	Recall50	Recall30
提案手法	0.7960	0.6529	0.7128	0.7975
無対策	0.3768	0.1601	0.2056	0.2727
元画像	0.8802	0.6756	0.7552	0.8533

©2026 IEE Japan

帯域制限した敵対的摂動による画風保護手法

加納　拓実*，竹本　修，野崎　佑典，吉川　雅弥　（名城大学）

An Artistic Style Protection Method via Bandwidth-Limited Adversarial Perturbations

Takumi Kano, Shu Takemoto, Yusuke Nozaki, and Masaya Yoshikawa (Meijo University)

１．はじめに

近年，拡散モデル（Diffusion Models）の発展が目覚ましく，テキストからの高品質な画像生成が可能となっている。特に，Low-Rank Adaptation （LoRA）[1]などの追加学習技術の普及により，少数の画像から特定の画風を模倣・生成することが容易になった。また，著作者の許諾を得ない無断学習による権利侵害の課題に対し，画風の模倣を阻害する代表的な防御手法として Mist[2]が提案されている。従来手法[2]は，画像全体に摂動を加えることで著作物を保護する一方で，拡散モデルの追加学習（LoRA）において画風情報が具体的に画像のどの周波数帯域に含まれているかは考慮されていない。本研究では，従来の防御手法 Mist を拡張し，帯域制限した新しい画風保護手法を提案する。提案手法では，周波数領域におけるマスキング処理を用いて，適応的に摂動を付加する帯域を制御する。

２．準備

＜2・1＞ 拡散モデル（Stable Diffusion）　本研究では，潜在拡散モデルの一種である Stable Diffusion[3] を対象とする。本モデルは，画像を低次元の潜在空間へ圧縮し，その空間内で拡散過程を行うことで，計算コストを抑えつつ高解像度な画像を生成する。

＜2・2＞ 拡散モデルへの追加学習（LoRA）　LoRA は，膨大なパラメータを持つモデル全体を再学習するのではなく，モデルへの入力に加える差分のみを学習することで，計算コストを大幅に削減する手法である。少数の画像で特定の画風を効率的に模倣できるため，個人環境での利用が拡大している一方，権利侵害の要因となっている。

＜2・3＞ 敵対的摂動による防御（Mist）　既存の防御手法として，Mist などが提案されている。これらは画像に人間には知覚できない微小なノイズ（敵対的摂動）を加えることで，AI の学習を妨害する。しかし，従来手法の多くは画像全体に一様な摂動を加えるため，画風情報がどの周波数帯域に依存しているかの検討が不足しており，防御性能と画質維持に課題がある。

３．提案手法

提案手法では，図 1 のように，保護対象画像に対し帯域を制限した摂動を加算することで，画風を模倣されない保護画像を生成する。具体的には，保護対象画像とターゲット画像から算出した損失に基づき勾配を求め，その勾配を高速フーリエ変換（FFT）により周波数領域へ変換する。ここで，中心距離に応じたソフトマスクをスペクトルに適用し，特定帯域のみを抽出した後，逆フーリエ変換（IFFT）で空間領域へ戻す。これにより，急激な遮断によって発生するリンギングを抑制しつつ，画風情報の主要因となる成分を集中的に撹乱する。生成された帯域制限摂動を元の画像に加算することで，保護画像を生成する。このように提案手法は，高周波ノイズのような視覚的な劣化を抑えながら，不適切な AI モデルへの学習を妨害する。

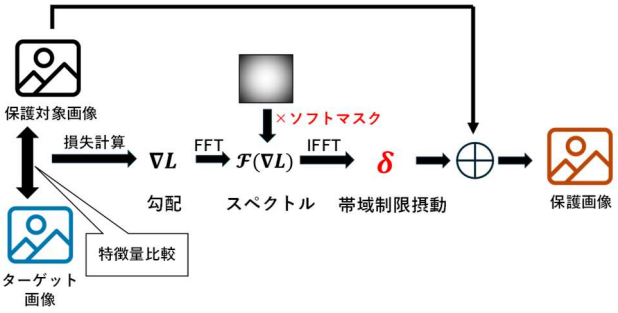


図 1．提案手法の概要
Fig.1. Overview of the proposed method

４．評価実験

＜4・1＞ 実験手法　提案手法の有効性を検証するため，フィンセント・ファン・ゴッホの代表作 8 点から切り出した計 40 枚（512×512 pixel）を学習データセットとして使用した。学習対象のモデルには Stable Diffusion v1.5 を採用し，LoRA による画風学習を行う。

比較手法として，以下の 4 条件を用いる。

(a)　防御なし：元画像をそのまま学習
(b)　全帯域防御（従来手法）：帯域制限を行わず，摂動を付加
(c)　高周波防御：画像の高周波成分のみに摂動を付加
(d)　低周波防御：画像の低周波成分のみに摂動を付加

ここで，ソフトマスクの半径dを，周波数空間における最大半径（画像サイズの半分である 256）に対する割合で定義する。具体的には，提案手法（低周波防御）においては半径dを 38（帯域幅の 15%）と設定し，中心からの距離 d< 38 の領域を摂動を付加する対象とする。一方，提案手法（高周波防御）においては半径dを 128（帯域幅の 50%）と設定し，$d \geq 128$の領域を摂動を付加する対象とする。

©2026 IEE Japan

＜4・2＞ 実験項目　　実験では，防御性能（生成画像の模倣度合い）と，学習画像の画質（防御に伴う劣化度合い）の 2 つの観点から評価する。画風の模倣を試行した生成画像の評価には，CLIP Score, LPIPS, FID を用いる。CLIP Score は，プロンプト"A painting by Vincent van Gogh"と生成画像との類似度，LPIPS は知覚的類似度，FID は，特徴量分布の類似度を評価する指標である。なお，CLIP Score および LPIPS は生成した 500 枚の平均値とする。また，保護画像の画質評価には，PSNR および SSIM を用いる。PSNR は，雑音成分の知覚感度に基づく画質評価指標，SSIM は，画像構造の類似度に基づく画質評価指標である。

＜4・3＞ 実験結果　　まず，生成画像の模倣度合いである防御性能について評価した。表 1 に生成画像の評価結果を，図 2 に生成画像の比較を示す。高周波防御は，防御なしと同等の CLIP Score であり，防御手法として有効性が低い。図 2 からも見た目の変化が小さいことがわかる。一方，低周波防御では CLIP Score が大きく低下し，Stable Diffusion の学習データを採用する閾値とされる LAION 基準値[4]を下回る高い防御性能を示した。図 2 からは，全体域防御と同じように格子状のテクスチャが見られる。

次に，保護画像の画質について評価した。表 2 に保護画像の画質評価を，図 3 に保護画像の比較を示す。PSNR は全ての手法で 30dB 付近の値であり，画質の劣化はあまりしていないように見える。一方，SSIM では，全帯域防御は 0.805 に留まった。対して，低周波防御は全ての手法の中で最も高い値となった。図 3 の視覚的な比較では微細な差異に留まるものの，この結果は，低周波防御が画素レベルでの構造情報を他の手法よりも正確に維持していることを示している。以上より，低周波防御は，保護画像の画質劣化を最小限に抑えつつ，拡散モデルを用いた画風の模倣に対して，防御できており，提案手法は有効であると考えられる。

５．まとめ

本研究では，拡散モデルの追加学習（LoRA）による画風模倣被害を防ぐため，周波数領域に着目した新たな防御手法を提案した。提案手法は，勾配情報に対して FFT およびソフトマスク処理を適用することで，特定の周波数帯域に限定した摂動を生成する。

評価実験の結果から，画風の模倣を阻害するためには，高周波成分よりも低周波成分への干渉が有効であることを明らかにし，提案手法である低周波防御は，従来の全帯域防御が抱えていた画質劣化の課題を解決し，画質維持と防御性能の両立を実現した。今後の課題として，画風によって防御に最適な周波数帯域が異なる可能性が挙げられる。これに対応するため，入力画像の特徴量に応じてマスクする帯域幅や強さを適応的に変化させるアルゴリズムの検討を進める予定である。

図 2．生成画像の比較
（左から防御なし，全帯域，高周波，低周波）
Fig. 2. Comparison of generated images
（From left: no defense, full-band, high-frequency, and low-frequency）

表 1．生成画像の評価
Table 1. Evaluation of generated images

手法	CLIP Score ↓	LPIPS ↑	FID ↑
全帯域防御（従来手法）	0.262	0.743	204.4
高周波防御	0.293	0.518	80.2
低周波防御	0.278	0.661	156.8
防御なし	0.296	-	-

図 3．保護画像の比較
（左から防御なし，全帯域，高周波，低周波）
Fig. 3. Comparison of protected images
（From left: no defense, full-band, high-frequency, and low-frequency）

表 2．保護画像の画質評価
Table 2. Image quality evaluation of protected images

手法	PSNR ↑	SSIM ↑
全帯域防御（従来手法）	30.059	0.805
高周波防御	29.804	0.770
低周波防御	29.655	0.837

文　献

(1) E. J. Hu, et al., Proc. of ICLR (2022)
(2) C. Liang, et al., Proc. of ICML, pp.20763–20786 (2023)
(3) R. Rombach, et al., Proc. of CVPR, pp.10684–10695 (2022)
(4) C.Schuhmann, et al., Proc. of NeurIPS, pp.25278–25294 (2022)

©2026 IEE Japan

RAG の検索精度向上に関する検討

大嶋　真広*，桐生　智志，鈴木　聡，飯坂　達也（富士電機）

A Study on Improving Retrieval Accuracy in RAG

Masahiro Oshima, Satoshi Kiryu, Satoshi Suzuki, Tatsuya Iizaka (Fuji Electric Co.,Ltd.)

１．はじめに

プラントの運転監視業務は，マニュアルに基づいて行われているが，経験の浅い運転員の場合は，複数の文書から必要な情報を短時間で探すことが難しい。

近年，大規模言語モデルと外部情報を取得するベクトル検索を組み合わせた検索拡張生成（Retrieval-Augmented Generation, RAG）[(1)]が提案されている。RAG により，ユーザーは検索質問文を入力することで，キーワードが一致していなくても類似度が高い文章を検索して，質問の回答が得られる。RAG の検索性能は事前のテキスト抽出処理と検索方法に影響を受ける。テキスト抽出において，検索する文章単位（チャンク）で文脈情報が失われないように，適切にチャンク分割しなければ検索性能が低下するリスクがある[(2)]。また検索方法は，厳密な単語の一致も考慮して，全文検索とベクトル検索を組み合わせたハイブリッド検索が提案されている。しかし，全文検索は文章を形態素解析して，その単語を検索するが，専門用語などは正しく分割できず検索できないことがある。

そこで本稿では，テキスト抽出の課題に対して文書構造や内容に合わせた改良と，検索方法の課題に対して専門用語を含む技術文書に合わせた改良を行い，その効果を確認したので報告する。

２．文書検索精度向上に向けた改良

＜2・1＞テキスト抽出の従来技術と課題　　テキスト抽出方法の概要を図 1 に示す。まず文書ファイルからテキストデータを頁ごとに抽出し，テキストデータをチャンクに分割する。その後，ベクトル検索用に各チャンクのテキストを埋込みモデル（multilingual-e5-large）でベクトル化し，文書 DB に記録する。また全文検索用に，各チャンクのテキストと文書名を形態素解析して名詞のみを抽出し，キーワードとして文書 DB に記録する。加えて文書名と頁番号を記録する。

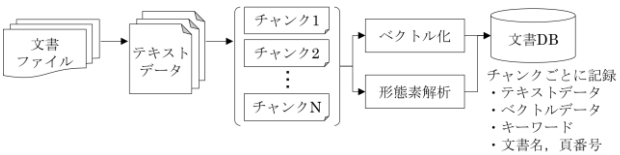


図 1 テキスト抽出方法の概要

Fig1. Overview of text extraction methods

今回比較対象とする従来技術として，文字の検出座標をもとに文字列を連結する座標ベースの方法とした。従来技術には，以下 4 つの課題がある。①段組み構造を正しい読み順で整形してテキスト抽出できず，文章が崩れてベクトル検索の性能が低下する。②チャンク分割する際に文脈情報が失われ，チャンク単位では何に対する内容かが分からなくなることがある。③表の構造を考慮しないため抽出した文章が崩れることや，チャンク分割により情報の対応関係が不明確になることがある。④目次などキーワードが多く存在する頁は検索されやすいが，検索質問文の回答生成には重要でない。

＜2・2＞テキスト抽出方法の改良　　従来技術の各課題に対して，文書構造や内容を考慮して以下 4 つの改良を行った。①読み順の考慮：段組みテキストを正しい読み順で取得・連結する。②上位見出しの付与（図 2(a)）：目次頁の情報をもとに，各チャンクの文章が属する見出し（項）及び上位の見出し（章節）をチャンクに付与する。これによりチャンク単位で何について書かれた文章かを明確にする。③表の整形（図 2(b)）：セル単位で文章を連結し，ヘッダーと各行の値をペアにして纏める。ヘッダーは，ルールベース（文字数とデータ型）処理により判定した。これによりチャンク分割後に，ヘッダーと各行の値との対応関係がなくなることを防ぐ。④不要頁の削除：検索のノイズになり得る表紙および目次頁のテキストを文書 DB に記録しない。

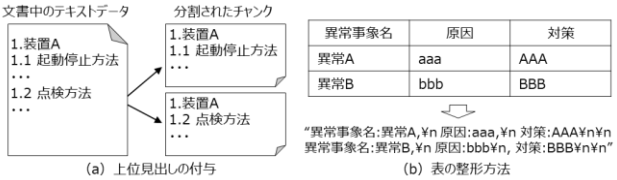


図 2 テキスト抽出方法の改良例

Fig2. An example of an improved text extraction method

＜2・3＞文書検索の従来技術と課題　　従来の文書検索技術としてベクトル検索とハイブリッド検索を評価する。ベクトル検索では，検索質問文を文書 DB 作成時と同一の埋込みモデルを使ってベクトル化し，文書 DB の各チャンクのベクトルデータとのコサイン類似度を求めることで，意味的に近い上位 N 件の文書を検索する。

ハイブリッド検索では，図 3 に示すようにベクトル検索と全文検索によりそれぞれ上位 2*N 件を抽出した後，それ

©2026 IEE Japan

ら文書の順位を統合して上位 N 件を検索結果とした。このとき，全文検索（BM25）では，検索質問文を形態素解析して単語に分割し，名詞のみをキーワードとして抽出して検索した。順位統合には，RRF（Reciprocal Rank Fusion）を用いた。RRF は式(1)によって各検索方法の順位に応じた得点を算出して，それらの得点を合算することで順位を統合する方法である。k は平滑化係数，rank は各検索方法の順位であり，k=60 とした。

$$\text{RRF Score} = 1 / (k + \text{rank}) \quad (1)$$

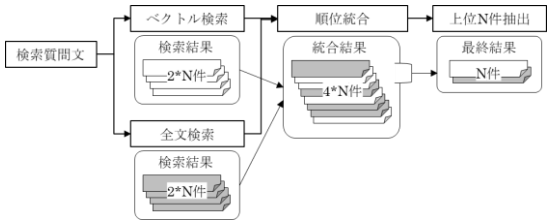


図 3 ハイブリッド検索による文書検索フロー

Fig3. Flowchart of the hybrid search method

従来技術の全文検索で用いられる BM25 は，単語の出現頻度と逆文書頻度，総単語数を用いて文書の類似度を計算する方法であり，単語の文字数は考慮していない。装置名や異常事象名などの専門用語は文字数が長くなる傾向があるが，BM25 では類似度が低く検索できないことがある。

＜2・4＞文書検索方法の改良　　提案手法による文書検索フローを図 4 に示す。提案手法では全文検索の得点に一致文字数による重みを加算し，再順位付けする。再順位付けに用いる得点は，式(2)より算出した。len(q)は検索質問文のキーワードのうち，文書に含まれるキーワードの総文字数である。キーワードには形態素解析により名詞のみ抽出した単語と，隣接する名詞を 1 つに連結した単語を含めた。またλは重み付けの調整用係数であり，λ=1.2 とした。

$$\text{Keyword Score} = \text{BM25 Score} + \lambda \times \log(\text{len}(q)+1) \quad (2)$$

さらに RRF による順位統合後に検索結果の絞り込みと，埋込みモデルよりも比較的性能の良いリランカーによるリランキングを追加した。リランカーには日本語の検索性能が高く，軽量な japanese-reranker-tiny-v2 を用いた。

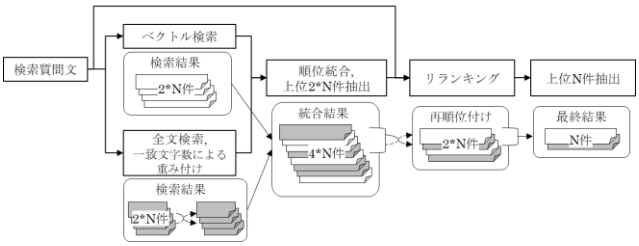


図 4 提案手法による文書検索フロー

Fig4. Flowchart of the proposed methods

３．実験条件

＜3・1＞データセット　　プラントの運転監視業務に関する文書群（監視制御システムの取扱説明書，図面，トラブルシューティング集，運転操作基準，保安規則）を検索対象として用いた。上記文書は 37 件（合計 583 頁）の PDF ファイルである。検索性能を評価するために検索質問文と関連する正解文書名・頁番号のペアを 646 件作成した。

＜3・2＞評価指標　　検索質問文に対する回答の生成に必要な正解文書・頁が検索できるかを評価するために，以下の 2 つの指標を算出した。

Hit Rate@N：検索質問文と関連する正解文書・頁が検索結果上位 N 件に存在する割合。

MRR@N：検索結果上位 N 件のうち，検索質問文と関連する正解文書・頁の順位の逆数の平均値。より上位に正解文書が現れるほど高い値を示す。

４．実験結果

＜4・1＞チャンクサイズによる性能比較　　今回対象の文書における最適なチャンクサイズを確認した。座標ベースのテキスト抽出方法において，チャンクサイズを 256～2048，セパレータを[”¥n”,”¥n¥n”]（改行コード）として，再帰的に分割したときの検索結果を比較した。その結果，どの検索方法でもチャンクサイズ 512 のときに Hit Rate が最大となった。そのため次節の実験ではチャンクサイズ 512 とする。

＜4・2＞テキスト抽出方法と検索方法による性能比較

表 1 に検索結果を示す。どの検索方法も文書構造を考慮したテキスト抽出により検索性能が向上した。表 1(A)より，提案手法では検索質問文の 93.2%に対して関連文書を上位 4 件以内に検索でき，必要な情報の取りこぼしが低減できている。また，表 1(B)より平均して 1.3 位（MRR=0.768）で検索質問文に関連した文書を抽出することができた。

表 1 検索結果（テキスト抽出方法と検索方法による性能差）

Table1. Search results (performance comparison by text extraction and search methods)

		検索方法					
		ベクトル検索		ハイブリッド検索		提案手法	
		HitRate @4	MRR @4	HitRate @4	MRR @4	HitRate @4	MRR @4
テキスト抽出方法	座標ベース	0.745	0.576	0.862	0.685	0.870	0.706
	文書構造を考慮した改良	0.831	0.663	0.906	0.748	**0.932 (A)**	**0.768 (B)**

５．おわりに

プラントの運転監視業務を支援する対話システム構築の初期検討として，技術文書の検索性能を向上させるためのテキスト抽出方法と検索方法の改良を提案した。そして提案方法によって検索性能が向上した。今後は，回答生成タスクを含むシステム全体の検討も進めていく。

文　献

(1)Patrick Lewis et al., Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks, arXiv:2005.11401 [cs.CL], 2020
(2)中内遼吾，言語モデルの検索拡張生成の研究動向, Bulletin of Advanced Institute of Industrial Technology Vol18, 2025

©2026 IEE Japan

幾何学的変換耐性を有するソフトラベル制御を用いたモデル指紋生成手法

片貝　直登*，竹本　修，野崎　佑典，吉川　雅弥（名城大学）

Model Fingerprinting via Soft-Label Control with Robustness to Geometric Transformations

Naoto Katakai, Shu Takemoto, Yusuke Nozaki, and Masaya Yoshikawa (Meijo University)

１．はじめに

近年，ディープニューラルネットワーク（DNN）は画像認識や自然言語処理などの多岐にわたる分野で成果を上げている。一方で，高性能なモデルの構築には膨大な計算資源とデータセットが必要となるため，学習済みモデルは知的財産として保護する必要がある。しかし，クラウドサービス等を介したモデルの不正転用や盗用といった著作権侵害のリスクが指摘されている。

モデルの所有権検証手法の一つとして，Adversarial Examples（AE）をモデル指紋として利用する手法が提案されている[1]。しかし，先行研究におけるモデル指紋は，入力画像に対して施される幾何学的変換に対して脆弱であるという課題がある。そこで本研究では，幾何学的変換に対する頑健性を備えた出力分布制御に基づくモデル所有権検証手法を提案する。提案手法では，AE 生成の最適化プロセスに Expectation over Transformation（EOT）[2]を導入し，安定した所有権検証を可能にする。評価実験を通じて，提案手法が変換耐性と高い識別能力を両立していることを実証する。

２．準備

＜2・1＞AE を用いたモデル識別手法[1]

特定の入力に対してモデルが固有の反応を示す性質を利用し，DNN モデルの所有権を判定する手法が提案されている[1]。本手法では，ターゲットとするモデル（権利者が所有するモデル）の特定のクラスの出力確率を，任意に設定した目標値Qに制御した敵対的サンプルをモデル指紋として利用する。検証の際，対象モデルへ指紋画像xを入力したときの出力分布$P(x)$が目標分布Qと一致するかを確認することで，モデルの同一性を判定する。この際，第 1 位クラスを維持しつつ，下位クラスの確率を操作することで，モデル本来の推論性能を維持したまま隠密な検証が可能となる。

＜2・2＞幾何学的変換（CR 処理）

モデル識別における実用上の課題として，検証対象モデルの入力前段に挿入される前処理が挙げられる。特に，入力画像を任意の比率で切り出し，再度元のサイズへとリサイズするクロッピング＆リスケーリング（CR）処理は，AE に埋め込まれた軽微な摂動を消滅させる。本研究では，この CR 処理後においても，出力確率分布が目標値を維持し続ける頑健な指紋の生成を目的とする。

＜2・3＞EOT

EOT は，画像に対して施される多様な変換（変換集合T）を最適化プロセスに組み込む手法である。具体的には，特定の変換後の画像で損失を計算するのではなく，変換後の画像群における損失の期待値を最小化するように摂動を最適化する。EOT における更新式は式(1)で定義される。

$$\min_{\delta} \mathbb{E}_{t\sim T}\left[\mathcal{L}\left(f(t+\delta)\right), Q\right] \tag{1}$$

ここで，$\mathcal{L}$は損失関数，tはTからランダムに選択される変換処理を指す。

３．提案手法

本研究では，先行研究[1]と同様のモデル所有権検証シナリオを想定する。すなわち，権利者が公開したモデルの複製がクラウド上に存在することを想定し，権利者は特定の入力を与えた際の出力分布の一致度を確認することで同一性を検証する。また，本研究ではコピーモデルの前処理として幾何学的変換が施された場合でも検証可能な頑健な手法を提案する。＜3・1＞で頑健なモデル指紋の生成手法について，＜3・2＞でモデル所有権の検証手順について説明する。

＜3・1＞モデル指紋生成手法

提案手法は，幾何学的変換に対する頑健性を獲得したモデル指紋（AE）の作成を目的とする。提案手法の AE 生成プロセスの概要を図 1 に示す。幾何学的変換耐性を保持したまま対象モデルの出力分布を任意の目標分布に固定するために，最適化ループ内に EOT を導入する。各更新ステップにおいて生成途上の AE 候補に対し，ランダムな CR 処理を施した複数のサンプルを生成する。これらのサンプル群から得られる KL ダイバージェンス損失の勾配を平均化した期待勾配を算出し，これに基づき摂動を更新する。また，最適化中の出力分布の変動を抑えるため，学習率制御にはコサインアニーリングを適用し，指数移動平均（EMA）を用いて目標分布との一致度を判定する。

©2026 IEE Japan

＜３・２＞所有権検証の手順

生成したモデル指紋を用いた所有権検証のフローを図 2 に示す。検証は以下の手順で行う。

まず，権利者は生成した AE を検証用クエリとして，クラウド上の検証対象モデルへ送信する。この際，検証対象モデルの前段に CR 処理等の幾何学的変換が実装されていることを想定する。モデルから得られた出力確率分布と，事前に設定した目標分布を比較し，その類似度を算出する。出力分布が目標分布と近い場合，当該モデルは権利者のモデルの複製であると判定する。本手法は EOT により生成段階で多様な変換を考慮しているため，検証時のクロップ位置やサイズが未知であっても，安定した検証が可能である。

４．評価実験

ターゲットモデルとして ImageNet で学習済みの ResNet50 v1 を用い，標的クラスを class407（ambulance）に設定した。目標確率分布は，第 1 位クラス（正解）の確率を 80%，第 2 位クラス（標的）を 20%とした。最適化のパラメータは，摂動上限 $\epsilon = 4/255$，EMA 係数 $\beta = 0.9$ とした。また，比較対象として ResNet50 v2，ViT-B/16，EfficientNet-B0 の 3 種類のモデルを用意した。評価では，幾何学的変換として実環境で想定される CR を用い，変換耐性とモデル固有の反応を検証した。

図 3 に，元画像，提案手法によって生成した AE，および両者の差分絶対値を 50 倍に強調した画像を示す。元画像（左）と生成された AE（中央）を比較すると，肉眼による差異は認められず，高い隠密性が確保されていることが確認できる。一方，50 倍に強調した差分画像（右）を確認すると，モデルの出力確率を制御するための微細な摂動が画像全体にわたって付加されていることが確認できる。

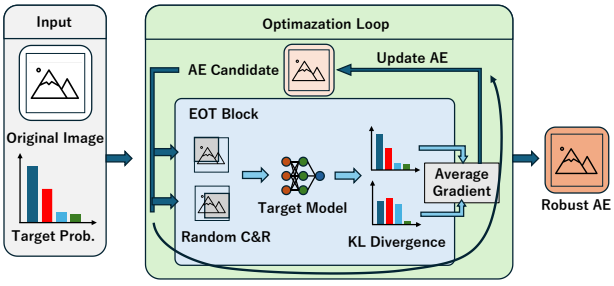


図 1　提案手法の概略
Fig.1. Overview of the proposed method

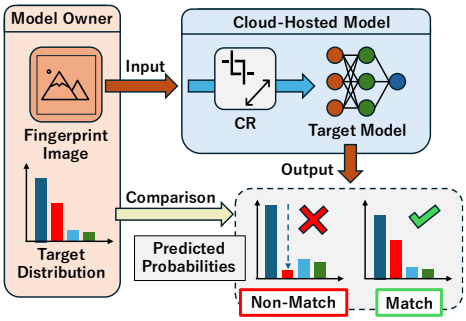


図 2　所有権検証フロー
Fig.2. Overview of the ownership verification flow

図 3　元画像・AE・差分画像
Fig.3. Original image, generated AE, and their difference

表 1　各モデルにおける標的クラス出力確率（%）
Table 1. Output probabilities of the target class for each model

生成手法	入力モデル	変換なし	96 % CR 適用後
従来手法	ResNet50 v1	19.9	0.00
提案手法	ResNet50 v1	21.0	22.0
	ResNet50 v2	0.14	0.12
	ViT-B/16	0.00	0.01
	EfficientNet-B0	0.05	0.06

表 1 に生成した AE，および幾何学的変換として 96%クロップ処理を施した AE を各モデルに入力した際の標的クラスにおける出力確率を示す。ターゲットモデル（ResNet50 v1）においては，100%サイズでの入力時はもちろん，学習時に想定した CR 処理（96%クロップ）を施した後においても，目標値である 20%に近い確率を出力していることがわかる。さらに 80%クロップ条件下においても，提案手法は 9.2%の出力を維持しており，変換に対する頑健性が確認された。これに対し，他のモデルでは標的クラスの確率は無視できるほど低く，提案手法が特定のモデルに対してのみ機能する高い識別能力を有していることを明らかにした。

５．まとめ

本研究では，DNN モデルの著作権保護を目的とし，幾何学的変換に対して頑健な出力分布制御を用いた所有権検証手法を提案した。評価実験の結果，所有権検証において高い識別能力を有することを実証した。

今後の課題として，本研究で扱った幾何学的変換以外のデジタル処理に対する頑健性の検討が挙げられる。これら多様な外乱を最適化プロセスに統合することで，より実用的な環境下での所有権検証技術の確立を目指す。

文　献

(1)　佐野　他：SCIS2025 講演論文集，3G4-2，1～8 (2025)

(2)　A. Athalye, et al., Proc. of ICML2018, 284～293 (2018)

©2026 IEE Japan

再攻撃と画像処理による敵対的サンプルの対策手法

木下　弘康*，竹本　修，野崎　佑典，吉川 雅弥（名城大学）

Adversarial Example Countermeasure using Adversarial Re-attacks and Image Processing

Hiroyasu Kinoshita, Shu Takemoto, Yusuke Nozaki, and Masaya Yoshikawa (Meijo University)

１．はじめに

近年，深層学習を用いた画像識別モデルは幅広く応用され，実社会でも利用されている。一方，画像識別モデルは敵対的サンプル攻撃（Adversarial Example: AE）によって誤分類を引き起こす脆弱性が知られている。

これに対する防御手法として，画像処理と敵対的再攻撃[(1)(4)]がある。敵対的再攻撃では，敵対的攻撃後の脆弱性である，決定境界を超えた近傍に位置することを利用し，再度攻撃を加えることで正しい識別領域に戻して防御する。これまで，個々の対策手法についての検討は行われているが，これらを組み合わせた防御手法についての研究はあまり報告されていない。

そこで本研究では，画像処理と敵対的再攻撃を組み合わせたハイブリッド AE 対策手法を提案する。

２．準備

敵対的サンプル攻撃（Adversarial Example: AE）は，機械学習モデルの損失関数と攻撃対象画像から得た勾配をもとに，微小な摂動を作り画像に加える攻撃である。これにより，攻撃された画像を入力された機械学習モデルは，誤分類を引き起こす。

本研究で使用する BIM（Basic Iterative Method）[(2)]は，ごく小さな摂動を反復的に加える攻撃手法である。1 回ごとにステップサイズαの摂動を加え，それをステップ数 N 回反復する。最終的に，摂動の大きさが摂動強度ε以下になるように調整する。

３．提案手法

本研究では，再攻撃と画像処理に着目した 3 種類の AE 対策手法を提案する。

＜3・1＞提案手法 1・2

提案手法 1・2 は画像処理で用いるフィルタ処理と再攻撃を組み合わせたものである。提案手法 1 では，図 1 に示すように，不正画像に対し画像処理を適用した後，再攻撃対策を適用する。提案手法 2 では，図 2 に示すように，不正画像に対し再攻撃対策を適用した後，画像処理を適用する。

＜3・2＞提案手法 3

提案手法 3 は複数の画像処理結果を用いて推論精度の向上を図る。具体的には，図 3 のように，再攻撃を行った後で複数種類の後処理を行い，それらから得たロジットの値を足し合わせて最終的な推論結果を得る。図 3 の例では，画像処理なし・ガウシアンフィルタ・メディアンフィルタ・リサイズ&リスケールを用いている。

4．評価実験

＜4・1＞実験環境

評価実験では，CIFAR-10 データセット，ResNet-20 モデルを使用する。AE 攻撃・再攻撃手法には BIM[(2)]を用いる。CIFAR-10 のテストデータセット 1 万枚に対して，それぞれの提案手法を実行し，その防御成功率を比較する。AE の摂動強度は，攻撃強度を固定し，再攻撃強度を変えて実験を行う。攻撃強度は 4/255 とした。再攻撃強度（ε）は 2/255, 4/255, 8/255 の 3 つを用いた。

図 1 提案手法 1 の概要

Fig1. Overview of the Proposed Method 1

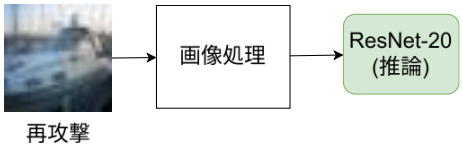


図 2 提案手法 2 の概要

Fig2. Overview of the Proposed Method 2

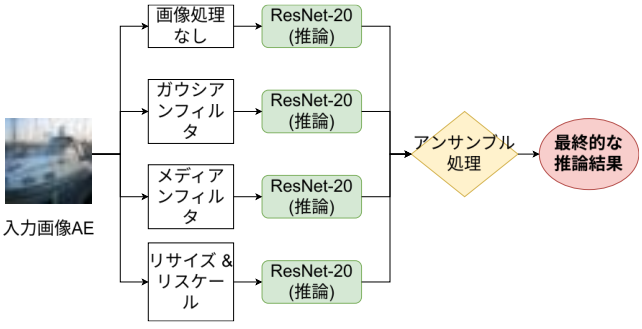


図 3 提案手法 3 の概要

Fig.3 Overview of the Proposed Method 3

©2026 IEE Japan

＜4・2＞予備実験の結果

提案手法 3 のアンサンブル処理は，再攻撃による防御を指向した対策手法である。再攻撃では，AE が特徴空間において決定境界付近に位置し，再度攻撃を受けると容易に決定境界を超えて分類結果が変化する特性に着目している[(1)(4)]。ここでは，AE 攻撃後・再攻撃後の正解ラベルの確信度順位の変化を可視化した。

実験では, CIFAR-10 のテストデータセット 1 万枚のうち，AE 攻撃に成功した 8297 枚を対象とし, AE 攻撃後と再攻撃後の 10 クラスの確信度と正解ラベルの順位を出力した。表 1 より AE 攻撃後も正解ラベルは約 48%の確率で 2 位の確信度を維持し，87%の確率で上位 5 位以内にある。また図 4 より，再攻撃に正解ラベルの確信度順位を向上させる効果があることがわかる。以上より，複数の防御結果を統合するアンサンブル処理が有効な対策手法であると考えられる。

＜4・3＞各対策手法の実験結果

提案手法 1・2 では，代表的な画像処理としてガウシアンフィルタを用いた。提案手法 3 では，処理なし・ガウシアンフィルタ・メディアンフィルタ・リサイズ&リスケール処理後の推論結果を統合して，アンサンブルな推論を行った。

各対策手法の有効性に関して，以下の通り防御率と全体防御率を定義した。

(1) 防御率=正しいラベルに識別されたサンプル / 攻撃成功したサンプル

(2) 全体防御率 = 正しいラベルに識別されたサンプル / すべてのサンプル

表 2 から，提案手法 1（前処理＋再攻撃）がもっとも AE 攻撃による影響を低減できていることがわかる。また提案手法 2，3 について，攻撃強度と同じ再攻撃強度（4/255）が高い防御効果となる傾向も読み取れる。また，再攻撃の摂動強度を変化させても，防御率の変化は 10%に満たない程度にとどまり，8/255 では全体防御率に悪影響が出ることがわかる。

以上より再攻撃のみを行った場合より，提案手法 1 が防御手法として有効であることを明らかにした。また提案手法 2 と提案手法 3 を比較すると，提案手法 3 を行ったほうが有効であることを明らかにした。

5. まとめ

本研究では画像処理と再攻撃を組み合わせた AE 対策手法を提案し，その効果を示した。今後は，より効果的な画像処理手法やアンサンブル手法について検討する予定である。

表 1 攻撃後の正解ラベルの確信度順位とその確率

Table.1 Confidence ranking of correct labels after attack and their probabilities

順位	確率	累積確率
2 位	0.4840	0.4840
3 位	0.1775	0.6616
4 位	0.1256	0.7872
5 位	0.0869	0.8741
6 位	0.0545	0.9285
7 位	0.0313	0.9599
8 位	0.0219	0.9818
9 位	0.0114	0.9933
10 位	0.0067	1.0000

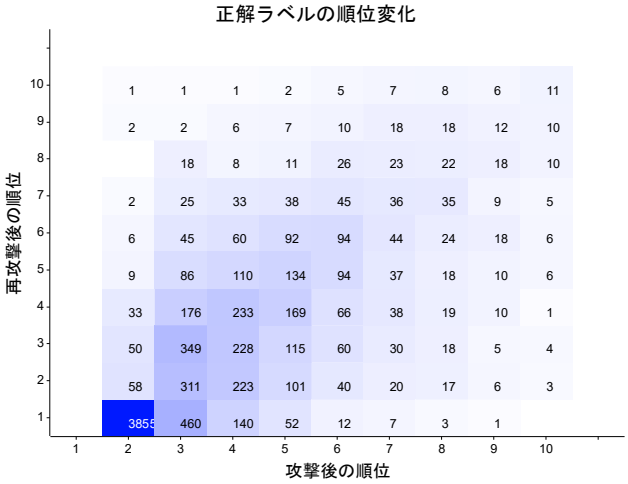


図 4 攻撃後･再攻撃後の正解ラベル確信度順位の遷移行列

Fig.4 Transition matrix of correct label confidence ranks after attack and reattack

表 2 各対策手法における防御成功率

Table2. Defense success rate for each countermeasure method

手法	ε(/255)	防御率(%)	全体防御率(%)
再攻撃のみ	2	45.33	38.71
	4	54.60	46.38
	8	54.75	46.46
提案手法 1 (前処理+再攻撃)	2	79.06	70.26
	4	79.32	68.63
	8	79.28	68.36
提案手法 2 (再攻撃+前処理)	2	53.20	50.58
	4	58.19	52.63
	8	55.45	47.53
提案手法 2 (再攻撃+後処理+アンサンブル)	2	56.16	53.21
	4	62.06	57.73
	8	58.54	52.07

文　献

(1)森本 他，火の国情報シンポジウム講演論文集 (2023)
(2) Alexey Kurakin, Machine Learning for Cyber Security (2017)
(3)小形 他，WINF2024 講演論文集 (2024)
(4)森本 他，人工知能学会全国大会論文集 (2023)

©2026 IEE Japan

Differentiable Top-k 学習のハイパーパラメータに着目した詳細な性能評価

市野　友翔*，竹本　修，野崎　佑典，吉川　雅弥（名城大学）

Detailed Evaluation of Differentiable Top-k Classification Learning Focus on Hyperparameter

Yuto Ichino, Shu Takemoto, Yusuke Nozaki, and Masaya Yoshikawa (Meijo University)

１．はじめに

近年，自動運転をはじめとする，AI を活用した画像認識システムが急速に拡大している。自動運転による事故を確実に回避するためには，画像認識結果のうち最上位のクラス（Top-1）のみを信頼して運転操作の根拠とするのではなく，複数の結果を総合的に考慮して判断することが重要である。これまでに，Top-1 が正解クラスか否かを損失関数として学習を進める One-hot 学習が広く用いられてきた。これに対し，上位k個までのクラスに正解クラスが含まれているか否かを損失関数として学習する Differentiable Top-k 学習[1]が提案されている。このような学習手法を実用的な AI に実装するためには，特定の条件下における性能だけでなく，様々な状況やハイパーパラメータを性能に与える影響を包括的に評価する必要がある。しかしながら，従来研究[1]では，学習手法は限られたパラメータでのみ評価されており，その有効性の検証が不十分である。そこで，本研究では Differentiable Top-k 学習のハイパーパラメータに着目し，その学習手法の性能および有効性について詳細に評価する。

２．Differentiable Top-k 学習

Differentiable Top-k 学習[1]は，学習モデルの出力結果のうち上位k個のクラスに着目した微分可能な学習手法である。概要を図 1 に示す。まず，学習データを深層ニューラルネットワーク（DNN）に入力し，ソート関数およびソフトマックス関数などの終端の活性化関数から各クラスの確率分布を得る。ここで，この確率分布に対し，順位情報を付加した行列を順位行列Pとする。次に，本学習手法ではあらかじめ決めた重み行列Wを順位行列Pと掛け合わせることで，重み付き順位行列P'を生成する。最後に，P'と正解ラベルから損失関数を計算し，DNN にフィードバックすることで学習を進める。

３．　提案評価手法

Differentiable Top-k 学習の性能を評価するため，評価項目としてハイパーパラメータのうち(1)逆温度T, および距離適用指数λ，(2)重み行列w，(3)最適化手法，(4)スケジューラ，(5)クリッピングを対象とし，値を変更した際の分類精度を評価する。提案評価手法は(1)および(2)を調査するための実験 A と(3)～(5)を調査するための実験 B の 2 つで構成する。

まず，(1)と(2)を評価するため(3)～(5)を固定する。 (1)については，Tとλの組み合わせをソート関数の入力として用いるため$T = 1.0$および$\lambda = 0.1$の 2 種類の値を用いる。(2)重み行列wは[1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]（one-hot 学習），[0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2]（Top-k 学習 A），[0.6, 0.3, 0.1, 0.0, 0.0]（Top-k 学習 B），[0.5, 0.0, 0.0, 0.0, 0.5]（Top-k 学習 C）の 4 種類とする。ここで固定する(3)～(5)について(3)は Adam，(4)はスケジューラ無し，(5)クリッピング無しとする。

次に(3)～(5)を評価するために(1)と(2)を固定する。(3)最適化手法は Adam と SGD[2]の 2 種類，(4)スケジューラ CosineAnnealingLR は使用の有無，(5)クリッピングは，勾配のノルムが 1 を超えないように縮小するものの有無である。ここで，固定する(1)と(2)については，最適化手法 Adam では，学習率$lr = 0.001$，逆温度$T = 1.0$，距離適用指数$\lambda = 0.1$で学習を行い，最適化手法 SGD では，学習率$lr = 0.1$，逆温度$T = 1.0$，重み付け係数$\lambda = 0.5$とする。

以上のパラメータを変更しながら，ResNet-50 モデルに対して Differentiable Top-k 学習を行う。対象とするデータセットは CIFAR-100 データセットから学習データ 47500 枚，検証データ 2500 枚を用いる。テストデータは 10000 枚用い，正答率 (テストデータに対する正解数／テストデータ数) を算出する。また，エポック数は 100 とし，各エポックにおける正答率のうち最大の値を最大正答率とする。その他の条件は，バッチサイズは 128，ソート関数は bitonic ソート，累積分布関数にシグモイド関数，損失関数モードは smce とする。

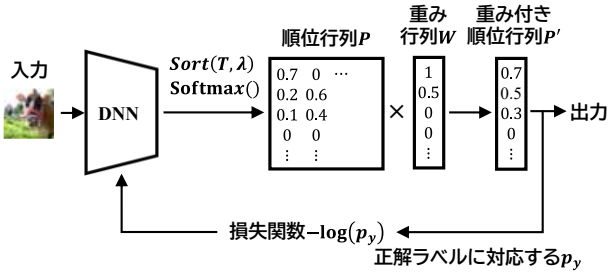


図 1: Differentiable Top-k 学習の処理概要

Fig.1. Overview of the Differentiable Top-k learning process

©2026 IEE Japan

４．実験結果

まず，実験 A について図 2，3 に示す。図において横軸は学習エポック数，縦軸は各エポックのテストデータに対する正答率である。 図 2，3 より Top-k (A)～(C)のいずれも，(1)の逆温度$T = 1.0$，距離適用指数$\lambda = 0.1$としたものの方が$T = 0.5$，$\lambda = 0.5$としたものより学習の安定性が高いことがわかる。また，最終的な認識精度はほとんど変わらないまま，早く収束している。(2)の重み行列Wについては，学習の安定性と収束の早さに違いがあり，Top-k (A)，(C)，(B)の順に分類精度に影響が表れている。これらのことから，最適化手法 Adam では(1)について$T = 1.0$，$\lambda = 0.1$とした方がよいと考えられる。また，(2)の重み行列Wについては Top-k (B)である$W = [0.6, 0.3, 0.1, 0.0, 0.0]$の重みが最も安定的に学習できると考えられる。以降の実験 B ではパラメータの影響が最も反映できる Top-k (A)の$W = [0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2]$を用いる。

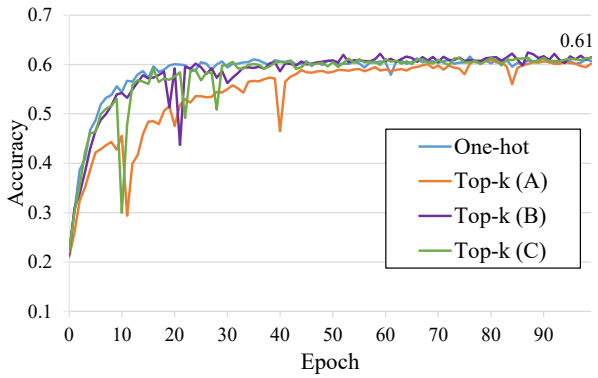


図 2: Top-1 分類精度（$T = 0.5$，$\lambda = 0.5$）
Fig.2. Top-1 accuracy（$T = 0.5$，$\lambda = 0.5$）

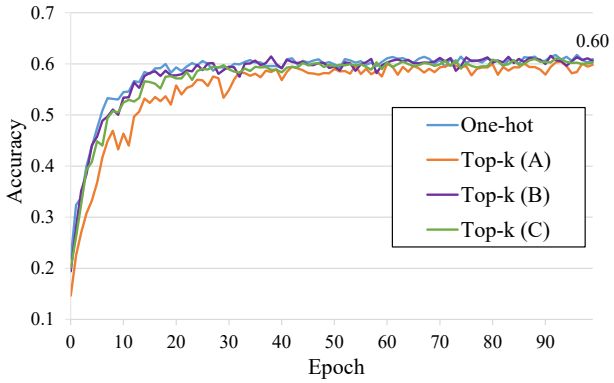


図 3: Top-1 分類精度（$T = 1.0$，$\lambda = 0.1$）
Fig.3. Top-1 accuracy（$T = 1.0$，$\lambda = 0.1$）

次に実験 B について，表 1，2 に(3)～(5)の結果を示す。表から One-hot 学習，Top-k 学習ともに，先行研究で用いられた Adam と比較して，SGD でスケジューラとクリッピングを使用したときの正答率が一番高いことがわかる。さらに最適化手法を SGD に変更，クリッピングを追加と変更していくと Top-1 および Top-5 正答率が順に向上した。また，Top-k 学習に注目すると，同様に最適化手法 Adam にスケジューラを適用した方が，適用していないときに比べて Top-1 および Top-5 正答率が向上した。しかし，最適化手法を SGD に変更した際に Top-1 および Top-5 正答率が低下し，クリッピングを追加することで，4 手法のうち最も高い正答率となった。これは，最適化手法 SGD でクリッピング無しのとき，勾配爆発が生じたことが原因だと考えられる。

一方で，どの手法においても Differentiable Top-k 学習が One-hot 学習を正答率で上回ることがなかった。このことから，Differentiable Top-k 学習の性能に限界があることを明らかにした。

５．まとめ

本研究では，Differentiable Top-k 学習において最適なパラメータの探索と，有効性の検証を行った。その結果，Top-k 学習の性能に限界があることを明らかにした。今後の課題として，上位の分類クラスに着目した新たな学習手法について検討する予定である。

文　献

(1) F. Petersen, et al., Proc of the ICML (2022)

(2) Z.Zhang, Proc of the IEEE (2018)

表 1: テストデータに対する最大正答率（Top-1）
Table1. Test accuracy（Top-1）

手法	One-hot 学習 正答率（%）	Top-k 学習 正答率（%）
Adam	61.74	60.40
Adam＋スケジューラ	66.32	65.10
SGD＋スケジューラ	71.60	34.72
SGD＋スケジューラ ＋クリッピング	74.54	72.26

表 2: テストデータに対する最大正答率（Top-5）
Table2. Test accuracy（Top-5）

手法	One-hot 学習 正答率（%）	Top-k 学習 正答率（%）
Adam	85.37	85.33
Adam＋スケジューラ	88.65	88.45
SGD＋スケジューラ	90.91	67.10
SGD＋スケジューラ ＋クリッピング	92.67	90.83

©2026 IEE Japan

CWGANs-GP によるデータ拡張を用いたモデル選択型ショーケース故障検知

小山　創央*，福山　良和（明治大学）
村上　賢哉　　鈴木　聡　　飯坂　達也（富士電機）

Refrigerated Showcase Fault Detection Using Model Selection with Data Augmentation by CWGANs-GP

So Koyama*, Yoshikazu Fukuyama, (Meiji University)
Kenya Murakami, Satoshi Suzuki, Tatsuya Iizaka, (Fuji Electric Co., Ltd.)

１．はじめに

冷蔵・冷凍ショーケース（以下，ショーケース）は，スーパーマーケットやコンビニエンスストアで利用されている。ショーケースは，冷気を循環させることで温度を一定に保つことができ，商品の保存・陳列のために利用されている。ショーケースでは，ごく稀に着霜や冷媒漏れ等の故障が発生する可能性がある。故障発生により，ショーケース内の温度上昇が起き，商品を適切な環境で陳列できなくなる。これにより，商品品質が劣化してしまうと，商品の廃棄が起き販売機会の損失とフードロスが発生する。店舗の経営問題と環境問題改善のために，高精度に故障を検知することが非常に重要である。

ショーケース故障検知では，４つのニーズがある。１つ目は，高精度に故障検知を行うこと，２つ目は，専門家なしで故障検知モデルを作成すること，３つ目は，不均衡データに対応可能なモデルを作成すること，４つ目は，非線形なデータに対応可能なモデルを作成することである。従来，ショーケース故障検知問題に対して，物理モデルを用いた方法，古典的な機会学習手法を用いた手法，教師無し機械学習手法を用いた手法が適用されてきた。しかし，どの手法も１つ目のニーズを満たしていなかった。そこで，著者らは，生成 AI の１種類である Conditional Wasserstein Generative Adversarial Networks with Gradient Penalty(1)（以下，CWGANs-GP）を用いたデータ拡張と教師あり故障検知手法の適用を行った。また，精度向上と学習安定性向上のために学習率スケジューラを用いた CWGANs-GP を用いたデータ拡張と教師あり故障検知手法の適用(2)を行った。しかし，この手法では，データ拡張を用いない方が良い結果になるケースがあり，改善の余地があった。

本論文では，CWGANs-GP によるデータ拡張を用いたモデル選択型ショーケース故障検知の適用を提案する。モデル選択型とは，学習データが異なる複数の教師あり故障検知モデルから，事前に取得したデータに対する精度が最も良いモデルを選択し，使用することである。実際のショーケースデータを用いて，学習率スケジューラを用いた CWGANs-GP を用いたデータ拡張と教師あり故障検知手法の適用(2)との比較を行い，有効性を確認した。

２．CWGANs-GP の概要

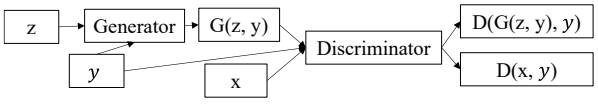
＜2・1＞CWGANs-GP の概要　　CWGANs-GP は，2014 年に M. Mirza によって提案された Conditional GANs と 2017 年に Arjovsky によって提案された Wasserstein GANs-GP を組み合わせた手法となっている(1)。Fig.1 に CWGANs-GP の構成を示す。Fig. 1 に示すように，CWGANs-GP は Discriminator と Generator の２つのネットワークで構成されている。識別器は，入力に対して正しい判別を行うように，生成器は，識別器を騙すようなデータを生成するように，学習を進めていく。異なる目的を持つ２つのネットワークが競い合うように学習を進めていくことで，モデル全体の精度が向上する。さらに，Auxiliary information（補助情報）を条件としてモデルに加えることで，指定した範囲にデータを生成することが可能となる。

＜2・2＞CWGANs-GP の損失関数　　CWGANs-GP の損失関数$V(G,D)$を以下に示す。

$$\min_G \max_D V(G,D) = \mathbb{E}_{\boldsymbol{x}\sim\mathbb{p}_r}[D(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y})] - \mathbb{E}_{\tilde{\boldsymbol{x}}\sim\mathbb{p}_g}[D(\tilde{\boldsymbol{x}}|\boldsymbol{y})] - \lambda\mathbb{E}_{\hat{\boldsymbol{x}}\sim\mathbb{p}_{\hat{x}}}[(\|\nabla_{\hat{x}}D(\hat{\boldsymbol{x}}|\boldsymbol{y})\|_2 - 1)^2] \quad (1)$$

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \varepsilon\boldsymbol{x} + (1-\varepsilon)\tilde{\boldsymbol{x}},\ \boldsymbol{x}\sim\mathbb{p}_r,\ \tilde{\boldsymbol{x}}\sim\mathbb{p}_g \quad (2)$$

ここで，G：生成器，D：識別器，$\boldsymbol{x}$：実際のデータ，$\mathbb{p}_r$：実際のデータの確率分布，$\mathbb{E}_{\boldsymbol{x}\sim\mathbb{p}_r}$：確率変数$\boldsymbol{x}$が確率分布$\mathbb{p}_r$に従うときの期待値，$\boldsymbol{y}$：条件変数，$D(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y})$：識別器に$\boldsymbol{x}$と$\boldsymbol{y}$を入力したときの出力，$\tilde{\boldsymbol{x}}$：生成器の生成したデータ，$\mathbb{p}_g$：生成器の生成したデータの確率分布，$\mathbb{E}_{\tilde{\boldsymbol{x}}\sim\mathbb{p}_g}$：確率変数$\tilde{\boldsymbol{x}}$が確率分布$\mathbb{p}_g$に従うときの期待値，$D(\tilde{\boldsymbol{x}}|\boldsymbol{y})$：識別器に$\tilde{\boldsymbol{x}}$と$\boldsymbol{y}$を入力したときの出力，$\lambda$：ペナルティに



z : Latent variable, x : Real data, y: Auxiliary information

Fig. 1.　The configurations of CWGANs-GP

©2026 IEE Japan

対する重み，$\mathbb{E}_{\hat{\boldsymbol{x}}\sim\mathbb{P}_{\hat{\boldsymbol{x}}}}$：確率変数$\hat{\boldsymbol{x}}$が確率分布$\mathbb{P}_{\hat{\boldsymbol{x}}}$に従うときの期待値，$\|\nabla_{\hat{\boldsymbol{x}}}D(\hat{\boldsymbol{x}}|\boldsymbol{y})\|_2$：$D(\hat{\boldsymbol{x}}|\boldsymbol{y})$の$\hat{\boldsymbol{x}}$に関する勾配の L2 ノルム，$\varepsilon$：０から１の間のランダムな値

３．CWGANs-GP によるデータ拡張を用いたモデル選択型ショーケース故障検知の適用

ショーケース故障検知の全体アルゴリズムを示す。CWGANs の最大学習数をMax_epochsとする。現在の学習回数をnとする。モデルを生成する学習間隔をMGIとする。Fig. 2 にモデル選択の枠組みを示す。

Step 1　初期化　　$n=1$とする。

Step 2　CWGANs-GP の学習　　全学習データを用いて，学習を行う。

Step 3　学習回数加算　　$n=n+1$とする。$n\ mod\ MGI=0$ならば Step. 4 へ。それ以外なら Step. 2 に戻る。

Step 4　故障データ拡張　　$CWGANs-GP_n$（n 回学習済みの CWGANs-GP）の生成器に実際の故障データから作成した条件とランダムな潜在変数を入力し，故障データを生成する。

Step 5　教師あり故障検知手法の学習　　実際の正常データと CWGANs-GP の学習に使用した実際の故障データ，$CWGANs-GP_n$の生成器で拡張した故障データを結合したデータを学習データとし，教師あり故障検知手法の学習を行う。$n=Max_epochs$ならば Step. 6 へ。それ以外なら Step. 2 に戻る。

Step 6　モデルの選定　　Fig. 2 のように，$\frac{Max_epochs}{MGI}+1$個のモデルに，事前に取得したデータを入力して，検証を行い，最も故障検知精度の高いモデルを選択。

Step 7　オンライン故障検知　　計測データに対し，選択した学習済み教師あり故障検知手法を用いて故障検知を行う。

４．シミュレーション

＜4・1＞シミュレーション条件　　実際のショーケースのデータを用いてショーケース故障検知のシミュレーションを行う。教師あり故障検知手法としては，文献（２）で最も精度が高いランダムフォレスト（以下，RF）を使用する。以下の２手法の比較を行う。

提案法：CWGANs-GP によるデータ拡張を用いたモデル選択型ショーケース故障検知の適用

従来法：CWGANs-GP によるデータ拡張を用いたショーケース故障検知の適用(2)

クロスバリデーションを 10 回実施し，乱数のシード値を 30 回変更した 300 パターンのシミュレーションを行う。以下に手法のパラメータを示す。

CWGANs-GP のパラメータ：

学習用異常データと検証用異常データの比率：７対３，Max_epochs：3000，MGI：100，バッチサイズ：32，潜在変数数：1000，故障データの拡張倍率：200 倍

＜4・2＞シミュレーション結果　　Table 1 に，提案法と従来法の Area Under the Precision-Recall Curve 値（以下，PR_AUC 値）と標準偏差及び Wilcoxon の符号順位検定を用いたときの P 値を示す。Table 1 より，提案法は，従来法よりも PR_AUC 値が 0.014%向上しており，300 パターンのうち，19 パターンで精度が向上していることを確認した。また，標準偏差の向上を確認した。２手法間の PR_AUC 値に有意差があるかを確認するために検定を行った。まず，Anderson-Darling 検定と Jarque-Bera 検定を行った結果正規性が確認されず，さらに，対応関係があるため，Wilcoxon の符号順位検定を行った。その結果 P 値が 0.05 よりも小さくなり，提案法と従来法の間に有意な差がないとは言えないことを確認した。これにより，提案法を用いることで高精度かつ安定的に故障検知を行えることを確認した。

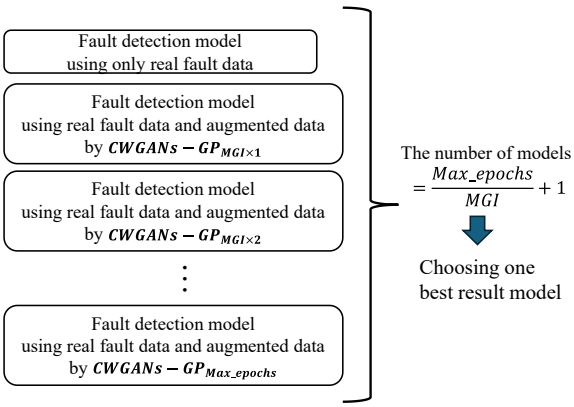


Fig. 2.　The framework of choosing a model (Step 6)

５．まとめ

本論文では，CWGANs-GP によるデータ拡張を用いた学習データ選択型ショーケース故障検知の適用を提案し，従来法と比較して，有効性を確認した。

今後は，更なる精度向上のため，手法の改良やパラメータ調整のエンジニアリングコスト削減を検討する。

文　　献

（1）J. Engelmann, S. Lessmann, “Conditional Wasserstein GAN-based oversampling of tabular data for imbalanced learning”, Expert Systems with Applications, Vol. 174, Aug. 2020.

（2）小山創央・他：「ショーケース故障検知に対する学習率スケジューラを用いた CWGANs-GP によるデータ拡張を用いた故障検知手法の適用」，電気学会システム研究会，ST-25-025 (2025)

Table 1　Average the PR_AUC value and the standard deviation of the proposed method and the conventional method and the P-value by the Wilcoxson test.

	The proposed method	The conventional method(2)
PR_AUC value	89.429%	89.415%
The standard deviation	0.01827	0.01828
The P-value	0.000143	

©2026 IEE Japan

ガウスカーネル Support Vector Machine を用いた Contextual Outlier Interpretation によるショーケースの異常検知結果説明手法の適用

設楽　涼介*，YIN　JIAHUI，福山　良和（明治大学）
村上　賢哉，鈴木　聡，飯坂　達也（富士電機）

Explanation of Refrigerated Showcase Anomaly Detection using Contextual Outlier Interpretation with Gaussian Support Vector Machine

Ryosuke Shitara, Jiahui Yin, Yoshikazu Fukuyama (Meiji University)
Kenya Murakami, Suzuki Satoshi, Tatsuya Iizaka (Fuji Electric Co., Ltd.)

１．はじめに

冷蔵・冷凍ショーケースとは，食品や飲料を冷却しながら保管・展示するための機器であり，主にスーパーマーケットやコンビニエンスストアなどで利用される。ショーケースは冷却器で冷やした空気を循環させて設定温度を保つが，着霜や冷媒漏れといった異常が発生することがある。異常が発生すると食品が劣化し，売り上げ機会の損失につながる可能性があるため，異常を正確に検知することが重要である。ショーケースの異常検知には，CWGANs による異常データ拡張と教師あり学習を組み合わせた手法が提案され，有効性が確認されている(1)。しかし，CWGANs を利用した異常検知モデルは，ブラックボックスモデルであるため，出力にどの特徴量が寄与したのかが分からず，信頼性の点で課題がある。そこで説明可能な AI（XAI）を用いて，出力に寄与した特徴量を特定し，異常検知結果を説明することが求められる。

ショーケースの異常検知の説明の従来法では，XAI 手法として LIME を利用した方法が提案されている(2)。しかし，LIME は異常検知モデルの局所的な挙動を線形近似する手法であるため，データが線形分離不可能な領域においては正しい説明が得られないという課題がある。こうした非線形な領域にも対応可能な方法として Contextual Outlier Interpretation（以下，COIN）が開発されている(3)。しかし，COIN は非凸な非線形データに対しては正しい説明ができない。これに対し，非凸な非線形データも説明できる手法として，ガウスカーネルサポートベクターマシン（以下，G-SVM）を用いた COIN (以下，GS-COIN)による説明が提案されている(4)。この方法は，汎用的な XAI 手法で，他の異常検知結果の説明の利用可能であり，ショーケースの異常検知結果への適用が期待される。

本論文では，GS-COIN による，ショーケースの異常検知結果説明手法の適用を提案する。

２．GS-COIN の概要

COIN は，Liu 等によって提案された異常検知結果の説明手法である(3)。COIN が線形 SVM により判別境界を構成するのに対し，GS-COIN は G-SVM により判別境界を構成することにより，非凸な非線形データ領域に対しても説明を可能とした (4)。さらに，各クラスタに対する G-SVM の学習および判別境界までの距離計算を並列処理として実装することで，計算時間の削減を図っている。GS-COIN のアルゴリズムを以下に示す(4)。

Step1. 学習データ集合T_Dのうち正常データから，説明対象の異常データdに最も近いサンプルを距離に基づいてk個選択し，近傍の正常データの集合Pを構成する。

Step2. 集合Pにクラスタリングを適用し，L個のクラスタ$C_1,\dots,C_L$に分割する。ここで，C_l（$l=1,\dots,L$）はl番目のクラスタを表す。

Step3. 各クラスタC_lに対して，説明対象の異常データdの周囲でオーバーサンプリングを行い，クラスタ内の正常データ数と同数のオーバーサンプリング点からなる異常データ集合O_lを生成する。

Step4. 各クラスタC_lとそのクラスタに対応するオーバーサンプリング点の集合O_lを用いて，クラスタごとに G-SVM による二値分類器S_lを学習する。これにより，G-SVM によるクラスタ毎の局所的な非線形判別境界（超曲面）を構築する。

Step5. 各分類器S_lに対して，異常データdを判別境界上まで移動させる最小ベクトルv_lを求める。その中からノルムが最小のものをv_{min}とし，その大きさ$\|v_{min}\|$を異常度として定義する。さらに，v_{min}について，各特徴量x_jに対する偏微分$w_j(j=1,\dots,N)$を求め，その絶対値$|w_j|$を変数重要度として出力して終了する。

©2026 IEE Japan

３．GS-COIN によるショーケース異常検知結果の説明

ショーケースの異常検知結果を GS-COIN を用いて説明する一例を，以下に示す。

Step1. オフライン収集したショーケースデータを用いて異常検知モデルを構築する。

Step2. 各ショーケースからリアルタイムで取得されるオンラインデータを送信し，異常検知モデルに入力して異常判定を行う。

Step3. Step2 で異常と判定されたデータに対して，2 章で述べた GS-COIN を適用し，異常検知の説明結果を顧客端末へ通知する。Step2 に戻る。

４．シミュレーション

＜4・1＞シミュレーション条件　本シミュレーションでは，着霜という異常時のデータを含む，実際のショーケースデータを用いて，異常検知およびその説明を行った。ショーケースデータは，8 つの特徴量$x_1, x_2, \ldots, x_8$を含んでいる。異常検知は，CWGANs によって異常データを拡張したのち，Random Forest（以下，RF）によって異常検知を行う。以下に，パラメータおよび計算機性能を示す。

・CWGANs のパラメータ　学習回数：3000，バッチサイズ：32，潜在変数数：1000，最適化手法：Adam，Adam の学習率：0.0001，元の異常データに対する拡張倍率：200 倍

・RF のパラメータ　決定木の本数：100

・GS-COIN のパラメータ　説明に使用する近傍データ数：912

・計算機性能　Intel Xeon GOLD 5118 2.3GHz

＜4・2＞シミュレーション結果　ショーケースデータのうち変数x_2と変数x_4を取り出した 2 次元空間において，非凸な領域付近で異常と判定されたデータに対して，線形 SVM を用いるオリジナル COIN と，G-SVM を用いる GS-COIN を適用した結果を比較する。Fig.1 は，実ショーケースデータの分布を模したイメージ図であり，非凸領域における COIN と GS-COIN の判別境界の違いを概念的に示したものである。Fig.1 において，図中記号「×」が説明対象の異常データ，赤丸が当該異常データをオーバーサンプリングして得られた異常データ，青丸が正常データを表す。緑点線は線形 SVM により得られた判別境界，紫点線は G-SVM により得られた判別境界である。非凸な領域では，線形 SVM による判別境界（図中緑点線）が正常データの分布形状を十分に表現できず，正常データ群を横切る形で直線的に分離してしまう。一方，G-SVM による判別境界（図中紫点線）は，局所的な分布に沿った超曲面として非凸な境界形状を表現しており，異常データと正常データをより適切に分離できていることが分かる。Table.1 には，オリジナル COIN と GS-COIN により算出された変数重要度と異常度（判別境界までの最短距離）を示す。異常度について，GS-COIN の方がオリジナル COIN よりも小さい値を示しており，G-SVM に基づく判別境界の方が，正常領域から，より短い変動量で異常へ到達する方向を，最短ベクトル（図中紫矢印）によって提示できている。なお，本シミュレーションにおける各説明の計算時間は，オリジナル COIN が 1.2332[s]，GS-COIN が 9.5349[s] である。GS-COIN は計算コストが増加するものの，非凸な非線形領域において，線形 SVM を用いたオリジナル COIN よりも異常データの局所構造を反映した判別境界と説明を与えられることが確認できる。

５．まとめ

本論文では，ショーケースの異常検知結果に対して，G-SVM を用いた GS-COIN による説明手法を適用した。非凸な領域では線形 SVM に基づくオリジナル COIN は判別境界を正しく生成できず， GS-COIN は G-SVM を用いることで正しい判別境界を生成し，正確な距離で正常な領域へ到達する方向と，異常判定に大きく影響した特徴量をより適切に示せることを確認した。

今後は，提案法の改良や別の XAI 手法の適用を検討する。

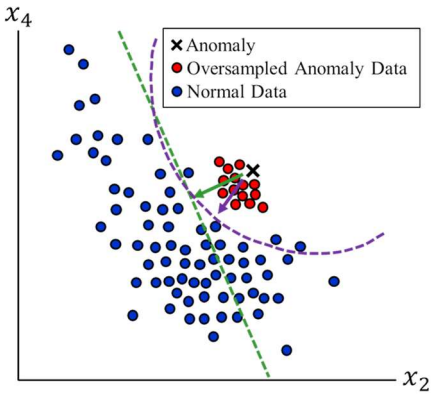


Fig.1. An illustrative example of the difference between decision boundaries by the original COIN and GS-COIN

Table 1. Comparison of feature importance and anomaly degrees between COIN and GS-COIN in a non-convex region

Methods	Variable importance		Anomaly degree
	x_2	x_4	
Original COIN	0.14147	0.16683	0.18250
GS-COIN	0.19067	0.19506	0.12273

文　献

(1)小山・福山他：「条件設定を改良した Conditional Wasserstein Generative Adversarial Networks with Gradient Penalty によるデータ拡張を用いたショーケース異常検知」，電気学会電子・情報・システム部門大会，PS6-5 (2025)

(2)設楽・福山他：「Local Interpretable Model-agnostic Explanations によるショーケースの異常検知の説明」，電気学会 全国大会，3-083 (2025)

(3) N. Liu, D. Shin, and X. Hu: “Contextual Outlier Interpretation”, arXiv:1711.10589 (2018)

(4)YIN・福山他:「高速化ガウスカーネル Support Vector Machine を用いた改良版 Contextual Outlier Interpretation によるガスタービン異常検知の説明」,電気学会電子・情報・システム部門大会，PS5-11 (2025)

©2026 IEE Japan

Ensemble Local Outlier Factor を用いたガスタービン発電機の異常検知における Maximal Information Coefficient に基づく変数選択

加藤　雄太*，福山　良和（明治大学）
村上　賢哉，鈴木　聡，飯坂　達也（富士電機）

Feature Selection Based on Maximal Information Coefficient for Anomaly Detection of Gas Turbine Generators Using Ensemble Local Outlier Factor

Yuta Kato, Yoshikazu Fukuyama (Meiji University)
Kenya Murakami, Satoshi Suzuki, Tatsuya Iizaka (Fuji Electric Co., Ltd.)

１．はじめに

ガスタービン発電は，再生可能エネルギーの大量導入に対応するための調整力として，重要な役割を果たしている。

重大事故を防止しつつ，設備保守にかかわる人材不足に対応するため， AI を用いたガスタービン発電機の異常検知が求められている。本研究では，クラウドサービスを用いて異常検知を行うことを想定している。現場には設置されている多数のセンサデータをすべて用いると，通信料や CPU コストなど運用コストが増大するため，重要な変数を選択する変数選択が必要となる。

ガスタービン発電機異常検知の変数選択には，主に次の 2 つのニーズがある。第一に，ガスタービン異常検知精度が高くなるように変数を選択する必要がある。第二に，多数のガスタービン設備に対して異常検知モデルを作成する場合や，対象設備の特性の変化に応じて再実行する場合を考慮すると，計算時間が短い変数選択手法が求められる。

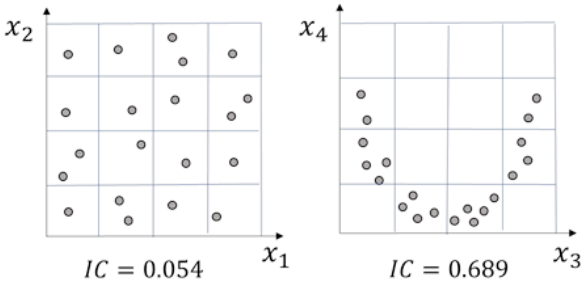
著者らは，アンサンブル Local Outlier Factor (以下，アンサンブル LOF)によるガスタービンの異常検知手法の有効性を確認した[1]が，十分な変数選択を行っていなかった。そのため，アンサンブル LOF に適した変数を選ぶ必要がある。上記のニーズ 2 を考慮すると，正常値のみで変数選択が可能で，計算コストが低いフィルタ法の適用が考えられる。著者らは，フィルタ法の一つとして，Maximal Information Coefficient を用いた変数手法 (以下，MIC-KNN-FS)[2]を提案しており，isolation using Nearest Neighbor Ensemble (以下，iNNE)を用いたガスタービンの異常検知に対する変数選択において既に有効性を確認している[3]。したがって，アンサンブル LOF を用いたガスタービン異常検知の変数選択に対し，MIC-KNN-FS の有効性が期待できる。

本論文では，アンサンブル LOF を用いたガスタービン異常検知の変数選択に対し，MIC-KNN-FS を適用することを提案する。提案法の有効性はラッパー法の一つである Population Based Incremental Learning (以下，PBIL)による変数選択手法[4]と Precision Recall Area Under the Curve (以下，PR-AUC 値)及び計算時間を比較することで確認した。

２．MIC-KNN-FS によるガスタービン異常検知の変数選択

MIC-KNN-FS は，新井等によって 2020 年に提案されたフィルタ法による変数選択手法である[2]。MIC を用いて変数間の非線形な関係を評価し，KNN を用いて類似した特徴を持つ変数を削除することで，代表的な変数を選択することができる。以下に，MIC について説明する。

Fig.1(a)は，相関のない 2 変数x_1, x_2の散布図，Fig.1(b)は，非線形な相関のある 2 変数x_3, x_4の散布図を示す。MIC では，データをグリッドで区切り，相互情報量(以下，IC 値)を求める。Fig.1(a)のように，データが分散していると IC 値は低く，Fig.1(b)のように，データが特定のグリッドに集中していると IC 値は高くなる。IC 値は，以下の式で計算できる。



(a) An example of scatter plots without nonlinear correlation　(b) An example of scatter plots with nonlinear correlation

Fig.1 Examples of IC values and scatter plots.

©2026 IEE Japan

$$IC = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} P(m,n) log \frac{P(m,n)}{P(m)P(n)} \quad (1)$$

ここで，M, N: 水平方向・垂直方向のグリッドで分けられたエリアの数，$P(m,n)$：水平方向m番目，垂直方向n番目のグリッドのエリアの同時確率分布関数，$P(m)$: 水平方向m番目のエリアの周辺確率分布関数，$P(n)$: 垂直方向n番目のエリアの周辺確率分布関数

MIC 値は，IC 値が最も高くなるようにグリッドを引いた時の IC 値のことである。

MIC-KNN-FS は，非線形な相関関係を評価できる MIC 値と， KNN を用いて変数選択を行う。以下に MIC-KNN-FS のアルゴリズムを示す[2]。

Step.1　全変数の数をF_1，変数選択後の変数の数をF_2とする。全変数の集合を$\boldsymbol{a} = \{a_i,\ i = 1, \cdots, F_1\}$, 変数選択後の集合を$\boldsymbol{b} = \{b_i,\ i = 1, \cdots, F_2\}$とおく。$\boldsymbol{b} \leftarrow \boldsymbol{a}$とする。

Step.2　KNN により削除する近傍の変数の数k_deleteと，最終的に選ばれる変数の数f_numを設定する。ここで，反復回数$i = 1$とする。

Step.3　変数$a_i \in \boldsymbol{b}$に対し，変数a_iと集合$\boldsymbol{b}$に属する他の変数$a_j (a_j \in \boldsymbol{b}, j \neq i)$の MIC 値, $MIC(a_i,\ a_j)$を求める。

Step.4　$MIC(a_i,\ a_j)$ が最大となるa_jをa_{jmax}とする。a_{jmax}と集合$\boldsymbol{b}$に属する他の変数$a_j (a_j \in \boldsymbol{b}, j \neq jmax)$の$MIC(a_{jmax},\ a_j)$を求める。$MIC(a_{jmax},\ a_j)$が大きい順に$k_delete$個の変数を集合$\boldsymbol{b}$から削除する（$F_2 = F_2 - k_delete$）。これにより，似た特徴を持つ変数を削除することができる。

Step.5　もし$k_delete > F_2 - 1$ならば，$k_delete = F_2 - 1$とする。

Step.6　もし$k_delete = f_num$ならば，Step.8 へ，そうでないならば，Step.7 へ。

Step.7　もし$i = F_1$ならば，Step.8 へ，そうでないならば，$i = i + 1$とし，Step.3 へ。

Step.8　変数選択後の変数の集合$\boldsymbol{b}$を出力する。

３．シミュレーション

＜3・1＞シミュレーション条件　　実際のガスタービンデータを用いて, MIC-KNN-FS および PBIL による変数選択の比較を行う。本シミュレーションで用いた条件を以下に示す。

・ガスタービンデータは，CCBY4.0 ライセンスのデータを利用する[5]。

・正常データを 7:3 に分け，7 割を学習データ，3 割を正常検証データとして用いる。異常データはすべて異常検証データとする。10 回の交差検証を行い，PR-AUC 値を評価指標とする。

・MIC-KNN-FS は，選択される変数の数f_num=2，削除する変数の数k_delete=10とする。

・アンサンブル LOF のハイパーパラメータは, 近傍数=30, サンプリングデータ数=100，モデル生成数=30とする。

・PBIL のハイパーパラメータは，個体数=500, 反復回数=500, 学習率=0.025，突然変異確率=0.01，突然変異量=0.2 とする。なお，乱数を 30 回変えて実行した。

＜3・2＞シミュレーション結果　　Table 1 に，MIC-KNN-FS 及び PBIL によるシミュレーション結果を示す。MIC-KNN-FS は，PBIL に比べ短い計算時間で変数選択ができることを確認した。さらに，MIC-KNN-FS は計算負荷が低いフィルタ法に基づく手法であるにもかかわらず, PR-AUC 値においてラッパー法の PBIL と同程度以上の精度を示すことを確認した。そのため，アンサンブル LOF の変数選択手法としてフィルタ法の MIC-KNN-FS が有効であることを示した。

５．まとめ

本論文では，アンサンブル LOF を用いたガスタービン異常検知における変数選択手法として，MIC-KNN-FS による変数選択手法を提案した。提案法は, 計算コストを低減しながら，高い精度を維持することができた。以上より，アンサンブル LOF を用いた異常検知に対して, 提案法である MIC-KNN-FS による変数選択の有効性を確認した。

今後は，ガスタービン異常検知手法のさらなる精度向上に努める。

Table1.　PR-AUC values and Calculation time for gas turbine data feature selection using the proposed MIC-KNN-FS and comparative PBIL based methods

	MIC-KNN-FS	PBIL
PR-AUC values	0.9999789	0.9999776
Calculation time[s]	466	11415

文　献

(1) 加藤・福山・村上・鈴木・飯坂: 「Ensemble Local Outlier Factor を用いたガスタービン発電機の異常検知」, 電気学会全国大会，3-081 (2025)

(2) 新井・福山・村上・松井 :「Maximal Information Coefficient を用いた変数選択手法に基づく Kernel PCA ベース MSPC によるショーケースシステムの異常検知」，電気学会論文誌 D，Vol.141 No.4 pp.345-353 (2020)

(3) 加藤・福山・島崎・長田・村上・飯坂・松井 :「Isolation using Nearest Neighbour Ensemble を用いたガスタービン異常検知手法のベイズ最適化によるパラメータ自動調整」，電気学会 C 部門大会，GS9-1 (2023)

(4) 山崎・福山・島崎・長田・村上・飯坂・松井 :「Population-Based Incremental Learning: A Method for Integrating Genetic Search Based Function Optimization and Competitive Learning」，電気学会 C 部門大会，GS507 (2022).

(5) A. Esan, et al.: “Data-set for Independent Gas turbine for Electricity Generation”, https://data.mendeley.com/datasets/6w3vy3ybhg/3 (2019).

©2026 IEE Japan

血中薬物濃度予測 AI における変量効果の考慮

松本　崚佑*，川村　駿太，関　弘翔，青山　隆彦，辻　泰弘，細野　裕行（日本大学）

A Study on Incorporating Variability Effects into AI-Based Blood Drug Concentration Prediction

Ryosuke Matsumoto, Shunta Kawamura, Hiroto Seki, Takahiko Aoyama, Yasuhiro Tsuji, Hiroyuki Hosono (Nihon University)

１．まえがき

臨床試験などで薬物をヒトに投与するにあたり，安全に最適な量で投与を行うため，薬物の効果を予測する必要がある．そして，効果を予測するにためには投与された薬物の血中濃度が必要である．先行研究[1]では，薬物動態(Pharmacokinetics：PK)モデルと人工ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network：ANN)を組み合わせて，血中薬物濃度を予測する ANN-PK モデルを開発した．式(1)に，経口投与の薬物を対象として血中薬物濃度を求める PK モデルの式を示す．$Conc$は血中薬物濃度[ng/mL]，$Dose$ は薬の投与量[mg]，tは投与からの経過時間[h]である．未知パラメータとして，kaは吸収速度定数[h^{-1}], keは消失速度定数[h^{-1}], Vdは分布容積[L]を意味する．また，式(2)にkeの算出式を示す. CL はクリアランス[L/h]である. ANN-PK モデルは, ANN を用いて各患者の CL などの未知パラメータを予測し, 実際の投与データを入力とした PK モデルで血中薬物濃度を算出する．

$$Conc = \frac{ka \times Dose}{Vd \times (ka - ke)} (e^{-ket} - e^{-kat}) \quad (1)$$

$$ke = \frac{CL}{Vd} \quad (2)$$

母集団薬物動態解析では変量効果(個体間変動と個体内変動)と呼ばれる，2 つの変動を考慮して血中薬物濃度を算出する．個体間変動とは，短時間内で変動は生じないが個体差に起因する変動であり，個体内変動とは，同一患者に対してもサンプリング誤差や日内変動，生理的変動により生じる変動である．一方，ANN-PK モデルは 1 つの入力に対して 1 つの決定的な値を予測するため変量効果を考慮できていない．そこで，本稿では ANN-PK モデルに対して母集団薬物動態解析において広く用いられている誤差モデル及び不確実性を扱うことが可能なベイジアンニューラルネットワーク(Bayesian Neural Network: BNN)[2]を導入し， 2 手法それぞれでの変量効果を考慮したモデル構築を目指す．

２．方法

免疫抑制剤シクロスポリンの臨床データ(36 名・89 データ)[3]を用い，1 名をテストデータ，残り 35 名を学習データとする交差検証により実験を行い，二乗平均平方根誤差(RMSE)により評価した．ANN には性別，年齢[year]，体重[kg]，身長[cm]，肝機能指標(ALT・AST)[U/L]，腎機能指標(SCR)[mg/dL]の特徴量を入力し，PK モデルには投与後経過時間[h]，投与量[mg]を入力した．目的変数は血中薬物濃度[ng/mL]とした．

誤差モデルとは，予測値に対する変動を表現するためのモデルであり，平均が 0，分散が σ^2 の正規分布に従う確率変数を用いて誤差を表現する．本研究では，確率変数を加算する加法誤差モデルを用い，ANN により予測された CL 及び血中薬物濃度に変動を付加することで，変量効果を考慮したモデルを構築した．σ の学習には 2 手法を用いた．1 つ目は，RMSE を損失関数とし，再パラメータ化トリックを用いたサンプリングを通して σ を ANN の出力として推定する手法である．2 つ目は，σ を学習可能なパラメータとし，負の対数尤度(Gaussian negative log-likelihood：NLL)を損失関数として学習する手法である．

BNN とは, ANN の重みに確率分布を仮定することで事後分布を推定し，出力の不確実性を扱うことが可能なモデルである．本研究では学習済みの ANN-PK モデルの重みを初期値とし，確率的勾配ハミルトニアン・モンテカルロ法(Stochastic Gradient Hamiltonian Monte Carlo：SGHMC)によって重みをサンプリングすることで，事後分布を学習した．

３．結果

誤差モデルを用いた学習を実施し，再パラメータ化トリック及び NLL に基づく 2 手法を比較した．再パラメータ化トリックによる学習での RMSE は 30.7 ng/mL, NLL では 29.4 ng/mL を示した. 先行研究における ANN-PK モデルの RMSE は 31.0 ng/mL であり[1]，本手法は同程度の予測精度を達成した．以上より，誤差モデルを導入することで，変量効果を考慮しつつ血中薬物濃度を高精度に予測可能であることを示した. 一方, BNN を用いた学習では RMSE が 38.0 ng/mL となり，十分な予測精度を得ることが困難であった．

４．まとめ

本稿では，ANN-PK モデルに対して誤差モデル及び BNN を導入し，変量効果を考慮したモデルの構築及び評価を行った．その結果，誤差モデルを用いた学習により，変量効果を考慮しつつ，先行研究と同程度の予測精度を達成した．今後は最適なパラメータの探索について検討を行う．

文　献

(1) C. Ogami, et al, CPT: Pharmacometrics & Systems Pharmacology, Vol.10, Issue 7, pp.760-768, 2021.
(2) T. Chen, et al, PMLR, Vol.32, Issue 2, pp.1683-1691, 2014.
(3) Y. Tsuji, et al, Biol. Pharm. Bull., Vol.38, Issue 9, pp.1265-1271, 2015.

©2026 IEE Japan

背臥位乳房 MRI を非造影像から造影像へ変換する拡散モデルにおける L1 損失の検討

佐々木　颯*，関　弘翔，石橋　直也，天野　真紀，細野　裕行（日本大学）

A Study on L1 Loss in a Diffusion Models for Translating Non-Contrast to Contrast-Enhanced Supine Breast MRI

Hayate Sasaki*, Hiroto Seki, Naoya Ishibashi, Maki Amano, Hiroyuki Hosono (Nihon University)

１．まえがき

造影腹臥位 MRI は乳房温存手術の術前診断に用いられるが，手術時は背臥位であるため，乳房変形に伴う腫瘍位置の不一致が生じる．この問題に対し，造影腹臥位・背臥位 MRI を用いて腫瘍位置を対応付ける手法[1]が提案されているが，身体的・経済的負担から造影背臥位 MRI は撮影されにくい．そのため，造影背臥位 MRI に近いデータを獲得する別の手法が求められている．これまで，拡散モデル[2]ベースのブラウン橋拡散モデル(BBDM)[3]を応用した 3D-Conditional BBDM(3D-cBBDM)を提案し，腹臥位 MRI における非造影像を入力として造影像を得る手法を検討してきた[4]．

本稿では，3D-cBBDM を用いて背臥位 MRI の変換を検討し，腫瘍のみを対象とした L1 損失を導入することで腫瘍再現性の改善を図る．

２．方法

＜2・1＞データセット　　本研究は，日本大学病院の倫理審査の承認(20220403)を得て実施した．日本大学病院より提供された腹臥位・背臥位 MRI ペアデータ(非造影 102 例，造影 102 例）を学習用とテスト用(各 98 ペア，4 ペア)に分けて使用する．ただし，3D-cBBDM では腹臥位・背臥位 MRI をベクトル量子化敵対的生成ネットワーク(VQGAN)[5]によって埋め込み表現にしたものを用いる．

＜2・2＞腫瘍を考慮した損失関数の設計　　3D-cBBDM の従来の損失関数は L1 損失であり，MRI 全体で最適化している．腫瘍は全体に対して占める割合が小さいため，考慮されにくい．よって，腫瘍のみを対象とした L1 損失(腫瘍損失)を導入することで腫瘍再現性の向上を図る．

＜2・3＞定量評価指標　　変換後の造影像の定量評価指標として，二乗平均平方根誤差(RMSE)およびピーク信号対雑音比(PSNR)[6]，構造的類似性(SSIM)[7]を用いる．

３．実験結果

有効性を検証するため，従来手法である敵対的生成ネットワーク(GAN)ベースの CycleGAN[8]と比較を行った．図 1 にテストデータに対する変換結果の一例を示す．また，表 1 に定量評価結果を示す．図 1 の定性評価では，腫瘍損失を導入した 3D-cBBDM の腫瘍が最も鮮明であり，定量評価の RMSE，PSNR 評価も最良であった．一方で CycleGAN より心臓や大血管，乳腺の輪郭が鮮明でなく，SSIM 評価も CycleGAN を下回った．原因としては，VQGAN の圧縮によって輪郭などの局所的な情報が潰されてしまい，適切な学習を行えていなかった可能性が考えられる．

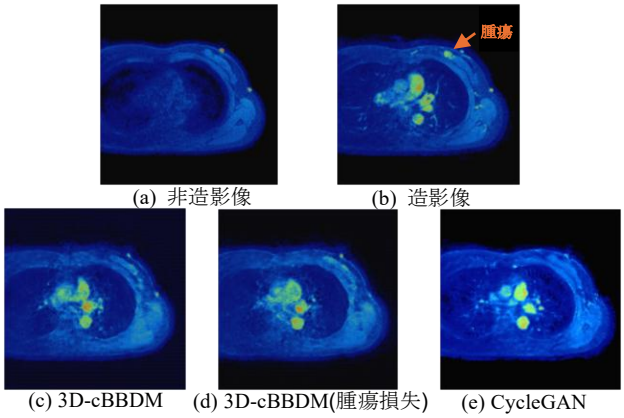


図 1　非造影像から造影像への変換結果

Fig. 1. Non-Contrast to Contrast-Enhanced Translation Results

表 1　3D-cBBDM と CycleGAN の定量評価

Table 1. Quantitative Evaluation of 3D-cBBDM and CycleGAN

	腫瘍損失	RMSE ↓	PSNR ↑	SSIM ↑
3D-cBBDM	×	0.0576	24.841	0.7169
	○	**0.0573**	**24.888**	0.7184
CycleGAN	×	0.0576	24.871	**0.7343**

４．まとめ

本稿では，3D-cBBDM を用いて背臥位 MRI の変換を検討するとともに，腫瘍のみを対象とした L1 損失を導入することで腫瘍再現性の改善を図った．その結果，腫瘍がより鮮明に再現された一方で，心臓や大血管，乳腺の輪郭の再現性は CycleGAN と比較して低下した．今後は，3D-cBBDM にパッチ分割に基づく学習を導入することで VQGAN を用いない学習を可能とし，VQGAN の導入に起因すると考えられる課題の改善および腫瘍再現性の向上を図る．

文　献

(1) M. Amano, et al., BioMed, pp.1-9, 2022
(2) J. Ho, et al., NeurIPS, pp.6840-6851, 2020
(3) B. Li, et al., CVPR, pp.1952-1961, 2023
(4) 佐々木颯，他，電気学会東京支部千葉支所研究発表会, 2-5, 2024
(5) P. Esser, et al., CVPR, pp12873-12883, 2021
(6) A. Hore, et al., ICPR, pp.2366-2369, 2010
(7) Z. Wang, et al., IEEE TIP, pp.600-612, 2004
(8) JY. Zhu, et al., ICCV, pp2223-2232, 2017

©2026 IEE Japan

From Natural Language to Optimal Schedules: An LLM Interface for EV Charging

Sihui Xue*, Daisuke Kodaira (University of Tsukuba)

I. INTRODUCTION

Large language models (LLMs) have recently achieved remarkable progress in natural language understanding and structured information generation, creating new opportunities for more natural human–machine interfaces in complex energy systems. In electric vehicle (EV) charging, scheduling problems are commonly formulated as linear programming (LP) models, yet translating users' informal preferences into optimization inputs and explaining the resulting schedules remain challenging.

Recent studies have explored the use of LLMs and large foundation models in power dispatch and system operation [1, 2], as well as LLM-based interfaces and interpretable control in building and home energy management [3, 4]. However, these works typically employ LLMs for offline analysis or high-level advice, rather than embedding them into an online optimization loop. As a result, a tightly coupled process from natural-language requirements to optimization and explanation is still lacking.

As illustrated in Fig. 1, this paper proposes an LLM-assisted EV charging optimization framework to address this gap. In the proposed framework, users specify charging requirements directly in natural language. The LLM agent extracts key scheduling parameters, including arrival and departure times, target state of charge (SoC), power limit, and the V2G flag, and passes them to an optimizer. After optimization, the resulting charging schedule is returned to the user together with a natural-language explanation summarizing the main charging periods, cost-related outcomes, and constraint satisfaction. By integrating natural-language interaction with optimization-based scheduling, the proposed framework enables user-driven EV charging decisions while improving interpretability and usability.

II. MODEL AND METHODOLOGY

The model considers a single residential EV and formulates an LP-based charge-discharge scheduling problem over time steps $t = 1, \ldots, T$, with inputs including the time-of-use price π_t, arrival and departure times $t_{\mathrm{arr}}, t_{\mathrm{dep}}$, initial state of charge (SoC) s_0, battery capacity E_{bat}, admissible SoC bounds, and power limits and efficiencies. The decision variables are the charging power p_t^+, discharging power p_t^-, and SoC s_t.

From a residential user's perspective, the model adopts minimization of electricity cost as the sole objective, while optionally

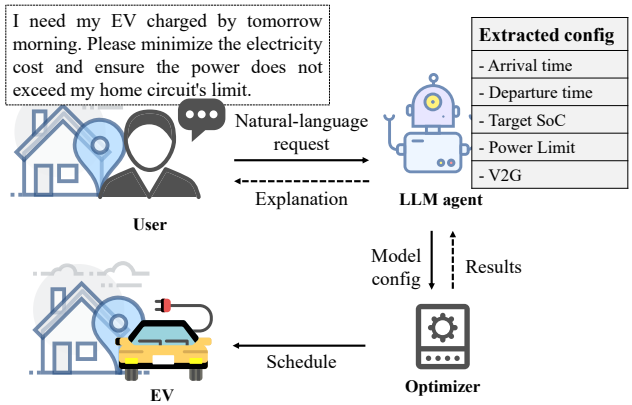


Fig. 1. Conceptual workflow of the proposed LLM-assisted EV charging optimization framework.

allowing vehicle-to-grid (V2G) discharging to obtain revenue from selling power back to the grid. Let Δt denote the length of each time step and $\alpha \in [0, 1]$ the discount factor of the selling price relative to the purchasing price. The objective function is

$$\min J = \sum_{t=1}^{T} \left(\pi_t \, p_t^+ - \alpha \, \pi_t \, p_t^- \right) \Delta t, \tag{1}$$

when discharging is not allowed, one can set the maximum discharging power to zero or directly enforce $p_t^- = 0$, so that the model reduces to a pure-charging cost-minimization problem.

Regarding the constraints, we first specify the evolution of the battery SoC. Let s_t denote the normalized SoC at time t (ranging from 0 to 1). At each time step it is updated according to the charging and discharging powers and their efficiencies as

$$s_{t+1} = s_t + \frac{\eta_{\mathrm{ch}} \, p_t^+ \, \Delta t}{E_{\mathrm{bat}}} - \frac{p_t^- \, \Delta t}{\eta_{\mathrm{dis}} \, E_{\mathrm{bat}}}, \quad t = 1, \ldots, T-1. \tag{2}$$

where η_{ch} and η_{dis} denote the charging and discharging efficiencies, respectively. The SoC is kept within admissible bounds $s_{\min} \le s_t \le s_{\max}$, and the charging and discharging powers satisfy $0 \le p_t^+ \le P_{\max}^{\mathrm{ch}}$, $0 \le p_t^- \le P_{\max}^{\mathrm{dis}}$ for all t. For scenarios where charging and discharging are only allowed while the vehicle is parked at home, the powers are forced to zero outside the interval $[t_{\mathrm{arr}}, t_{\mathrm{dep}}]$ by setting $p_t^+ = p_t^- = 0$ for $t \notin [t_{\mathrm{arr}}, t_{\mathrm{dep}}]$. To reflect the user's energy requirement at departure, a target SoC s_{tar} is imposed through the terminal condition $s_{t_{\mathrm{dep}}} \ge s_{\mathrm{tar}}$; if this cannot be satisfied under the given time window, price profile, and power limits, the optimization problem has no feasible solution.

©2026 IEE Japan

In the above model, arrival and departure times $t_{\mathrm{arr}}, t_{\mathrm{dep}}$, the initial and target SoC (s_0, s_{tar}), charging and discharging power limits, and the V2G on/off flag can be collected into a configuration vector. In the proposed framework, this configuration is produced automatically by the LLM-based decision layer from natural-language descriptions and then supplied to the EV charging LP model. In the experiments, the LLM-based decision layer is implemented using the GPT-5-mini model accessed via an API interface, with a deterministic decoding setting (temperature set to zero) to ensure consistent extraction of structured configuration parameters from user inputs.

III. CASE STUDY

To assess the feasibility of the proposed framework, we study the charging of a single residential EV. The electricity price follows the ToU profile in Fig. 2(a). The EV parameters are: $E_{\mathrm{bat}} = 60$ kWh, $\eta_{\mathrm{ch}} = \eta_{\mathrm{dis}} = 0.95$, $\Delta t = 1.0$ h, and SoC $\in [20\%, 90\%]$. As shown in Fig. 2, the user request is: *"I will arrive home around 6 p.m. and leave at 7 a.m. tomorrow. Please charge my EV from about 20% to at least 80% by departure, avoid high-price periods as much as possible."* This interaction is illustrated in the Agent-User interaction module on the left side of Fig. 2. By integrating this request with scenario data, the LLM agent generates the configuration: charging window 18:00-07:00, initial/target SoC 20%/80%, and discharging disabled.

Using this configuration, the LP model in Section II computes a cost-minimizing charging schedule under all constraints. We compare the results against two benchmarks: *No-Optimization*, which charges at maximum power upon plug-in while ignoring prices, and *No-LLM*, which uses the same LP solver but with manual configuration based on the user's text. In this case, the *No-LLM* trajectories overlap with the LLM-based results within numerical tolerance; thus, the *No-LLM* curves are omitted to avoid redundancy. This demonstrates that while the cost reduction originates from the LP optimization, the LLM-based agent mainly automates configuration extraction and produces user-oriented explanations.

In this example, both strategies satisfy the target SoC requirement of 80% at the departure time. However, the LLM-assisted LP optimization significantly reduces the total charging cost from ¥43.16 to ¥15.16 , achieving a substantial cost saving of ¥28.00, which corresponds to a saving ratio of 64.9%. As seen in Fig. 2(a) and (b), the baseline strategy allocates a large fraction of charging to the expensive 18:00-22:00 period. In contrast, the optimized strategy shifts the majority of the charging load to the low-price valley between 23:00 and 06:00, which is represented by the purple electricity price curve in Fig. 2(a), and performs only limited charging at other times. This behaviour matches the user's preference to avoid high-price periods while ensuring the vehicle reaches the target SoC.

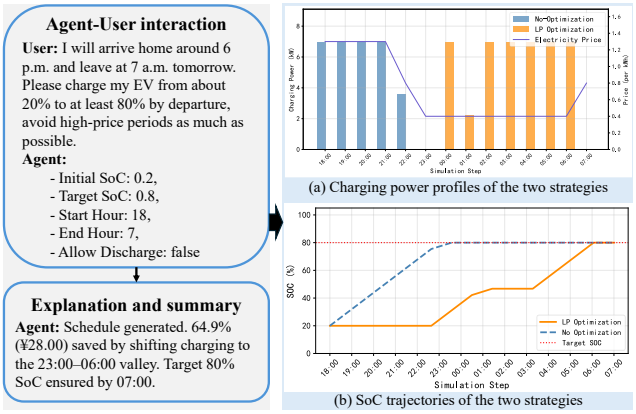


Fig. 2. Demonstration of the LLM-assisted EV charging optimization: (a) charging power profiles (left y-axis) and electricity price (right y-axis), and (b) corresponding SoC trajectories.

Overall, the parameters extracted by the LLM directly correspond to the information in the user's request, demonstrating that the decision layer can reliably map natural language to the structured configurations required for optimization. This case study confirms that the proposed LLM-assisted framework not only supports optimal charging decisions but also provides interpretable explanations for residential users.

IV. CONCLUSIONS

This paper proposes an LLM-assisted framework for EV charging optimization. In a residential case study, the system reduced charging costs by 64.9% relative to a no-optimization baseline, achieving a configuration consistent with manual expert setup. Beyond efficiency, the LLM improves usability by translating key scheduling decisions into plain language. Future work will focus on two areas: developing a closed-loop negotiation mechanism to resolve infeasible preferences, and extending explanations to include grid-impact feedback to support long-term user trust. Overall, this integration transforms rigid schedulers into interactive assistants for user-centric demand response.

REFERENCES

[1] Y. Cheng, H. Zhao, X. Zhou, J. Zhao, Y. Cao, C. Yang, and X. Cai, "A large language model for advanced power dispatch," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 8925, 2025.

[2] C. Huang, S. Li, R. Liu, H. Wang, and Y. Chen, "Large foundation models for power systems," in *2024 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. IEEE, 2024, pp. 1–5.

[3] L. Zhang and Z. Chen, "Large language model-based interpretable machine learning control in building energy systems," *Energy and Buildings*, vol. 313, p. 114278, 2024.

[4] F. Michelon, Y. Zhou, and T. Morstyn, "Large language model interface for home energy management systems," in *Proceedings of the 16th ACM International Conference on Future and Sustainable Energy Systems*, 2025, pp. 590–602.

©2026 IEE Japan

外出行為生成モデルを用いたEV充電需要推計

川井　流星*，大原　涼太郎，内田　英明，山口　容平，下田　吉之（大阪大学）

The Estimation of EV Charging Demand Based on Human Activity Simulation Model

Ryusei Kawai, Ryotaro Ohara, Hideaki Uchida, Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda (The University of Osaka)

１．まえがき

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて運輸部門において脱炭素化が求められており，経済産業省はグリーン成長戦略[1]の中で2035年までに国内の乗用車新車販売の電動化比率を100%とする目標を立てた．走行時に温室効果ガスを排出しない電気自動車（EV）を排出係数の小さい電源と合わせて普及させることで運輸部門の脱炭素化を進めることができる．一方で，EV充電によって大幅な電力需要の増加が起こる可能性が報告されている．日本においても，田頭ら[2]は人々の居住地などの基礎充電場所におけるEV充電が夜の時間帯の電力需要を増加させることを示した．

Mizuno ら[3]は位置情報データに対して大規模言語モデルを訓練し，人の移動経路を予測する手法を開発した．著者らはこの手法を適用することでEV充電によって発生する電力需要を推計できると考えた．本研究では位置情報ログデータを学習させた外出行為生成モデルを開発し，高い時空間解像度でEV充電需要を推計する．

２．手法

＜2・1＞使用データ　Agoop社のポイント型流動人口データ[4]を訓練用データとして使用した．このデータセットはAgoop社が開発したSDKを搭載したスマートフォンアプリがインストールされたスマートフォンから収集されている．使用したデータの一覧を**表 1**に示す．ログは分単位のタイムスタンプ・緯度・経度・水平誤差によって構成される．

表 1　位置情報ログデータ
Table 1　Location log data

期間	地域	ユーザー数
2019/10/24～2019/11/04	全国	1,478,122
2022/02/03～2022/02/09	近畿地方	745,259
2022/08/04～2022/08/10	近畿地方	797,428
2022/10/24～2022/11/04	近畿地方	862,598

＜2・2＞ジャーニーの抽出　自宅を出発して自宅に到着するまでの一連の移動行動をジャーニーと定義し，Yamaguchi ら[5]が確立した手法を適用することでジャーニーを抽出した．まず，測定の誤差の要因となるノイズを除去したうえで，ログを移動と滞在の2種類に分類した．その後，移動ログは自動車・鉄道・徒歩・その他の4種類に，滞在は自宅・職場・その他のスポットでの滞在の3種類に分類した．端末に搭載されているOSの特性の違いを考慮し，Androidのユーザー1500人，iOSのユーザー1500人を対象としたアノテーションデータに基づいて機械学習モデルを構築した．機械学習モデルの性能は正解率とF1スコアを用いて評価した．正解率とF1スコアの両方で0.75を上回り，モデルの訓練データとして用いる上では十分な性能を得た．

＜2・3＞ジャーニー生成モデル　まず，ジャーニー中の各スポットの重心点を含む1 kmメッシュを文字列で表現した．次に時間情報に関して，時間スケールの違いを考慮して滞在時間と移動時間の二つを別々のバイト文字で表し，経過時間の累積によって時刻を表現した．また，それぞれ累積分布が等確率になるように36分割し，固有の文字を割り当てた．

さらに，モデルが詳細に人の行動を再現できるように，各ユーザーの属性情報とジャーニーの特徴を補助情報として文字列に埋め込んだ．各ユーザー属性及び行動日の情報を**表 2**に，ジャーニーの特徴を**表 3**に示す．

表 2　ユーザーの属性情報と行動日の情報
Table 2　Demographic features

項目	ユーザー数
自宅メッシュ	自宅が含まれる1kmメッシュ
交通利便性	自宅が含まれる1 kmメッシュのPTAL[6]（6レベル）
平休日フラグ	平日か休日か
自動車保有フラグ	ユーザーが自動車を保有するか
通勤者フラグ	ユーザーが通勤者か否か
職場メッシュ	職場が含まれる1 kmメッシュ

表 3　ジャーニーの特徴
Table 3　Information of journey

項目	内容
外出目的	ジャーニーの目的が通勤か否か
出発時間帯	出発時刻が午前0時を起点に3時間ごとに1日を区切った8つの時間帯のいずれに含まれるか
帰宅時間帯	帰宅時刻が午前0時を起点に3時間ごとに1日を区切った8つの時間帯のいずれに含まれるか
目的地メッシュ	外出中で最も長時間滞在したスポットの1 kmメッシュ
主要交通手段	ジャーニー中で最も長距離を移動するのに使われた交通手段
職場メッシュ	職場が含まれる1 kmメッシュ

＜2・4＞モデルの訓練　本研究では，Radford ら[7]が提案

©2026 IEE Japan

した，約 1.2 億パラメータの GPT2-small を用いた．トークナイザーには Sennrich ら[8]が提案した Byte-Pair-Encoding を用いた．語彙数は 80000 とした．

＜2・5＞EV の充電需要推計　　本研究では，EV 利用者の帰宅と同時に充電を開始し，EV が自宅から離れるか満充電になるまで定格電力で充電を続ける状況を想定して充電需要の推計を行った．各ユーザーが利用する車種は必要バッテリー容量に応じて普通車・軽自動車をランダムに割り当てた．EV 充電需要推計の各パラメータを**表 4**に示す．

表 4　EV 充電需要推計の各パラメータ
Table 4　Features of car

	軽自動車	普通自動車
電費[km/kWh]	9.0	7.5
充電電力[kW]	3	6
バッテリー容量[kWh]	20	60

3．結果

＜3・1＞モデルによる外出行為生成　　生成データとパーソントリップ調査を地域間の OD 量を用いて比較した結果を**図 1**に示す．兵庫県を対象に集計し，生成データは実人口に応じて拡大推計を行った．その後，トリップ量のオーダーが大きく異なる市区郡の組の間で比較を行うために，各市区郡を出発地とするトリップに対する目的地の市区郡の割合で表した．CV-RMSE は 62%であるが，RMSE は 3.7%であり，十分にデータが存在する主要な市区町村の組においては OD のパターンを正確に再現できている．

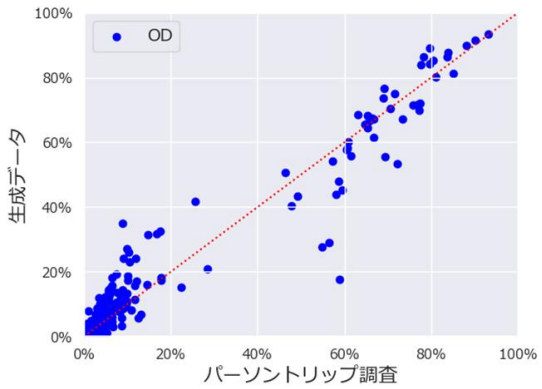


図 1　生成データとパーソントリップ調査の比較
Fig. 1　Generated and survey data

＜3・2＞EV 充電需要推計　　推計した EV 充電需要を**図 2**に示す．通勤通学者の帰宅が集中する午後 6 時ごろに需要のピークが現れることが分かった．また，EV 充電需要は多可町において最も大きく、神戸市長田区や伊丹市では需要が小さい．一方で，多可町は神戸市長田区・伊丹市と比べて交通利便性が悪く，人々の移動に自動車が頻繁に利用される．地域の交通特性によって充電需要の特性が異なることが分かった．また，通勤通学者が多い平日は休日よりも充電需要が大きいことも分かった．

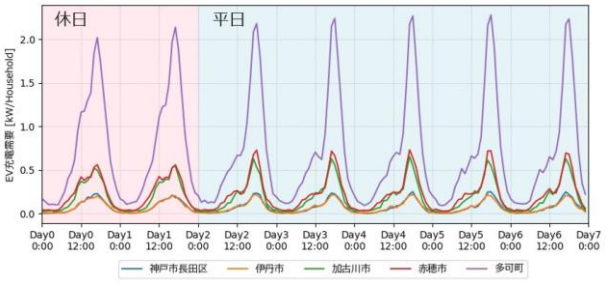


図 2　EV 充電需要
Fig. 2 EV charging demand in 5 municipalities

4．結論

本研究では，位置情報ログデータを用いた外出行為生成モデルを開発し，交通手段と走行距離から EV 充電に伴って発生する電力需要を推計した．今回の結果から，EV 利用者の帰宅と同時に充電を開始する場合の需要は午後 6 時ごろに集中し，ピークの大きさは地域の交通特性によって異なることが分かった．今後は長期間の外出行為生成，また居住者の属性情報に応じた生成ができるよう開発を進める．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23K26260 の助成を受けたものである．

文　献

1) 経済産業省　グリーン成長戦略；https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/05_jidosha.html, 2026 年 1 月 2 日閲覧
2) 田頭直人，高木雅昭；電気自動車による地域別充電負荷の推計―日中の充電行動を考慮して―，電力中央研究所報告, Y13009 (2014)
3) Mizuno et al.; Generation of individual daily trajectories by GPT-2; Frontiers in Physics 10:1021176 (2022)
4) Agoop 社　ポイント型流動人口データ；https://agoop.co.jp/service/dynamic-population-data/, 2026 年 1 月 4 日閲覧
5) Yamaguchi et al.; Large-scale spatiotemporal modeling of travel behavior, electric vehicle charging demand, and flexibility based on human mobility big data, Energy, 335, 137804 (2025)
6) Su et al.; Estimating Public Transportation Accessibility in Metropolitan Areas: A Case Study and Comparative Analysis, sustainability, 15(17), 12873 (2023)
7) Radford et al.; Language Models are Unsupervised Multitask Learners; OpenAI (2019)
8) Sennrich et al.; Neural Machine Translation of Rare Words with Subword Units; Association for Computational Linguistics; pp.1715-1725 (2016)

©2026 IEE Japan

多指ロボットハンドの把持動作を実現する報酬設計の検討

山田　慶太郎*，齋藤　正親，水戸部　一孝(秋田大学)

Reward Design for Grasping Actions Using a Multi-Fingered Robot Hand

Keitaro Yamada, Masachika Saito, Kazutaka Mitobe (Akita University)

１．序論

多指ロボットハンドの指先を制御する際の関節角度を求める問題は一般に逆運動学問題として知られている。特に高自由度を持つロボットにおいては，計算が複雑であり，このような問題は，ベルンシュタイン問題として知られている。多指ロボットハンドなどの高自由度ロボットハンドでは関節の数が増えることにより，目標位置に対して関与する関節の自由度が冗長になり，動作が一意に決定できなくなるため制御が困難となる。このような問題に対して，強化学習を用いた解法が有効とされている[1]。本研究では多指ロボットハンドによる把持動作の実現を目的として，強化学習における報酬設計を検討する。

２．シミュレーション方法

本研究では，Gymnasium-Robotics に含まれる AdroitHandRelocate 環境を改変した強化学習環境を用いてシミュレーションした。本環境には，多指ロボットハンドが机上の球を把持するタスクを設定した。学習アルゴリズムには，連続行動空間において安定した性能を示す Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient（TD3）を用いた。また，実装には Python を用いた。

３．報酬設計

デフォルトの環境における報酬設計では，物体との距離に基づく設計がなされていた。しかし，この設計では，掌で物体を押し付ける行動や，偶発的な接触によって高い報酬を獲得し，指を用いた把持とは異なる不自然な行動に収束することがあった。

本研究では，ロボットハンドの指腹部に評価領域を設定し，領域内に球面が入れば接触しているとみなし，正の報酬を与える。また，各指腹部の中心点と球表面との距離に応じて，負の報酬を与える。すなわち，指を用いず掌のみで球を支持する行動では十分な報酬を得られず，指を用いた把持行動によって報酬が増加する報酬設計とした。

４．実験結果

図 1 に学習曲線を示す。横軸にエピソード数，縦軸に総報酬を示す。また，橙線は 50 点の移動平均である。同図より，30000 エピソード付近から報酬が飽和したことがわかる。学習の進行に伴い，複数の指が同時に球へ関与する把持動作が観測された。特に，指を屈曲させながら球を包み込むような把持行動が頻繁に確認され，デフォルトの報酬設計で見られた掌による押し付け行動はなくなった。図 2 に学習後のポリシーによる把持動作を示す。ロボットハンドが青の球を５指で包み込むように把持している様子を見て取れる。

５．結論

本研究では，多指ロボットハンドによる自然な把持動作の獲得を目的として，把持状態を評価する報酬設計を提案した。指腹部および掌の関与を考慮した報酬設計により，掌押し付けに陥らず，包み込むような把持動作が誘導されることを示した。今後は，球の直径を変更した際の把持に必要な報酬設計を検討する予定である。

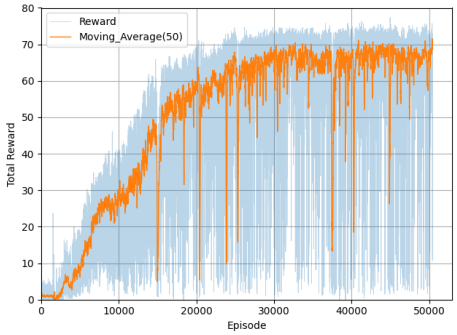


図 1 エピソードに対する総報酬の推移
Fig.1. Transition of Total Reward over Episodes

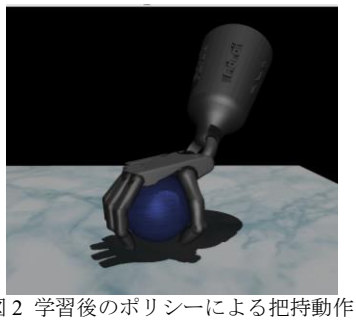


図 2 学習後のポリシーによる把持動作
Fig.2. Grasping actions based on post-learning policies

文　献

(1) OpenAI,“SOLVING RUBIK’ S CUBE WITH A ROBOT HAND”, arXiv:1910.07113 [cs.LG], 2019.

©2026 IEE Japan

環境設置カメラによる自律移動ロボットの位置及び姿勢推定に関する研究
―深層学習モデルを利用した実環境での位置推定―

坂下　悠*，鳥井 昭宏，道木 加絵，元谷 卓（愛知工業大学）
舟洞　佑記，道木　慎二（名古屋大学）

Pose estimation of autonomous mobile robots using environment-mounted cameras
-Pose estimation in real-world environments using deep learning-

Haruka Sakashita, Kae Doki, Akihiro Torii, Suguru Mototani(Aichi Institute of Technology)
Yuki Funabora, Shinji Doki(Nagoya University)

1　研究背景・目的

自律移動ロボットにとって、自己位置推定は重要な課題である。従来の手法ではロボットに搭載されたセンサ情報のみを利用してきた。そこで本研究では移動環境中に設置されたセンサ情報も利用することでロバスト性の向上を目指す。これまで、環境設置センサとしてカメラを想定し、カメラを原点とするロボットの位置・姿勢推定システムを構築してきた [(1)] 。本システムには深層学習を利用しており、学習モデルは入力画像に対するロボットの 3 次元位置と姿勢を推定するよう設計している。本稿ではこの学習済みモデルを利用して、実環境でリアルタイムの位置推定を行い、その精度を検証する。

2　実環境での推定システム

〈2･1〉システム概要　　図 1 に本研究で構築を目指すカメラ画像を用いた位置・姿勢推定システムの概要を示す。本システムでは推定を行う PC が、入力データとして環境設置カメラから 1280*720[pixel] の画像を受け取る。受け取った画像を 320*180[pixel] の画像サイズにリサイズし、学習済みモデルがロボットの 3 次元位置と姿勢を推定し出力する。出力された位置・姿勢情報をロボットが受け取る。リアルタイム推定を行う PC の性能を表 1 に示す。本稿では環境設置カメラから画像を受け取り、ロボットの位置・姿勢情報を出力するところまで作製した。本システムは入力画像 1 枚に対して推定を行っており、特にフィルタ等は実装していない。

〈2･2〉学習済みモデルの作製及び検証　　学習済みモデルは深層学習フレームワーク TensorFlow の VGG16 を利用して作製する。表 2 は学習時の主なパラメータである。本研究では入力が画像、出力が 3 次元座標と姿勢となるようにデータセットを作製する。また、本稿では新たに現在環境のデータをデータセットに組み込んで学習させる。学習済みモデルに過学習等の問題がある場合、実環境でのリアルタイム推定に利用できない。そのため、学習済みモデルの検証を行う。図 2、図 3 は作製した学習済みモデルの検証結果である。図 2、図 3 のグラフはロボットの位置・姿勢と推定値の誤差のヒストグラムと分布曲線である。位置・姿勢推定の誤差平均は 0[m] 付近である。また、分布曲線の形状も大きく歪んでいない。上記結果より、過学習等の問題は見られない。そのため、当学習モデルを利用し実環境でのリアルタイムでの推定を行う。

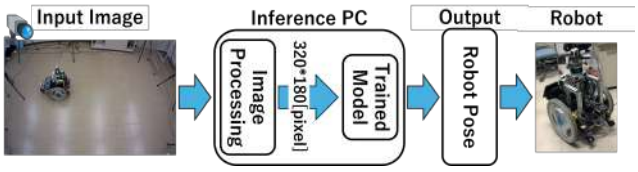


図 1: 提案システム

Fig. 1: Proposed system

表 1: PC の性能

Table 1: PC specifications

CPU	Intel Core i7-11800H (11th gen., 2.5 GHz)
RAM	32 GB
GPU	N/A
OS	Ubuntu 20.04

表 2: 学習に用いる主なパラメータ

Table 2: Key parameters of deep learning

Parameter	Value
Optimizer	Adam
Epochs	80
Batch size	50
Image size	320*180
Training data	24,000
Validation data	5000

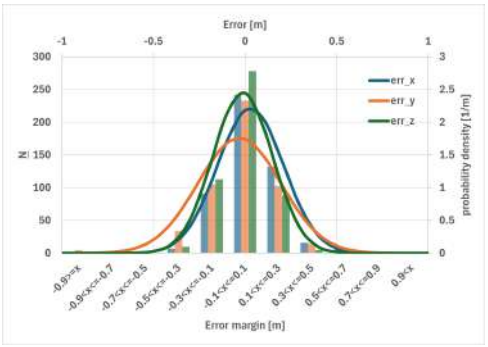


図 2: 位置の検証結果

Fig. 2: Position test results

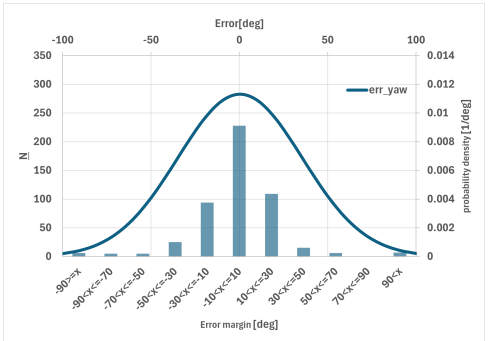


図 3: 姿勢の検証結果

Fig. 3: Orientation test results

©2026 IEE Japan

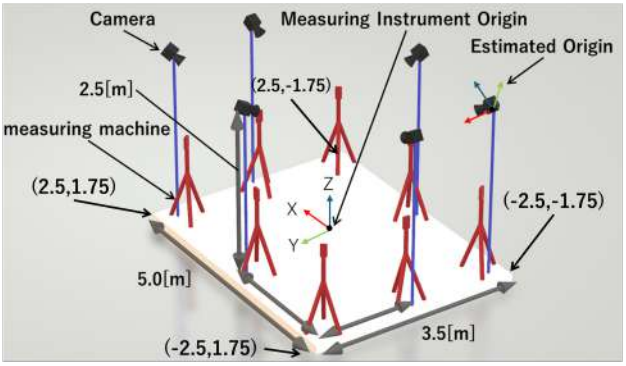


図 4: 実験環境の模式図
Fig. 4: Schematic of the experimental environment

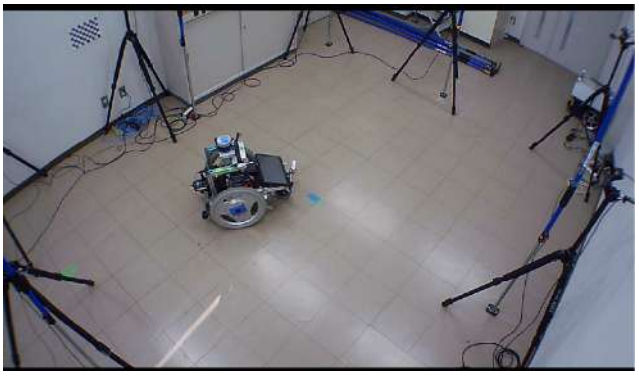


図 5: 入力画像
Fig. 5: Input image

3 実環境におけるリアルタイム推定

〈3･1〉実験内容　図 4 は実験環境の模式図である。実験環境は 5.0[m]*3.5[m] の空間である。8 台の装置で構成される計測機でロボットの座標を右手系で計測する。計測機の原点は実験を行う空間の中心に固定する。床面の具体的な座標は図 4 に示した。本実験では 1 台のカメラでロボットの位置推定をする。図 5 は実際のカメラからの入力画像である。推定に利用するカメラは、計測機の原点から見て、X 座標が-2.5[m]、Y 座標が-1.25[m]、Z 座標が 2.5[m] の位置に設置されている。また、カメラは計測機の原点を向くように向きを調整している。図 5 の計測機による座標は、左端が (-2.5,1.75)、中央下が (-2.5,-1.75)、右端が (2.5,-1.75)、中央奥が (2.5,1.75) である。本稿で作製した推定システムは利用しているカメラを原点としたロボットの座標を左手系で出力する。そのため、推定値の検証のため、計測機と同一の座標系に推定値を座標変換する。ロボットを (-1.25,1.0) 付近から (1.25,-1.0) 付近に移動するときの、計測機で計測した実際のロボット座標と、本システムのリアルタイム推定の結果を比較し位置推定精度の検証をする。画像内でのロボットの移動ルートを図 6 に示す。また、カメラ画像の入力速度と本システムの出力速度を比較し、リアルタイム性の評価をする。入力速度と出力速度の差が小さいほどリアルタイム性が高い。

〈3･2〉実験結果　図 7 は XY 平面における実際のロボットの移動の軌跡と推定値の軌跡である。矢印はロボットの移動方向を示している。推定値の軌跡が実際のロボットの移動に誤差はあるものの沿っていることが確認できる。しかし、推定精度が悪い位置がある。推定精度が悪い位置は、ロボットの移動

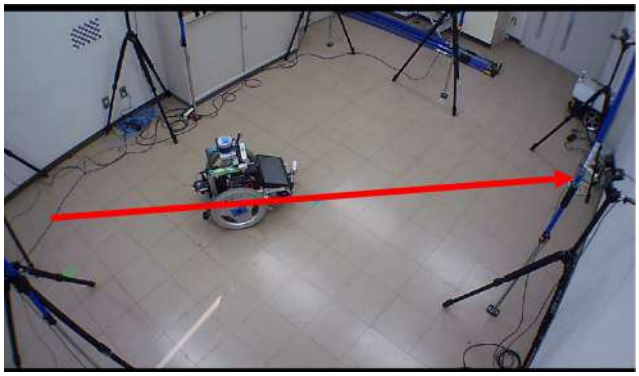


図 6: 画像内でのロボットの移動
Fig. 6: Robot motion in the image

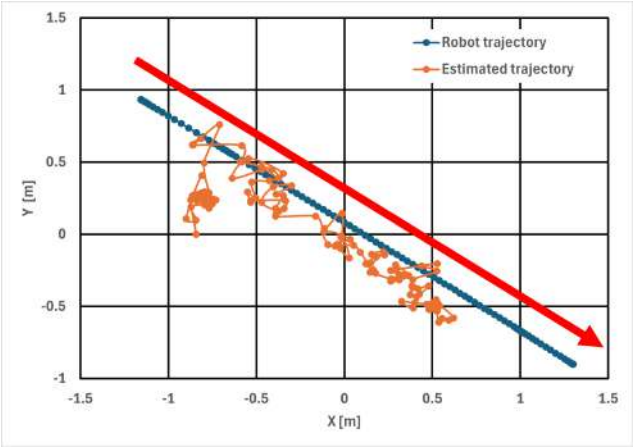


図 7: ロボットと推定値の軌跡
Fig. 7: Robot and estimated trajectory

の始点と終点付近である。また、これは画像内での左右の両端周辺あたることが確認できる。推定のリアルタイム性は、カメラ画像の入力速度が 24.1[Hz]、本システムの出力速度が 9.1[Hz] となっている。入力速度と出力速度の差が大きく、カメラの出力周期に対し本システムの推定速度が追い付いていないためリアルタイム性は低い。

〈3･3〉考察　画像内での左右の両端で推定精度が悪くなった原因は、データセット内に画像端にロボットが映っているデータが不足していることが考えられる。本システムのリアルタイム性が低い原因は、学習済みモデルでの推定に GPU を利用していないことや、画像のリサイズから推定までを 1 つのシステムで行っていることが挙げられる。

4 まとめ

本稿では、実環境での位置・姿勢推定システムの作製し、リアルタイムでの推定を行い、推定精度の検証を行った。作製したシステムでのリアルタイム推定ができた。しかし、推定精度は画像両端周辺でのロボットの位置推定が著しく悪くなっていた。また、本システムのリアルタイム性は低かった。そのため、今後は推定精度向上と、リアルタイム性の向上方法を模索する。

文　献

（1） 佐藤大樹, 他,”深層学習を用いた環境設置カメラによる自律移動ロボットの位置推定精度向上－推定対象を平面に限定した場合の位置推定精度検証－”2023 年電気学会 C(電子・情報・システム) 部門大会,PS3-9

©2026 IEE Japan

PSD エントロピーと機械学習を用いた 複数 DoS 攻撃検出方式

東　勇樹*，花田　真樹（東京情報大学）

Multiple DoS Attack Detection Method Using PSD-Derived Entropy and Machine Learning

Yuki Azuma, Masaki Hanada (Tokyo University of Information Sciences)

１．まえがき

近年, 世界的に高度化・巧妙化するサイバー攻撃により, その被害規模は拡大し, 深刻な社会的問題となっている。中でも，サービス拒否攻撃（DoS）は最も一般的な攻撃の一つであり, 特に低レート DoS 攻撃は平常時の通信と判別がつきにくく，被害が長期化しやすいという特徴がある。

本研究では，通信回数および通信容量の PSD（Power Spectral Density）エントロピーと通信の統計量を特徴量とし, 機械学習を用いた DoS 攻撃検出方式を提案する。

評価実験では，提案方式と既存方式である PSD エントロピーによるフィルタリングを用いた機械学習による DoS 攻撃検出方式との比較実験を行い，提案方式の有効性を示す。

２．先行研究

先行研究(1)(2)では, PSD エントロピーによるフィルタリングを利用した手法を提案している。先行研究(1)では，はじめに，通信回数から算出した PSD エントロピーに基づく閾値によるフィルタリングを行う。通常通信と攻撃通信の PSD エントロピーからそれぞれ閾値を設定し，PSD エントロピーが通常通信の閾値より大きい場合は通常通信と判定し，PSD エントロピーが攻撃通信の閾値より小さい場合は攻撃通信と判定する。その後, 閾値で判別できなかった通信から SVM（Support Vector Machine）を用いて DoS 攻撃通信を検出する。この研究では，KDD Cup 1999 データセット(3)を用いて DoS 攻撃の一種である smurf 攻撃と正常通信の 2 値分類を行っている。先行研究(2)では, はじめに, 通信回数および通信容量から算出した PSD エントロピーに基づく閾値によるフィルタリングを行う。通常通信の PSD エントロピーから閾値を設定し, PSD エントロピーが閾値より小さい場合，NN（Neural Network）によって DoS 攻撃通信を検出する。この研究では， CIC-IDS2017 データセット(4)を用いて Hulk，GoldenEye，slowloris，Slowhttptest の 4 種類の DoS 攻撃について正常通信との他クラス分類を行っている。

先行研究(2)では，PSD エントロピーによるフィルタリングを用いて，PSD エントロピーが閾値より小さい場合は，機械学習による判別を行うが, 閾値以上の場合は, 正常通信と固定的に判定する。この手法では，PSD エントロピーが閾値以上となる攻撃が存在する場合，正常通信と誤って判定する可能性がある。そこで，本研究では，PSD エントロピーをフィルタリングでなく機械学習の特徴量として追加導入する。

３．データセット

本研究では，先行研究(2)で用いられている CIC-IDS2017 データセット(4)を使用する。CIC-IDS2017 データセットは 2017 年に作成されたデータセットであり，通信の各種統計量に対して，正常通信と Hulk，GoldenEye，slowloris，Slowhttptest などの攻撃のラベルが振られている。

４．提案方式

本研究では，1 秒あたりの通信回数および通信容量の PSD エントロピーを DoS 攻撃検出のための特徴量として追加導入する方式を提案する。

提案方式では，はじめに，PSD エントロピーの算出を行い，算出した PSD エントロピーを通信の各種統計量に対して追加し，新たな特徴量を作成する。その後，これらの特徴量を用いて，機械学習による分類器を作成する。

以下では，まず，PSD エントロピー算出と特徴量作成について述べ，その後，適用する機械学習について述べる。

＜4・1＞PSD エントロピー算出と特徴量作成

CIC-IDS2017 データセット(4)を用いて通信の 1 秒あたりの通信回数および通信容量から PSD エントロピーを算出する。

CIC-IDS2017 データセット(4)の MachineLearningCSV には, 77 種類の通信の統計量が含まれている。本研究では, これらの全て（77 種類）の通信の統計量（および先行研究(5)において有効性が示された 11 種類の通信の統計量）に対して, 算出した PSD エントロピーを加え, 新たな特徴量を作成する。

＜4・2＞分類器

＜4・1＞で述べた特徴量を用いて機械学習による分類器を作成する。機械学習アルゴリズムとして，Microsoft が開発した勾配ブースティングアルゴリズムである LightGBM（Light Gradient Boosting Machine）を採用する。

５．評価実験

＜5・1＞データセット

©2026 IEE Japan

本研究では，CIC-IDS2017 データセットに含まれる MachineLearningCSV を使用する。正常通信および DoS 攻撃通信である Hulk, GoldenEye, slowloris, Slowhttptest のみを抽出し，解析対象とする。

先行研究(2)と同一条件での評価を行うため，PSD エントロピー算出後，通常通信 47,500 件および DoS 攻撃通信 2,500 件（各攻撃 625 件）を抽出し，層化分割による 5 分割交差検証を行う。

＜5・2＞分類器

本研究では機械学習アルゴリズムとして，LightGBM（Light Gradient Boosting Machine）を採用する。また，先行研究(1)(2)との性能比較のために，これらの研究で使用されている SVM，NN を用いる。PSD エントロピーによるフィルタリングを用いた方式（既存方式），PSD エントロピーを既存の通信の統計量に追加した方式，既存の通信の統計量のみを用いる方式について比較を行う。

＜5・3＞評価方法

評価方法には，通常通信および 4 種類の DoS 攻撃からなる 5 クラス分類における F1-score の macro 平均を用いた。また，攻撃通信のみを対象としたクラス別 F1-score を算出し，攻撃種別ごとの検出性能を評価した。

６．結果と考察

表 1 に，各手法における DoS 攻撃検出性能を示す。なお，表中の特徴量構成では 11 種類の特徴量を「11」，77 種類の全ての特徴量を「All」，PSD エントロピーを「PSD」と略記する。また，表中の分類器では，PSD エントロピーによるフィルタリングを用いたものを「PSD 閾値判別」と表記し，「SVM」，「NN」，「LightGBM」は採用した機械学習アルゴリズムである。

表 1　DoS 攻撃検出性能
Table 1. DoS attack detection performance

分類器	特徴量構成	F1-score (macro)
PSD 閾値判別 ＋SVM	11	0.429
SVM	11	0.723
SVM	11 + PSD	0.728
SVM	All	0.881
SVM	All + PSD	**0.896**
PSD 閾値判別 ＋NN	11	0.449
NN	11	0.860
NN	11 + PSD	0.895
NN	All	0.965
NN	All + PSD	**0.967**
LightGBM	11	0.892
LightGBM	All + PSD	0.921
LightGBM	All	0.992
LightGBM	All + PSD	**0.992**

注：各値は通常通信および 4 種類の DoS 攻撃からなる 5 クラス分類における F1-score の macro 平均である。LightGBM における All と All＋PSD の F1-score（macro）の差は 0.0002 と小さいが，All＋PSD の方がわずかに高い値を示した。

機械学習アルゴリズムに着目した比較では，SVM，NN，LightGBM の順に F1-score（macro）が向上し，特に LightGBM と全ての特徴量を用いた構成において高い検出性能が確認された。いずれの分類器においても，PSD エントロピーを特徴量として追加することで F1-score（macro）が向上した一方，PSD エントロピーによるフィルタリングを用いた方式は検出性能が低下した。これは，PSD エントロピーが一部の DoS 攻撃に対してのみ有効であることを示している。

攻撃種別の評価では，Slowhttptest において比較的高い F1-score が得られた一方で，slowloris では他の攻撃と同程度の低い値にとどまった。これらの結果から，PSD エントロピーは通信回数や通信容量に含まれる周期性・規則性を強く反映する指標であり，低レート性そのものを直接表す指標として不十分と考えられる。

７．おわりに

本研究では，1 秒あたりの通信回数および通信容量に基づく PSD エントロピーを DoS 攻撃検出の特徴量として追加導入する方式を提案し，その有効性を検証した。その結果，PSD エントロピーを特徴量として用いることで，いずれの機械学習モデルにおいても検出性能の向上が確認された。一方，PSD エントロピーに基づく単純な閾値判別は，多様な DoS 攻撃を包括的に検出するには限界があることが明らかとなった。

今後は，PSD エントロピー算出の効率化や，適用対象とする通信特性の限定などを検討することで，実運用環境への適用可能性を高めることが課題である。

文　献

(1) N. Zhang, F. Jaafar, Y. Malik: Proc. IEEE Int. Conf. Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud) / Edge Computing and Scalable Cloud (EdgeCom), pp.59–62 (2019)

(2) 椙村 駿平・関谷 勇司：第 19 回情報科学技術フォーラム（FIT2020），pp.73-74（2020）

(3) S. Stolfo, W. Fan, W. Lee, A. Prodromidis, P. Chan: Proc. The Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD), (1999)

(4) I. Sharafaldin, A. H. Lashkari, A. A. Ghorbani: Proc. Int. Conf. Information Systems Security and Privacy (ICISSP), pp.108–116 (2018)

(5) O. Ali, P. Cotae: Proc. IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conf. (UEMCON), pp.228–234 (2018)

©2026 IEE Japan

作曲活動支援 AI におけるランキング学習を応用した趣向反映方法の検討

坂上　直也*，関　弘翔，細野　裕行（日本大学）

A Study on Reflective Preference Methods Using Learning to Rank in Composition Support AI

Naoya Sakagami, Hiroto Seki, Hiroyuki Hosono (Nihon University)

１．まえがき

近年，テキスト(プロンプト)から音楽を生成する Text-to-Music が画像生成と同様に発展しつつある．特に拡散モデル(1)や Flow Matching(2)などの生成モデルが登場したことで，より高音質の音楽を生成することが可能になった．しかし，現状の音楽生成 AI はプロンプトのみで生成を制御するため人間の意図を組み込んだ音楽生成が困難である．

ここで近年，Human-in-the-loop と呼ばれる人間のフィードバックを AI の学習ループに適応することで精度を高めるという設計思想が注目され，文章生成 AI の学習にランキング学習を用いることが一般的になっている．

そこで，本研究では Flow Matching 系の音楽生成 AI にランキング学習を組み合わせることで，AI の学習ループに人間の好み，趣向を反映できる音楽生成 AI を提案する．

２．ランキング学習を応用した趣向反映機能の構築

Flow Matching とは，ある確率分布(単純なノイズ分布)から別の確率分布(複雑なデータ分布)へ，サンプルを連続的に変換する流れ(フロー)を学習する生成モデリングである．また，ランキング学習とは，複数サンプルの順位を比較することによって，相対的に生成品質が高いサンプルを学習する手法である．これを実現する方法として複数サンプルを相対的に順位付けする手法である Group Relative Policy Optimization (GRPO)を組み込んだ Flow-GRPO(4)を使用した．本研究では報酬関数として，任意の数の曲を好みとして設定し，CLAP(5)の Audio Encoder を用いたベクトル空間で生成音楽との類似度を比較する手法を構築した．この報酬関数を通してユーザーの好みを反映し人間の趣向を反映できる音楽生成 AI を提案し，学習を行った．図 1 に音楽生成におけるランキング学習の処理フローを示す．

音楽生成モデルとして，Flow Matching 系の音楽生成 AI である JASCO(3)を使用した．

３．生成音楽の定性的・定量的評価

ランキング学習によって，ユーザーの趣向に沿うように調整を行った音楽について試聴による定性的評価を行った．結果として，調整後の音楽もノイズなどを含んでおらず，学習崩壊などは見られなかった．

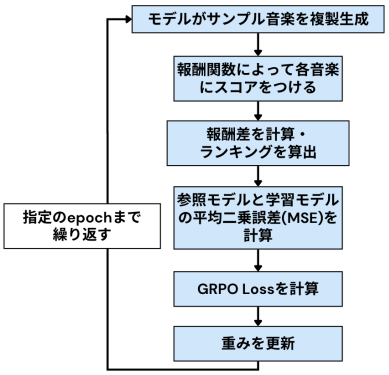


図 1 ランキング学習の処理フロー

表 1 調整前音楽と調整後音楽の定量的評価

	平均コサイン類似度 ↑	平均ユークリッド距離 ↓
調整前	0.7979	0.6140
調整後	0.8065	0.5984

また，定量的評価として調整前と調整後の JASCO で 100 回ずつ生成し，CLAP Audio Encoder を通してベクトル化し，好みベクトルとのコサイン類似度・ユークリッド距離を求めた．表 1 に調整前音楽と調整後音楽の平均コサイン類似度とユークリッド距離を示す．結果として，調整後音楽の方が好みベクトルとのコサイン類似度が増加し，ユークリッド距離が短縮した．したがって，ランキング学習とユーザーの趣向を反映した報酬関数を組み込むことで生成音楽を好みベクトルの方向に調整することができた．

4．まとめ

本研究では Flow Matching 系音楽生成 AI にランキング学習を組み込むことでユーザーの趣向をより反映できる音楽生成 AI を提案した．今後の方針として，より適切な報酬関数の設計や，リアルタイム性を重視したユーザー趣向の音楽生成ができるように AI や処理フローの改善を行う．

文　献

(1) J. Ho, et al., NeurIPS, pp.6840-6851, 2020.
(2) Y. Lipman, et al., ICLR, 2023.
(3) O. Tal, et al., ISMIR, pp.264-271, 2024.
(4) J. Liu, et, al., arXiv preprint arXiv:2505.05470, 2025.
(5) Y. Wu, et al., ICASSP, pp.1-5, 2023.

©2026 IEE Japan

腹臥位乳房 MRI における非造影像を造影像へ変換する Swin Transformer モデルの検討

武山　颯一郎*，佐々木　颯，関　弘翔，宮野　咲紀，
石橋　直也，天野　真紀，細野　裕行　（日本大学）

A Study on a Swin Transformer Model for Translating Non-Contrast to Contrast-Enhanced in Prone Breast MRI

Soichiro Takeyama, Hayate Sasaki, Hiroto Seki, Saki Miyano,
Naoya Ishibashi, Maki Amano, Hiroyuki Hosono (Nihon University)

１．まえがき

造影 MRI は腫瘍を捉えるのに適したモダリティであり，乳房温存術の術前診断では腹臥位（うつ伏せ）で撮影された MRI を使用する．しかし，手術時は背臥位（仰向け）である．姿勢の違いから乳房の形状が変化し，それに伴い腫瘍の位置も変化するため，造影腹臥位 MRI から把握した腫瘍の位置を直接活用できず，医師は経験的に切除範囲を決定する必要がある．この問題に対して，造影背臥位 MRI を用いて腫瘍の位置を皮膚にプロジェクションマッピングする技術[1]がある．この技術によって，造影 MRI の情報を手術時に直接利用可能になるが，身体的なリスクや経済的な負担から造影背臥位 MRI は撮影されにくい．よって，造影背臥位 MRI に近いデータを得る別の手法が求められる．

これまで，大規模言語モデルの中核を担う構造である Transformer[2]をベースとした Generative Adversarial Networks（GAN）[3]による Image-to-Image（I2I）モデルである Transformer with Localization Prompts（TLP）[4]を用いて，造影背臥位 MRI を得る手法を検討してきた[5]．しかし，TLP はスライスごとに変換を行うため，体組織の立体的な構造を考慮できないという課題があった．

本研究では，乳房 MRI の 3D データを扱うのに適した Transformer モデルとして Swin UNEt TRansformers（Swin UNETR）[6]について検討を行う．なお，データ数が豊富な腹臥位にて非造影像から造影像へ変換を行うモデルを構築し，背臥位に転移学習することで実現を図るものとし，腹臥位乳房 MRI での検討とする．また，GAN の識別器に対して Explainable AI(XAI)を適用し，学習傾向の解釈を行う．

２．手法

＜2・1＞データセット　　本研究は，日本大学病院の倫理審査の承認(20220403)を得て実施した．日本大学病院より提供された腹臥位 MRI（非造影 340 例，造影 340 例）を学習用とテスト用（各 330 ペア，10 ペア）に分けて使用した．データによる値域の違いがあるため，学習前に Min-Max 法を用いて[-1, 1]に正規化を行った．また，造影像に対して一定の閾値以上のボクセルを腫瘍として設定することでセグメンテーションマスク（以下 SM と略記）を作成した．

＜2・2＞Swin UNETR　　本研究では，データの効率的な処理が可能な Transformer である Swin Transformer[7]ベースの 3D 医療画像用セグメンテーションモデルである Swin UNETR を用いる．Swin UNETR を生成器として，3D データに対応させた TLP に組み込み，学習を行うことで I2I タスクに応用する．また，TLP は腫瘍が存在し得る関心領域を SM として指定することができ，放射線科医などが出力画像の品質を調整可能であるという特徴を持つ．

＜2・3＞Swin UNETR の改良　　モデルの注意が腫瘍部分に向くように損失関数および最適化手法の改良を行った．

Swin UNETR は画像全体の構造を考慮する損失関数で学習されるが，腫瘍は全体に対して占める割合が小さい．よって，腫瘍の再現性を向上させるために腫瘍領域のみを対象とした L1 損失の導入を行った．腫瘍領域は SM 部分で設定を行うこととするが，閾値により作成した SM では内蔵等の腫瘍でない部分が大半を占める．よって，SM 中でラベルが一定数以上連結している部分や一定以下の密度となっているものを排除し，腫瘍部分のみになるようにした．

また，学習の安定化を目的として，Transformer ベースの言語モデルの学習において注目されている最適化手法の MomentUm Orthogonalized by Newton-Schulz (Muon)[8]を導入した．

＜2・4＞識別器への Grad-CAM の適用　　モデルの学習傾向を調べるために，識別器への XAI の適用を行った．Grad-CAM[9]は CNN ベースの画像認識モデルに対して入力とその予測に対する局所的な説明を与える手法である．本研究では 3D データ対応させた PatchGAN[10]を識別器に採用しているため，画像中のパッチごとに Grad-CAM を適用した．

＜2・5＞定量評価指標　　変換後の MRI の定量評価指標として Root Mean Squared Error（RMSE），Peak Signal to Noise Ratio（PSNR）[11]，Structural Similarity（SSIM）[12]を用いた．

３．結果

比較手法として，GAN ベースの CycleGAN[13]を使用した．

©2026 IEE Japan

CycleGAN は造影像と非造影像の相互変換を学習することにより，非造影像から造影像への変換を実現するモデルである．CycleGAN と TLP および Swin UNETR を用いて学習用データを学習し，テストデータに対する変換を行った．TLP は SM を利用する場合のみ，Swin UNETR は生成時に SM を利用する場合と利用しない場合で変換を行った．表 1 にそれぞれの定量評価の結果を示す．

＜3・1＞Swin UNETR と TLP および CycleGAN の変換結果　図 1 に，実データおよび，テストデータに対する変換結果の例を示す．表 1 の定量評価では，Swin UNETR の方が良い値を示した．図 1 の定性評価においても Swin UNETR の方がより鮮明な造影像を再現した．しかし，腫瘍の再現には至らなかった．

＜3・2＞改良した Swin UNETR の変換結果　図 2 に改良した Swin UNETR（Focused Swin UNETR と呼ぶ）のテストデータに対する変換結果の例を示す．表 1 より SM を利用した Focused Swin UNETR が最良であった．図 1 と図 2 の定性評価では腫瘍の再現を確認でき，損失関数の改良によりモデルの注意を腫瘍に誘導可能であることが示唆された．

＜3・3＞識別器への Grad-CAM の適用結果　図 3 に Focused Swin UNETR の学習時に使用した識別器へ Grad-CAM を適用した結果の例を示す．

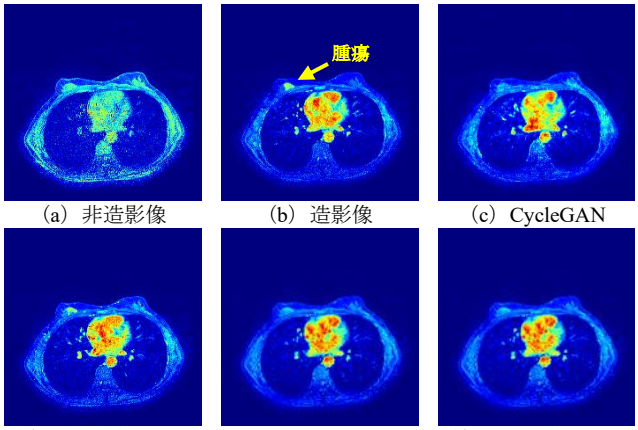
図 3 より，識別器の注目が乳房以外の部分に多く向いている．PatchGAN ベースの識別器を使用していることから，乳房部分以外を重要視して学習している可能性があり，腫瘍の再現精度向上を妨げている要因と推測される．よって，I2I モデルの学習が乳腺や腫瘍部分の再現度向上に集中するような改良を行っていく必要がある．

４．まとめ

本研究では，Swin UNETR を腹臥位乳房 MRI の I2I 用に改良して学習し，腹臥位における非造影像から造影像への変換を行った．改良により，Swin UNETR で実データに近い造影腹臥位 MRI が得られた．今後は，乳房部分にモデルの注意を向けるような工夫を加えることで，生成品質及び腫瘍の再現精度の向上を図り，背臥位での検討を行う．

表 1　CycleGAN ,TLP, 各種 Swin UNETR の定量評価
Table 1. Quantitative Evaluation of CycleGAN, TLP, Various Swin UNETRs

	SM	RMSE ↓	PSNR ↑	SSIM ↑
CycleGAN	×	0.0598	24.524	0.7011
TLP	○	0.0599	24.501	0.7258
Swin UNETR	×	0.0569	24.946	0.7338
	○	0.0568	24.948	0.7334
Focused Swin UNETR	×	0.0543	25.358	0.7410
	○	**0.0542**	**25.362**	**0.7411**



（a）非造影像　（b）造影像　（c）CycleGAN
（d）SM を利用した TLP　（e）Swin UNETR　（f）SM を利用した Swin UNETR

図 1　実データと CycleGAN, TLP, Swin UNETR の変換結果
Fig. 1. Ground truth and translation results from CycleGAN, TLP, Swin UNETR

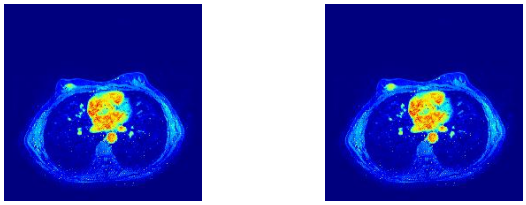

（a）Focused Swin UNETR　（b）SM を利用した Focused Swin UNETR

図 2　Focused Swin UNETR の変換結果
Fig. 2. Translation results of Focused Swin UNETR

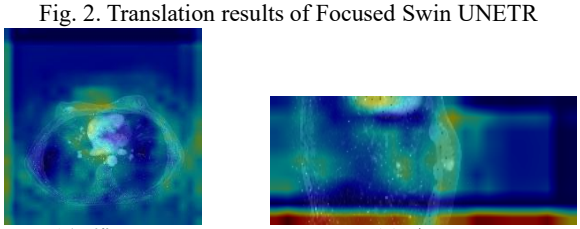

（a）横断面　（b）矢状面

図 3　識別器への Grad-CAM の適用結果
Fig. 3. Application of Grad-CAM to Discriminator

文　献

(1) M. Amano, et al., BioMed, pp.1-9, 2020.
(2) A. Vaswani, et al., NeurIPS, pp.5998-6008, 2017.
(3) I. Goodfellow, et al., NeurIPS, pp.2672-2680, 2014.
(4) L. Li, et al., arXiv preprint arXiv:2503.01265, 2025.
(5) 武山颯一郎,他, 2025 度(第 21 回)電気学会東京支部千葉支所研究発表会, 1-6, 2025.
(6) A. Hatamizadeh, et al., Lect Notes Comput Sci, pp.184-192, 2022.
(7) Z. Liu, et al., ICCV, pp.10012-10022, 2021.
(8) K. Jordan, GitHub, https://kellerjordan.github.io/posts/muon/, 2024.
(9) R. R. Selvaraju, et al., ICCV, pp.618–626, 2017.
(10) P. Isola, et al., CVPR, pp.1125–1134, 2017.
(11) A. Hore, et al., ICPR, pp.2366-2369, 2010
(12) Z. Wang, et al., IEEE TIP, pp.600-612, 2004.
(13) J. Zhu, et al., ICCV, pp.2223-2232, 2017.

©2026 IEE Japan

ニューラルネットワークを用いた睡眠時無呼吸症候群のリスク判別に関する検討

本郷　羽琉*，関　弘翔，赤星　俊樹，内木場　文男，陳　和夫，細野　裕行（日本大学）

A Study on Risk Discrimination of Sleep Apnea Syndrome Using Neural Network

Haru Hongo, Hiroto Seki, Toshiki Akahoshi, Fumio Uchikoba, Kazuo Chin, Hiroyuki Hosono (Nihon University)

１．まえがき

睡眠時無呼吸症候群(Sleep Apnea Syndrome: SAS)とは，睡眠中に呼吸が止まる，または小さくなる病気の事である．SAS の重症度は，睡眠 1 時間に 10 秒以上持続する無呼吸と低呼吸の合計回数である無呼吸低呼吸指数(Apnea Hypopnea Index: AHI)という指標により表される．重症度として，AHI が 5 から 15[回/時間]は軽症，15 から 30[回/時間]は中等症，30[回/時間]以上は重症と分類される．SAS の潜在患者数は成人男性の 20 %前後，女性の 10 %前後とされる(1)．また，治療を受けていない潜在的患者数が多いことが知られており，SAS の簡便なスクリーニング方法が望まれている．

本研究では，顔画像に年齢や性別，BMI などの背景情報を加えて AI による SAS のリスク判別を行う手法の開発を目指している．本稿ではその前段階として，背景情報，顔情報それぞれを入力とする 2 つのニューラルネットワーク(NN)モデルを構築する．比較手法として背景情報を入力とするロジスティック回帰モデルを用いて SAS リスク判別の性能を比較する．

２．手法

＜2・1＞データセット　　本研究は日本大学医学部附属板橋病院における臨床倫理審査委員会の承認(RK-230613-5)を受けて実施した．新宿睡眠・呼吸器内科クリニックから提供されたデータセット(80 人分)を用いる．

患者背景情報には，SAS との関連が明らかにされている年齢，性別，BMI の 3 属性を用いた(2)．

顔画像は，ゴーグルで目隠しをされた 2D の顔写真から DAD-3DHeads(3)を用いて口や顔の輪郭などの顔特徴点を 3 次元で抽出し，3 次元座標点間距離(128 次元)を算出して顔情報とした．さらに顔情報には頸囲も含めることとした．

教師データは AHI≧15(中等症以上)をリスク 1，そのほかをリスク 0 として設定した．

＜2・2＞モデル構築　　本稿では，背景情報モデルは 2 層，顔情報モデルは 3 層とした全結合型の NN で構築した．活性化関数は ReLU とし，顔情報モデルは過学習の傾向が強いため，ドロップアウトを追加した．

＜2・3＞評価指標　　評価指標として Area Under the ROC Curve(ROC-AUC)と Average Precision(AP）を用いた．ROC-AUC は陽性と陰性の判別能力を総合的に評価する指標であり，AP は陽性検出性能を測る指標である．評価は 5 分割交差検証を行った．各 fold で学習データと検証データに振り分けられるが，すべての患者がいずれか 1 回のみ検証データとして評価される．本稿では，fold の検証データに対する ROC-AUC と AP を算出し，各々の平均値を評価に用いた．

表 1　定量評価
Table 1. Quantitative evaluation

	ROC-AUC ↑	AP ↑
ロジスティック回帰	0.7751	0.8467
背景情報 NN	0.7964	0.8419
顔情報 NN	0.5562	0.7031

３．結果

表 1 に 3 モデルの評価結果を示す．

表 1 より，背景情報を入力とするロジスティック回帰と背景情報 NN が，AUC と AP とも同程度に高い判別性能を示した．このことから，有効性が既知である背景情報が，新宿睡眠・呼吸器内科クリニックのデータにおいても SAS リスク判別に強く貢献することが示唆された．一方で，顔情報 NN は ROC-AUC が約 0.56，AP が約 0.70 と低く，顔・頸囲由来の特徴を単純な NN で処理するのみでは効果が限定的である可能性が示された．

４．まとめ

本稿では，年齢・性別・BMI からなる患者背景情報，座標点間距離と頸囲からなる顔情報を入力とした SAS リスク判別モデルを構築し，性能を比較した．その結果，患者背景情報のみを用いたモデルは，ロジスティック回帰，NN ともに高い判別性能を示した．一方で，顔情報のみを用いるモデルの判別性能は低いものとなった．今後は，顔情報モデルの判別精度向上を図るとともに，顔情報と患者背景情報の特徴を統合した SAS リスク判別モデルの構築を検討する．

本研究は JSPS 科研費 JP23K07638 の助成を受けたものです．

文　献

(1) 日本呼吸器学会，“睡眠時無呼吸症候群（SAS）の診療ガイドライン 2020，”2020
(2) T. Matsumoto et al., European Respiratory Journal, 56(2), 2020.
(3) T.Martyniuk, et al., in Proc. of CVPR, pp.20942-20952, 2022.

©2026 IEE Japan

電気設備点検における原状復帰のためのブレーカ状態認識の検討

綾田アデルジャン*，佐々木大三，丹健二（秋田県産業技術センター），
武村順三（中部電気保安協会）

Breaker States Recognition for Status Recovery in Electrical Equipment Inspection

Adiljan Ayata, Daizo Sasaki, Kenji Tan (Akita Industrial Technology Center)
Junzou Takemura (Chubu Electrical Safety Services Foundation)

１．まえがき

電気設備の点検作業では，電気事業法に基づく停電措置と原状復帰が不可欠である．しかし，多岐にわたる点検項目や長時間の作業は，見落としや疲労によるヒューマンエラーの要因となりやすい．現状のチェックシート等による確認では，多様な設備形態に完全に対応することが難しく，重大事故防止の観点から，画像処理技術を用いた自動的な復帰状態確認の導入が求められている[1].

高圧受電設備のキュービクルにおいて，特にブレーカの開閉状態の確認は安全確保の要となる．そこで本研究では，復帰ミスの自動検知手法の確立を目的とし，最新の物体検出モデルである YOLO12 を用いたブレーカのスイッチ状態認識に関する評価実験を行った．本稿では，その試行実験の結果について報告する．

２．認識モデル

ブレーカの状態変化を高精度に捉えるため，最新の物体検出モデル YOLO12 [2]を採用する．YOLO12 は，改良されたバックボーンによる高密度な特徴抽出や注意機構の導入により，小領域の検出性能が大幅に強化されている．これにより，ブレーカの把持部のわずかな位置ズレや角度差の識別において，高い精度と，現場での運用に耐えうるリアルタイム性の両立が期待できる．

YOLO12 にはパラメータ規模の異なる 5 つのモデル（N, S, M, L, X）が存在する．本研究では，これら全てのモデルを用いて学習および評価を行い，モデルの規模が認識精度や推論速度に与える影響を比較検証することで，設備点検の自動化システムに最適なモデル構成を検討する．

３．実験結果および考察

実験用データセットとして，スマートフォンで撮影した約 300 枚のブレーカ画像を用意し，訓練用と評価用に 9 対 1 の割合で分割した．YOLO12 の各モデル（N～X）に対しては，公開されている訓練済みウェイトを初期値としてファインチューニングを行った．また，実環境でのロバスト性を検証するため，学習データには含まれないアクションカメラやドローンで撮影した画像に対しても推論実験を行った．図 1 に認識結果の一例を示す．図の上段がスマートフォンによる評価画像，中段がアクションカメラ画像，下段がドローン画像に対する検出結果である．

評価セットを用いた定量評価では，全モデルが高い精度を示したが，注目すべき点は，パラメータサイズの大きいモデル（L, X）よりも軽量モデル（N, S）の方が高精度であったことである．これは，学習データ数が約 300 枚と限られていたため，大きいモデルでは学習データへの過学習が生じ、汎化性能が低下した可能性が高い．一方，アクションカメラやドローンで撮影した画像では，撮影角度や距離が学習時と大きく異なるため，一部で認識ミスが発生した．具体的には，軽量モデル（N, S）では類似形状を誤検出する傾向が強く，大きいモデル（L, X）では学習データの特徴を捉えすぎたため，対象自体を見落とす未検出が多く見られた．これらの結果から，モデルサイズに応じたエラー傾向の違いが明らかとなり，今後の課題として，多様なアングルを含むデータの拡充やデータ拡張手法の改善が求められる．

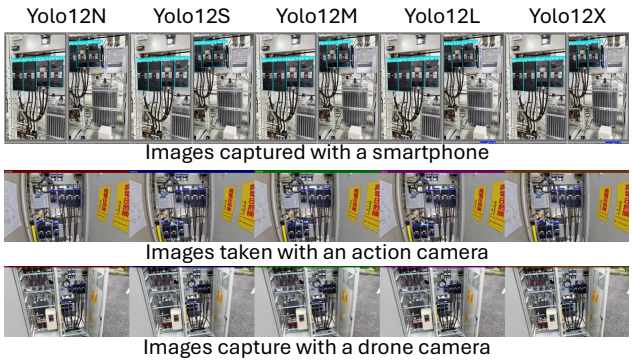


図 1．実験結果の一例

４．おわりに

本稿では，復帰ミス防止に向け YOLO12 によるブレーカ認識を検討した．評価セットで良好な結果が得られたが，視点・照明変化への汎化性向上が今後の課題である．

文　献

[1]　鈴木聖矢，渡邉柚華，多湖貴一，今村柊斗，青木公也，武村順三，電気設備の点検作業における原状復帰ミスの検出手法の試行，第 42 回電気設備学会全国大会, 2C-3, 2024
[2]　Yolo12, Ultrlytics, https://docs.ultralytics.com/ja/models/yolo12, 最終アクセス　2026.1.6

©2026 IEE Japan

少数データの専門ドメインにおけるアスペクト抽出 ～事前学習モデルと R-Drop による正則化の有効性検証～

林　尚也*，浦野　昌一　（明治大学）

Aspect Extraction in Specialized Domains with Limited Data
～Validation of Pre-trained Models and R-Drop Regularization～

Naoya Hayashi*, Shoichi Urano (Meiji University)

１．はじめに

テキストデータから、有益な知見を自動抽出する自然言語処理技術への期待は高まっており、文書全体の大まかな感情ではなく、「何（アスペクト）」について述べられているかを特定するアスペクト抽出は、業務効率化や意思決定支援において重要な役割を果たす。しかし、これらの専門ドメインへの技術適用には「データ希少性」という課題が存在する。また、一般的な深層学習モデルは過学習を起こしやすく、十分な精度が得られない問題がある。本研究では、少数データ環境下におけるアスペクト抽出精度の向上を目的とする。具体的には、BERT 等のほかにエンティティ認識に強みを持つ事前学習モデル（LUKE）と、過学習を抑制する正則化手法（R-Drop）を組み合わせ、その有効性を検証する。

２．分析手法

本タスクは、入力文中のアスペクトを抽出する系列ラベリング問題とする。入力文から、各トークンに対して、BIO タグ形式のラベルを予測する。ここで、B はアスペクトの開始、I はアスペクトの継続、O はそれ以外を表す。また、専門ドメインかつ小規模データセットである金融分野の「chABSA[1]」データセットを用いる。

＜2・1＞LUKE[2]（Entity-aware Attention）　LUKE は、従来の単語単位で処理する BERT 等と異なり、エンティティを独立したトークンとして扱い、トークンの種類を考慮して Attention スコアを計算する Entity-aware Self-attention 機構を持つ。これにより、専門用語（アスペクト）固有の意味や境界を、正確に捉えることが可能となる。

＜2・2＞R-Drop[3]（Regularized Dropout）　少数データ環境下での過学習を抑制するため、R-Drop を導入する。本手法は正則化手法の一つで、同一入力を 2 回モデルに通し、異なる Dropout により得られる 2 つの出力分布間の KL ダイバージェンスを最小化することで予測の整合性を高める。

表1　シミュレーション結果
table1　Simulation results

	F1	F1(＋R-Drop)
BERT	0.785	0.800
RoBERTa	0.808	0.809
DeBERTa	0.809	0.817
LUKE	0.814	0.830

３．シミュレーション

ベースラインとして BERT, RoBERTa, DeBERTa を採用し、提案手法として LUKE およびそれぞれに R-Drop を適用したものを比較する。BERT モデルは日本語事前学習済みの base の whole-word-masking モデルを使用する。その他は日本語事前学習済みの Base モデルを使用する。シミュレーションを 10 回行った際の F1 スコアの平均を表 1 に示す。

表 1 より、モデル間の比較において LUKE が最も高い F1 スコアを記録した。これは、LUKE が単語だけでなくエンティティを考慮した事前学習を行っており、金融ドメイン特有の専門用語（アスペクト）を的確に捉えられたためと考えられる。また、すべてのモデルにおいて R-Drop 適用後に精度が向上した（平均 0.01）。特にデータ数が少ない本実験環境下において、R-Drop が過学習を抑制し、モデルの汎化性能を高める上で有効に機能したことが確認された。

４．まとめ

本研究では、データ希少な金融ドメインにおけるアスペクト抽出において、LUKE と R-Drop を組み合わせた手法の有効性を検証した。実験の結果、LUKE は専門用語（エンティティ）の認識において従来の BERT 等に対し優位性を示し、さらに R-Drop を導入することで過学習が抑制され、F1 スコアが有意に向上することを確認した。

本手法は、金融のみならず、電力インフラの保守高度化や観光データの分析など、高品質な教師データの確保が困難な専門ドメインにおいて、極めて有効であり、あらゆる産業領域におけるデータ利活用に対する汎用的な技術基盤になり得ると結論付ける。

文　献

(1) I. Yamada, A. Asai, H. Shindo, H. Takeda, & Y. Matsumoto: LUKE: Deep Contextualized Entity Representations with Entity-aware Self-attention, In *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP),* pp. 6442-6454 (2020).

(2) X. Liang, L. Wu, J. Li, Y. Wang, Q. Meng, T. Qin, W. Chen, M. Zhang, & T. Liu: R-Drop: Regularized Dropout for Neural Networks, In *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 34, 10890-10905 (2021).

(3) T. Tsuchiya, et al.: chABSA-dataset. GitHub repository, https://github.com/chakki-works/chABSA-dataset (2018).

©2026 IEE Japan

環境情報を考慮した猫動画の骨格推定に基づくロボット動作言語の生成

田中　良磨*，佐藤　紘基，山内　翔，鈴木　恵二（公立はこだて未来大学）

Generation of Robot Motion Language Considering Environmental Information Based on Skeleton Estimation of Cat Videos

Ryoma Tanaka, Koki Sato, Sho Yamauchi, Keiji Suzuki (Future University Hakodate)

１．はじめに

近年，ロボットは工業や農業で動作するのみではなく，SONY の「aibo」(1)のようなペットのように，人間とともに生活をするロボットが普及してきている。また，人間と共に生活を行うロボットは単調な動作は飽きられてしまうことが先行研究で明らかになっている(2)。そのため，家庭用犬型ロボットのようなロボットは，実際のペットのように人間と生活を行なっていくには，飽きられない，人間の関心を引く，多様な動作が可能な魅力を持つ必要がある。そのようなロボットの創出が求められている。

そのような魅力を持つロボットを創出するために，先行研究では，佐藤らによって多様な動作のロボット動作手法が提案されている(3)。この研究では，まず，猫の動画から 2D 骨格を抽出し，次に 3D 骨格に変換を行い，そして，自然言語処理モデルを使用する。そうすることで，継続的に多様な動きを生成させた。しかし，動きにのみ焦点を当てており，その動きに合わせた周りの環境や音の情報を考慮した動作生成を行なっていない。そのため，周囲の環境に合わせた動作生成ができなかった。

そこで本研究では，この先行研究を拡張し，環境情報を考慮した動作生成を行なう。図 1 に本研究の提案システムの全体像を示す。まず，猫の動画内に存在する人や車などの周辺物体情報と波の音や鳴き声などの周辺環境音を抽出する。次に，骨格情報に対応した環境情報の動作言語化を行ない，3D 骨格データと合わせる。そして，環境情報をデータセットに追加しロボットの動作生成を行ない，周辺環境に対応したロボットの多様な動作生成を可能とすることを目的とする。

筆者らはこれまでに，環境情報を考慮した動作生成を行ない，クラスタリングを用いた評価の結果，環境情報を考慮することで，周囲の状況に適した動作を生成することが可能となった。しかし，生成される姿勢の種類が乏しい点や，データセットに含まれない環境情報の存在が課題として存在した。そこで本稿では，動画データの追加と 3D 骨格推定手法の改善，そして自然言語処理モデルでの学習を行ない，姿勢パターンと環境情報の拡充を目指す。

２．提案手法

＜2・1＞システム概要　　本研究では，動画データの追加と 3D 骨格推定手法の改善を行ない，図 1 にて提案したシステムの全体像に沿い，gMLP(4)での学習を行なう。

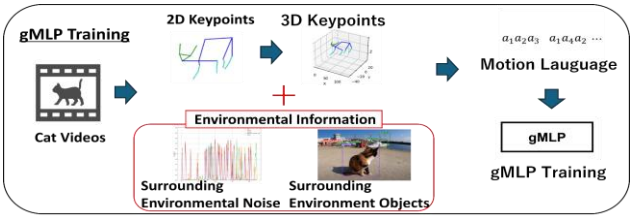


図 1 提案するシステムの全体像

Fig. 1 Abstract Proposed Method Learning gMLP Considering Environmental Information

＜2・2＞動画データの追加　　はじめに，動画データの追加を行なう。新たにインターネット上で動画を収集し，約 1.1TB 分の動画データに加え，10 秒から 6 時間までになる約 1.2TB 分の動画データを追加し，合計約 2.3TB の動画データに拡張した。

＜2・3＞3D 骨格推定手法の改善　　先行研究では 3D 骨格推定手法には C3DPO(5)を用いており，本研究ではこの C3DPO の学習時に推定に使用する閾値の変更とデータセットの追加を行なう。閾値の変更を 0.3 から 0.1 に変更を行なった。これによって抽出した 2D 骨格をそのまま使用することが増え，C3DPO による不足している点の予測を減らすようにした。また，追加した動画データに合わせ，データセットも増幅を行なった。

＜2・4＞gMLP による学習　　変換した動作言語の全データを 100 シーケンスごとに区切り，そこから 7:3 となるように，訓練データと検証データに分割し，学習を行なった。

gMLP の学習時の損失の推移を図 2 に示す。4epoch 時に検証損失が最も低い値となっている。データ生成には，この 4epoch 時点までを学習したモデルを利用する。また，4epoch 以降で，検証損失が上昇傾向にあることがわかる。

３．実験

＜3・1＞実験概要　　本稿では動画データの追加と骨格推定の改善が gMLP にどのような影響を与えるのか検証する。この検証のため，学習用データと学習後の動作生成における姿勢数と環境情報の変化の比較を行なう。

＜3・2＞先行研究における動作言語化の定義　　姿勢数の比較を行なうにあたり，比較に使用する動作言語を定義する。

©2026 IEE Japan

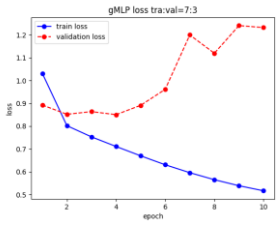


図2 gMLPのトレーニングデータおよび検証データに対するエポック数と損失のグラフ

Fig. 2 Graph of number of epoch and loss for training and validation data for gMLP

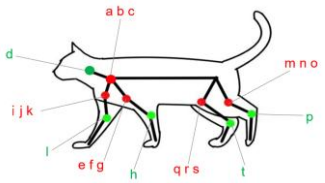


図 3 ネコの関節の自由度（緑：1 自由度，赤：3 自由度）

Fig. 3 Degree of freedom of cat's joints (green: 1DOF, red:3DOF)

本研究では従来研究と同様の形式で動作言語を定義した。図 3 に猫骨格に対する自由度を定義した図を示す。関節自由度の数としては，計 20 の自由度となっている。この定義した関節に対応するように動作言語を定義する。動作言語の概要を表 1 に示す。表 1 に示すように動作言語は a から t のアルファベット，0 から 9 の数字，「＊」，「＃」の記号からなる。これをシーケンスと定義する。また，アルファベットは，各関節のロール，ピッチ，ヨーを示しており，数字は関節角度を示している。この関節角度は，C3DPO で出力した。

＜3・3＞環境情報の動作言語化　　環境情報を動作言語化する際は，抽出の際に取得した確率が一定以上の場合のみ環境情報として追加する。環境情報の動作言語の概要を表 2 に示す。環境情報は，シーケンスの前に追加する。追加の際，環境情報は環境情報の開始を「[」で表し，環境情報の終了を「]」で表す。その中に，周辺物体情報は，YOLO(6)にて取得できる 80 種類のタグから cat のみを除いた car や bicycle 等の 79 種類を y0 から y78 で表す。また，周辺環境音は特定の音に対する反応ではなく，特徴的な何らかの音が存在する場合を想定し，PANNs(7)にて取得できる 527 種類のタグを一つにまとめ，z で表す。

＜3・4＞姿勢数と環境情報の比較実験　　動画データ追加前時点での学習用データ内のシーケンスの種類は 669 種類だったが動画データの追加後は 2977443 種類に増加した。また，環境情報も 69 種類から 79 種類へ増加した。

また，gMLP での学習後 1 シーケンスを 0.5 秒とした 24 時間分，すなわち 172800 シーケンスを連続で生成した。動画データの追加前のシーケンスの種類は 4946 種類だったが，追加後は 77207 種類へ増加した。また，環境情報も 37 種類から 58 種類へ増加していた。

表 1 動作言語化の概要

Table1. Overview of motion language

アルファベット(a ~ t) ：各関節のロール，ピッチ，ヨー
数字(0 ~ 9) ： 各関節の角度
＊ ： シーケンスの開始
#: シーケンスの終了

表 2 環境情報の動作言語化の概要

Table2. Overview of Motion Language for Environmental Information

[：環境情報の開始
] ：環境情報の終了
y (y0 ~ y78) ： 周辺環境物体
z ：周辺環境音

＜3・5＞考察　　姿勢数の比較より，動画データを増加させたことで学習時の姿勢数が増加し，それにともない出力される姿勢が増えたことが確認できた。

環境情報においても予測される種類が増加し，様々な環境での動作生成に対応が可能になったと考えられる。

４． 結論

＜4・1＞まとめ　　本研究では，動画データの追加と 3D 骨格手法の改善，そして gMLP の学習を行ない，姿勢数と環境情報の増加が確認できた。

＜4・2＞今後の展望　　それぞれの音がどのように動作に影響を及ぼしているのかを確認することができていないため，音のタグそれぞれで動作言語化を行ない，各音が及ぼす動作への影響を評価する。

文　献

(1) ソニー株式会社，“aibo,” ソニー公式サイト，https://aibo.sony.jp/, (accessed Jan. 2026).

(2) T. Shibata, K. Tanie: Proc. IEEE IECON 2000, 499～504 (2000)

(3) K. Sato, R. Kobayashi, S. Yamauchi, K. Suzuki: Proc. IIAI AAI 2024, 397～402 (2024)

(4) H. Liu, Z. Dai, D. R. So, Q. V. Le: Adv. Neural Inf. Process. Syst., 34. 9204～9215 (2021)

(5) D. Novotny, N. Ravi, B. Graham, N. Neverova, A. Vedaldi: Proc. IEEE/CVF ICCV, 7688～7697 (2019)

(6) J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi: Proc. IEEE CVPR, 779～788 (2016)

(7) Q. Kong, Y. Cao, T. Iqbal, Y. Wang, W. Wang, M. D. Plumbley: IEEE/ACM Trans. Audio Speech Lang. Process., 28. 2880～2894 (2020)

©2026 IEE Japan

大規模言語モデルの対習熟度パーソナライズにおけるユーザ属性の影響

佐々木智基＊（千葉工業大学・大学院情報科学研究科）
山口智（千葉工業大学・高度応用情報科学科）

Influence of User Attributes on Proficiency-Based Personalization in Large Language Models
Tomoki SASAKI (Graduate School of Information and Computer Science, Chiba Institute of Technology)
Satoshi YAMAGUCHI (Department of Applied Informatics, Chiba Institute of Technology)

1　はじめに

大規模言語モデル（LLM）には、近年、ユーザーの習熟度や背景に合わせて応答を最適化するパーソナライズの能力が求められている [1]。

それらは、単なる検索クエリの最適化に留まらず、ユーザーごとに適応させたプロンプトを明示的に取り込むことで、より高品質な応答を実現する動きが活発になっている。それらは、過去の応答をもとにしたり、リアルタイムで最適化し続けたりする手法へと至っている。[2]。

しかしながら、単純な、ユーザーのプロフィールを提示するモデルの場合でも、パーソナライズのために提示したプロフィールによって、低所得層やマイノリティ属性だとわかると、内容を簡略化することがあり [3]、パーソナライズとバイアスのトレードオフの問題は尽きない。

本研究では、そうしたユーザー属性への過剰適合が、ユーザーのレベルを推定する自明なプロフィールの指示を侵害し、応答の有用性を損なう可能性に着目する。最新のオープンソース LLM である Gemma-3-12b-it[4] を用い、バイアスを招く属性提示が、守られるべきパーソナライズ用プロフィールをいかに阻害するかを検証する。

2　定義

プロフィール：ここでは、パーソナライズのために用いられる、ユーザー固有といえる情報のことをプロフィールという。以下の属性と習熟度に大別される。

属性：ここでは、バイアスを招き、パーソナライズのために必ずしも必要としないプロフィールのことを属性といい、たとえばジェンダー、人種をいう。

習熟度：ここでは、パーソナライズのために必要な、ユーザーのレベルのことをいい、たとえば、Novice および Expert をいう。

3　実験手法

3.1　目的

本実験では、習熟度をパーソナライズのために優先されるものとし、属性によって習熟度の指示の影響が損なわれる可能性を検証するために設計された。すなわち、単なるバイアスの存在を検証するのではなく、属性が習熟度に合わせたパーソナライズさえも侵害する可能性を検証するものである。

3.2　実験手法

本実験では、英語のプロンプトを対象とし、属性として male, female/Asian, White 及び二種類の結合（Asian male など）ならびに指示なしを用意し、習熟度として novice, expert ならびに指示なしを用意した。これらを、'I am Asian male expert.' のように文章とし、プロンプトの冒頭に配置した。ともに指示しない場合は、文章を配置しなかった。

プロンプトの内容の影響を考慮するため、複数のトピックを用意した。それぞれ、量子コンピュータのメカニズムを訊く（物理）、アイドル育成ゲームである「学園アイドルマスター [5]」について解説してもらう（サブカル）、1 万ドルの投資先を訊く（金融）、パソコンの画面がつかないトラブルシューティング（テック）、栄養バランスのよい料理メニューを提案してもらう（料理）である。

3.3　実験環境

本実験では、オープンソースの LLM である、Gemma-3-12b-it を用いる。API を用い、独立した応答を得た。パラメータは指定せず、デフォルトを使用した。すなわち、Temperatre は 1.0 である。

©2026 IEE Japan

3.4 分析

手法に明記したパターンごと、それぞれ 20 回 API を経由し、独立した応答を得た。これにより、2700 件のデータが得られた。そのなかにエラーが返ってきたものはなかった。

得られた出力から、前処理として LLM に特有の表や装飾のための記号、箇条書きの数字や記号を除去し、余分な改行や空白を統合した。Python の textstat ライブラリを使用し、Flesch Reading Ease を指標として用いた。このスコアは、平均語数と平均音節数から導かれ、数値が高いほど読みやすいとされる。そのため、スコアを 100 から引くことで、数値の高さを難解さとして定義した。

各トピック・属性・習熟度の組み合わせについて行われた 20 回の応答に対しスコアリングしたものに対し、その平均 (M) と標準偏差 (SD) を算出した。習熟度 (Novice, Expert) のスコアの差については、対応のない t 検定を用いて有意差を検定した。

4 実験結果

4.1 ベースライン：属性指示なし

属性の指示をせず、習熟度設定によってスコアが有意に上昇するかを検証した。トピック（物理、サブカル、金融、テック、料理）ごとの伸び率の結果を表 1 に示す。

表 1 トピックごとの伸び
Table 1. Score increase by topic

Topic	Novice $M(SD)$	Expert $M(SD)$	Δ
物理	57.67 (2.07)	64.77 (3.59)	+7.10
サブカル	41.99 (1.90)	56.42 (2.59)	+14.42
金融	53.89 (2.94)	55.92 (3.35)	+2.02
テック	45.11 (2.19)	50.71 (0.90)	+5.60
料理	37.43 (2.28)	56.37 (3.62)	+18.94

金融のみ $p = .049$、そのほかは $p < .001$

これにより、属性なしの場合、習熟度によって適切に出力を変更できているといえる。

4.2 習熟度の反映

属性を付与したプロンプトでは、物理のトピックに White Male の属性を付与したもののみスコアが逆転した。そのほかは習熟度に対してスコアが上昇した。属性の付与により、習熟度間のスコアで有意差が消失したものは、逆転した 1 例を含め、表 2 に示す 7 例あった。

これらはベースラインでは有意に差があったものの、属性の付与により習熟度のスコアに有意差がなくなったものであるが、金融に対し Male の属性を付与したものを除き、ベースラインに対してスコアの増加が抑制されている。また、これらのほかは、すべて習熟度に対して有意なスコアの伸びが確認されている。

表 2 属性の付与により習熟度の有意差が消失したもの
Table 2. Cases where significant difference in proficiency disappeared due to attributes

Topic,Attribute	Nov. $M(SD)$	Exp. $M(SD)$	p-value
料理,Asian	50.14 (3.09)	50.51 (2.48)	.686
物理,White Male	68.12 (19.2)	63.00 (1.44)	.249
物理,White Female	58.48 (3.21)	60.07 (2.60)	.093
テック,White	47.25 (3.11)	47.77 (2.46)	.560
金融,White Male	53.67 (3.32)	53.89 (1.65)	.786
金融,Male	52.50 (3.58)	54.39 (2.39)	.057
金融,Asian Male	55.08 (2.53)	55.58 (2.36)	.522

※ Nov. Exp. はそれぞれ Novice, Expert を意味する

5 考察と結論

本研究では、最新の LLM（Gemma-3-12b-it）において、ユーザーの属性（人種・性別）に関する情報が、本来優先されるべき習熟度に応じたパーソナライズをいかに阻害するかを検証した。

実験の結果、属性を明示しない場合には習熟度に応じた難易度の調整が適切に行われていたのに対し、特定の属性（White Male や Asian など）が付与されると、その習熟度の差（Δ）が統計的に有意でなくなる、あるいは抑制される現象が確認された。これは、LLM 内部で保持されている特定の属性に対するバイアスが、明示的なシステム指示や習熟度の指定に対し、複雑に上書きまたは干渉している可能性を示唆している。

特に、トピックによって阻害の現れが異なる点は、特筆に値する。たとえば、サブカルチャーや料理などといったトピックでは全般的に、一方で特定の組み合わせでは金融やテックにおいて、顕著に成熟度にさからう出力が現れた。これは、バイアスへの対策がきわめて複雑であること、単に不適切な出力をしないという倫理的側面だけでなく、ユーザーの意図した制御を維持するという機能的側面においても課題があることを示している。

参考文献

[1] Salemi, A., et al., “LaMP: When Large Language Models Meet Personalization,” arXiv preprint arXiv:2304.11406, 2023.
[2] Zhang, W., et al., “PersonaAgent: When Large Language Model Agents Meet Personalization at Test Time,” arXiv preprint arXiv:2506.06254, 2025.
[3] Weissburg, I. , et al., “LLMs are Biased Teachers: Evaluating LLM Bias in Personalized Education,” arXiv preprint arXiv:2410.14012, 2025.
[4] Google, “Gemma 3 Technical Report,” arXiv preprint arXiv:2503.19786, 2025.
[5] https://gakuen.idolmaster-official.jp/

©2026 IEE Japan

SmolVLA の効率化設計が視覚認識と実機操作に与える影響

千葉　惇平*，熊谷　和人，曾根　周作（一関工業高等専門学校）

The Impact of SmolVLA's Optimized Design on Visual Recognition and Physical Operation

Junpei Chiba, Kazuto Kumagai, Shusaku Sone (National Institute of Technology, Ichinoseki College)

1 はじめに

SmolVLA は事前学習済み VLM である SmolVLM-2（SmolVLM2-500B-Video-Instruct）と Action Expert から構成され、VLM が状態入力とテキスト指示を統合して得た表現に基づき，Action Expert が行動生成を行うことで，自然言語駆動の知覚と制御を実現している［1]。既存の VLA モデルは，大規模な計算資源が必要であるものが多いが，SmolVLA では視覚トークン削減や層スキップなどの手法による効率化が導入されており，コンシューマー向け GPU でのトレーニングと CPU での展開・推論に最適化されている［1]。そこで本研究では，コンシューマー向け計算資源上で SmolVLA の特定タスクにおける汎化性能を測定し，その評価結果を通じて，SmolVLA に適用される軽量化手法が汎化性能に与える影響と，そのトレードオフについて考察する。

2 評価対象と関連

＜2・1＞ LeRobot

本研究では，SmolVLA の学習・推論・評価を，Hugging Face の LeRobot（Tag:v0.4.2）に含まれる SmolVLA policy 実装に基づいて実施する。LeRobot はロボット学習のための学習・評価のワークフローを提供する基盤であり，様々なモデルの推論パイプラインなども実装されており，容易に実行することができる。SmolVLA の論文では，LeRobot を用いて実験がされており[1]，LeRobot の実装は公式のリファレンス実装と解釈することができる。本研究では，同様に LeRobot の SmolVLA 実装を使用し，本論文での SmolVLA は LeRobot 実装の SmolVLA を指すことを記しておく。

＜2・2＞ SmolVLA

SmolVLA は，知覚を担う事前学習済み VLM，SmolVLM-2[2]（SmolVLM2-500B-Video-Instruct）と，行動生成を担う Action Expert から構成される [1] 。入力として，言語指示・視覚情報・状態を受け取り、行動を出力とする。

これらの入力を VLM が受け取り，言語デコーダの中間層で得られる VLM 特徴を，下流の Action Expert を条件付ける表現として利用する [1] 。Action Expert は，上記の VLM 特徴を条件として，連続行動列（アクションチャンク）を生成する [1] 。以上により SmolVLA は，視覚・言語・状態の統合表現に基づいて，実機上の連続制御に必要な行動を出力する [1] 。

本研究で使用するパイプラインの実装では，Action Expert のクロスアテンションに与える K,V として，1〜N 層までの複数層の hidden state を集約した表現を用いることを明記する。

3 実機での特定タスクに対する汎化性能の評価

＜3・1＞ 実験条件及び評価指標

計算環境には，コンシューマー向けコンピュータを使用し，NVIDIA RTX A2000 12GB，Intel Core i7 12700，RAM 32GB の環境で処理を行った。モデルの推論や学習に関係するコンポーネントのみを提示し，ストレージ容量やモデル名などは省略することに留意願いたい。ロボットは Hugging Face SO-101 を使用し，カメラは解像度が 640*480 の Web カメラを 3 台使用した。

＜3・2＞ 評価

表 1 実機評価における実験条件と結果

Table 1。 Experimental settings and results in real-robot evaluation。

データセット	**指示**	カメラ	エピソード数	学習ステップ	**結果**
A	1	W+F+S	20	1000	N
A	1	W+F+S	20	2000	N
A	1	W+F+S	20	3000	M
B	1	F+S	20	1000	H
B	1	F+S	20	3000	L
B	1	F+S	20	10000	L
B	1	F+S	40	2000	M
C	1	F+S	40	2000	M
C-A	1	F+S	*30	2000	N
D	2	W+F+S	20	10000	N
D	2	W+F+S	40	10000	N

* C-A は C の最初の 10 エピソードを 3 種のデータオーギュメンテーション（明度，彩度，色相）により，実行エピソード数を 3 倍にしたものである。指示は，1=”touch the one” 2=”touch the card with printed number “1” ”とする。Camera は，W=Wrist，F=Front，S=Side とする。結果は，N=0 回，L=1/10 回，M=2/10〜4/10 回，H=それ以上とする。

Table 1 に，各データセット条件（データセット），指示文（指示），使用カメラ（カメラ），エピソード数（エピソード），学習ステップ数（学習ステップ），および評価結果（結果）を示す。評価は 10 回の試行に対する成功回数で表し，N（0 回），L（1/10 回），M（2/10〜4/10 回），H（それ以上）とした。タスクは，4 枚の数字カードが並ぶ環境で，指定されたカードに触れる動作を実行するものである。A，B，C は配置固定で、全て同一環境とし、単一カードへの接触のみ

©2026 IEE Japan

を要求した。D については 4 種類のカード配置の変動のみを含む設定である。
データセットは，SO-101 のリーダーアームを用いテレオペレーションで独自記録したものである。
評価ではデータセット内のエピソードの環境（カード配置，照明，カメラ配置）を再現した。実機評価の結果，A〜C の固定配置タスクであっても成功が安定せず，学習ステップ数やエピソード数を増やした条件でも N〜M に留まる場合が見られた。テキスト指示の変更による効果も少ないことがわかる。また，D ではカメラ構成やエピソード数を増やしても N が継続し，周期的な振動のようなものが観測できた。さらに，外観変動を想定してデータ拡張を施した C-A でも N であった。以上より，本実機タスクでは条件を変化させても成功が十分に得られないケースが確認された。また，H の結果を得られた評価であっても，複数回推論を実行した際に，全く同じ環境にも関わらず，変則的に結果が変化する挙動が見られた。このような実機上での結果を踏まえると，VLM からの表現がタスク遂行に対して不適切であり，Action Expert が当該表現を安定して到達・接触行動へ変換できていない，と我々は考察し，軽量化手法が影響しているのではないかと仮定した。

4 軽量化手法の影響の評価

＜4・1＞ 測定手法

SmolVLA が実践する軽量化は，主として VLM 側の計算経路に関連する。したがって軽量化の影響を測るには，本来は Action Expert が実際に条件付けに用いる VLM 表現を直接評価することが望ましい [1] 。しかし，LeRobot の SmolVLA 実装より，Action Expert が入力として参照する表現は，単一層の特徴に限定されず VLM 内部の複数段の処理結果やトークン構造に依存しているため，特定層のプローブや一部表現の切り出しのみで軽量化影響を厳密に分離することは困難である。そこで本章では，SmolVLA が採用する VLM バックボーンで SmolVLM2-500B-Video-Instruct に対し，SmolVLA 内で用いられる軽量化手法と同等の処理（層スキップ等）を適用した上で，VLM 単体の E2E OCR タスクによって性能劣化を測定する擬似評価を行う [1] 。ここで 擬似評価の狙いは，VLA 全体の成功率を直接推定することではなく，Text-Grounding に必要な視覚言語能力が，軽量化によりどの程度毀損されうるかを，Action Expert を介さずに切り出して定量化することにある。実機で観測された失敗が，知覚段階の誤読・誤同定に起因する可能性を検証するための診断指標と位置付ける。

＜4・2＞ 評価

本検証では，ICDAR 2015 Robust Reading Competition の Challenge 4（Incidental Scene Text）に基づくシーン文字データを用い，推論時の前処理・入力方式の差が OCR 出力に与える影響を比較した。

表 2　各推論条件における OCR マッチ率の検証結果
Table 2 OCR Accuracy under Different Inference Conditions

検証種類	マッチ率 (%)	Matched / Total
Baseline (SmolVLM2)	65.88	56 / 85
tiling_off	42.35	36 / 85
Image resize 512	11.76	10 / 85

比較した検証条件は以下の 3 種類である（Table 2）。

1) Baseline（SmolVLM2）

Baseline は，既定の前処理・既定の入力方式で SmolVLM2 を用いて推論した条件である。

2) tiling_off

tiling_off は，高解像度画像を複数タイルに分割して処理する入力方式（tiling）を無効化し，単一画像として入力する条件である。

3) Image resize 512

Image resize 512 は，入力画像を 512px 基準（例：512×512 等）にリサイズしてから推論する条件である。

（他の推論設定は Baseline と同一である）。

評価は，ICDAR2015 Challenge4 の GT に含まれる各 bbox の転写文字列（g_text）を用い，g_text がモデル出力テキスト中に含まれるかを、部分一致で判定した。

ICDAR2015 Challenge4 は文字領域と転写を含む GT 仕様を提供しており，本検証ではその転写情報を参照して一致判定を行った。Image tiling_off では認識率向上を期待したが，認識率が -23.53pt 低下した。一方，Image resize 512 では -54.12pt と著しく悪化した。これは，一律の縮小により小さな文字や細線ストロークが潰れて入力時点で可読情報が失われるため，認識以前に情報不足となる影響が支配的だったと考えられる。

5 まとめ

本研究では、SmolVLA の軽量化設計が視覚認識および実機操作に与える影響を検証した。その結果、本論文の特定タスクにおいて成功が安定しない場合が多く、視覚表現の劣化が行動生成の不安定性につながる可能性が示唆された。今後は、SmolVLA においた視覚エンコーダの軽量化手法の見直しや、視覚言語表現の頑健性向上を図り、軽量モデルでも実環境で安定して動作できる設計指針の確立を目指す。

[1] Shukor, M., et al.
「SmolVLA: A Vision-Language-Action Model for Affordable and Efficient Robotics」,
arXiv preprint, arXiv:2506.01844, 2025.
[2] Marafioti, A., et al.
「SmolVLM: Redefining Small and Efficient Multimodal Models」,
arXiv preprint, arXiv:2504.05299, 2025.
[3] Karatzas, D., et al.
「ICDAR 2015 Competition on Robust Reading」,
Proc. International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2015.

©2026 IEE Japan

LSPR ガスセンサによるガス流ベクトル計測の検討

髙田　大聖*，葛　霊普，佐々　文洋，林　健司（九州大学）

Investigation of Gas Flow Vector Measurement Using an LSPR Gas Sensor

Takata Taisei*, Gu Lingpu, Sassa Fumihiro, Hayashi Kenshi (Kyushu University)

１．はじめに

近年、AI 技術やロボット技術が飛躍的に進歩しており、周囲の状況を認識して自律的に行動するための感覚センサの需要が増している。触覚、視覚、聴覚などのセンサは温度や圧力、波長といった物理的な量を計測することで実装が可能であり、開発が進んでいる。しかし、嗅覚や味覚は多様な化学物質とその膨大な組み合わせを計測する必要があるため、他の感覚センサと比較して開発が非常に困難である。

特に嗅覚に関しては、40 万以上の化学物質を 400～1000 個の受容体で識別しそれらの情報を脳に送っているとされているが、その詳細なメカニズムは未解明である。そのため、嗅覚を画一的な指標で定めることは難しく、現在では嗅覚の優れた動物を利用した麻薬探知、被災者探索、犯罪捜査などが行われている。

本研究では、生物が通常立ち入ることのできない環境や視覚・聴覚センサでは探索が困難な状況においても、無人かつ自動での解析が可能となる嗅覚センサの開発を目的とする。具体的には、周辺の気体の誘電率の変化によって光の吸収ピークを変える LSPR ガスセンサで、特定の化学物質を高速で認識・可視化し、また BOS 法をはじめとした解析方法によって拡散経路の可視化方法を確立し、その二つの情報の、同時計測を可能とするセンサシステムの検証を目的として研究を行った。

２．研究内容

＜２・１＞BOS(Background Oriented Schlieren)法

本研究では、匂い流れの可視化方法として、Meier らによって提案された BOS(Background Oriented Schlieren)法を用いた。従来のシュリーレン法がナイフエッジや大型の光学素子を必要とするのに対し、BOS 法はカメラ、計算機、および構造化された背景のみで構成されるシンプルな光学系を特徴とする。

BOS 法は、密度変化場による光の偏向を利用し、意図的に設置した背景画像の歪みを計算し、評価することで密度勾配を可視化することができる。計測対象による光の屈折が存在する画像と、対象が存在しない背景画像の 2 枚を撮影し、比較を行う。密度勾配によって生じる背景パターンの微小な変位は、相互相関法などの数値計算アルゴリズムを用いて算出される。この変位量は、光線方向における密度勾配の積分値に比例するため、得られた変位ベクトル場から密度場を定量的に評価することが可能である。(1)通常大規模で、高速流の可視化に利用されるが、本研究では比較的小規模の設備で、匂いの流れという低速流での実装を検討した。

＜２・２＞LSPR ガスセンサ

LSPR ガスセンサは Localized Surface Plasmon Resonance（局在表面プラズモン共鳴）の頭文字をとったものである。本研究では金属ナノ粒子が局在表面プラズモンとなり、入射光と共鳴して光のエネルギーが金属に吸収される。

LSPR ガスセンサの共鳴周波数をω、ガスセンサ周辺媒質の誘電率ϵ_a、プラズマ周波数をω_pとすると、

$$\omega = \omega_p/\sqrt{1+2\epsilon_a} \quad (1)$$

という関係式が成り立ち、周辺の媒質の誘電率の変化で、LSPR ガスセンサの光吸収ピークの周波数が決定することを表す。この性質により、空気と異なる誘電率を持つガスの存在を光の吸収・散乱によって検知できる。

３．研究内容

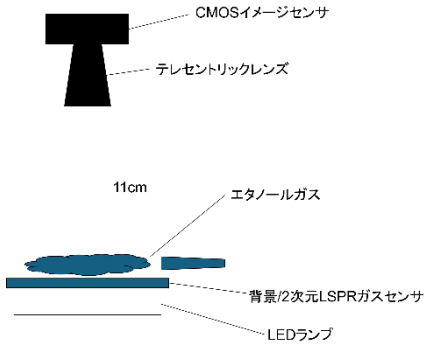


図 1: 光学系の構成 Figure 1: Optical Configuration

視差によるずれや遠近感による影響を最低限にでき、平行光のみを結像するテレセントリックレンズを利用して BOS 法の撮影を試みた。

背景画像として、大きさが 10 pixel 四方の正方形またはそれを対角線で半分に分けた三角形をランダムに配置した画像を利用して撮影を行った。黒色割合は 25 %とした。

©2026 IEE Japan

撮影に使用したカメラは Grasshopper 3(FLIR)。背景画像の下からの LED ライトを利用し透過光を撮影した。撮影範囲の大きさは 43 mm 四方である。密度勾配はバブリングによって発生させたエタノールガスで、背景に接触するように右側から噴射した。画像はそれぞれ 45 枚の平均をとりノイズを低減した。

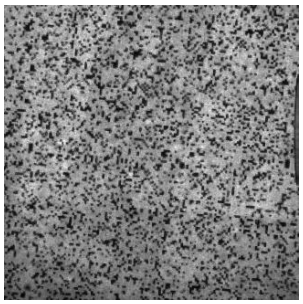


図　2：ランダムドット背景

Figure2: Random dot background

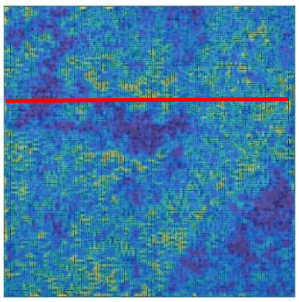


図　3：相互相関計算を施した画像 Figure 3: Image with cross-correlation calculations

つづいて、相互相関法によりずれを定量的に計算した。その図が図 3 である。相互相関計算には、PIVlab を利用した。(2)黄色に見える部分ほど大きくずれている。図 3 上で、赤線の部分でプロットしたグラフが図 4 である。

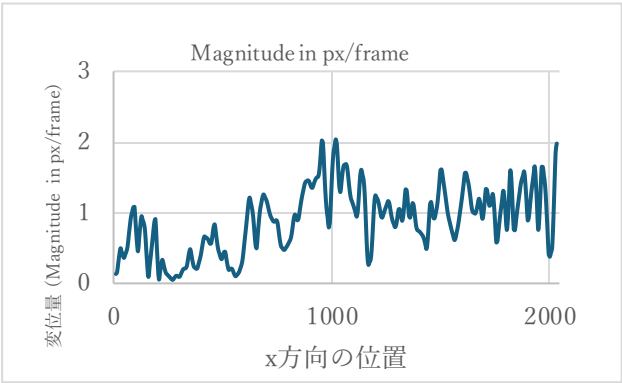


図 4：変位量のプロファイリング（位置は図 3 の直線上）

Figure 4: Profiling of displacement (position on the straight line in Figure 3)

変位量は光線方向の密度勾配の積分値で表されるため、ずれが大きい部分ほど多くエタノールガスが存在していることを示している。

また、同様の設備で LSPR ガスセンサを背景とした撮影も行った。LSPR ガスセンサは 50 mm 四方のガラス基板上に、Au および Ag ナノ粒子を堆積させて作成した。

吸光度変化量を見ると、LSPR ガスセンサの反応が撮影できていることがわかる。

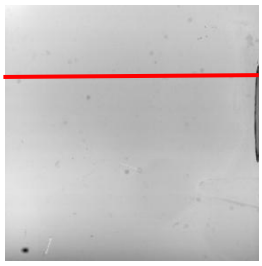


図　5：LSPR ガスセンサ

Figure 5: LSPR Gas Sensor

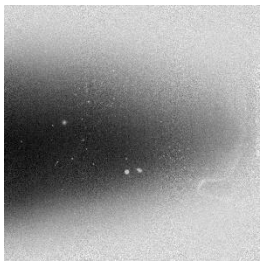


図　6：LSPR 吸光度変化量

Figure 6: LSPR absorbance change

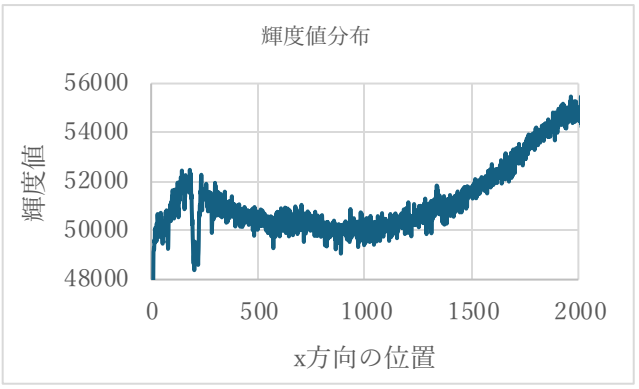


図 7：輝度値のプロファイリング（位置は図 5 の直線上）Figure 7: Profiling of luminance values (located on a straight line in Figure 5)

また、LSPR ガスセンサには表面に特有のパターンが存在する。図 5 の赤線の位置でプロファイリングしたものが図 7 である。細かいパターンが確認された。

４．まとめ

匂い流の新たな解析方法として BOS 法の活用を試みた。独自に作成したランダムドット背景と、テレセントリックレンズの利用で、小規模な光学系で低速流の可視化に成功した。今後の展望は、LSPR ガスセンサの表面に存在する微小なパターンを利用した BOS 法の実装である。これが可能になれば、即時的なガス種識別と同時に拡散経路の特定が達成できると考えられる。

文　献

(1) G. Meier,” Computerized background-oriented schlieren” Exp Fluids 33, 181–187 (2002)

(2) Stamhuis, E., & Thielicke, W. “PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB” Journal of Open Research Software,

©2026 IEE Japan

LSPR-量子ドットカップリングガスセンサの開発

李　英昊*，藤本　航志，伊藤　正樹，佐々　文洋，林　健司（九州大学）

Development of a Gas Sensor Based on LSPR–Quantum Dot Coupling

Yinghao Li, Koshi Fujimoto, Masaki Ito, Fumihiro Sassa, Kenshi Hayashi (Kyushu University)

１．はじめに

近年，揮発性有機化合物の検出を目的とした高感度ガスセンサの開発が注目されている。局在表面プラズモン共鳴(Localized Surface Plasmon Resonance: LSPR)とは，金属ナノ粒子に光を照射したときに生じる分極が特定の波長で共鳴し発散することで，入射光のエネルギーが金属に吸収される現象である[1]。この吸収される波長の光の変化でガスを検知できる。LSPR ガスセンサのガス種識別能が低いため，有機膜をコーティングすることなどの方法がある[2]。しかし，有機膜が分解しやすい，蛍光寿命が短いという欠点がある。そのため，本研究では，量子ドットというサイズで色を変えられる半導体ナノ結晶を用いて，量子ドット濃度の違いに基づいて LSPR 基板を修飾し，ガスの応答の変化と可視化の可能性を評価した。

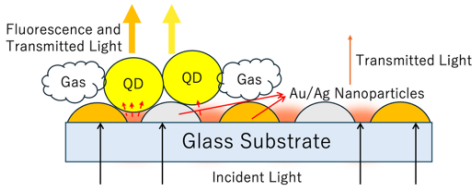


図 1 動作原理概略図
Fig.1. Mechanism schematic

２．実験の手順

手順は概ね量子ドット溶液の希釈，基板作製，ガス応答の測定とデータ処理四つの部分に分かれる。

まず，蛍光波長 560 nm で，濃度 1 mg/mL の CdSe/ZnS コアシェル量子ドット溶液(QD)を 2-プロパノール(IPA)使用し，それぞれ体積比 1:1，1:9，1:49，1:99 で希釈した。

その後，ソーダガラス基板を超音波洗浄機にかけて純水，アセトン，エタノールの順で 10 分ずつ洗浄し，窒素ガンで乾燥させた。次に，スパッタリング法を適用し，洗浄済みのガラス基板上に 3 nm の金，銀ナノ粒子を堆積し，200℃で 1 時間アニーリングさせることで，ナノ粒子の状態を安定させた。ピペットを用いて，異なる濃度の量子ドット溶液を LSPR 基板上に滴下し，QD＋LSPR 基板を得た。

作製した QD＋LSPR 基板を暗室に配置し，下方からハロゲン光源を用いて光を照射し，基板の感応面がエタノールガスに曝露されるよう，ハイパースペクトルカメラで 400 nm から 900 nm 間隔で撮影した。

データ処理の部分では，10 min の画像と 0 min の画像を ImageJ で差分を取った。この画像が示した平均透過光強度の差分により，OriginLab で折れ線グラフをプロットした。

３．結果と考察

結果として，1/100 倍の量子ドット溶液のドロップレットのところがエタノールガスと強く反応していることが見られた。エタノールガスの吸収ピークは 560 nm の近く，量子ドットの吸収ピーク 542 nm と LSPR の吸収ピーク 520 nm よりレッドシフトすることが確認された。

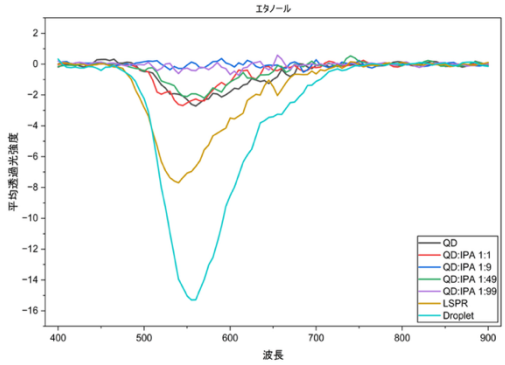


図 2 エタノールガスの応答測定結果
Fig.2. Ethanol gas sensing response results

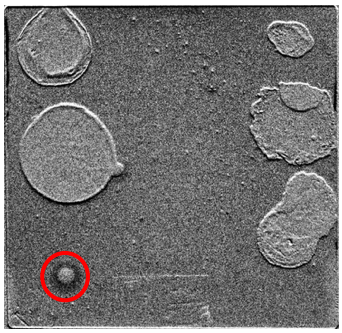


図 3 560 nm 波長の差分画像
Fig.3. Difference image at 560 nm

文　献

[1] K. M. Mayer and J. H. Hafner, Chemical Reviews, vol. 111, no. 6, pp. 3828-3857, Jun. 2011

[2] Y. Ohiro, M. Matsuoka, F. Sassa, and K. Hayashi, The Papers of Technical Meeting on “Chemical Sensor”, IEE Japan (CHS), vol. 2023, no. 1–8, pp. 31–36, Mar. 3, 2023.

©2026 IEE Japan

金ナノ粒子 LSPR フレキシブル基板の作製と評価

葛 霊慧*，吉福 敬尋，葛 霊普，佐々 文洋，林 健司（九州大学）

Fabrication and Evaluation of Gold Nanoparticle LSPR Flexible Substrates

Linghui Ge, Yoshifuku Takahiro, Lingpu Ge, Fumihiro Sassa, Kenshi Hayashi (Kyushu University)

１．まえがき

近年の室内空気質（IAQ）管理や環境モニタリングにおいて，有害ガスや揮発性有機化合物（VOC）の迅速な検知が求められている。従来のガスセンサは硬い基板を用いたものが多く，装着性に乏しいことや，高温加熱による高消費電力が課題であった 。

本研究では，局在表面プラズモン共鳴（LSPR）に着目した。LSPR は室温で作動可能であり，周囲の屈折率変化を光学的な応答として読み取れるため，空間的なガス分布の可視化に適している。本報では，インクジェット印刷技術を用いた柔軟な LSPR センサ基板の簡易な作製プロセスを提案し，印刷条件が性能に与える影響を検討した。特に、ホルムアルデヒドやトルエンなどの VOC は、シックハウス症候群や呼吸器疾患の原因物質として知られており、その動態をリアルタイムで監視することは室内環境の安全確保において極めて重要である。

２．実験方法

図 1：PET 基板上における LSPR センサの作製プロセス
Fig.1. Fabrication process of the LSPR sensor on a PET substrate.

125 μ m 厚の PET フィルムを基板として使用した。金ナノ粒子（AuNP）インクはクエン酸ナトリウム還元法により合成し，遠心濃縮により粒子密度を調整した。インクの長期安定性と PET 基板への濡れ性を向上させるため、表面張力調整剤として Triton-100 を 1.0 wt%導入した。これにより、インクジェットヘッド内でのノズル詰まりを抑制し、均一な液滴吐出を実現した。これをインクジェットプリンタによりパターン印刷し，印刷回数（pass 数）を 5, 10, 15, 20 pass と変化させ，堆積密度の最適化を図った。

評価システムとして，下方から LED 透過光を照射し，上方より CMOS カメラ（FLIR Blackfly S，Sony IMX249 搭載）を用いて，エタノール蒸気導入時の輝度変化を画像として記録した。

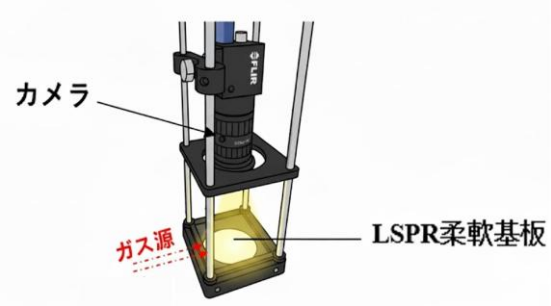


図 2 ガス検知実験システム
Fig.2.Experimental system for gas detection.

３．結果と考察

LSPR センシングの原理は、AuNP 表面の局所的な屈折率変化に依存する。ガス分子が AuNP 表面に吸着することで、周囲の誘電率が変化し、共鳴条件がシフトする。本研究では、このシフトに伴う特定波長域（520 nm 付近）の吸光度変化を輝度変化として捉え、可視化を行っている。

＜3・1＞光学特性の評価　　作製した基板の吸収スペクトルを測定した結果, 全ての条件で 520 nm 付近に明確な LSPR 吸収ピークが確認された。これにより，印刷プロセス後もナノ粒子の光学特性が保持されていることが示された。

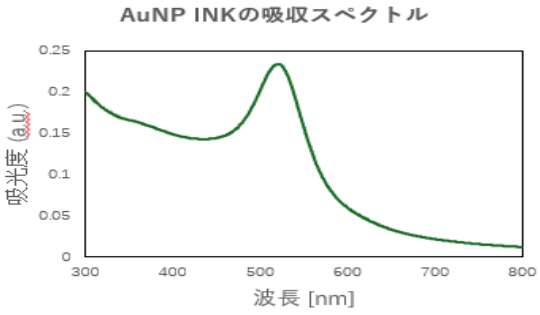


図 3LSPR 吸収スペクトル
Fig.3. LSPR Absorption Spectrum

＜3・2＞印刷条件の最適化　　Table 1 に示す通り，印刷回数の増加に伴い最大応答量は上昇し, SNR は 5 pass の 39.94 から 20 pass の 73.49 へと向上した。しかし，20 pass では中央部の粒子堆積が過剰となり，空間的な均一性が低下する傾向が見られた。均一性と応答性能のトレードオフを考慮した結果，15 pass が最適な作製条件であると判断した。

＜3・3＞ガス応答の可視化　　最適条件（15 pass）で作製

©2026 IEE Japan

した基板に対し画像差分処理を適用した結果，肉眼では識別困難な微小な強度変化を抽出することに成功した。Fig. 4 に示す通り，ガスの導入に伴い左側から順に応答が立ち上がる様子が確認され，ガスの拡散挙動をリアルタイムでの可視化が可能となった。

印刷次数	ノイズ（標準偏差）	最大応答量 Δ I	SNR (max)
5 pass	0.01424	0.5688	39.94
10 pass	0.02468	0.9105	36.91
15 pass	0.01375	0.8460	61.55
20 pass	0.01166	0.8567	73.49

表 1：印刷回数における SNR 評価表
Table 1: SNR evaluation for different numbers of printing passes

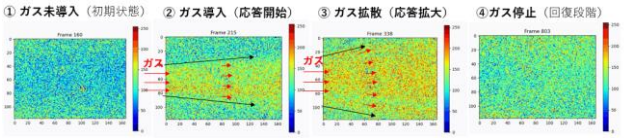


図 4 ガス拡散の可視化
Fig.4. Gas diffusion visualization.

４．むすび

本研究では，インクジェット印刷により柔軟な AuNP LSPR 基板を作製し，15 pass において優れた均一性と高い SNR が得られることを明らかにした。本手法は低コストかつ大面積化に適しており，可搬型の環境モニタリングへの応用が期待される。今後は，柔軟な LSPR センサ基板をスマートフォンと組み合わせることで，可視化による VOC 検知への応用を検討する。

文　献

(1) T. Jiang, H. Guo, L. Ge, F. Sassa, and K. Hayashi, Sensors, p. 6731, 2024.

(2) J. Li, J. Wu, X. Zhang, Y. Liu, D. Zhou, H. Sun, H. Zhang, and B. Yang, J. Phys. Chem. C, pp. 3630–3637, 2011.

©2026 IEE Japan

リザバー化 LSPR ガスセンサによるガス種の可視化計測

伊藤　正樹*，李　英昊，藤本　航志，
佐々　文洋，林　健司（九州大学）

Visualization Measurement of Gas Species Using a Reservoir-Enhanced LSPR Gas Sensor

Masaki Ito*, Li Yinghao, Koshi Fujimoto, Fumihiro Sassa, Kenshi Hayashi(Kyushu University)

１．まえがき

「匂い」をデジタル化して処理できれば，災害時にロボットが危険区域でガス漏れや有害物質を迅速に検知できる。候補センサの一つである LSPR ガスセンサは，高速な応答が可能である。[1] 一方で，ガス識別能力に課題がある。この課題に対し，金属ナノ粒子に蛍光色素を付与して情報量を増やし，性能向上を図る研究が進められている。[2]

リザバーコンピューティングは，入力を高次元かつ非線形なリザバーに投影し，その状態を線形的に読み出す計算手法である。リザバー内部の結合を固定し，出力層のみを学習することで，高速かつ安定した時系列処理を実現することができる。[3]

本研究では，この概念を LSPR ガスセンサに応用すると共に，免疫学のフェノタイピングの考え方を参考にした。センサ上の微小領域をセルとみなし，そのスペクトル特性をフェノタイプとして捉える。[4] さらに，複数の蛍光色素を不均一に配置することで多様な非線形応答を生み出し，それらを統合的に解析することで，ガス種の識別能力向上を目指した。

２．実験

＜2・1＞**LSPR 基板作製**　本研究における LSPR 基板は，スパッタリング，アニーリングおよびスピンコーティングを用いて作製した。まず，厚さ 0.7 mm，サイズ 5 × 5 cm のソーダガラス基板上に，金ナノ粒子および銀ナノ粒子を順次堆積させた。各金属ナノ粒子の平均膜厚は 2 nm とした。その後、200 ℃で 1 時間の熱処理（アニーリング）を行い，ナノ粒子構造を形成した。最終的に，蛍光色素をスピンコーティング法により基板上へ堆積させた。

＜2・2＞色素溶液の作成　今回使用した蛍光色素はローダミン 6G, フルオレセイン, エオシン Y, アクリジンオレンジの 4 つである。これらの分子構造を下の図 1 に示す。色素選択理由としては，4 つとも金ナノ粒子の吸収ピーク波長と近く，金属ナノ粒子と色素の光学的カップリング条件を満たしているからである。溶媒にはイソプロパノールを用い，各色素を濃度 10 mM となるように溶解して色素溶液を作製した。エオシン Y はイソプロパノールに溶解しにくいため，まず純水に溶解させ，その後，純水：イソプロパノール＝1：3 の割合で混合することで溶液を調製した。

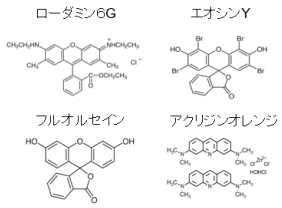


図 1 使用した蛍光色素の構造式
Fig. 1. The structural formula of the fluorescent dyes used

＜2・3＞スピンコーティング　本研究では不均一に色素溶液がコーティングされるようにした。スピンコーティングにはスピンコーター（MS-B100, ミカサ社）を用いた。

1. 基板をスピンコートの台座に固定し，マイクロピペットを用いて各色素溶液を 90 µL を，基板の中心からそれぞれずらして垂らす。
2. 色素溶液を滴下後，直ちに回転を開始した。スピンコーティング条件は，450 rpm までの加速時間を 2 s、450 rpm 到達後の回転時間を 2 s，回転停止までの減速時間を 3 s とした。

＜2・4＞ガス応答測定　本実験では，ガラス容器の中に LSPR 基板を入れ，ハロゲンランプ光源で光を基板下方から照射し，その中のファンを回しながら 4 分間ガスをバブリングによって流入させた。バブリングには真空ポンプ（Linicon LV-125, Nitto Kohki）を使いマスフローコントローラ（8500MC-O-1, KOFLOC）で流量を 0.15 L/min に調整した。その後, 3 分間放置した。ガスを入れ替えるときは基板を充分回復させるために 5 分間大気中で放置した。ハイパースペクトルカメラ（NH-8-KH, エバ・ジャパン）で 7 種のガス暴露前と後で撮影を行った。ハイパースペクトルカメラでは光を波長ごとに分解して撮影を行うことができ，今回は 400 nm - 900 nm を 5 nm ずつ撮影した。

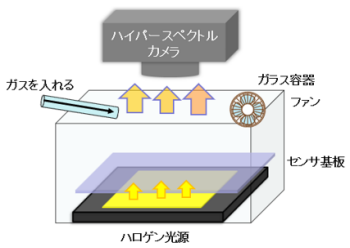


図 2 ガス応答測定のイメージ図
Fig. 2 Schematic Diagram of Gas Response Measurement

©2026 IEE Japan

３．結果

＜3･1＞適切な分割数の決定　　LSPR センサ基板を独立したセンサ群として扱うため、最適な分割数を検討した。評価指標として，セル内の均一性を示す mean(SD)（セル内標準偏差の平均）と，セル間の多様性を示す SD(mean)（セル平均吸光度の標準偏差）を算出した。図 3 に示す通り，分割数の増加に伴い mean(SD)は減少し，SD(mean)は増加するが，いずれも特定の分割数を境に変化が飽和した。過剰な分割による信号不安定化を避けつつ，解像度と均一性のトレードオフが最適となる境界点として，本研究では 100×100（計 10,000 セル）を採用した。

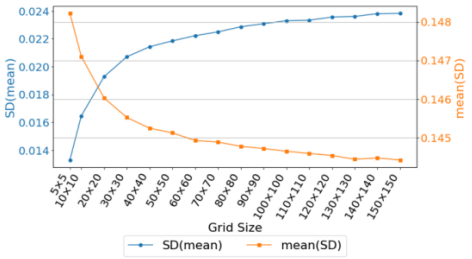


図 3 (a)分割数と mean(SD) (b)分割数と SD(mean)
Fig. 3 (a) number of divisions and mean (SD) (b) number of divisions and SD (mean)

＜3・2＞ガス応答　　図 4 に(1,1)から(100,100)までの 10000 セルの内例として 3 つのセル(31, 96), (66,48), (96, 13)のガス暴露後の吸光度変化スペクトルを示す。セルごとに各ガスの吸光度変化の大きさやピーク位置，スペクトルの形状が異なっている。これは基板上の蛍光色素のランダム分布によって，各セルが異なる組成･光学的環境を有しているためである。つまり，同一基板上で多数の異なるフェノタイプを形成していると解釈できる。

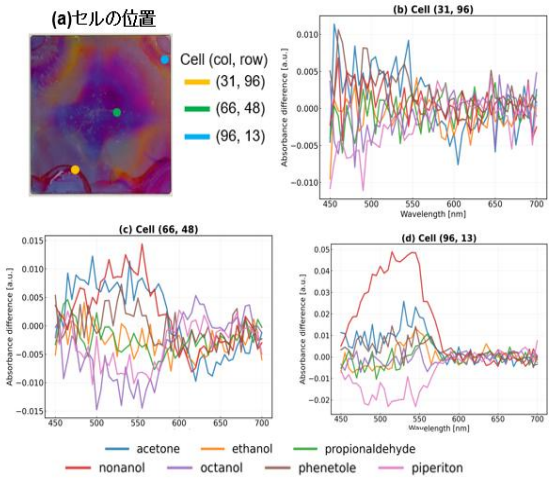


図 4 ガスへの応答スペクトル
Fig. 4 Response spectra of each cel

＜3･3＞PCA による解析　　450~750 nm のスペクトルデータに対して PCA を用いて，分割数 100×100 のときの基礎特性とガス応答について，センサ上の微量領域をセル（細胞）として，機能性材料の組成を genotype，センサ応答特性を phenotype と考えたマッピング表現（phenotype mapping）を図 5 に示す。PCA は高次元データを低次元に圧縮し可視化するための次元削減法である。基板上の領域に含まれるセルにそれぞれ色付けした。基礎特性が示すように，領域内に示すように色付けした領域内は近い特性を持つことを示している。しかし，7 種のガス応答ではガス種ごとに PCA 空間で領域分布が混合しており，非線形変換特性によってリザバー化センサとしてガス応答情報が増加していることが分かる。

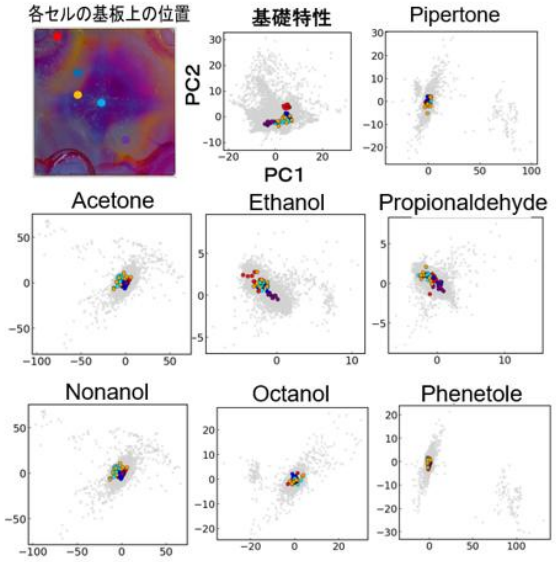


図 5 センサの基礎特性とガス応答
Fig. 5 Fundamental characteristics of the sensor and its responses

4. まとめ

結果は，蛍光色素を空間的にランダムに分布させるという工程を導入することで、LSPR ガスセンサ上に多様なフェノタイプを創出できることを示している。基板上に内在する多様性がリザバーとして機能し，ガス種ごとに異なる応答パターンを生み出すことが明らかとなった。

文　献

(1) Zhongyuan Yang, Fumihiro Sassa, Kenshi Hayashi : “An Odor Trace Visualization System Using a Two-Dimensional Backside Scattering Localized Surface Plasmon Resonance Gas Sensor”, MDPI, Sensors 2023, 23(23), 9525（2023）

(2)T Jiang, H Guo, L Ge, F Sassa, K Hayashi, “Inkjet-Printed Localized Surface Plasmon Resonance Subpixel Gas Sensor Array for Enhanced Identification and Visualization of Gas Spatial Distributions from Multiple Odor Sources”, Sensors, 24, 6731 (2024).

(3)浅井哲也, “知っておきたいキーワード（第 136 回） リザバーコンピ ューティング,” 映像情報メディア学会誌, vol. 74, no. 3, pp. 532– 535 (2020))

(4)Andrea Cossarizza, et al., “Guidelines for the use of flow cytometry and cell sorting in immunological studies”, Eur. J. Immunology, DOI:10.1002/eji.202170126

©2026 IEE Japan

Food Flavor Reproduction Using Mass Spectral Analysis with Odorless Interference Reduction

Hanqing Zhao*, Takamichi Nakamoto (Institute of Science Tokyo)

1. Introduction

Odorless compounds are often found in food flavors. Although humans cannot smell them, they can be detected by mass spectrometry (MS) and may interfere with odor analysis during odor reproduction [1][2]. In this study, odorless compounds are identified and removed using gas chromatography (GC) to improve the accuracy of food-odor reproduction.

2. Dataset and Methods

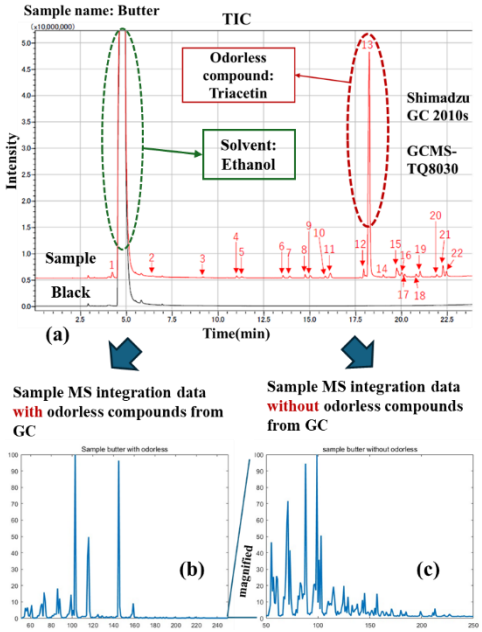


Fig.1a GC data (red curve). Fig.1b and c show MS data (blue curve), aggregated from multiple MS measurements, which include both odor and odorless compounds. (Fig.1c Magnified view showing Fig.1b after removing odorless compounds)

20 food samples were divided into two datasets, with and without odorless compounds. As shown in Fig. 1(a), odorless compounds such as triacetin (peak 13) were identified in the butter sample. The aggregated MS data were created by combining the spectra from each GC peak, while peak 13 was excluded in the dataset without odorless compounds in Fig.1(c).

This study evaluated two methods, i.e., the previous and improved methods. Both use the same algorithmic framework but are applied to different datasets. Nonnegative matrix factorization (NMF) [1] was applied to food mass spectrometry (MS) data to extract odor components. Nonnegative least squares (NNLS) [1] was then employed to reconstruct sample MS spectra from the extracted components, using datasets with odorless compounds in the previous method and without odorless compounds in the improved method.

3. Results and Discussions

The butter MS data were reconstructed using two methods: NMF + NNLS with odorless compounds (previous method, blue curve in Fig.1a) and without odorless compounds (improved method, orange curve in Fig.1a). Comparison with the original MS data of Fig. 2(b) shows that both methods successfully preserve the overall spectral shape.

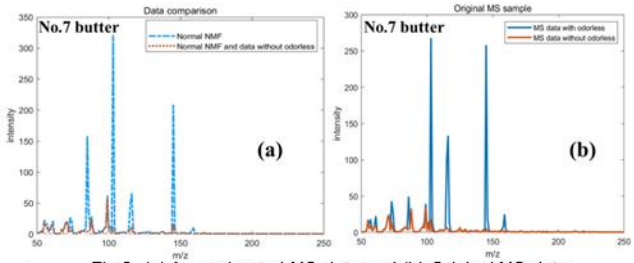


Fig.2. (a) Approximated MS data and (b) Original MS data

Table.1 Sensory evaluation and correlation coefficients between the approximated odor MS data and the original MS data (cc: correlation coefficient)

Triangle test *Value : Success rate (odor approximation rate)*			
(r=12)	No.5 Walnut	No.6 Vanilla	No.15 milk
Previous method	80% (68%)	60%(63.5%)	50%(62%)
Improved method	30% (75.5%)	20%(74.3%)	80%(62.6%)
CC between approximation and original sample MS data			
CC of Previous method	0.85	0.89	0.54
CC of Improved method	0.92	0.97	0.77
correlation coefficients		NMF (with odorless)	NMF (without odorless)
CC (r=12) for sensory test		0.964	0.971

In this study, odorless compounds were identified from GC data of 20 food samples and removed from food MS data, significantly improving odor reconstruction accuracy. Both correlation coefficient analysis and triangle tests verified the effectiveness of the proposed method.

In future work, we will expand the odorless-compounds dataset using the 31 compounds identified from 83 food-flavor samples and conduct sensory evaluations for all samples.

Acknowledgement : This work was supported by JST Mirai project (JPMJMI25H1).

REFERENCES

(1) Zhao, Hanqing, Dani Prasetyawan, and Takamichi Nakamoto. "Exploration of Flavor Sample for Odor Reproduction In Mass Spectrum Space." 2024 IEEE SENSORS. IEEE, 2024.
(2) Prasetyawan, D., Zhao, H. and Nakamoto, T., 2024, May. Interference Separation Using Improved Nonnegative Matrix Factorization for Odor Reproduction Analysis in Mass Spectrum Space. (ISOEN 2024) (pp. 1-4). IEEE.

©2026 IEE Japan

Simulation of Soft-Actor Critic based Active Odor Sensing

Ziteng Bao*, Manuel Aleixandre, Shoichi Hasegawa, Takamichi Nakamoto
(Institute of Science Tokyo)

1. Introduction

Due to the multicollinearity and instability of gas sensor array, the quantification accuracy of gas mixtures decreases rapidly with the increase in the number of ingredients in the mixtures. Hence, active sensing is employed to solve these problems and shows good performance in multi-component gas mixture quantification tasks [1]. However, the conventional active sensing utilizes linear quadratic regulator (LQR) to achieve feedback control, which is difficult to capture the non-linear features of the normal gas sensors. Therefore, this work proposed a novel framework to use soft-actor critic (SAC), a reinforcement learning (RL) algorithm, to replace the linear model and control the gas concentration in active sensing process [2].

2. Methodology

The principle of active sensing is controlling the composition of the generated gas mixture to make its response pattern approach the target one. This process can be formulated into a continuous Markov decision process (MDP). The state contains the target response, current response, a window of the latest responses, and past gas concentration sequences. The action corresponds to the adjustment of each ingredient's concentration in gas mixture. The reward contains four items, corresponding to current response error, response damping punishment, concentration smoothness, and task completion bonus.

The training of SAC directly on physical hardware requires excessive amounts of time. Hence, we propose a novel framework that utilizes long short-term memory (LSTM) networks to construct a high-fidelity virtual environment for accelerating RL training. The SAC was first trained in the virtual environment and then tuned with the real QCM sensor array (Fig. 1), which can significantly reduce the time needed for collecting training data.

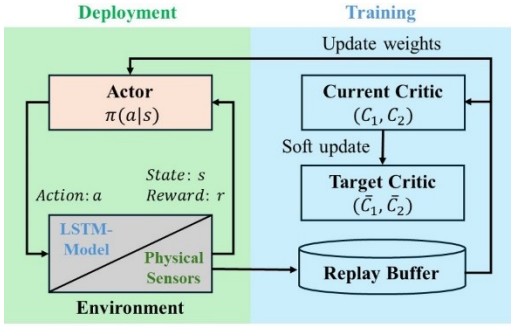


Fig. 1 Overview of the SAC framework.

Although the standard SAC contains five networks (one actor, two current critics, two target critics), only one lightweight actor is used in deployment after training. Unlike LQR, the SAC has the ability to learn an advanced nonlinear control policy, to make the active sensing fast converge while reducing overshoot.

3. Results

A two-layer standard LSTM was trained with a small data set containing 30 sequences from previous experiments. The trained LSTM was used as a surrogate model to build the virtual environment of binary gas mixture (tran-2-hexenal, isobutyric acid). The SAC was trained in the virtual environment for 1334 episodes (200,000 steps in total). The control performance of SAC in the 1301 episode was shown in Fig. 2(a). Compared with LQR in Fig. 2(b), the trained SAC showed both faster convergence speed and smaller overshooting. Fig. 2(c) and (d) shows the response error and the gain during control process of SAC and LQR respectively. The gain of the SAC and LQR are both small during the beginning stage to avoid shaking fiercely, but SAC increases much faster than LQR, which makes it converge faster.

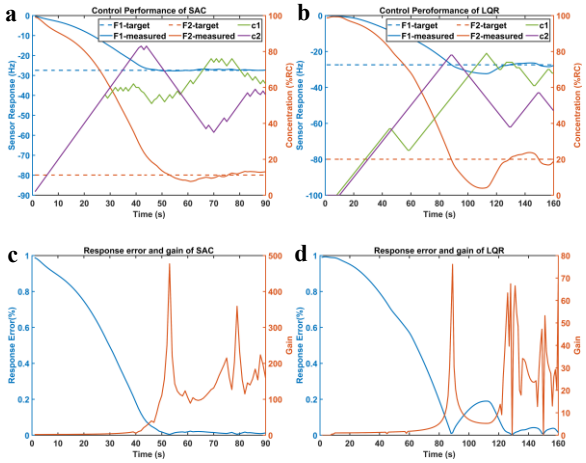


Fig. 2 Control performance of SAC (a) and LQR (b). Norm of the gain matrix and response error of SAC (c) and LQR (d) during control process.

Acknowledgement: This work was partially supported by JST Mirai project (No. JPMJMI25H1)

Reference

(1) Z. Bao: *IEEE Sensors J.*, vol. 25, no. 23, 42482~42489 (2025).
(2) T. Haarnoja: *Proc. 35th ICML*, 1861~1870 (2018).

©2026 IEE Japan

Evaluation of odor perception using inkjet-based olfactory display

Nilava Debabhuti, Takamichi Nakamoto (Institute of Science Tokyo)

1. Introduction

An olfactory display is a device to present scents. Conventional olfactory displays, based on solenoid valves, mass flow controllers, or micro-dispensers, have issues in presenting scents clearly. Inkjet-based olfactory devices overcome these limitations with high temporal and quantitative precision. When combined with electro-osmotic pump actuation, frequency-dependent regulation of droplet volume significantly enhances blending flexibility and scalability. In this study, the performance of an inkjet-based olfactory display is evaluated using limonene as a model odorant through controlled sensory experiments assessing reproducibility and perceptual discrimination across multiple concentration levels.

2. System overview

Following our previously reported design [1], the olfactory display employs an electro-osmotic pump (EBP-RF1R, Takasago Electric) to supply liquid odorants to a piezoelectric inkjet device (MJ-AB-01, Microfab). Droplet ejection is driven by 60 V pulses with frequency-controlled volume.

3. Experimental Methodology

<3・1>Preparation for odour concentration level

Sensory evaluations consisted of six randomized odour concentration combinations, with participants identifying perceived changes as an increase, a decrease, or no change. For the inkjet-based display, the odorant was diluted in ethanol (1:5), and concentration levels were defined based on consensus perceptual responses. High and low levels were achieved using inkjet frequencies and EO pump voltages of 1500 Hz/50 V and 300 Hz/20 V, respectively.

As a comparative study, a 13-channel olfactory display [2] was used with airflow set to 1 L/min to the nose and 3 L/min to exhaust, employing limonene diluted with octyl and decyl glycerate (ODO) (1:1, 500 µL) at relative concentrations of 20% (high) and 5% (low). High and low levels of the two methods were adjusted so that the two methods could generate similar intensity for high and low levels.

<3・2>Sensory test

Sensory evaluation was conducted with 7 participants, aged 25–65 years, who reported no olfactory impairments. To reduce bias, six odour concentration sequences were randomised for each participant, where +1, −1, and 0 denoted an increase, decrease, and no change, respectively. Each stimulus was presented for 20 s, after which participants identified the perceived change. User experience and comfort were assessed using a 5-point Likert scale (1: strongly disagree, 5: strongly agree).

4. Results and Discussions

Seven participants completed the study. For the inkjet-based olfactory display, 26 out of 42 responses (≈62%) correctly identified the direction of odour concentration change, whereas it was 15 out of 42 responses (≈36%) for the solenoid valve-based olfactory display, indicating reliable perceptual discrimination of concentration variations.

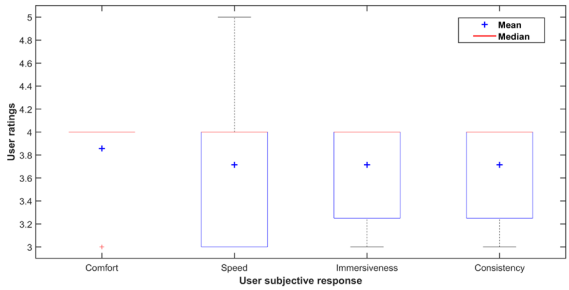


Fig. 1. Box plot for user-perceived subjective responses for inkjet device

Subjective evaluations using the inkjet device are summarised in Figure 1 (box plots) for comfort, speed, immersiveness, and consistency. The medians of all criteria have high central tendencies (≈4), confirming that users evaluated the system favorably.

5. Summary

Overall, the results confirm both perceptual reliability and positive user acceptance of the inkjet-based system.

6. Acknowledgement

This work was partially supported by JST Mirai project (No. JPMJMI25H1)

References

[1] N. Debabhuti et al., IEEE SENSORS, pp.1–4, Oct. 2024.

[2] M. Iseki et al., Electrical Engineering in Japan, vol.215, e23392, 2022.

©2026 IEE Japan

櫛形電極微粒子センサの高感度化に向けた立体化プロセスの検討

櫻井　拓馬*，安藤　毅（千葉工業大学）

Study on Three-dimensional Fabrication Process for Interdigitated Electrodes to Improve Sensitivity of Particulate Matter Sensor

Takuma Sakurai*, Ki Ando (Chiba Institute of Technology)

１．緒言

大気汚染による健康被害の主な要因として，粒子状物質(Particulate Matter：PM) の呼吸器への沈着が問題視されている。また，健康被害は PM の表面性状に依存すると報告されており，詳細な健康被害のモニタリングを行うためには，排出源に応じて異なる表面性状に対し選択的に PM 量を評価可能なセンサシステムが求められる。

そこで本研究では，従来から PM 量評価に用いられている櫛形電極[1]に着目し，その高感度化を目的として，高さ100 μmの立体電極構造の作製プロセスの検討を行った。電極を立体化することで対向する電極面積が増加し，静電容量変化の増大による高感度化が期待される。その結果，PM の表面性状選択性の付与の際に，感度の余裕が確保できると考える。

２．作製プロセス

本研究では，主にウェットプロセスを用いて電極の立体化を行った。立体構造の形成にはめっき法を用い，電気めっき法では電流密度の低い櫛端部に析出むらが生じる可能性があることから，膜厚均一性に優れる無電解めっき法を採用した。作製プロセスを図 1 に示す。まず，密着性に優れた非研磨サファイア基板上に，RF スパッタ法によって下地となるニッケル薄膜を成膜した。続いて，ネガ型フォトレジスト (OMR-100，東京応化工業) をスピンコートし，水銀ランプを用いて櫛間隔100 μmのめっき下地のパターンを露光・現像した。次に，塩化第二鉄溶液を用いてレジストに転写したパターンに対しエッチングを行い，櫛型電極の下地を作製した。最後に，無電解ニッケルめっきによる電極の厚膜化を行い，立体構造を作製した。

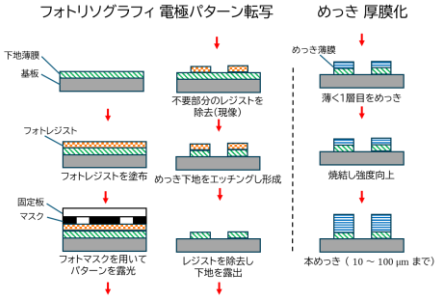
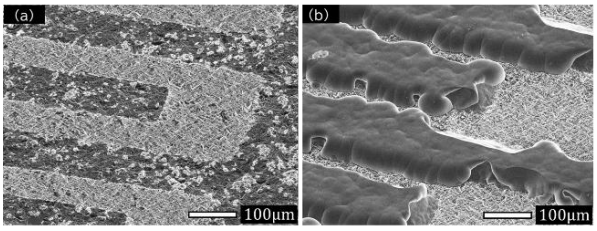


図 1 櫛形電極 PM センサの作製プロセス
Fig.1. Fabrication of a comb electrode PM sensor

３．作製結果

作製した櫛形電極 PM センサの走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を図 2 に示す。図 2 (a) に示す平坦な櫛歯状のめっき下地から，無電解ニッケルめっきにより，図 2 (b) に示す立体構造を持つ櫛電極が作製できたことが確認された。櫛電極の高さであるめっき膜厚は，現在のところ50 μmまで達成している。一方で，水平方向へのめっき成長が途中から活発になることで櫛間隔が設計値より狭小化し，さらに電極間への意図しないめっき析出が生じた結果，電極間が短絡する課題が明らかになったため，引き続きプロセスの改善を行う。



(a) めっき前の下地　(b) めっきによる立体化後
(a) An electrode before plating　(b) An electrode after thick plating
図 2 電極表面の SEM 像
Fig.2. SEM image of interdigitated electrode Surface

４．結言

本研究では，櫛形電極 PM センサの立体化を検討し，高さ50 μmの電極構造を有するセンサ素子の作製を行った。一方で，意図しないめっき析出に起因した電極短絡が発生し，作製プロセスの課題が明らかになった。今後は改良として，フォトレジストを用いた側壁を櫛間に形成することで不要なめっき析出を抑制し，課題の解決とさらなる電極高さおよび性状別 PM 量評価センサシステムの実現を目指す。

文　献

(1) M. Carminati, L. Pedalà, E. Bianchi, F. Nason, G. Dubini, L. Cortelezzi, G. Ferrari, M. Sampietro, “Capacitive detection of micrometric airborne particulate matter for solid-state personal air quality monitors” Sensors and Actuators A: Physical, Volume 219, Pages 80-87 (2014)

©2026 IEE Japan

点滅光の光ファイバ導光による植物生体電位の光応答の S/N 比改善

田中　心乃美*，安藤　毅（千葉工業大学）

Improvement in S/N Ratio of Light-induced Plant Bioelectric Responses via Optical Fiber-guided Blinking Light

Konomi Tanaka, Ki Ando (Chiba Institute of Technology)

１．はじめに

光合成は，反応の起点となる光化学反応と，そのエネルギーを利用して糖を生成する炭素固定反応で構成されている。我々はこれらの反応の評価のために，植物の生理活性を反映した細胞内外のイオン濃度差によって発生する，植物生体電位に着目した(1)。また我々は，生体電位応答を誘引する光照射を点滅光することにより，反応速度が速い光化学反応と遅い炭素固定反応を分離して，生体電位応答から評価可能であることを報告している。しかし，光化学反応の応答速度 200 μs～20 ms に合わせて点滅周期を短くすると，生体電位応答の振幅が小さくなる。さらに，光源の点滅によって発生するノイズが生体電位に重畳し，また，生体電位応答は点滅周期に同期するため，結果として S/N 比が悪く，0.5 Hz 以上の点滅に対する生体電位応答の評価が困難であった。

そこで本稿では，光ファイバ導光により光源と測定対象植物を離隔し，光源ノイズの低減と点滅周波数の向上を図り，その有効性について報告する。

２．植物生体電位測定手法

ゴールデンポトスを対象とし，暗室内にて図 1 のように，葉の表にリング型，葉柄に皿型電極を導電性ペーストで張り付け，電極間の電位差を測定した。それぞれの電極は脳波用アクティブ電極であり，電極 - データロガー間でのノイズ侵入を阻止しているが，それでもなお，無視できない光源ノイズが測定に重畳していた。さらに測定波形は生体アンプでバンドパスフィルタ 0.08－50 Hz とハムフィルタで処理をし，5000 倍に増幅しデータロガーにて記録した。

また光源は，白色パワーLED (5 V，623 mA) からの点滅光を，直径 2 mm の光ファイバを 3 本束ねたもので導光し，LED と測定対象植物の距離を 1 m としたもので検討を行った。なお，従来利用していた LED パネル光源 (350×363 mm, 24 V，3200 mA) を測定対象植物の直上 20 cm に設置し全体を照明するものを，比較として用いた。

３．実験結果

LED パネル光源を 0.3 Hz にて点滅させた際の測定例を図 2 に示す。このとき，生体電位応答の振幅が約 60 μV であるのに対し，LED の点灯，消灯に同期した光源ノイズが約 24 μV の振幅で観測されていた。さらに点滅周波数を向上させると S/N 比は急速に悪化し，生体電位応答の評価が困難となった。光ファイバを用いた点滅光源を，同じく 0.3 Hz にて点滅させた際の測定例を図 3 に示す。このとき，光源ノイズは観測されず環境ノイズ以下となり，光源と測定対象の離隔に加え，光源の電流値低減による S/N 比改善であると考える。

さらに S/N 比を検討するために，光ファイバを用いた点滅光の周波数を増加させ，植物生体電位応答の FFT 解析を行った。図 4 に示すように，点滅周波数と同期した植物生体電位応答のピーク値は，点滅周波数 22 Hz までは環境ノイズの約 0.1 μV を大きく上回り，植物生体電位応答を評価可能な周波数上限が大きく向上した。

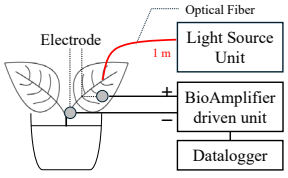


図 1　測定装置の模式図

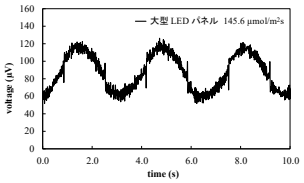


図 2　LED パネルによる植物生体電位応答

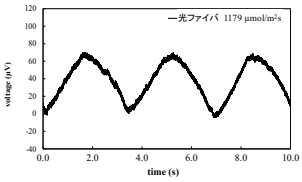


図 3　光ファイバ光源による生体電位応答

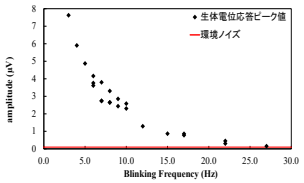


図 4　点滅周波数に対する S/N 比の検討

４．まとめ

本稿では植物への照射光に光ファイバ導光を用い，生体電位応答評価の S/N 比向上を実現した。今後はさらなる光量の増加，光源の離隔と電流値低減を並行して検討しつつ，植物生体電位応答から光合成評価を試みる予定である。

文　献

(1) 大藪多可志,勝部昭明 :「植物生体電位とコミュニケーション」，海文堂 (2009)

©2026 IEE Japan

アナターゼ型 TiO_2 を用いた光触媒併用型 SnO_2 ガスセンサの検討

渡邊　航*，安藤　毅（千葉工業大学）

Optimization of SnO_2 Gas Sensor in Combination with Photocatalyst Based on Anatase-type TiO_2

Wataru Watanabe*, Ki Ando (Chiba Institute of Technology)

１．はじめに

ガスセンサではガスとの反応を促進するために，ヒータからの熱エネルギーを利用している。また，反応表面積の増大や金属触媒の添加を行って，感度が向上されてきた(1)。

我々は，更なる高感度化を目的として，光触媒を併用する手法に着目した。本研究では，ガスセンサ層として SnO_2 (酸化スズ) を，併用する光触媒層として TiO_2 (酸化チタン) を用いる。しかし，TiO_2 光触媒併用型ガスセンサの報告において，TiO_2 の結晶構造について検討した例は少ない。一般に，TiO_2 はアナターゼ型とルチル型が安定な結晶構造として挙げられ，光触媒効果としてはアナターゼ型が優れている。しかしガスセンサとして用いる SnO_2 がルチル型を示すため，同時に成膜される TiO_2 もルチル型を示しやすいことが考えられる。本研究では，RF スパッタ法を用いて SnO_2 と TiO_2 を積層したガスセンサを成膜し，その際に，アナターゼ型 TiO_2 が得られる成膜条件を検討する。また，その積層順がガス感度に及ぼす影響を検討する。

２．アナターゼ型 TiO_2・ルチル型 SnO_2 の成膜

実験では，単層の TiO_2 膜と SnO_2 膜，積層順の異なる SnO_2 / TiO_2 膜と TiO_2 / SnO_2 膜 (大気側 / 基板側) の計 4 種を RF スパッタ法にて成膜した。TiO_2 層はアナターゼ型となる成膜条件を検討し，その結晶構造は XRD を用いて解析を行った。結果として，積層時にアナターゼ型 TiO_2 が得られた成膜条件は以下の通りである。成膜時のターゲットには TiO_2 粉末と SnO_2 粉末を各膜の成膜に用いた。基板には，非結晶であり，成膜条件によって TiO_2 の結晶構造の制御が容易な石英ガラス基板を用いた。成膜は，スパッタガスに Ar ガス，反応性ガスに O_2 ガスを導入し，ガス比 $Ar : O_2 = 4 : 1$，スパッタガス圧力 5.0 Pa，投入電力 115 W で行った。基板温度については，アナターゼ型 TiO_2 成膜時は 300℃とした。また，積層時の TiO_2 の結晶構造への影響を考慮し，ルチル型を示し易い SnO_2 は，特定の結晶配向性が強くなりすぎないよう基板加熱せず成膜を行った。膜厚はそれぞれ 300 nm を狙い，TiO_2 は 5 時間，SnO_2 は 27 分間成膜を行った。作製した各膜は大気雰囲気アニール (500℃，1 時間) を施した。

３．XRD による結晶構造の解析とガス感度測定

XRD を用いて結晶構造の解析を行った結果を Fig. 1 に示す。どちらの積層順でもアナターゼ型 TiO_2 とルチル型 SnO_2 の回折ピークが主に観測された。次に，作製した各膜を 300℃に加熱してガスセンサとして動作させ，水素ガス 100 ppm に対しての応答を確認した。また，測定の途中で UV 光 (365 nm，1.5 mW / cm^2) を照射し，光触媒効果を確認した。Fig. 2 に TiO_2 / SnO_2 膜のガス応答例を示す。光照射開始時には若干の光応答がみられ，その後，光照射なしと比べて大きなガス応答がみられた。さらに測定値から得られる I_{AIR} と I_{GAS} を用いて応答感度 S を $S = (I_{GAS} - I_{AIR}) / I_{AIR}$ として導出した。他の膜においても同様に応答感度 S を導出し Table 1 に示す。光触媒を併用することで，光照射時の感度 S の増加量が大きくなることが TiO_2 / SnO_2 膜において示され，光触媒効果がガスとの反応促進に寄与したと考える。

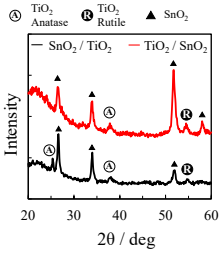


図 1 XRD の回折結果
Fig. 1 X-ray Spectram

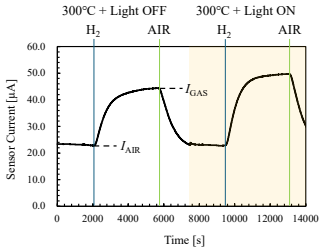


図 2 TiO_2 / SnO_2 膜におけるガス応答
Fig. 2 Gas Response of TiO_2 / SnO_2 film

表 1 各膜における水素ガス (100 ppm) に対するガス感度 S
Table 1. Gas Sensitivity to H_2 (100 ppm)

	SnO_2		SnO_2 / TiO_2		TiO_2 / SnO_2	
UV Light	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
I_{AIR} (μA)	54.85	49.18	4.00	4.15	22.85	21.34
Sensitivity S	1.22	1.46	0.92	0.92	0.94	1.33

４．まとめ

実験では，アナターゼ型 TiO_2 を積層した光触媒併用型 SnO_2 ガスセンサを作製することが出来た。今後は，最適な光触媒効果を得るための膜厚や積層順，配向性の優れたアナターゼ型 TiO_2 による感度の向上を狙う。また，ルチル型 TiO_2 と SnO_2 を積層し，TiO_2 光触媒層の結晶構造がガス感度に及ぼす影響を比較・検討していく。

文　献

(1) 北村雅季：J. Vac. Soc. Jpn，60.11，415～420 (2017)

©2026 IEE Japan

圧力勾配式スパッタリング法による ZnO 薄膜の成膜条件とガスセンサ特性の検討

染谷　陸*，安藤　毅（千葉工業大学）

Study on Deposition Conditions and Gas Sensor Properties of ZnO Thin Films by Pressure Gradient Sputtering Method

Riku Someya*, Ki Ando (Chiba Institute of Technology)

１．はじめに

酸化物半導体式ガスセンサは分析機器と比べて小型であることや低コストである利点から，呼気ガスを測定した病理診断への応用が期待される。しかし，現状では重大疾患の検知に必要な数 ppb 以下の感度に届いておらず，高感度化が課題である。半導体のガス感度はキャリア密度や表面形態に強く依存し(1)，その特性は成膜圧力や温度などの条件によって変化する。そこで我々は，ガスセンサの感度向上を目的として，報告例の少ない低成膜圧力条件や，高温成膜条件に着目しつつ，成膜圧力・温度の違いがキャリア密度や表面形態，ガスセンサ特性に及ぼす影響を検討した。

２．実験手法

本研究では，圧力勾配式スパッタリング法を用い，ZnO 焼結体をターゲットとして，c 面 α-Al_2O_3 (sapphire)基板上に薄膜を成膜しガスセンサを作製した。成膜時の投入電力は 100 W，成膜時間は 30 min，ガス比 Ar : O_2 = 8 : 2 とし，RT(室温)，400℃，800℃の 3 つの成膜温度ごとに 0.25～10 Pa の間で 5 通りの圧力で成膜を行った。ガス感度測定は，作製したサンプルを動作温度 500℃に加熱してガスセンサとして動作させ，理想大気下(Air)で 30 分測定後，H_2 100 ppm の導入・停止を 30 分毎に 3 セット繰り返した。ガス感度は 3 回目の H_2 100 ppm 導入直前の電流値をI_{air}，停止直前の電流をI_{H_2} とし，$S = (I_{H_2} - I_{air})/I_{air}$として感度 S を導出した。

３．実験結果

成膜したサンプルの内，温度ごとに 3 つの成膜圧力で作製したサンプルの表面形態を図 1 に示す。まず，温度による表面形態の変化が大きく，400℃，RT，800℃の順に粗い結果となった。成膜圧力による変化は，RT・400℃成膜サンプルでは低成膜圧力で表面の平坦性が高く，高圧力成膜サンプルでは粒子状の表面になる傾向が見られた。一方 800℃成膜サンプルではどの成膜圧力でも平坦性が高く，成膜時の加熱の影響が支配的であることが示唆された。

図2に，作製したサンプルのガス感度測定時の電流値とガス感度の計算結果を示す。表面積が大きいと思われる 400℃成膜サンプルが，他の温度で成膜した平坦性の高いサンプルに比べI_{H_2}とI_{air}の差であるΔIが大きく，高感度を得られる

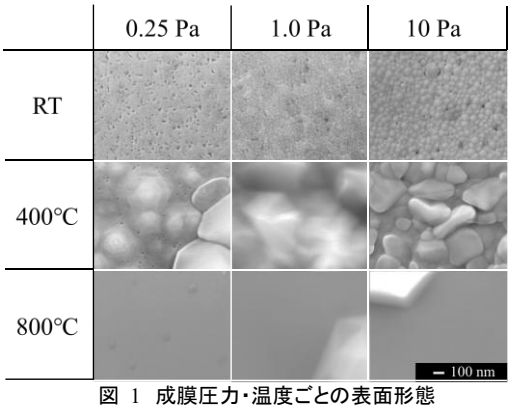


図 1　成膜圧力・温度ごとの表面形態
Fig 1.　Surface Morphology at Deposition Pressure and Grown Temperature

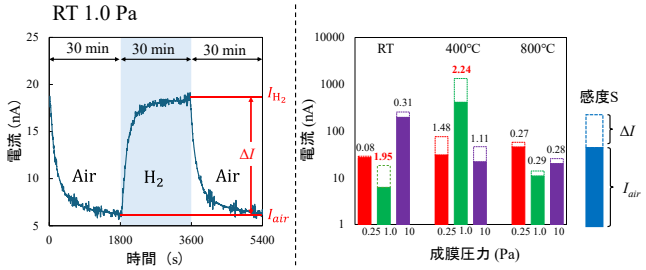


図 2　ガスセンサの電流値と感度
Fig 2.　Gas Sensor Current and Sensitivity

傾向にあった。これは，大きな表面積がガス吸着に有利に働いていると考えられる。また，2 番目に高感度であった RT 1.0 Pa 成膜サンプルは同温度で成膜した他のサンプルと比べ，I_{air}が小さい上でΔIが大きく，低キャリア密度かつ大表面積を組み合わせることで感度向上することが示唆された。

４．まとめと展望

本研究では，成膜圧力や温度による表面積やキャリア密度がガス感度に大きく影響する結果を得た。今後は 800℃成膜サンプルなどの平坦性の高い薄膜に対しエッチングで表面積を増大させ，低キャリア密度かつ大表面積を両立させることによりガス感度が向上する可能性を検討していく。

文　献

(1)　Yanli Kang, Feng Yu, Lu Zhang, Wenhao Wang, Long Chen, Yingchun Li : Review of ZnO-based nanomaterials in gas sensors Solid State Ionics Volume 360 (2021)

©2026 IEE Japan

窒素含有非晶質炭素被覆 QCM 型水素ガスセンサ

植村　皇介*，加藤　透和，金杉　和弥，平栗　健二（東京電機大学）
石黒　康志（防衛大学校）

Nitrogen Doped Amorphous Carbon Film-Coated QCM-Type Hydrogen Gas Sensor

Osuke Uemura, Towa Kato, Kazuya Kanasugi, Kenji Hirakuri (Tokyo Denki University)
Yasushi Ishiguro (National Defense Academy)

１．まえがき

安全な水素社会を実現するためには、万一の水素ガス漏洩を検知するセンサの設置が必要不可欠である。現在普及している水素ガスセンサ の基幹部品には、Pd や Pt などの貴金属を含む複合材料が使用されており、資源枯渇の懸念がある。また、動作温度が 300℃以上となるため、消費電力や安全性に課題がある。そこで我々は、貴金属レスで室温動作可能な新しい水素ガスセンサの開発に取り組んでいる(1)。具体的には、ガス吸着反応に基づいて周波数応答性が変化する水晶振動子マイクロバランス（QCM）デバイスを基本構造とし、その水素ガス感応膜に資源が豊富な窒素含有非晶質炭素膜（a-C:N）の適用を検討している。

本研究では、独自の a-C:N 被覆 QCM 型水素ガスセンサの基礎評価として、QCM 電極材料（Au、Al、Ti）が水素ガス応答性に与える影響を調査した。

２．実験方法

本実験では、基本共振周波数が 9MHz に設計された電極材料の異なる 3 種類の QCM 素子（Au、Al、Ti）を用いた。それら QCM 素子に対し、黒鉛ターゲットと Ar/N_2 混合ガスを用いた RF マグネトロンスパッタリング法 (E200-S, CANON ANELVA) により a-C:N 膜を成膜した。成膜条件は、RF 電力 200 W、ガス流量比 $Ar:N_2$=1:1、ガス圧力 3.5 Pa を固定とし、膜厚を約 300 nm とした。水素ガス応答性評価は窒素ガスをキャリアガスとして 50 mL/min、水素ガスを 10 mL/min（20 vol%濃度）導入した際の周波数変化 (ΔF) を測定した。

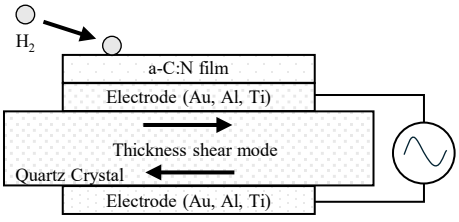


図 1 QCM 型水素ガスセンサの断面図

Fig.1 Diagram of QCM-type H_2 gas sensor

３．実験結果

各サンプルの水素ガス応答性（ΔF）を Fig.2 に示す。図より、電極材質に関わらず、a-C:N 膜を被覆する前は顕著な水素ガス応答を示さなかったものの、a-C:N 膜を被覆することで大幅に水素ガス応答性が向上することを確認した。この QCM 電極材料の違いに着目すると、Au 電極の水素ガス応答性(ΔFmax) は約 25 Hz、Al および Ti 電極は約 30 Hz となり、高価な Au よりも Al や Ti の方が良好な水素ガス応答性を示した。つまり、a-C:N 被覆 QCM 型水素ガスセンサにおいて QCM 電極材料の選定が重要となることを示唆した。

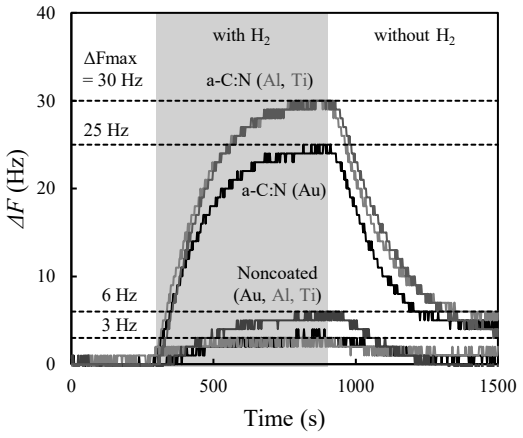


図 2 電極材料の異なる QCM 素子 (Au、Al、Ti) の水素ガス応答性

Fig.2 QCM characteristics of each sample (Au, Al, Ti)

４．まとめ

本研究では、a-C:N 被覆 QCM 型水素ガスセンサの基礎評価として、QCM 電極材料と水素ガス応答性の関係を調査した。a-C:N 膜を被覆した際の水素ガス感度は Au よりも Al や Ti の方が高くなることを確認した。各 QCM 素子に成膜した a-C:N 膜の物性については当日報告する。

文　献

(1)Y. Ishiguro, et al., *J. Mater. Chem. C*, **11**, 10178-10184 (2023)

©2026 IEE Japan

Au 薄膜/Pd ナノ粒子を用いたヘテロコア光ファイバ SPR センサ水素ガス応答評価

田畑　大志*，由元　輝明，渡辺　一弘，西山　道子（創価大学）

Evaluation of hydrogen gas response of hetero-core optical fiber SPR sensor with Au thin film/Pd nanoparticles

Daishi Tabata, Teruaki Yoshimoto, Kazuhiro Watanabe, Michiko Nishiyama (Soka University)

１．はじめに

近年，次世代エネルギー燃料として水素が注目されている．しかし，空気中で水素濃度が 4%を超えると爆発の危険性を有するため，漏洩を迅速かつ正確に検知するセンサが必要とされている．従来の電気式センサはスパークによる着火リスクが懸念される一方，光ファイバセンサは防爆性に優れ，安全に水素ガスを検知することが可能である。我々はこれまでにコア径の異なる光ファイバを挿入融着したヘテロコア光ファイバを用いた水素センサを提案している。特に水素感受膜として Pd ナノ粒子(PdNPs)を用いることで応答性に優れたセンサを実現した[1]。このセンサは伝搬光がヘテロコア部からクラッド層に漏洩し，光ファイバの外界との相互作用を可能にし，ファイバ表面に固定化した PdNPs の水素吸蔵による屈折率変化から透過光強度の変化を感度として検出できる。

しかし，水素濃度を上昇させた状態の吸収過程と水素濃度を下降させた状態の放出過程において，同一濃度であっても応答が異なるヒステリシスが課題となっていた。先行研究において Au 薄膜を成膜することでヒステリシスの抑制を確認できたが，感度が減少することが課題であった[2]。そこで，本研究では PdNPs 層の積層数を調整することで Au 薄膜による表面プラズモン共鳴(SPR)波長を光源波長までシフトさせ，SPR 現象による感度を向上させることを目的とし，実験的に評価を行った。

２．実験構成

センサ構成を図 1 に示す。コア径 50 μm の光ファイバにコア径 3 μm の光ファイバを 15 mm 挿入し作製したヘテロコア光ファイバの表面にスパッタリングによって 40 nm の Au 薄膜を施したものを 3 本作製した。その後、ポリリジン(PLL)と PdNPs を，センサ No.1 は 6 サイクル，センサ No.2，3 は 10 サイクル交互積層し，PdNPs を固定化した。なお、センサ No.3 は PdNPs 固定化前に 11-メルカプトウンデカン酸(11-MUA)で 20 分間表面処理を行った。以上の 3 種類のセンサで水素応答特性実験を行った。また，白色光源と分光器を用い，波長 400-1000 nm における透過光スペクトルを測定し，PdNPs の積層数に対する Au 薄膜の SPR 波長シフトの評価を行った。水素応答実験構成図を図 2 に示す。中心波長 850 nm の LED 光源を用い，水素ガス流入時の光強度のリアルタイム応答をパワーメーターで測定した。センサ周辺の水素濃度を 150 秒ごとに 0%から 4%まで変化させた実験 1 と，0%から 4%を往路，4%から 0%を復路として 150 秒ごとに 0.25%ずつ変化させた実験 2 の計 2 種類の各水素濃度における光損失を測定し，感度，反応時間及びヒステリシスの評価を行った。

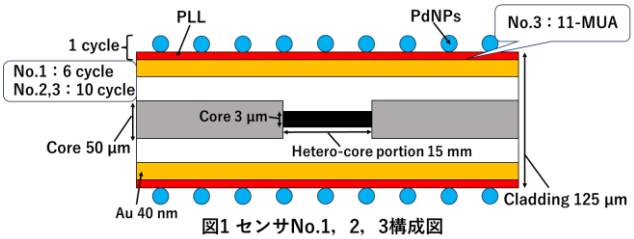


図1 センサNo.1，2，3構成図
Fig. 1 Sensor No.1, 2, 3

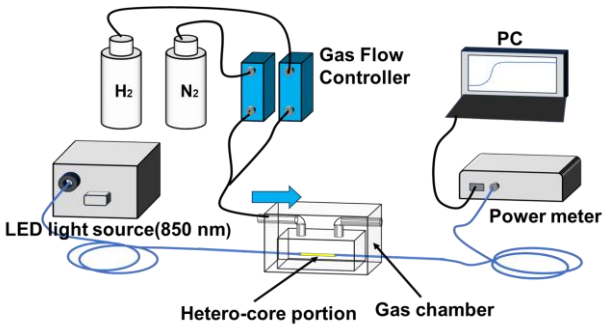


図2 水素応答特性実験図
Fig. 2 Experiment on hydrogen response properties

３．結果及び考察

各センサの PdNPs 固定化後の透過光スペクトルを PdNPs 固定化前の透過光スペクトルで正規化し、SPR の吸収波長シフトを示したものを図 3 に，センサ No.2，3 における窒素と水素 4%の正規化透過光スペクトルを図 4 に，水素応答実験結果を表 1 に示した。応答時間及び回復時間は実験 1 における感度の 10%から 90%の変化時間とし，ヒステリシスは実験 2 における各濃度の往路と復路の光損失差を最大

©2026 IEE Japan

光損失で規格化して算出し，最大ヒステリシスと各濃度における総和を評価した。図 3 より、センサ No.1 は SPR 吸収波長が約 650 nm，No.2，3 は約 850 nm までシフトした。表 1 より，センサ No.1 は Au のヒステリシス抑制効果によって従来のセンサに対してヒステリシスは抑制された。No.1 に対して No.2 の感度は向上したが，応答時間，回復時間及びヒステリシスは増加した。これは，積層数の増加によって PdNPs の固定化が不安定になり，センサ表面全体の PdNPs が水素吸収・放出するまでに時間を要したためと考えられる。そこで，PdNPs の固定化を安定させるために Au 薄膜上を 11-MUA で表面処理を行い，センサ No.3 で同様の実験を行った。No.3 では感度が向上し，No.2 に対して反応時間及びヒステリシスが抑制された。これは、11-MUA のチオール基が Au 表面と強固に結合し、かつカルボキシル基が PLL，PdNPs 層の静電的結合を強化したことで、多層膜構造の安定性が向上したためであると考えられる。

4．結論

以上より SPR 吸収波長を光源波長までシフトさせることで感度が向上したが，PLL，PdNPs の積層数増加による反応時間やヒステリシスの増加が確認された。また，11-MUA による表面処理により反応時間及びヒステリシスの抑制を担保しつつ，SPR による感度向上の可能性が示唆された。

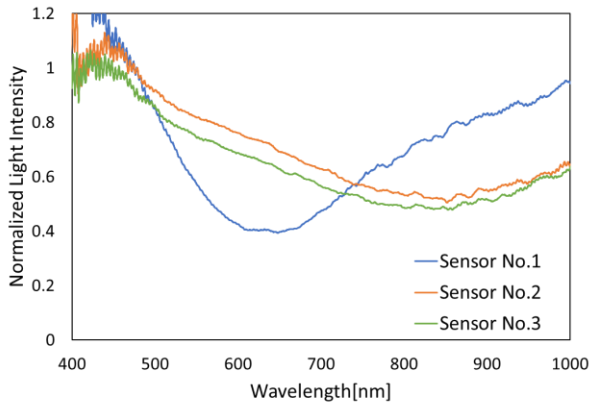


図3 SPRピーク波長シフト
Fig. 3 SPR Peak Wavelength Shift

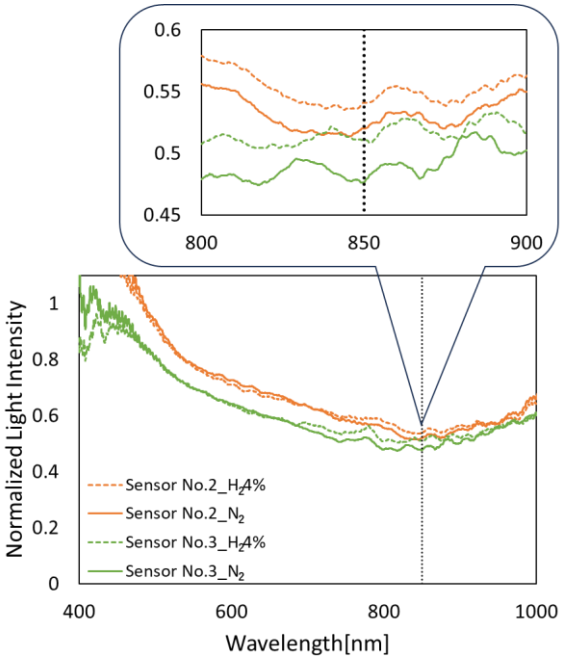


図4 水素，窒素SPR波長シフト
Fig. 4 Hydrogen, nitrogen SPR wavelength shift

表1 実験結果
Table, 1 Experimental results

	Sensitivity[dB]	Response Time[s]	Recovery Time[s]	Maximum Hysteresis	Total Hysteresis
Sensor No.1	0.141	2.92	18.0	0.564	1.89
Sensor No.2	0.185	21.3	86.9	0.681	2.69
Sensor No.3	0.283	5.08	23.8	0.583	1.96

文献

(1) Yuna Nakamura et al., ICST2024

(2) 田畑大志・由元輝明・渡辺一弘・西山道子，第 42 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム，11P4-PS-87

©2026 IEE Japan

酸化金属半導体ガスセンサの選択性向上に向けたセンサ出力非線形処理回路に関する基礎検討

藤田　匠*，長谷川 智也，工藤　稜大，齋藤　敦史（芝浦工業大学）

Fundamental study on nonlinear processing circuit to improve selectivity of metal oxide semiconductor gas sensors

Takumi Fujita, Tomoya Hasegawa, Ryodai Kudo, Atsushi Saito (Shibaura Institute of Technology)

１．まえがき

本研究では半導体ガスセンサのガス選択性向上を目的として，センサに印加するヒータ電圧を動的に変化させるヒータ電圧プロファイルの検討を行った．また，得られたセンサ応答を非線形処理するための回路について検討した．

２．ヒータ電圧制御，およびセンサ応答非線形処理回路によるガス選択性の向上

＜2・1＞ヒータ電圧プロファイル　ガスセンサのヒータ電圧を動的に制御することによる応答特性変化を利用した．図1に実験に使用したヒータ電圧プロファイルの例を示す．通常時 5[V]のヒータ電圧を 1.0[V/s]で 5.0[V]→3.0[V]→5.0[V]と変化させた．このプロファイルを印可した際のセンサ出力の推移全体をセンサ応答とする．

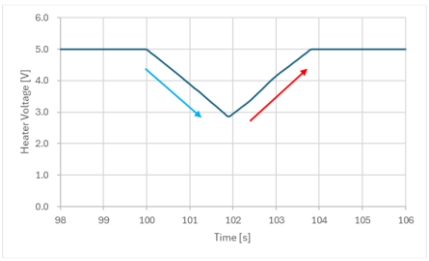


図 1. ヒータ電圧プロファイルの例

Fig.1 Example of Heater Voltage Profile

＜2・2＞ センサ応答非線形処理回路　ヒータ電圧の制御に加え，センサ出力推移の変化を強調するために，センサ出力を非線形処理する回路を導入した．非線形処理としてセンサ応答値の 2 乗回路, およびローパスフィルタ (LPF), およびハイパスフィルタ (HPF)を用いた. 2 乗回路にはリニアテクノロジー社製の乗算器 AD633 を用いた．LPF，および HPF には RC フィルタ回路を用い，ヒータ電圧プロファイルの制御時間 4s を踏まえて，それぞれの遮断周波数を 0.133Hz とした. 非線形処理回路全体の回路図を図2に示す．

＜2・3＞ センサ応答測定結果　半導体ガスセンサにはフィガロ技研社製の TGS2603 を，測定対象ガスには Ethanol, および Acetone を用い，ガス濃度は 100ppm とした．先のセンサ出力処理回路を導入した場合の LPF 出力を図3に示す．同図はガスに対する応答が定常となった状態で図 1 のヒータ電圧プロファイルを印可した際の測定結果であり，横軸をヒータ電圧，縦軸をセンサ出力とし，ヒータ電圧制御に伴うセンサ出力の推移を表したものである．また，半導体ガスセンサのベースラインドリフトの影響を軽減するため，清浄空気中での応答推移で規格化されている．

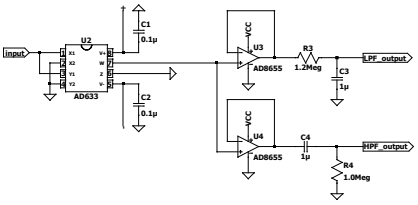


図 2 センサ出力非線形処理回路

Fig.2 Circuit for non-linear processing of sensor output

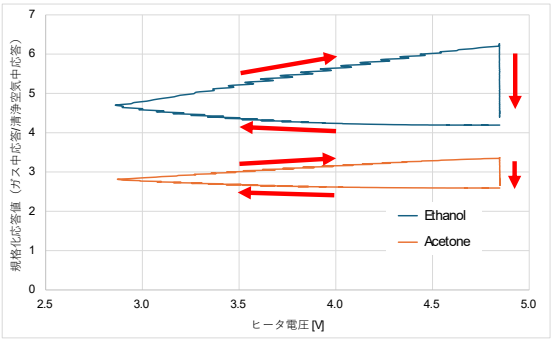


図 3 ヒータ電圧制御，非線形処理を適用したセンサ応答

Fig.3 Sensor response using heater voltage control and nonlinear processing

３．まとめ

半導体ガスセンサのヒータ電圧を制御し，その際の出力を非線形処理することによって得られた推移全体をセンサ応答とすることでガス識別能力向上の可能性があることを確認した．

文　献

(1) 山添昇,電気化学および工業物理化学 50 (1), p.29-37B (1982)

©2026 IEE Japan

匂い強度増強装置を用いたカビ臭検知に関する基礎的研究

石井　悠貴*，岡崎　勇磨　（東京農工大学），
松倉　悠　（電気通信大学），石田　寛（東京農工大学）

Fundamental Study on Mold Smell Detection Using Odor Amplifier

Yuki Ishii, Yuma Okazaki (Tokyo University of Agriculture and Technology), Haruka Matsukura (University of Electro-Communications), Hiroshi Ishida (Tokyo University of Agriculture and Technology)

１．はじめに

近年，ミネラルウォーターの需要拡大に伴い，品質保持のための分析技術の需要も高まっている。飲用水中のカビ臭の原因物質は主にジェオスミンと 2-メチルイソボルネオールであり，これらの濃度が水質基準値の 10 ng/L[1]以下でもカビ臭を感じる人がいる。しかし，このレベルの低濃度なジェオスミンは簡便なセンサでは検出できず，ガスクロマトグラフなどの高価な装置を使った分析が必要となる[2]。

筆者らは，吸着剤に匂い分子を捕集してから加熱脱着することにより，簡便に匂いを濃縮できる装置の実現を目指した研究を行っている[3]。濃縮された匂い蒸気をユーザに直接提示することで，嗅覚感度が擬似的に増幅されたかのような効果が期待される。本研究では，この装置を水質検査に応用し，カビ臭の有無を自らの鼻で手軽に判定可能にすることを目指す。本稿では，基礎的な実験結果を報告する。

２．方法

図 1 に示す小型の管状セル[3]を作製して用いた。内径 2.4 mm，外径 3 mm の銅パイプを通気路とし，その中に顆粒状の吸着剤（Tenax-TA，ジーエルサイエンス）を 24 mg 充填した。加熱は定格 15 W の薄膜ポリイミドヒータ（ミズホクラフト）により行う。ヒータの最小曲率半径が 6 mm のため，通気路銅パイプの外側に，内径 3 mm，外径 6 mm の銅パイプを被せてからヒータを巻きつける構造とした。

今回は，水質基準値以下である 5 ng/L のジェオスミン水溶液を対象として匂い濃縮実験を行った。ジェオスミン水溶液を 100 mL/min の流量でバブリングして得た蒸気を 10 分間管状セルに流してジェオスミンを吸着させた後，管状セルを 120℃で 100 秒間加熱する。その後，空気を 100 mL/min の流量で流し，濃縮された匂いを光イオン化検出器（ppbRAE 3000，RAE Systems）に送り，応答を測定した。対照実験として，ジェオスミンを含まない精製水に対しても同様の実験を行った。

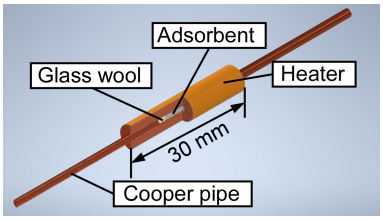


図 1　管状セルの模式図
Fig. 1. Schematic diagram of the tubular cell.

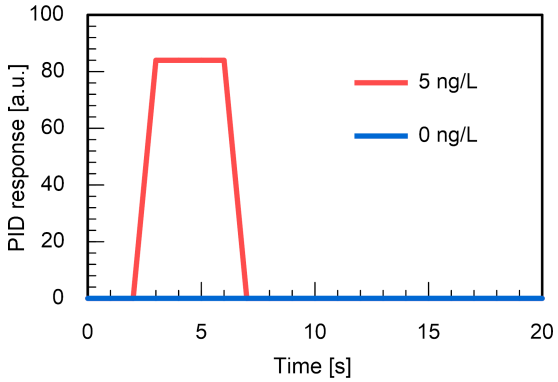


図 2　ジェオスミン蒸気に対する PID 応答の時間変化
Fig. 2. Time courses of the response of a photoionization detector (PID) to changes in geosmin vapor concentration.

３．結果と考察

光イオン化検出器の応答を図 2 に示す。ジェオスミンを含まない精製水をバブリングしても光イオン化検出器は応答しなかったが，ジェオスミンを含む溶液に対しては明確なピークが検出された。また，実際に匂いを嗅いだ結果，濃縮前は無臭であった試料から明らかな異臭が感知され，装置の有用性が確認された。本研究は，JSPS 科研費（No. 22H04952，25K22815）の助成を受けて行った。

文　献

(1) 平成 15 年 5 月 30 日厚生労働省令第 101 号 (2003)

(2) A. Szczurek et al.: Electronics, 13, No. 63 (2023)

(3) 木村晟也他: 電気学会ケミカルセンサ研究会資料, CHS-22-030 (2022)

©2026 IEE Japan

連続匂い刺激下におけるカイコガ嗅覚入力-行動出力特性の同時計測法の確立

李　庭ミン*，祐川　侑司，Stephan S. Haupt，加沢　知毅，神﨑　亮平，光野　秀文
（東京大学）

Establishment of Measuring method for Input-Output Characteristics of Silkmoths under Continuous Odor Stimulation

Jeongmin Lee*, Yuji Sukekawa, Stephan S. Haupt, Tomoki Kazawa, Ryohei Kanzaki, Hidefumi Mitsuno
(The University of Tokyo)

１．背景と目的

カイコガのオスは，空間中に拡散する微量なフェロモン情報を高感度に受容し，メスの位置を特定する優れた探索・定位能力を有している(1)。特に，様々な匂い情報が存在する環境下でのカイコガの探索能力は，既存の工学的アルゴリズムと比べ探索成功率の観点で優位性がある(2)。そのため，このメカニズム解明は工学応用上で重要である。

我々はこれまでに，上記を解明するための実験系を考案し，カイコガ匂い源探索行動と同期した触角電位（EAG）が計測可能であることを示した。しかし，同実験系がカイコガの行動に及ぼす影響が未検証であること，また，連続刺激に対する計測に未対応であることが課題であった。

そこで本研究では，これらの課題を克服し，カイコガの感覚入力と行動出力を，連続匂い刺激下において高精度で同時計測可能な新規実験系を構築し，その実証を行った。

２．実験方法

実験には成虫のオスカイコガを用い，15℃，16:8 昼夜サイクルで管理しものを使用した。

カイコガの自由歩行を阻害しないロバストな EAG 計測を実現するために，専用の計測システムを開発した。EAG 計測には自作アンプを利用した。また，配線の重みによる行動への干渉を最小限に抑えるため，カイコガに装着される計測具とアンプの間には直径 0.05 mm の極細エナメル線を採用し，巻径 10 mm，巻き数 10 回のヘリカルコイル構造を導入することで高い追従性を確保した。計測具の電極には直径 0.5 mm の銀線を塩化銀でコーティングしたものを使用し，別のカイコガ個体から採取した触角を導電性ゲルで接続することで，安定した電位計測を可能にした。匂い刺激提示には電磁弁とポンプを用いて，1 L/min の流量にて 0.8 Hz 周期でフェロモンを射出する装置を構築した。匂い刺激は 0.7 m/s の風によって伝播される。

３．実験結果

＜3・1＞EAG 計測具の行動への影響　　EAG 計測具の装着が，カイコガの行動に及ぼす影響を検証した。その結果，統計的に有意な影響は確認できなかった（図 1）。

＜3・2＞連続匂い刺激下での行動と EAG データ計測　　構築した実験系を活用し，カイコガの自由な探索行動に伴う匂い受容情報の取得を行った。高い S/N 比を維持したまま連続的に取得することに成功した（図 2）。匂い物質の検出頻度が高くなる区間ではカイコガの歩行速度が速まるが，

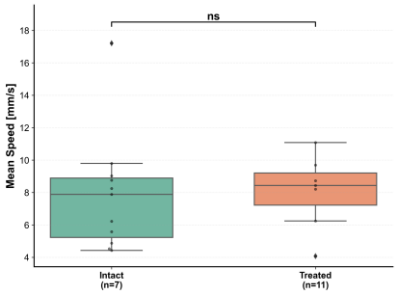


図１．カイコガの個体別歩行速度分布の比較
Fig 1. Comparison of individual walking speed distributions in silkmoths (Mann-Whitney U test, P-Value = 0.66)

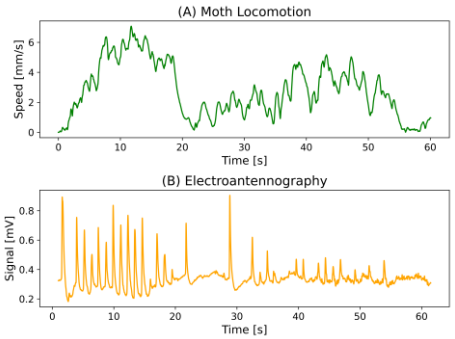


図２．カイコガの匂い源探索行動における EAG 計測値
Fig 2. Measured EAG values during the odor source search behavior of the silkmoth

逆に低頻度の区間では歩行速度が低減，または歩行停止することを実験的に確認した。

４．結論と今後の展望

本研究では，カイコガの匂い源探索定位行動とそれを引き起こした匂い情報を同時観察するための実験系を考案した。また，その実験系での計測具はカイコガの歩行運動に影響を及ぼさないことを確認した。さらに，連続した匂い刺激下でのカイコガ行動と，そのとき受容したと推定される匂い情報を安定的に同時計測する系の確立に成功した。

今後は構築した匂い刺激装置と実験系を活用し，カイコガの匂い情報に対する行動方策を探求しつつ，その工学的応用を検討していく予定である。

文　献

(1)R Kanzaki et al. : *Zool. Sci.*, 9. 515~527 (1992)

(2)J Lee et al. : *2025 ICARM.*, Portsmouth, UK, 585~591 (2025)

©2026 IEE Japan

金属基板を用いた
高感度 Cr-N 薄膜ひずみゲージ

佐々木　祥弘*，丹羽　英二（電磁材料研究所）

High-sensitivity Cr-N thin-film strain gauge using a metal substrate

Yoshihiro Sasaki, Eiji Niwa (DENJIKEN)

１．まえがき

Cr-N 薄膜は電磁材料研究所が開発した新規高感度ひずみセンサ材料である。それは，ひずみに対する感度を示すゲージ率（Gf）が 12～16 と従来の金属箔ひずみゲージ材料の 6～8 倍大きく，温度に対する感度を表す抵抗温度係数（TCR）をほぼゼロに制御可能な，優れたひずみセンサ特性を有する。この材料を接着して用いるひずみゲージとする場合，基板（ベース）が必要となる。これまで基板材料として樹脂およびセラミックスを検討したが，樹脂は柔らかく耐熱性が低いため安定な特性を得ることが難しく，セラミックスは安定な特性は得られるが脆性があり壊れやすいという問題があった。そこで樹脂よりもヤング率が高く，耐熱性があり，かつ脆性が無い材料として金属に着目し，それを基板とするひずみゲージ素子の試作評価を行った。

２．実験方法

金属基板用材料として，ヤング率が樹脂材料より大きくセラミックス材より小さい，かつ，熱膨張係数が Cr と同程度の Nb，Ti，Fe-Ni および Ta の 0.02mm 厚箔材を用いた。それらの上に厚さ 2μm の SiO2 絶縁膜を介して Cr-N 薄膜素子を形成した。TCR 調整のための熱処理温度は 200℃とした。作製した試料をハサミで切り出し成型後ステンレス製測定治具に接着し，評価測定を行った。接着には瞬間接着剤を用いた。評価には，Gf および TCR 等の特性ならびに 80℃で 120 時間保持した場合の抵抗値の変化を測定した。

３．結果および考察

薄膜素子の作製および評価の際，薄膜素子形成，切り出し成型，絶縁膜の絶縁性，測定治具への接着および電極線のハンダ溶接等に問題は見出されなかった。図 1 に，基板に用いた材料のヤング率に対する試作試料の Gf を示す。樹脂およびジルコニアと同様，金属基板においても 15～17 の大きな値が得られた。また，TCR をほぼゼロとする調整も可能であることを確認した。図 2 に Ti 基板素子における 60℃および 80℃でそれぞれ 120 時間保持した場合の抵抗値の変化を示す。80℃での 120 時間前後の抵抗変化率（ΔR/R）は約－0.01％と小さかった。図 3 に各種基板材料試料に関する同様の試験における抵抗変化率をヤング率に対して示す。金属基板における 120 時間 80℃保持前後の抵抗変化率は樹脂材料およびジルコニアのそれと比較して小さく，熱安定性に優れることがわかった。高感度低 TCR 特性の壊れにくいひずみゲージを提供可能と考えられる。

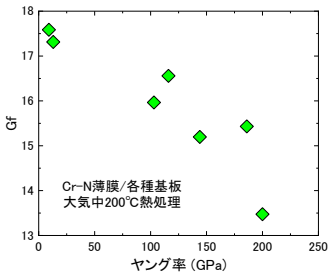


図1　基板に用いた材料のヤング率に対する試作試料の Gf

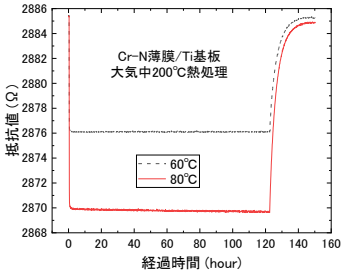


図 2　Ti 基板素子の 120 時間保持試験における抵抗値の変化

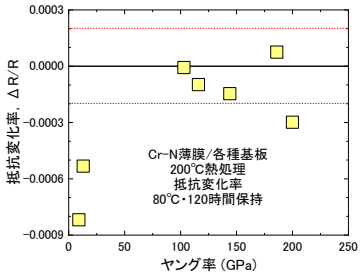


図 3　各種基板材料試料におけるヤング率に対する抵抗変化率

©2026 IEE Japan

Cr-Al 薄膜/Ti 基板素子と樹脂製構造体からなる小型力覚センサ

若生　直樹，佐々木　祥弘，早坂　淳一，丹羽　英二（電磁材料研究所）

A compact force sensor consisting of a Cr-Al thin film/Ti substrate element and a resin structure body

Naoki Wako, Yoshihiro Sasaki, Junichi Hayasaka, Eiji Niwa (DENJIKEN)

１．まえがき

Cr-Al 薄膜は，ひずみに対する感度を示すゲージ率（Gf）が約 7 と従来の金属箔ひずみゲージ材料の約 3.5 倍大きく，抵抗値の温度感度を表す抵抗温度係数（TCR）および Gf の温度感度を表す感度温度係数（TCS）をいずれも同時にゼロ近傍に制御可能な，優れた特性を有する(1)。本薄膜を Ti 基板上に形成することにより，熱的および力学的に安定な優れたひずみゲージが得られる(2)。本研究では，Cr-Al 薄膜/Ti 基板ひずみゲージを樹脂製ダイアフラムに接着して用いることで，小型軽量で高耐荷重な力覚センサを構築可能と考え，その試作評価を行った。

２．実験方法

ダイアフラム構造体用材料として，強度が大きいスーパーエンジニアリングプラスチックである PEEK を用いた。構造解析および荷重印加試験から，その寸法を直径 12mm，高さ 6mm，隔膜厚さ 3mm とした。ひずみゲージは 0.02mm 厚の Ti 基板上に SiO_2 絶縁膜を介して Cr-Al 薄膜素子を形成し，直径 5.8mm の円形に切り出して用いた。図 1 に，作製した力覚センサ素子の断面模式図およびひずみゲージの薄膜パターンを示す。ダイアフラム上面に受力突起があり，その反対側の面にエポキシ系接着剤を用いてひずみゲージを接着し，配線をハンダ溶接した。評価には機械試験機を用い，印加荷重に対する出力特性を測定した。

３．結果および考察

作製した PEEK 製ダイアフラム構造体自体は 700N までの印加荷重に対して線形の変形挙動を示し，除荷後のゼロ戻りも良好だった。よって，この構造体 1 個で約 70kg までの測定が可能であることを確認した。図 2 に作製した力覚センサの写真を示す。その作製の際，切り出し成型，構造体への接着および電極線のハンダ溶接等によるひずみゲージへの悪影響は見られなかった。図 3 に荷重印加試験の測定結果を示す。その結果，100N まで直線性の良い応答が得られることがわかった。この力覚センサ 1 個で約 10kg までの測定が可能と考えられる。従来用いられるステンレスと比較して比重が約 1/6 であることから，小型軽量で高耐荷重な力覚センサを構築可能と考えられる。

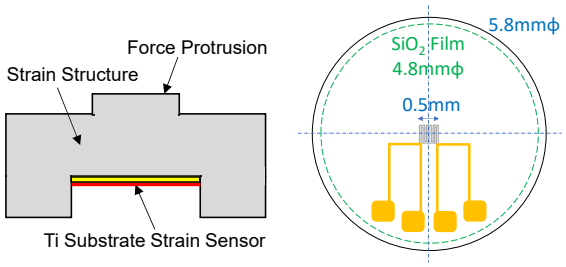


図 1　力覚センサ素子の断面模式図および薄膜パターン
Fig.1. Schematic Cross-sectional view and thin film pattern of the force sensor element

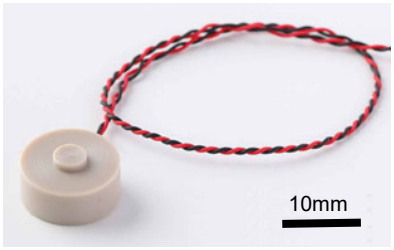


図 2　作製した力覚センサの写真
Fig.2. Photograph of the fabricated force sensor

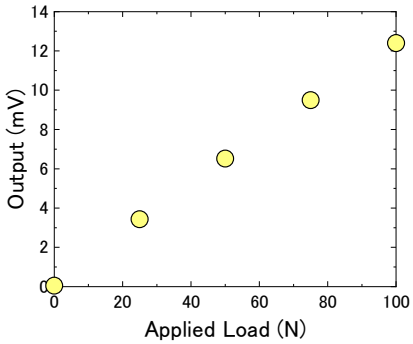


図 3　荷重印加試験結果
Fig.3. Load applying test results

文　献

(1)丹羽英二：電学論 E, 138, 394～300 (2018)

(2)丹羽英二･佐々木祥弘：令 8 電気学会全大，同時発表 (2026)

©2026 IEE Japan

温度影響の小さい高安定ひずみゲージ用 Ti 基板 Cr-Al 薄膜

丹羽　英二*，佐々木　祥弘（電磁材料研究所）

Ti substrate Cr-Al thin film for highly stable strain gauge with little temperature effect

Eiji Niwa, Yoshihiro Sasaki (DENJIKEN)

１．まえがき

ひずみ測定の対象物に接着して用いるひずみゲージは基板（ベース）を必要とする。特に薄膜材料の場合，基板の存在は不可欠であり，その影響は大きい。例えば，著者らが開発した高感度ひずみセンサ材料 Cr-N 薄膜[(1)]の場合，基板材料として樹脂は柔らかく耐熱性が低いため安定な特性を得ることが難しく，セラミックスは安定な特性は得られるが脆性があり壊れやすいという問題があった。その検討から，樹脂よりもヤング率が高く耐熱性を有して脆性が無い金属箔材がひずみゲージとしての安定利用に有効という結果が得られた[(2)]。また，Cr-N 薄膜の場合，ひずみに対する感度を示すゲージ率（Gf）は 12～16 と大きく，抵抗値への温度の影響を表す抵抗温度係数（TCR）はほぼゼロに制御可能だが，Gf への温度の影響を表す感度温度係数（TCS）を TCR と共にほぼゼロ近傍とすることが容易ではない。そこで，TCR および TCS を共にゼロ近傍に制御可能な Cr-Al 薄膜[(3)]について，基板材料として金属箔材の中から Ti を選択し，その特性と熱安定性を調べた。

２．実験方法

Ti の 0.02mm 厚箔材の上に厚さ 2μm の SiO_2 絶縁膜を介して Cr-Al 薄膜素子を形成した。Cr-Al 薄膜はスパッタリング法により組成の異なる合金ターゲットを用いて成膜した。熱処理温度は 300℃とした。作製した試料をハサミで切り出し成型後ステンレス製測定治具に接着し，評価測定を行った。接着には瞬間接着剤を用いた。評価には，Gf，TCR および TCS の特性ならびに 60，80 および 100℃でそれぞれ 120 時間保持した場合の抵抗値の変化を測定した。

３．結果および考察

薄膜素子の作製および評価の際，薄膜素子形成，切り出し成型，絶縁膜の絶縁性，測定治具への接着および電極線のハンダ溶接等に問題は見出されなかった。図 1 に，合金ターゲット中の Al 量に対する TCR および TCS の値を示す。10at%Al 量付近において，ほぼ TCR＝TCS=0 となることがわかる。その組成において Gf については約 7 と，従来の箔ひずみゲージの約 3.5 倍の値が得られた。図 2 に 60℃，80℃および 100℃でそれぞれ 120 時間保持した場合の抵抗値の変化を示す。100℃での 120 時間前後の抵抗変化率（ΔR/R）は約 0.06%と小さかった。その変化は 1 年間でも約 4.5%と小さく，優れた熱安定性が示唆された。Ti を基板とする Cr-Al 薄膜により，熱的に高い安定性を示し，壊れにくく，従来よりも高感度なひずみゲージを提供可能と考えられる。

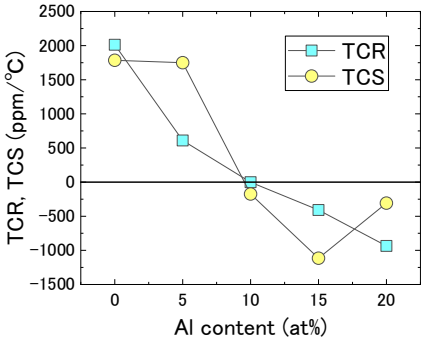


図１　合金ターゲット中の Al 量に対する TCR および TCS

Fig.1. TCR and TCS versus Al content in alloy target

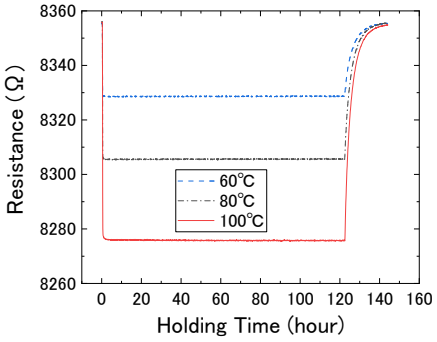


図２　120 時間定温保持試験における Cr-Al 薄膜/Ti 基板素子の抵抗変化

Fig.2. Resistance change of Cr-Al thin film/Ti substrate element during 120-hour constant temperature holding test

文　献

(1)丹羽英二･佐々木祥弘：電学論 E, 134, 385～391 (2014)

(2)佐々木祥弘･丹羽英二：令 8 電気学会全大, 同時発表 (2026)

(3)丹羽英二：電学論 E, 138, 294～300 (2018)

©2026 IEE Japan

可視光レーザーを用いたレーザーハイドロホンによるディジタル変調波形の検出

古家　凜*，津田　紀生，水嶋　大輔（愛知工業大学）

Detection of Digitally Modulated Waveforms Using a Laser Hydrophone with a Visible-Light Laser

Rin Furuya, Norio Tsuda, Daisuke Mizushima (Aichi Institute of Technology)

１．背景

水中無線通信は主に水中音響通信が主流であり、信号検出には圧電型ハイドロホンが広く用いられている。しかし、乱流や気泡などの擾乱下では性能が低下する。半導体レーザーの自己結合効果に基づくレーザーハイドロホンは、音場との非接触性によってこの問題を解決できる。この効果は、発光した光とレーザー共振器に戻ってきた反射光との干渉によって生じる [1]。これまでの研究では、赤外線レーザー(IR laser)を用いたレーザーハイドロホンにより、ディジタル変調信号の検出とビット誤り率(BER)の測定を行った。しかし、この波長帯は水による吸光係数が大きく、水中での計測には最適ではないと考えられる。そこで、本研究では可視光レーザー(VIS laser)を用い、BER を測定して、その結果を赤外線レーザー使用時と比較する。

２．実験概要

図 1 に実験装置を示す。レンズと半導体レーザーはレーザーマウント内に収めている。IR laser の定格発振波長は 840 nm であり、水の吸光係数は 2.93×10^{-7}と大きい。VIS レーザーの波長帯は 520 nm であり、吸光係数は 1.32×10^{-9} である [2]。実験に用いるレーザーパワーは 3 mW である。水槽の直径は 300 mm である。音源には OKI 製の OST2140 を使用し、レーザービームに対して直角の位置に 50 mm 離して設置する。

ランダムビット列を各種ディジタル変調方式に基づいて変調し、その信号を音源より水槽内へ入射した。合計 1000 ビットより BER を算出した。ディジタル変調方式は FSK(Frequency Shift Keying)、ASK(Amplitude Shift Keying)、BPSK(Binary Phase Shift Keying)、QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)、16QAM(16 Quadrature Amplitude Modulation)の 5 種類とし、基本周波数f_0は 200 kHz、基本振幅 A_0は 60 Vp-p とする。FSK では変調周波数差Δf =50 kHz を用い、送信ビット ”0” では周波数を f_0、送信ビット”1”では$f_0+\Delta f$とした。ASK では変調度m =0.8 を用い、送信ビット “1” の振幅をA_0、送信ビット “0” の振幅を$(1-m)A_0$とした。BPSK では、送信ビットが “0” と “1” で、180°の位相反転が起きるようになっている。QPSK では、送信ビット “0”、“1”、“2”、“3” に応じて位相を 90° ずつ変化させた。16QAM では、4 ビットごとに 1 つの 16QAM シンボルへ変換し、上位 2 ビットを I 成分(同相成分)、下位 2 ビットを Q 成分(直交成分)に対応させた。I および Q の振幅レベルはそれぞれ{-3, -1, +1, +3}にマッピングした。

Table 1.　Experimental results

Modulation schemes	BER (IR Laser)	BER (VIS Laser)
ASK (m = 0.8)	15.6	7.1
ASK (m = 0.5)	16.4	9
FSK (Δf = 50 kHz)	6.8	1
FSK (Δf = 25 kHz)	9.7	5.3
BPSK	3	2.3
QPSK	5.6	3.2
16QAM	8.4	5.1

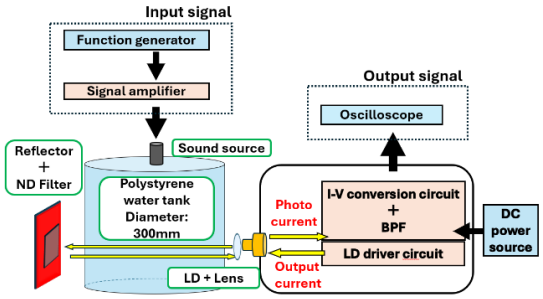


Fig. 1.　Experimental setup

３．実験結果

IR レーザー、VIS レーザーでの BER 測定結果を表 1 に示す。表 1 よりどの変調方式においても、BER が VIS laser において低くなった。これまでの研究により、自己結合効果によって生じる雑音の強度は戻り光の強度よりも半導体レーザーの活性層から検出面方向に出射する後進光の強度に依存していることが示されている。表 1 の結果は、VIS laser の波長の方が水の吸光度が低いため、雑音の少ない低いパワーでも十分な反射光強度が得られた結果 BER が改善されたと考えられる。

文　献

(1) K. Fukuyama et. al., Optical Review, Vol.32, pp.557-566, 2025.
(2) George M. Hale et. al., Vol.12 Issue3, Querry, pp.555-563, 1973.

©2026 IEE Japan

傾斜センサの静特性を基にした模擬出力による傾斜角判別システムの応答評価

下尾　浩正*[1]，南部　幸久[2]，寺村　正広[1]
([1]佐世保工業高等専門学校，[2]有明工業高等専門学校)

Response Performance Evaluation of Tilt Angle Detection System with Simulated Output Based on Static Characteristics

Kosei Shimoo*[1], Yukihisa Nanbu[2], Masahiro Teramura[1]
([1]NIT (KOSEN) Sasebo College, [2]NIT (KOSEN) Ariake College)

１．まえがき

自然災害による物体の転倒は，物損や機能停止を招き，復旧に長時間を要することが多い。転倒直前には傾斜角が急変するため，この変化を高速に検知できれば，警報や制御動作を発動する時間的余裕が得られる。転倒防止機構と傾斜角判別システムを組み合わせることで，物損抑制と被害低減に寄与すると考えられる。

筆者らは，傾斜角に応じた電圧を出力する光学式傾斜センサ部と，出力電圧から傾斜角を判別し，判別結果を論理レベルで出力する傾斜角判別部からなる，傾斜角判別システム(1)を開発しており，十数マイクロ秒オーダで応答することを特徴としている。従来，傾斜角判別システムの応答時間を，傾斜センサ部の発光素子にパルスを与えてから，傾斜角判別部が判別結果を出力するまでの時間として計測してきた(1)。しかし，傾斜角判別システムの実使用では，電源投入後に傾斜角判別システムが動作した状態で使用するため，発光素子へのパルス入力は電源投入時のみである。実使用に即した応答時間を評価するには，傾斜角をできる限り高速に変化させる必要があるが，傾斜ステージを機械的に高速変化させるには限界がある。

本稿では，傾斜センサ部の静特性を計測し，計測した静特性をファンクションジェネレータで模擬出力することで，傾斜角の高速変化を再現し，傾斜角判別システムの応答限界を評価した結果を報告する。

２．傾斜角判別システム

傾斜角判別システムは，光学式傾斜センサ部と傾斜角判別部から構成される。傾斜センサ部は，測定対象の傾斜角を検出するため赤外線発光素子 1 個（IR LED）と受光素子 2 個（Ptr_L, Ptr_R）を平面上に配置し，対面には常に水平を保つ反射鏡（mirror）を設置している。水平状態（図 1 左）では Ptr_L と Ptr_R は同一光量を受光し，同電圧を出力する。正方向に傾斜すると（図 1 右）Ptr_L が Ptr_R より多く受光するため Ptr_L の出力電圧が高くなる。傾斜センサ部の構成

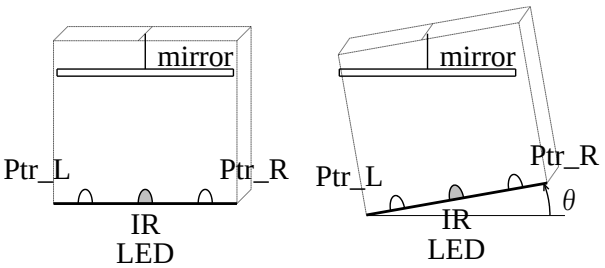


図 1　光学式傾斜センサ部の構造
Fig.1. Structure of the Optical Tilt Sensor Part

により，傾斜角に応じた 2 種類の電圧を出力する。傾斜角判別部は，センサ部から入力される 2 種類の電圧を基に，閾値を設定した複数のニューラル比較器で並列処理を行う。2 種類の電圧の組み合わせが特定の範囲にある場合，その範囲に対応する傾斜角判別結果を論理信号「1」で出力する。

３．実験方法

傾斜角判別システムの応答性能を評価するため，まず，試作した傾斜角判別システムを用いて，−5.0°から＋5.0°の範囲で 0.1°刻みの傾斜角を設定し，傾斜センサ部の 2 種類の出力電圧を計測して，傾斜角と電圧の対応関係を静特性として求めた。次に，取得した静特性を基に傾斜角の変化を模擬する電圧波形を作成し，ファンクションジェネレータの任意波形機能で出力した。電圧波形は−5.0°から＋5.0°までの傾斜角に対応する 2 種類の電圧の変化を 1 周期とした。そして，傾斜センサ部をファンクションジェネレータに置き換え，傾斜角判別部の出力をオシロスコープで観測し，入力電圧の変化に対応して論理信号が正しく出力されることを確認した。

応答性能の評価は，模擬する電圧波形の周期を 10.0 μs，5.0 μs，2.5 μs，2.0 μs と段階的に減少させ，論理信号が誤判別または出力不能となる条件を応答限界として判定した。なお，傾斜角判別部の出力数は 11 個であるが，オシロスコープのチャネル数の制約により同時測定できないため，2ch ずつ順次観測した。

©2026 IEE Japan

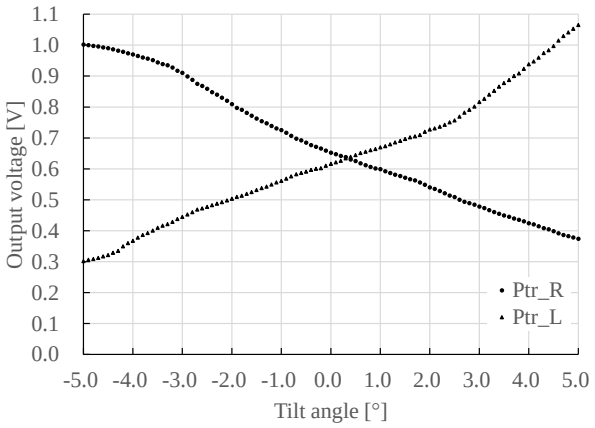


図２　傾斜センサ部の静特性
Fig.2. Static Characteristics of the Optical Tilt Sensor

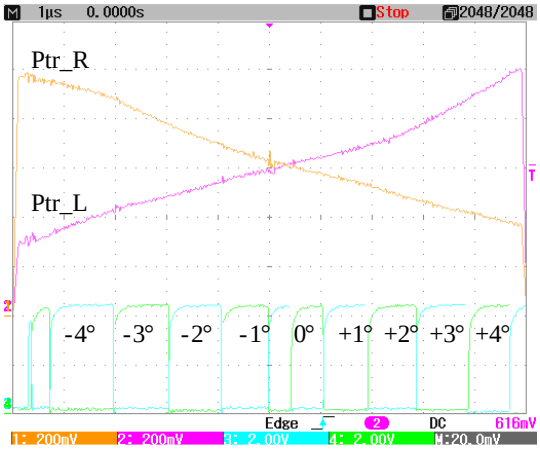


図３　模擬電圧入力時の出力結果(10.0 μs)
Fig.3. Result of Output with Simulated Voltage Input (10.0 μs)

４．実験結果

傾斜センサ部の静特性の実験結果を図 2 に示す。−5.0°のとき Ptr_R が最大電圧， Ptr_L が最小電圧となり，両者の交点は 0.0°付近の電圧であることを確認した。

次に，静特性を模擬する電圧波形（周期 10.0 μs）を入力とした際の傾斜角判別システムの出力を図 3 に示す。図 3 の上段は模擬電圧波形，下段はシステムの論理信号出力を示し，論理信号は判別時に 5 V を出力している。オシロスコープのチャネル数の制約により，出力は 2ch ずつ観測したため，複数の実験結果から出力波形部分のみ切り出して図示した。システムの出力は，左から−5°，−4°，…，0°，+1°，…，+4°，+5°に対応しており，傾斜角判別が正しく行われていることを確認した。同様に 5.0 μs および 2.5 μs の実験結果も正しく行われていることを確認した。図 4 に周期 2.0 μs の結果を示す。−5°，−4°，−3°の判別が正しく行われていないことを確認した。

５．考察

図 2 の結果から，Ptr_R と Ptr_L の出力電圧の交点は 0.3°付近であり，理論値である 0.0°とはわずかに異なる。しかし，傾斜角に応じて 2 種類の電圧の組合せが一意に決定されるため，差異は傾斜角判別に影響を与えない。

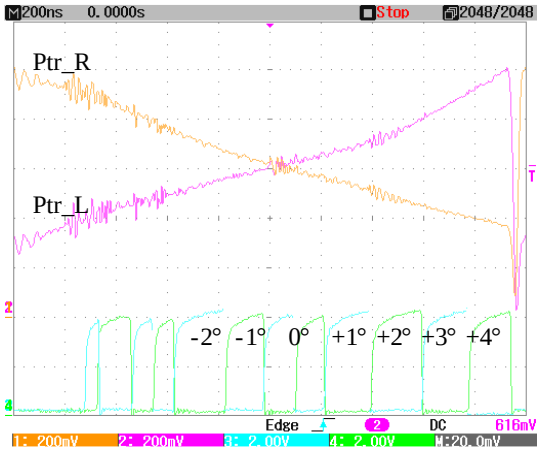


図４　模擬電圧入力時の出力結果(2.0 μs)
Fig.4. Result of Output with Simulated Voltage Input (2.0 μs)

本実験では傾斜角判別の境界を n±0.5°に設定した。設定値に基づき，図 3 に示す結果では，例えば −4°の判別は入力電圧の組み合わせが −4.5°から −3.5°の範囲に対応する場合に行われる。0°の判別のみ水平を境に 2 段階に分けており，判別結果が正しいことが確認できる。同様に周期 2.5 μs まで確認できた。一方，図 4 の周期 2.0 μs の結果では模擬電圧出力が不安定となり，−5°，−4°，−3°の判別が正しく行われていない。正の角度では模擬出力電圧が概ね安定し，判別結果も正しいことから，応答限界の要因として模擬出力電圧のノイズの影響が考えられる。さらに，試作システムではニューラル比較器を 4 個単位で基板に実装しており，負の角度に対応する基板のグランド構成が電圧安定性に影響を与えている可能性がある。

６．まとめ

傾斜角判別システムの応答性能を実使用条件で評価するため，傾斜センサ部の静特性をファンクションジェネレータで模擬出力し，応答性能を確認した。評価の結果，−5.0°から+5.0°までを 2.5 μs で変化させた場合でも応答可能であることを確認した。

今後は，応答限界の要因解析を行うとともに，転倒防止機構との連携実験を通じて実使用環境での有効性の検証などが課題である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23K04336 の助成を受けたものです。

文　献

(1)下尾浩正，南部幸久，寺村正広：光学デバイスとニューラル比較器による高速傾斜センサシステム，第 40 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 7P2-PS-24，(2023)

©2026 IEE Japan

形状記憶合金膜アクチュエータの面内初期伸長のための SU-8 サポート機構の形成

飯野　嬉優*，長坂　慶大，峯田　貴（山形大学）

Fabrication of SU-8 support mechanism for initial in-plane extension of shape memory alloy film actuator

Y Iino, Y Nagasaka, T Mineta (Yamagata University)

１．緒言

人の皮膚への振動刺激により質感や記号の提示を目指した様々な触覚ディスプレイが開発されている[1]。指腹部では，1 Hz 程度での横方向への振動では，垂直方向に比べ 4 倍の力を要するが，振幅は 0.6 倍で感知できることが報告されており[2]，横振動型の触覚ディスプレイも開発されてきた[3]。筆者らの研究グループでは，形状記憶合金(SMA)膜のアクチュエータに初期伸長を与え，横方向に収縮させる横振動型の触覚ディスプレイの開発に取り組んできた[4][5]。

面内で初期伸長するために，SMA アクチュエータ基板を接着したダミープレートごと湾曲して伸長する手法が考案されたが，煩雑なプロセスの確立には至っていない[4]。そこで，厚膜ネガ型レジスト SU-8 製のサポート機構を SMA アクチュエータ基板へ接合して面内で横方向に初期伸長する手法にも取り組んでおり，ばねの根本部へのひずみにより伸長途中での破断が課題となっている[5]。

本研究では，最大ひずみの異なる SU-8 サポート機構を設計して作製し，伸長時に許容できる最大ひずみを調べた。また，ひずみを低減した SU-8 サポート機構を作製し，伸長挙動を評価した。

２．触覚ディスプレイの構造と動作原理

図 1 に触覚ディスプレイの構造と動作原理を示す。SMA アクチュエータ層とサポート機構層を接合し，SMA 側の基板を剥離した後，SMA ビームを外力によって面内で初期伸長して最下層の配線基板へ固定する構造であり、左右の SMA ビームを交互に通電加熱して形状回復効果により収縮させる。厚膜である SU-8 サポート機構層に基板貫通電極(TSV)で配線を設け，SMA 層と配線基板を導通させる構想である。

３．種々ひずみの SU-8 ばねの設計と作製

面内伸長型 SMA アクチュエータ 1 素子を 200 μm 初期伸長するためのサポート機構として，SMA アクチュエータ 1 素子(1.2 mm×1.36 mm[4])に対応する SU-8 のばねを設計した。中央部にストッパーを設けて，200 μm 伸長後に中央部のストッパーを接触するようにした[5]。

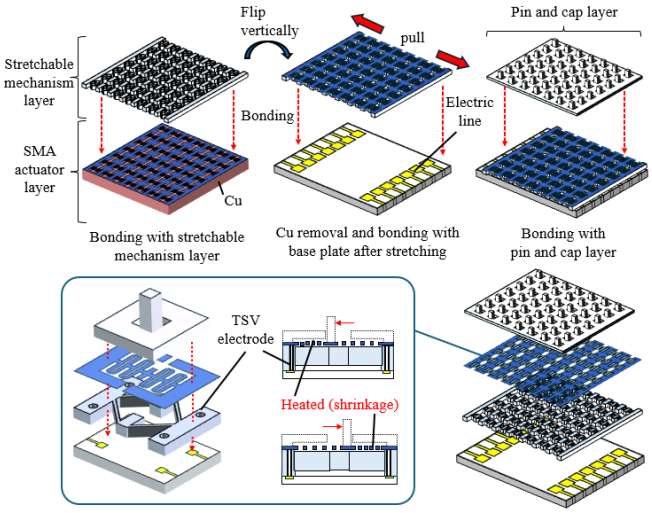


図 1 考案した触覚ディスプレイの構造および動作原理

Fig.1 Proposed structure and motion principle of tactile display.

サポート機構に組み込むばねに許容される最大歪みと適する形状を把握するために，所定の伸長(200 μm)の際に 4～6%程度の異なる最大歪みになるように，図 2 に示す A～D パターンの 4 種類を FEM 解析(Fusion 360, 非弾性解析，ヤング率：4.94 GPa)に基づいて設計した。

各ばねパターンを 14 個直列にしたものをそれぞれ 3 本ずつ並列に作製した。図 3 に SU-8 機構の作製プロセスを示す[5]。ガラス基板をアンモニア加水処理し，犠牲層となるポジ型レジスト(東京応化工業，OFPR-800LB，3 μm)を塗布した上にリソグラフィによって SU-8 構造体を形成した。BHF 溶液により基板とレジスト間を高速に剥離し[6]，OFPR を溶解した。図 4 に剥離後の SU-8 サポート機構を示す。パターン C ではばね根本部の鋭角な箇所でパターンが太くなったが，概ね良好に自立させて形成することができた。

４．SU-8 サポート機構の変形挙動の評価

作製した SU-8 サポート機構をマイクロステージに固定した治具に接着し，横方向に伸長して顕微鏡で変形挙動を評価した。伸長した結果を図 5 に示す。パターン A, B,および C は合計 2910 μm（1 ばね当たり 208 μm）まで伸長しても破断せず，最大ひずみ 4%程度であれば伸長可能であること

©2026 IEE Japan

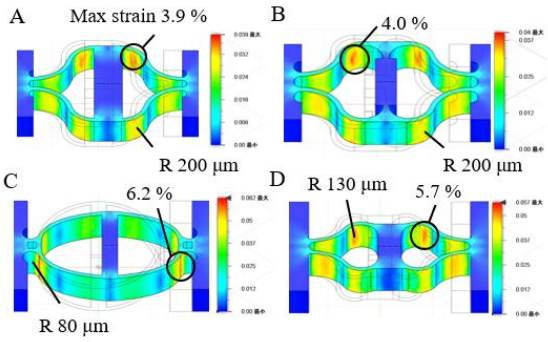


図 2 異なる歪みを持つ SU-8 ばねパターン
Fig.2 Various SU-8 spring patterns with different maximum strains.

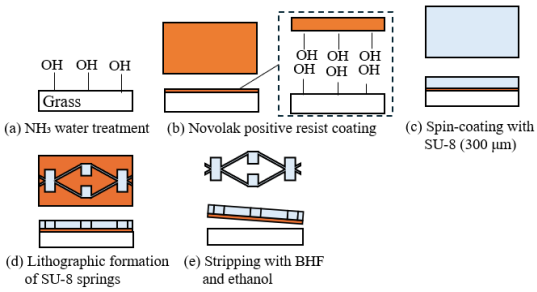


図 3 SU-8 サポート機構の作製プロセスフロー
Fig.3 Fabrication process flow of SU-8 support mechanism.

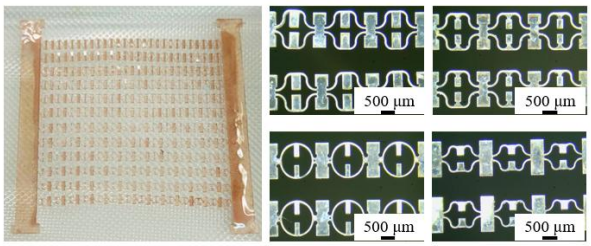


図 4 形成した SU-8 サポート機構
Fig.4 Fabricated SU-8 support mechanism.

がわかった。パターン D のみ破断が生じた。また，パターン B および C は個々のばねが均等に伸長したが，パターン A および D ではばらつきが生じた。

以上の結果に基づき，パターン B のばねのみを配置したサポート機構を作製し，同様の手法で伸長の挙動を評価した。図 6 は伸長前後の様子である。一箇所でばねが破断したが，他は所定の伸長量 1400 μm(1 ばね当たり 200 μm)まで個々のばねが均等に伸長した。全てのストッパーは伸長量 2100 μm(1 ばね当たり 300 μm)でほぼ同時に接触し，接触後にばねの剛性が上昇することを確認した。今後はストッパーが 200 μm の伸長時に接触するようにストッパー長さの微調整が必要である。

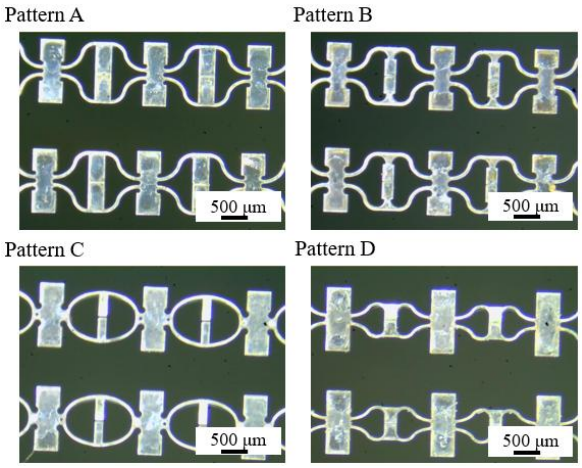


図 5 伸長後の各種パターンの SU-8 ばね
Fig.5 SU-8 spring patterns after stretching.

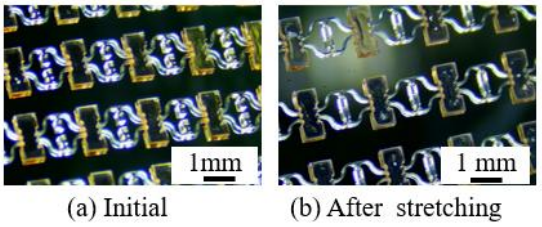


図 6 SU-8 サポート機構の初期状態と伸長後
Fig.6 Initial and elongated states of SU-8 support mechanism.

5．結言

SMA アクチュエータを初期伸長する横方向に引き伸ばし可能な SU-8 面内伸長サポート機構の歪みと破断発生の関係を評価し，ばね形状を決定した。所定の伸長量 1400 μm(1 ばね当たり 200 μm)でばねが均一に伸長すること，ストッパー接触後にばねの剛性が上昇することを確認した。今後は，面内伸長機構層に基板貫通電極(TSV)も作製して SMA アクチュエータと導通させ，ピン/キャップ層を搭載した触覚ディスプレイを形成し，触覚提示の評価を行っていく。

文　献

(1) H. Kajimoto, IEEE Trans. on Haptics, vol.5, No.2, pp.184-188 (2012).
(2) J. Biggs, M. A. Srinivasan, HAPTICS 2002, Vol.1, pp.121-128 (2002)
(3) H. Kajimoto, IEEE Trans. Haptics, Vol.12, No.3, PP. 257-268 (2019)
(4) 長坂慶大，峯田貴，第 42 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 11P2-D-5, pp.1-4(2025)
(5) 長坂慶大，飯野嬉優，峯田貴，マイクロマシン・センサシステム/ケミカルセンサ合同研究会, MSS-25-082, pp.11-13 (2025)
(6) H. Mitsui, H. Kashiwazaki, T. Mineta, J. Robotics and Mechatronics, Vol.32 No.2(2020)

©2026 IEE Japan

円筒リソグラフィ手法によるチューブ型多軸フォースセンサ機構部への配線形成

今野　竜之介*，滝口　創太，峯田　貴（山形大学）

Electric lines formed on mechanism of
a tubular multi-axis force sensor using cylindrical lithography

Ryunosuke Konno*, Souta Takiguchi, Takashi Mineta (Yamagata University)

1．緒言

血管内等へガイドワイヤやカテーテルへ血管壁や患部への接触力などを検知するために Fiber Bragg Grating (FBG)や[1] ,MEMS チップ型等の多軸フォースセンサ[2] の搭載が試みられている。

本研究グループでは，ガイドワイヤ先端部に搭載するチューブ型多軸フォースセンサを目指し，φ0.6 mm 程度の円筒面への 60~70 μm 厚の厚膜レジスト SU-8 のビーム構造をもつチューブ型センサ機構部と抵抗配線パターンの**円筒リソグラフィによる**形成に取り組んできた[3][4]。約 60 μm 厚の SU-8 ビームの段差部付近では配線形成用のレジスト膜厚が不均一になり，また，積層薄膜金属のエッチングプロセスが適正化されておらず，幅 10 μm 程度の均一なパターニングが困難であった[4]。

本研究では、薄膜の SU-8 ビーム構造にひずみ検知用の抵抗配線などを形成後に厚膜の SU-8 ビーム構造を積層する形成手法を考案し、平板フォトマスクを用いて分割して円筒リソグラフィを行う手法により，ひずみ検出用の抵抗配線などの形成に取り組んだ。

2．チューブ型多軸フォースセンサの構造

チューブ型多軸フォースセンサの構造を図 1 に示す。厚膜レジスト SU-8 (60 μm)のビーム構造上への配線のパターニングではなく，薄膜 (5 μm)のビーム構造を形成後に配線パターンを形成し、その上へ厚膜のビーム構造を積層する構造にした。各 SU-8 ビームは、3 軸方向の外力に対応して個別に変形する配置にし，ひずみ検出用の幅 10 μm の Cr 膜 (100 nm 厚)抵抗配線を個別に配置した[4]。また、円筒リソグラフィとエッチングによる配線パターン形成精度を考慮し、Au/Cr 膜 (100 nm/50 nm)のコンタクトパッド部を設け，それを介して Cu/Cr 膜 (3 μm/100 nm 厚)の導通配線と Cr 膜抵抗配線を導通する構造とした。

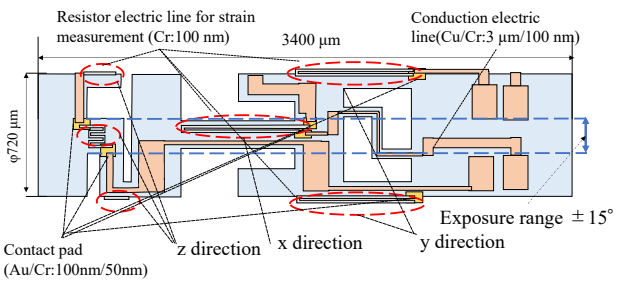


図 1 チューブ型多軸フォースセンサの構造
Fig.1 Structure of cylindrical multi-axis force sensor mechanism

3．作製プロセス

＜3.1＞平板マスクによる円筒リソグラフィ　レジストはコアパイプへディップコーティングし，パイプを回転ステージに取り付け、平板フォトマスクを線接触させて光ファイバーUV 光源(波長 365 nm，露光量 21.6 mW/cm^2 ,露光範囲 φ4 mm)を用いて露光をした。フォトマスクと円筒試料が線接触している箇所以外の領域はギャップのある露光となる。中心角±45°の範囲(ビーム部は中心角±15°以内)にマスクパターンが位置するようにして，回転と露光を 4 回繰返した。

＜3.2＞SU-8 ビーム構造および配線の形成プロセス　形成プロセスフローを図 2 に示す。図 2(a)に示すように、研磨したφ0.6 mm の真鍮パイプに SU-8 をディップコートし，円筒リソグラフィによりビーム構造 (5 μm 厚)を形成した。次に，図 2(b)のように Au (100 nm)/Cr (50 nm)を回転スパッタにより成膜し，ネガ型レジスト(4 μm 厚)パターンを形成して Au 膜と Cr 膜をそれぞれエッチングしてコンタクト用パッド部を形成した。次に図 2(d)に示すように，Cu (3 μm)/Cr (100 μm)を成膜した後、ポジ型レジスト (3 μm 厚)パターンを形成し(図 2(e))，Cu 層のみを導通配線パターンにエッチングした(図 2(f))。その後，ポジ型レジスト (3 μm 厚)パターンを形成して，露出した Cr を抵抗配線パターンにエッチングした(図 2(g))。

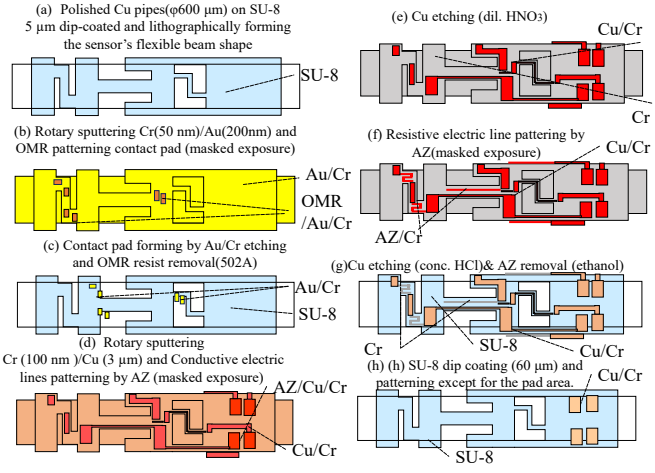


図 2　円筒面へのひずみ検出および導通用の配線形成プロセス
Fig.2　Fabrication process flow of strain detection and conductive electric lines on cylindrical surfaces

©2026 IEE Japan

最終的には，60 μm 厚の SU-8 ビーム構造を積層し、真鍮パイプを溶解してチューブ型ビーム機構部を独立させる構想である。

＜3.3＞各種薄膜金属層エッチングによる配線形成結果

図 3 は導通配線と抵抗配線のコンタクト用パッド部を形成するために，Au/Cr 膜上へネガ型レジスト(東京応化工業、OMR100-35cp)を 4 μm 厚にディップコートして、平板マスクを用いて円筒リソグラフィした後に，Au 層と Cr 層をエッチングした結果である。Au/Cr パッド部が約 30 μm 程度円周方向も長軸方向も同様に拡大しており，パイプとフォトマスク間のわずかに生じたギャップによる広がりと考えられる。

図4は，約3 μm厚のポジ型レジスト(メルクエレクトロニクス, AZ P1350)パターンを用いて，Cu/Cr導通配線とCr抵抗配線の形成をそれぞれ形成した結果である。Cu/Cr 導通配線はサイドエッチングでレジストパターンよりも幅が 6 ～ 9μm 減少し，また，Cr 抵抗配線は 2 μm 減少し約 8 μm 幅となったが，配線形状を良好に形成することができた。Au/Cr パッドパターンが大きくなったために抵抗配線と重なる箇所が生じ，今後，配線に余裕を設けるなどの改良が必要である。

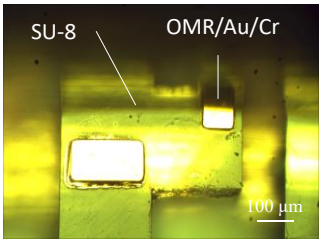


図 3　OMR マスクパターン除去前の形成した Au/Cr パッド部
Fig.3 Au/Cr pads formed before removing the OMR mask pattern

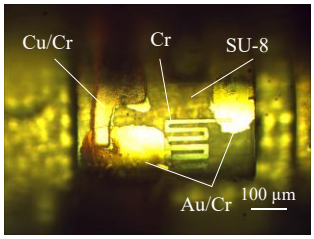


図 4 エッチングにより形成した Cu/Cr 導線配線および Cr 抵抗配線
Fig. 4 Cu/Cr conductive electric lines and Cr resistive electric after the etching processes

＜3.4＞円筒面への厚膜 SU-8 パターン形成の予備検討　図 5 は、ライン間とライン間隔がそれぞれ 50 μm のテストパターンの平板フォトマスクを用い、円筒面（φ600 μm パイプ）上の膜厚 50 μm の SU-8 を円筒リソグラフィした結果である。フォトマスクとの接触部から離れてギャップが大きくなるにつれて、円筒面に対して斜めの入射になる。入射角に対する形成した SU-8 の円筒面に対する側壁の角度を図 5 に示す。また，SU-8 の屈折率の文献値 1.67[5]から予想される角度も図中に示す。入射角 70 ° 付近では，屈折率より大きくなるが，入射角 50 ° までは屈折率に近い角度になることがわかった。

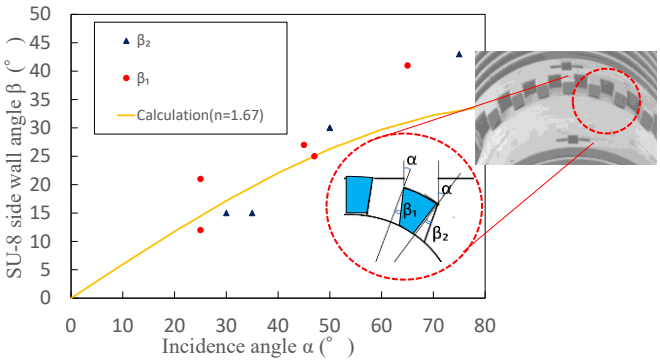


図 5 円筒リソグラフィで形成した厚膜 SU-8 の側壁の角度と入射角度の関係
Fig.5 SU-8 Relation between sidewall angle of cylindrically lithographed thick SU-8 and incident angle

4. 結言

SU-8 製ビーム構造をもつチューブ型フォースセンサの形成を目指し，円筒面の 5 μm 厚の SU-8 ビーム構造の形成と，回転スパッタ成膜，円筒面リソグラフィ，およびエッチングにより，Au/Cr のコンタクトパッド部の形成，Cu/Cr の導通配線，および Cr 抵抗配線の形成に取り組んだ。円筒面への厚膜 SU-8 リソグラフィでは、露光範囲±50° の領域において，屈折率に近い角度になることがわかった。

今後は，パッドと配線のパターニングには露光時の広がりも考慮して配置を改良し，また，薄膜の SU-8 ビーム構造にひずみ検出用の配線などを形成した後に厚膜の SU-8 ビームパターン(60 μm 厚)を積層形成して，チューブ型フォースセンサを形成していく。

文　献

(1) ,Katsumi Yokoyama, Hiroshi Nakagawa, Dipen.Cshah, Hendrik Lambert, Giovanni Leo, Nicolas Aeby, Atsushi Ikeda, Jan V. Pitha, Palph Lazzara, Warren M. Jackman: “Novel Contact Force Sensor Incorporated in Irrigated Radiofrequency Ablation Catheter Predicts Lesion Size and Incidence of Steam Pop and Thrombus” Circulation:Arrhythmia and Electrophysiology., pp354-362. (2008)
(2) Beibei Han, Yong-jin, Muhammad Hamidullah, Angel Tsu-Hui Lin and Woo-tae Park: ”Sillicon nanowire-based ring-shaped tri-axial force sensor for smart integration on guidewire”, J. Micromech. Microeng.24 (2014)
(3) 峯田貴，芳賀洋一，江刺正喜:”非平面フォトファブリケーションによる形状記憶合金パイプからアクチュエータ作製”，IEEJ Trans. SM, Vol. 123, No.5, pp-158-162 (2003)
(4) 滝口創太，峯田貴, “円筒リソグラフィによるチューブ型多軸フォースセンサ機構の形成”，マグネティック/マイクロマシン・センサシステム/ バイオ・マイクロシステム合同研究会 ,MAG-23-114, MSS-23-052, BMS-23-029, pp1-3(2023)
(5) 中村 克生, Florian LARRAMENDY, 平井 義和, 土屋 智由, Oliver PAUL, 田畑 修, “厚膜ネガレジスト用三次元リソグラフィシミュレータの開発”，日本機械学会,講演論文集 (2016.9.11－14)

©2026 IEE Japan

絶縁層の硬度変化における MIM 型プラズモンセンサの感度特性

川原　奏風*, 松谷　貴臣（近畿大学）,　村井　健介（産総研）

Sensitivity of MIM plasmon sensors to changes in the hardness of the insulating layer

Kanon Kawahara, Takaomi Matsutani (Kindai University), Kensuke Murai (AIST)

１．はじめに

金属中における自由電子の集団的量子振動であるプラズモンは，光と相互作用することで特定の波長の光を吸収する性質を持つ。この特性を利用した表面プラズモン共鳴（SPR）はセンシング技術に応用されている。本研究では，金属層（M 層）の間に誘電体層（I 層）を挟み込んだ MIM（Metal-Insulator-Metal）構造デバイスを開発し，圧力センサとしての応用を試みてきた。このセンサは，圧力によって I 層の厚さが変化することで吸収波長がシフトする原理を利用している。ここでは，I 層の機械的強度の変化による圧力に対する感度特性の評価について報告する。

２．実験方法

2 枚のガラス基板上にそれぞれ 50 nm および 200 nm の銀薄膜を真空蒸着し，M 層とした。M 層の間には 2 液性熱硬化型シリコーンゴム（KE-109EA/B, 信越化学工業株式会社）とシリコーンオイル（KF-96-20CS, 信越化学工業株式会社）を I 層として塗布し，MIM 構造を形成した。その作製したデバイスを金属板で挟み卓上マッフル炉に入れ 100℃3 時間で硬化した。本実験では，シリコーンゴム（A/B）とオイル（O）の混合比率を A:B:O=1:1:(3, 5, 8)の 3 種類の I 層でデバイスを作製した。

デバイスに白色 LED 光を照射し，反射光をファイバ分光器で測定した。次に，図 1 の測定装置で加えた圧力に応じたスペクトルの変化を記録した。MIM デバイスのシリコーン（I 層）の膜厚を d，屈折率を n，プラズモンの吸収ディップの次数（自然数）を m とすると，ディップ吸収波長 λ_m は式（1）のように表せる。

$$2nd = m\lambda_m \qquad (1)$$

式（1）から加圧による膜厚 d の変化量（d/d_0）を算出した。

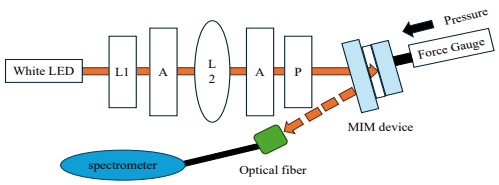


図 1 反射スペクトル測定の概略図

Fig.1. Schematic diagram of reflection spectrum measurement

３．結果および考察

作製した 3 種類の MIM デバイス（A:B:O=1:1:(3, 5, 8)）に対して，フォースゲージを用いて垂直方向に加圧し，その時の反射スペクトル変化から圧力と膜厚の変化率（d/d_0）を算出した。図 2 に圧力と膜厚変化率の関係を示す。

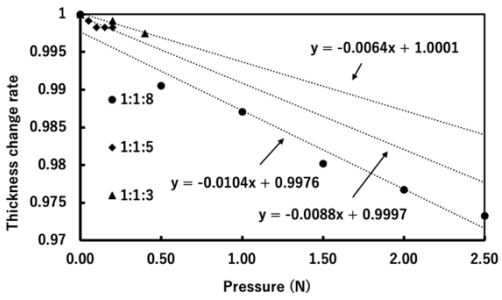


図 2 混合比による I 層の膜厚変化−圧力依存性

Fig.2. Dependence of mixing ratio on I layer thickness and pressure

すべての配合比において，圧力の増加に伴い膜厚がほぼ直線的に減少する挙動が確認された。配合比 1:1:3 では-0.0064, 1:1:5 では-0.0088，1:1:8 では-0.0104 となり，オイル配合比の増加に伴い感度が向上することが確認された。

この感度向上の要因としては，シリコーンゴム内のオイル含有率増加に伴いヤング率の低下が挙げられる。本結果は，センサのサイズや膜厚を変更することなく，オイルの混合比率の調整のみで感度や測定レンジを制御可能である。すなわち，微小な圧力を検出したいときは高オイル比率，広範囲の圧力を検出したいときは低オイル比率を選択できるといった，用途に応じた柔軟なセンサ製作が可能となる。

また，I 層の強度を高めて圧力測定を行った場合，測定圧力を高めるにつれ，吸収ディップが消滅し測定が続行できなかった。これは，加圧することによってガラス基板がたわみ，I 層の厚みが局部的に減少したため M 層の平行度が保てなくなったことが原因と示唆される。したがって，ガラス基板のたわみ強度も考慮する必要がある。

４．まとめ

I 層の機械的強度を変化させることにより測定圧力のワイドレンジ化が可能となった。

©2026 IEE Japan

初期ひずみを印加した伸縮性ナノシート一体型静電アクチュエータの作製

芹澤 快*，森 和哉（豊橋技術科学大学），齋藤 優人，藤枝 俊宣（東京科学大学），
權 益賢，崔 容俊，野田 俊彦，澤田 和明，髙橋 一浩（豊橋技術科学大学）

Fabrication of a pre-strained stretchable nanosheets integrated with an electrostatic MEMS actuator

Kai Serizawa, Kazuya Mori(Toyohashi Tech.), Masato Saito, Toshinori Fujie(Science Tokyo),
Ik Hyun Kwon, Yong-Joon Choi, Toshihiko Noda, Kazuaki Sawada, Kazuhiro Takahashi (Toyohashi Tech.)

１．研究背景・研究目的

新たな表示素子として、表面プラズモン共鳴と呼ばれる光の異常透過現象を利用し、環境光で表示可能なプラズモニックカラーフィルタの研究が進められている。先行研究では、伸縮性の高いポリスチレンーポリブタジエンーポリスチレントリブロック共重合体（SBS）ナノシート上に金属格子を形成し、伸縮動作をすることで可視光域の赤から青紫色までの表現を実現している(1)。この伸縮性カラーシートの静電駆動に向け、MEMS 技術と組み合わせた、伸縮性ナノシート一体型 MEMS 静電アクチュエータの研究を行っている（図 1)。特に SBS ナノシートひずみが一定の値を超えるとヤング率が低下する非線形特性が報告されていることから(2)、本特性を利用し、5%程度の初期ひずみを SBS ナノシートに印加することにより駆動に必要な静電引力を小さくでき、低電圧駆動が可能になると考えた。そこで、本研究では静電 MEMS アクチュエータにおける SBS ナノシートへの初期ひずみの有効性の検討を目的とした。

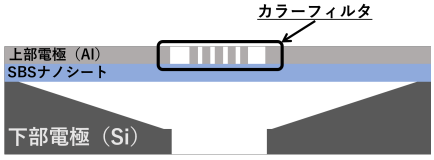


図 1 伸縮性ナノシート一体型 MEMS 静電アクチュエータ
Fig. 1 Stretchable nanosheets integrated with an electrostatic MEMS actuator.

２．初期ひずみを印加する提案手法・デバイス作製

SBS ナノシートへの初期ひずみの有効性を検討するため、自立した SBS ナノシートを伸長させた状態で犠牲膜のポリビニルアルコール（PVA）へ接着し、上部電極のパターニングを行った。初期ひずみの印加量は、SBS ナノシートの透過特性から膜厚を算出することで評価した。初期ひずみなしの SBS ナノシートの膜厚が約 370 nm であるのに対し、初期ひずみありでは約 340 nm へと減少させ、膜厚方向に約 8.1 %の初期ひずみが印加した。下部電極は、マスク開口部の粗密を段階的に変化させることで、レジストに傾斜を作製するグレースケールリソグラフィを用いて、緩やかかつ長い傾斜電極を Si 基板上に作製した。Al/SBS ナノシート構造の上部電極を水中でリリースし、下部電極基板に転写してデバイスを作製した。作製した静電アクチュエータは、初期ひずみを印加した上部電極を用いることで、上部電極と下部電極のアライメント時にしわの寄らないデバイスの作製に成功した。

３．駆動実験・結果

作製したひずみ印加デバイスと無ひずみのデバイスを用いて上下電極間に電圧を印加した。初期ひずみなしではほとんど変化が見られなかったが、ひずみ印加デバイスでは、印加電圧 60 V から駆動が確認され、160 V 印加時にはスティクションによる大きな駆動が生じた。また、160 V 印加時に深さ方向へ 約 78.6 μm の駆動が確認され、一部において SBS ナノシートの膜厚変化が確認された(図 2)。これらの結果より、初期ひずみによってデバイスの低電圧駆動が可能であることが示された。

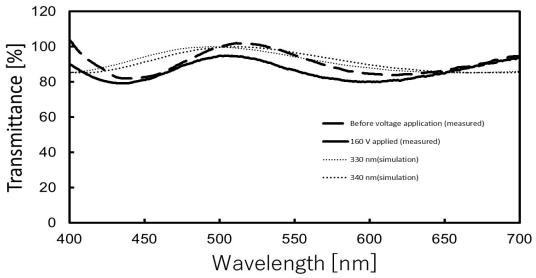


図 2 静電駆動時の SBS ナノシートの透過スペクトル
Fig. 2 Transmission spectrum of the SBS nanosheet in electrostatic operation.

文 献

(1) H. Kumagai, T. Fujie, K. Sawada, K. Takahashi : Advanced Optical Materials vol. 8, no.15, 1902074, 2020

(2) K. Takahashi, T. Fujie, R. Teramoto, I. Takahashi, N. Sato, S. Takeoka, K. Sawada, MRS Commun., vol. 9, no. 1, pp. 381-389, 2019, doi:10.1557/mrc.2019.11.

©2026 IEE Japan

低弾性率材料を用いた大変形バルーン特性を活かした圧力駆動バルーンアクチュエータ

岡　大智*，堀　祐登，小西　聡　（立命館大学）

Pneumatic Bending Actuator Utilizing Large-deformation Balloon Characteristic of Low-Elasticity Material

Daichi Oka, Yuto Hori, Satoshi Konishi (Ritsumeikan University)

１．研究背景

近年、ソフトアクチュエータに関する研究が活発に行われており、圧力駆動は、その重要な駆動原理となっている。圧力駆動ソフトアクチュエータの一つに構造体の膨張を利用し駆動する方式がある。我々は、圧力駆動力変換曲げアクチュエータにおける膨張量に着目し、研究を行ってきた[1]。本アクチュエータの駆動原理を図 1 に示す[2]。バルーンの膨張力を力変換機構により屈曲力へと変換しているため、大変形バルーンの実現により駆動特性の向上が期待できる。

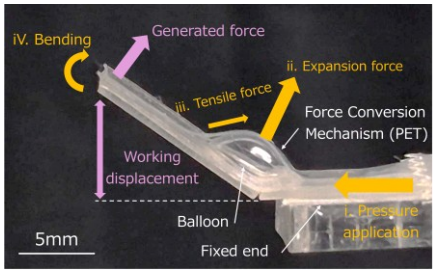


図 1 圧力駆動力変換曲げアクチュエータ

Fig.1.Pneumatic bending actuator with a conversion mechanism

２．低弾性率材料を用いた大変形バルーン

従来は、柔軟性、生体適合性を有する PDMS(KE-1606)を使用してきた。本研究では、大膨張バルーンの実現に向け、PDMS よりもヤング率の低い Ecoflex を用いた。

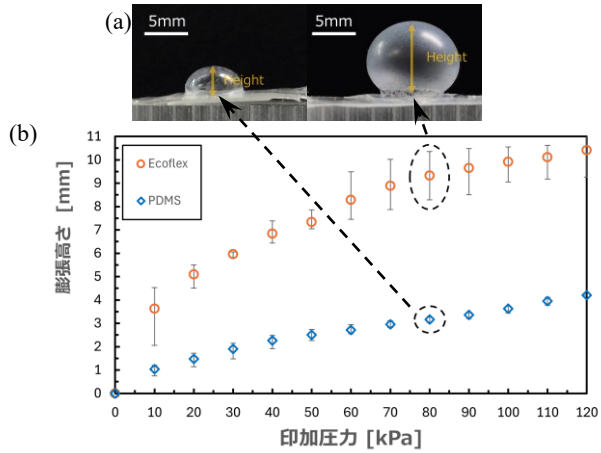


図 2 バルーン膨張高さ比較 (a) バルーン膨張画像 (b) 評価結果

Fig.2. Expansion height comparison(a) Expanded image (b) Result

図 2a に膨張の様子の比較結果(80kPa)を示す。また、図 2b に製作したバルーンの膨張高さ変位の評価結果を示す。図 2 より、Ecoflex によるバルーンの大変形実現に成功した。

３．圧力駆動曲げアクチュエータの駆動特性評価

駆動特性評価は、ロードセルを用いて作用変位(図 1)に対する発生力を、3 種類の印加圧力条件下において測定することにより行った。図 3 に評価結果を示す。100kPa 印加時を例にすると、Ecoflex デバイスは変位 8mm 時の発生力を計測できているが、PDMS デバイスは計測できていないため、駆動範囲が拡大していることが確認できた(図 3 点線の枠内)。この結果より、大変形バルーンの採用により、同一圧力条件下における最大作用変位が向上し、高位置対象に力を与えることが可能であることが示された。

一方、対象物の変位が低い場合、PDMS デバイスの発生力の方が高くなっていることが確認した。本アクチュエータは力変換フィルムとバルーンの位置関係が屈曲力に影響を与えるため、低位置の対象物に対しては PDMS デバイスの方が高くなったと考えられる。

今後は、大きな膨張量を活かしたデバイスの設計最適化に向け、バルーンと力変換フィルムの位置設計を行う。

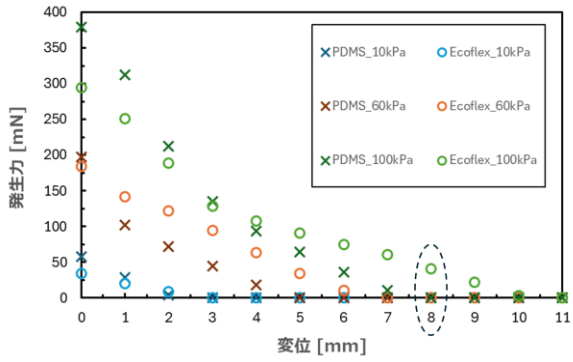


図 3 各印加圧力における変位-発生力の評価結果

Fig.3.Relationship between displacement and generated force for each applied pressure

文　献

(1) S. Konishi et al. : Scientific Reports., 1~10 (2020)
(2) Hori, Y., Konishi, S., Microsystems & Nanoengineering, 1–12, 2023.

©2026 IEE Japan

SAE-MEMS 共振器の解析環境に関する研究

得能　京介*，曽野　記生（立命館大学），土屋　良重（サウサンプトン大学），
山根　大輔（立命館大学）

Simulation Environment for SAE-MEMS Resonators

Kyosuke Tokuno, Toshiki Sono (Ritsumeikan University), Yoshishige Tsuchiya (University of Southampton),
Daisuke Yamane (Ritsumeikan University)

１．背景・目的

高度な情報処理を行う AI(Artificial Intelligence)チップが急速に普及し、集積回路の消費電力量増大が問題となっている。そこで、物理的挙動を低エネルギーの物理システムとして活用するリザバー・コンピューティング(RC: Reservoir Computing)の研究開発が行われている。RC は、学習コストを低コストに抑えつつ、高い計算性能を実現できるため、AI チップの消費電力低減に向けた研究開発が近年急速に進んでいる。MEMS(微小電気機械システム)分野や NEMS(ナノ電気機械システム)では微小な非線形素子を用いた物理リザバーが提案されており、集積化技術による AI チップ応用が期待されている。MEM/NEM 振動子の RC 応用に向けた電気的な非線形制御技術として、従来は外部回路から電圧・電流を加えていたが、電力消費増と素子サイズ拡大が課題であった。そこで本研究では荷電処理不要な自己組織化エレクトレット（SAE: Self-Assembled Electret）[1]に着目し、MEM/NEM 振動子の非線形性制御応用を目指す。当研究室では微弱な振動から発電する SAE-MEMS 環境振動発電素子の研究に取り組む中で MEMS の機械的特性と回路の電気的特性を同時に解析する等価回路モデルを構築した[2-3]。本設計技術を MEMS 共振器設計に適用し、MEM/NEM 振動子の RC デバイス応用を目指す。

そこで本研究の目的は、SAE-MEMS 共振器の解析環境の構築である。

２．SAE-MEMS 共振器解析モデルの構築

SAE-MEMS 共振器の解析モデルを図 1 に示す。上部電極が x 変位した時にはたらく復元力 F_{kc} は、

$$F_{kc} = -kx - c\frac{dx}{dt} - \beta_m x^3 \tag{1}$$

と表される。SAE 表面電位と交流電圧による静電引力 F_e は、

$$F_e = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \frac{S}{(l_{gap} - x)^2}(V_{SAE} + V_{ac})^2 \tag{2}$$

と表される。したがって可動電極の運動方程式は、

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = F_{kc} + F_e \tag{3}$$

と Duffing 方程式の形で表される。

これまで、SAE-MEMS デバイスの解析環境構築にあたっては、主に回路シミュレータの LTspice を用いてきた。しかしながら MEM/NEM 振動子で取り扱うナノレベルの計算においては精度が不十分であった。そこで本研究ではプログラミング言語の Python を用いた数値解析を行った。Python による微分方程式の数値的解法として、今回のモデルでは高精度に計算可能なルンゲ・クッタ法を用いた。

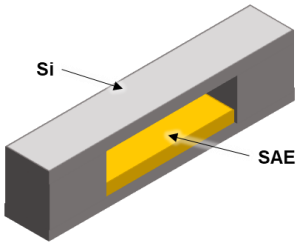


図 1.　MEMS 共振器の解析モデル
Fig.1, Analysis model of SAE-MEMS Resonator

３．Python による数値解析結果

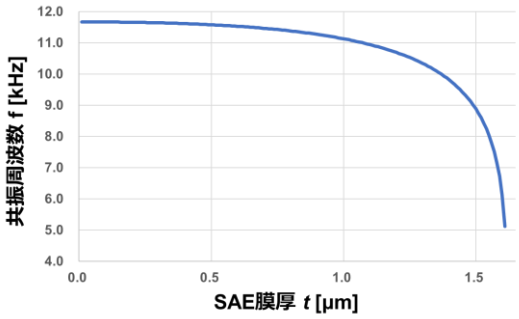


図 2.　解析結果
Fig.2, Analysis result

数値解析より得られた SAE 膜厚-共振周波数グラフを図 2 に示した。SAE 膜厚の増大と共に共振周波数は低下し、非線形応答が現れた。

４．結論

本研究では MEM/NEM 振動子のリザバー・コンピューティング応用に向け、SAE-MEMS 共振器の解析環境を Python にて構築した。解析結果より共振器の非線形性を確認し、今後の共振器作製に向けた見通しを得た。

文　献

(1)D. Yamane et al., Appl. Phys. Lett., vol. 119, p. 254102, (2021).

(2)K. Tokuno et al., IEEJ TEEE E, vol. 19, No. 5, (2023).

(3)K. Tokuno et al., PowerMEMS2023, (2023).

©2026 IEE Japan

磁性流体を用いた端面反射型ヘテロコア光ファイバ SPR センサの磁場応答特性

花田　颯人*，阿部　孝明，Deepro Banerjee，西山　道子（創価大学）

Magnetic field response of an end-reflection hetero-core optical fiber SPR sensor using magnetic fluid

Hayato Hanada, Takaaki Abe, Deepro Banerjee, Michiko Nishiyama (Soka University)

１．はじめに

光ファイバセンサは小型で耐電磁ノイズ性に優れ，磁場検出に適している。一方，表面プラズモン共鳴(SPR)を用いることで光ファイバ屈折率センサは高感度化される。我々はこれまでの研究で，異種コアファイバを融着して構成するヘテロコア構造を採用し，光ファイバ SPR センサの応用を提案している[1]。本研究では，磁性流体を用いて，SPR センサを端面反射型を採用しヘテロコア光ファイバ磁場センサを試作し，磁場印加に伴う磁性流体の屈折率変化から磁場を検出できることに基づき[2]，反射光スペクトルと光強度の時間応答から磁場に対する応答を実験的に評価した。

２．実験構成

提案するヘテロコア光ファイバ磁場センサは，図 1(a)に示すように，コア径 50 μm のマルチモード光ファイバ(MMF)伝送路と，コア径 3 μm のシングルモード光ファイバ(SMF)小切片を融着したヘテロコア構造を用いた。光ファイバ側面に 60 nm，端面に 300 nm の金を成膜することで、端面反射型 SPR センサを構築した。ヘテロコア構造の SMF

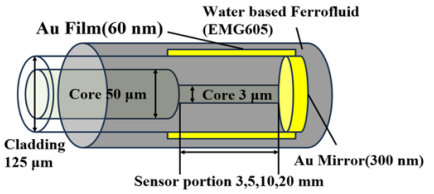


図 1:提案磁場センサ
Fig. 1 Sensor configuration

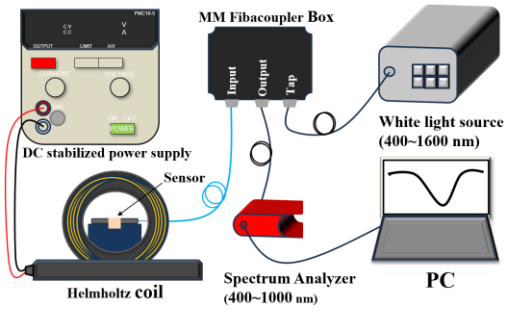


図 2:磁場センサ評価試験構成
Fig. 2 Evaluation setup configuration

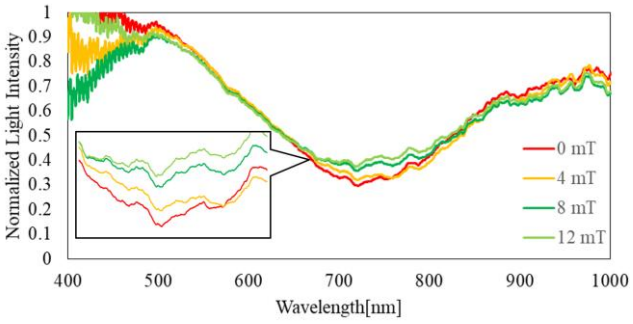


図 3:磁場に対する反射光スペクトル特性
Fig3.Experimentally obtained spectra of the proposed sensor

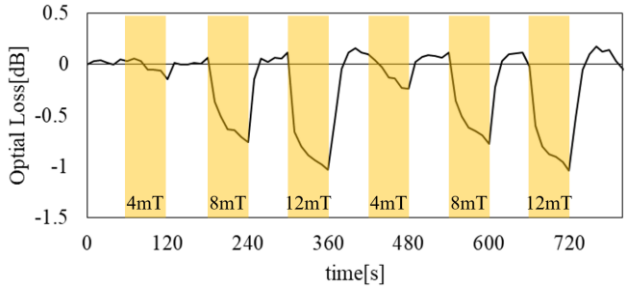


図 4: 提案センサの光損失時間応答結果
Fig. 4: Real-time response in the optical loss change

挿入長は 10 mm を採用し，そのヘテロコア部周囲に磁性流体(EMG605)を保持するためにガラスキャピラリで封入した。図 1(b)に示す通り，ヘルムホルツコイルを用いて 0–12 mT の磁場を段階的に印加しながら光ファイバからの反射光スペクトルを測定し，磁場 応答を評価した。また時間応答は，中心波長 750 nm の光損失データをプロットした。

３．実験結果

図 3 に示す通り，波長 750 nm 付近に SPR による吸収が確認され，また印加磁場の増加に伴う吸収スペクトルに変動が見られた。図 4 に示す通り，磁場を段階的に変化させた際，磁場強度に応じた光損失の減少が確認され，また磁場の印加有無に対して再現性のある周期的応答が観測された。12 mT の印加に対して最大約 1.03 dB の変動を確認した。

文　献

(1) M. Iga et al., Sens. Actuators B, 106 (1) 363-368 (2005)

(2) 阿部孝明他，信学技報, 124 (381) 80-83 (2025)

©2026 IEE Japan

交差アーチ構造による
ヘテロコア光ファイバ加速度計の多軸化の検討

廣瀬　篤紀，渡辺　一弘，西山　道子（創価大学大学院）

An Examination of the Multiaxial Development of Hetero-core Optical Fiber Accelerometer Using Crossed arch structure

Atsuki Hirose, Kazuhiro Watanabe, Michiko Nishiyama (Soka University)

１．研究背景

近年，地震等の自然災害による構造物の倒壊を防ぐため，損傷を早期検知するために，歪みセンサ，加速度計による構造ヘルスモニタリング技術が提案されている[1]. 我々は，耐環境性に優れたヘテロコア光ファイバによる加速度計を提案し[2]，特に半円アーチ型の光ファイバ加速度計は，3 軸方向検出を実現している[3]．この従来提案している加速度計は半円アーチが 3 方向に筐体外側に突出するため，それらを覆うと筐体サイズが大きくなり，また構造的に不安定で横感度に課題があった．そこで本研究では，より構造的に安定した交差アーチ構造を用いたヘテロコア光ファイバ加速度計を提案し，感度多軸化の検討を行ったので報告する．

２．センサ・実験構成

ヘテロコア光ファイバは，コア径の異なる光ファイバを挿入・融着して作製される光ファイバセンサである．本研究では，コア径 9 μm のシングルモード光ファイバ(SMF)伝送路上にコア径 3 μm の SMF 小切片を 1 mm 挿入・融着して作製されたヘテロコア光ファイバセンサを利用する．

Fig.1 に交差アーチ構造を用いたヘテロコア光ファイバ 3 軸加速度計の構成を示す．ヘテロコア部を含む SMF 伝送路は，2 本のアーチを描くよう筐体に固定され，交差点には粘着ラバー製付加質量が設置された．ヘテロコア部はベース付近に 2 か所，交差点の側方に 1 か所配置され，3 方向の振動を検知可能となっている．ベース付近に設置された 2 つの光ファイバセンサをセンサ X, Y，交差点側方の光ファイバセンサをセンサ Z とする．

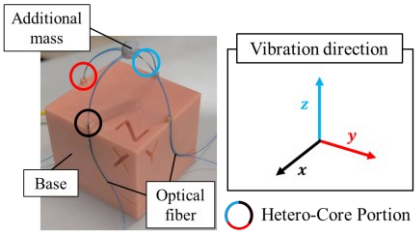


Fig.1　Configuration of Hetero-core optical fiber accelerometer using crossed arch structure

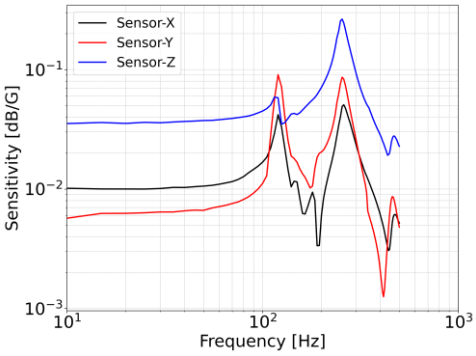


Fig.2　Frequency characteristics when z-vibration was approved

本加速度計の特性を評価するため，周波数応答特性実験を行った．提案加速度計は，参照用加速度計とともに加振器に固定され，5-500 Hz の範囲で 5 Hz 刻みで周波数スイープされた正弦波振動が印加され，得られた時系列データに FFT 処理を施すことで周波数応答スペクトルを得た．加速度感度は，参照用加速度計の出力を基準として提案加速度計印加した周波数成分の比から算出された．振動印加方向は Fig.1 中に示す x, y, z の 3 方向とする．

３．実験結果

Fig.2 に，振動印加方向を z としたときの周波数応答特性を示す．主軸となるセンサ Z は，第 1 共振周波数 255 Hz，共振周波数の 4 分の 1 以下の帯域における感度は 0.0374 dB/G を示した．また，センサ X, Y の第 1 共振周波数は 120 Hz と同じ共振点となり，センサ X, Y が交差アーチの中心軸に対して適切に対称配置されていたことが確認された．同じ z 方向に振動を印加したとき，最も感度が高いセンサはセンサ Z となり，他の主軸でも同様の傾向が確認されたため，提案加速度計の構成は単軸時と比較して大きく構造を変更せず感度の 3 軸化が可能であると考えられる．

文　献

(1) J. Li et al., Sensors, 15, 8831-8851(2015)

(2) M. Nishiyama et al., Sens Actuators A Phys., 209, 154-160 (2014)

(3) M. Kadokura et al., IEEE Trans. Instrum. Meas., 71, 1-8(2022)

©2026 IEE Japan

ラングミュア・ブロジェット膜作製装置向け MEMS 表面張力計の開発

村上 修一*，柏木 行康，筧 芳治，金岡 祐介，小栗 泰造
（大阪産業技術研究所）

Development of MEMS surface tension meter for LB film production equipment

Shuichi Murakami, Yukiyasu Kashiwagi, Yoshiharu Kakehi, Yusuke Kanaoka, Taizo Oguri
(Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology)

１．はじめに

ラングミュア・ブロジェット膜（LB 膜）とは、水面と空気の界面に形成された、分子一つの厚みを持つ油膜（単分子膜）、またはそれを基板に積層転写したものである。近年、LB 膜は、高い均一性、分子配向性、最少の材料で表面を被覆できる物質効率の高さなどの特長を有することから、幅広い材料科学分野でさかんに研究されている[1]。LB 膜は、水面に膜材料である両親媒性分子を展開した後、せき板で膜を圧縮し緻密な単分子膜を得る。この際に表面張力をモニタする必要があるが、表面張力計の測定子のサイズが大き過ぎると製膜の妨げになることもあり、逆に小さ過ぎると感度が不足する問題を抱えている。本研究では、MEMS 技術を使って Si 片持ち梁上に歪み抵抗素子を、更に水面と接触する同梁先端部にフィン形状の測定子を形成して、表面張力を電気抵抗変化として高感度に検出する小型表面張力計の開発を行ったので報告する。

２．MEMS 表面張力計の試作と評価

表面張力計は、水面の表面張力により片持ち梁先端の測定子が片持ち梁面の鉛直下方向に 10 mN 程度の力で引っ張られた際に、歪み抵抗素子の抵抗が 1 %程度変化するように、有限要素法を援用して設計し、520 μm 厚の Silicon on Insulator (SOI) ウェハから MEMS プロセスにより試作した。大きさは幅 5 mm、全長 18 mm（測定子 5 mm、ばね部 8 mm、固定部 5 mm）とし、SOI ウェハの Si デバイス層からなるばね部の厚さは 20 μm とした。平坦な片持ち梁表面には熱酸化膜、歪み抵抗素子を形成した。片持ち梁裏面には SOI ウェハの埋込酸化膜があり、先端部から 5mm までの間の Si バルク層をフィン形状にして表面張力計の測定子とした。

図 1 に試作した MEMS 表面張力計の表側と側面の写真を示す。ここで、歪み抵抗素子は Cr 薄膜をスパッタリング法により膜厚 100 nm 製膜して、フォトリソグラフィにより片持ち梁の固定端から長さ 2.5 mm、幅 70 μm の 1 往復の配線を形成し、抵抗 130 Ω ～ 140 Ω とした。同薄膜のゲージファクタは 12.9 であった。表面張力計の測定子は裏面からの Bosch 方式 Si 深掘り (DRIE) 装置（MUC-21, SPT 社）により裏面からエッチングを行い、幅 50 μm ～ 100 μm、ピッチ 200 μm ～ 700 μm にて一部の Si バルク層を残し、フィン形状の測定子を形成した。

電気化学測定装置を使って歪み抵抗素子に一定電流 2 mA を流しながら、表面張力計の測定子を水面に接触させた際、水面から離した際の歪み抵抗素子両端間の電圧を測定した。図 2 に結果を示す。同図より、測定子が水面に接触したとき、水面から離れ始めとき、完全に離れたときに、明確に測定電圧が変化していることが分かる。講演では、測定結果から分かった表面張力計としての性能について議論する。

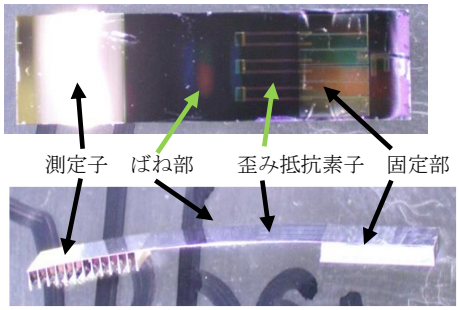


図 1　試作した MEMS 表面張力計（上：表側、下：側面）
Fig.1. Prototype MEMS surface tension meter

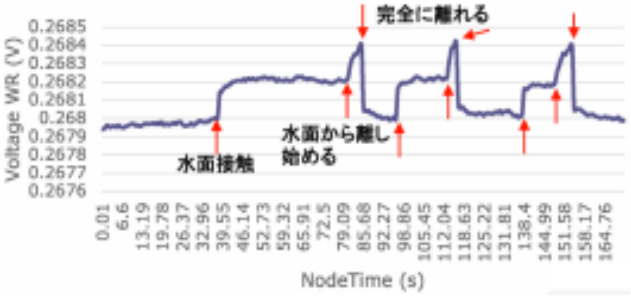


図 2　電気化学測定装置を使った評価結果
Fig.2. Evaluation results using an electrochemical measurement device

文　献

(1) Osvaldo N. Oliveira, Jr. et al.,: Chem. Rev. **122**, 6459 (2022)

©2026 IEE Japan

PDMS ダイアフラムを用いた能動型触覚ディスプレイの形成および動的特性の評価

山﨑　孝太朗*，宍戸　道明，徐　嘉楽（鶴岡工業高等専門学校），峯田 貴(山形大学)

Fabrication and characterization of refreshable tactile display with PDMS diaphragm

Kotaro Yamazaki*, Michiaki Shishido, Jiale Xu (Tsuruoka College), Takashi Mineta (Yamagata University)

1．緒言

人間の五感の中でも視覚による情報が最も多いとされている[1]。平成 18 年度の厚生労働省の調査報告によると視覚障碍者は 31.5 万人となり，身体障碍者全体の 8.8%を占めている。視覚障碍者の文字情報の取得を支援するツールとして，これまで様々な駆動手法を用いた触覚ディスプレイが開発されてきた[2],[3]。触覚ディスプレイには，指で表面をなぞることで知覚するスタティック型の触覚ディスプレイと能動的にピンを駆動させることにより情報を伝達するダイナミック型の触覚ディスプレイの 2 種類に分類されているが，ダイナミック型はスタティック型に比べ情報伝達精度は低下する課題がある[4]。

指の皮膚下の触覚受容器のメルケル小体は，1 Hz 程度の低周波数領域で 100 μm 以上の振幅で知覚できることが報告されており[5]，本研究では，皮膚の触覚受容器の感知する閾値を十分に超える高出力の触覚ディスプレイの実現を目指し，触覚ディスプレイ素子の形成方法の確立および動作特性を評価した。

2．触覚ディスプレイの構造および動作原理

図 1 に触覚ディスプレイの構造を示す。触覚ディスプレイは，フレーム部，ピン部およびダイアフラム部によって構成し，刺激提示用に 2×3 個の可動ピンをアレイ状に配置した構造である。ピンの寸法は JIS-T-0921 の規格に基づき[6]，ピンの縦点間および横点間をそれぞれ 2.8 mm とした。供給口より各ピンの可動部へ加圧の有無により PDMS (Polydimethylsiloxane)ダイアフラムを変形させることで，ピンを上下方向に振動させ，指先の皮膚に振動刺激を提示する。

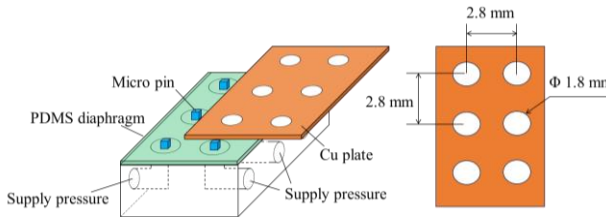


図 1. 触覚ディスプレイの構造
Fig.1 Structure of tactile display

3．触覚ディスプレイの作製プロセスおよび形成結果

触覚ディスプレイの作製プロセスを図 2 に示す。図 2(a)に示すように犠牲層を形成した Cu 基板上に，主剤および硬化剤を 10:1 の割合で混合した PDMS をスピンコーティングし，PDMS ダイアフラム (約 10 μm 厚)を形成した。次に PDMS ダイアフラム上にフォトリソグラフィプロセスにより SU-8 ピンを形成した (図 2(b))。犠牲層を溶解して Cu 基板から剥離した PDMS ダイアフラムをアクリル治具と接合した (図 2(c))。最後にフォトリソグラフィおよび硝酸エッチングにより貫通エッチングして形成した Cu フレームと接着した (図 2(d))。

作製した触覚ディスプレイを図 3 に示す。触覚ディスプレイは良好に形成することができ，加圧 (~40 kPa) しても

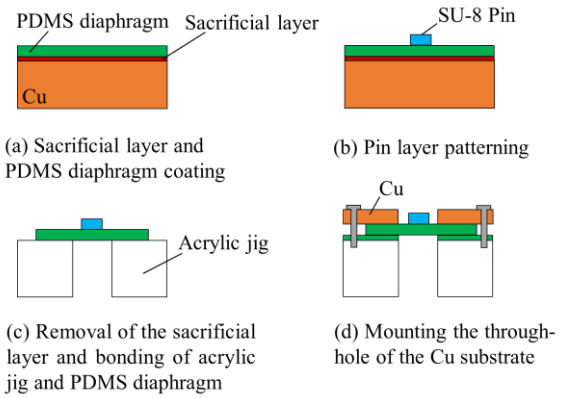


図 2. 触覚ディスプレイの作製プロセス
Fig.2 Fabrication process of tactile display

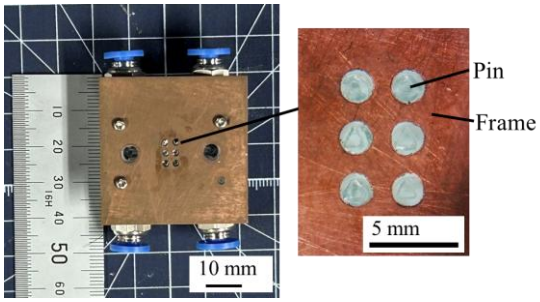


図 3. 作製した触覚ディスプレイ
Fig.3 Completed tactile display

©2026 IEE Japan

PDMS ダイアフラムの破断や剥離等が発生しないことを確認した。

4. 動作特性の評価

エアコンプレッサから供給された圧縮空気を減圧弁により，一定圧力をデバイスに供給し，電磁弁の開閉によってデバイスを駆動させた際の動作振幅をレーザー変位計により測定した。PDMS ダイアフラムの耐性を考慮し，印加可能な圧力の上限を 40 kPa とした。無加圧時および印加圧時 (30 kPa)でのピン部の様子を図 4 に示す。ピン部がフレーム部と干渉せず，作製した PDMS ダイアフラムが良好に変形することを確認した。

各印加圧力に対する発生振幅の測定結果を図 5 に示す。印加圧力 10 kPa では，触覚受容器メルケル小体の感知できる 100 μm をわずかに超える 130 μm の振幅が得られ，40 kPa では，振幅が 2 倍より大きい 280 μm まで増加し，触覚受容器の知覚限界の数倍の振幅が得られることがわかった。印加圧力 10 kPa~40 kPa では，200 ms 程度でピン部が最高点に達し，初期位置に戻るまでに 400 ms~500 ms 程度要することがわかった。空気の供給および排気には 600 ms~700 ms 程度必要であることがわかり，低周波数領域での使用は可能であることがわかった。皮膚の受容器マイスナー小体の感度が良い周波数 15 Hz 以上での使用を考える場合には，応答速度が追いつかないことも考えられ，駆動周波数による振幅減少などへの影響も今後評価していく。

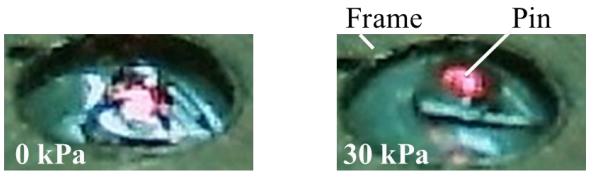


図 4. ピン無動作およびピン動作 (30 kPa)
Fig.4 Images of the unactuated and the actuated pin (30 kPa)

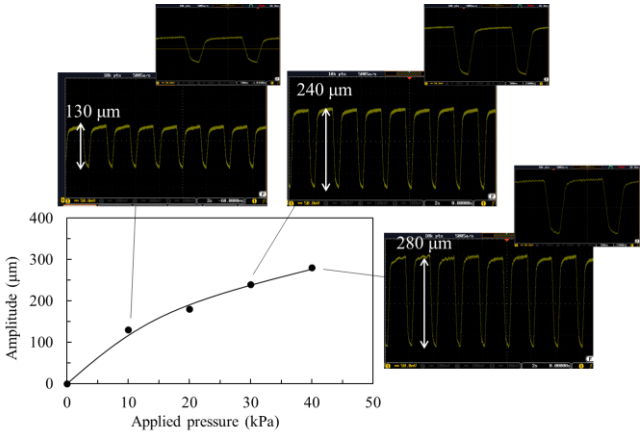


図 5. ピンの発生振幅および印加圧力の関係 (0.5 Hz)
Fig.5 Relationship between vibration amplitude of pin and applied pressure (0.5 Hz)

作製した触覚ディスプレイの 2 ピンを交互に加圧した個別駆動では隣接したピンに影響を与えず，複数のピンの同時駆動も可能であることを検証した。

5. 結言

触覚受容器メルケル小体の閾値を超える高出力の触覚ディスプレイを目指し，PDMS ダイアフラムを用いた触覚ディスプレイを作製し，動作特性の評価を行った。

作製したデバイスは，PDMS ダイアフラムの破断や剥離が発生せず，高い歩留まりで良好な触覚ディスプレイを形成することができた。

印加圧力 10 kPa では，130 μm の発生振幅を得ることができ，40 kPa では，280 μm まで振幅が増加し，触覚受容器メルケル小体の知覚限界を超える振幅が得られることがわかった。また，複数のピンを同時に個別動作させられることを確認し，振動刺激による複雑な点字の提示も可能であることを示した。

今後，作製した触覚ディスプレイの振幅および発生力の周波数応答特性を評価し，個人差の検証も含め人間の知覚可能な振動刺激パターンを調べていく予定である。

謝辞

本研究の一部は科研費(基盤研究(C) 費課題番号 24K15058)で行われた。ここに感謝の意を表す。

文　献

(1) 林 宏樹・高畑 実:日本ロボット学会誌,Vol.18, No.6, 772~775 (2005)
(2) X. Wu, S. H. Kim, H. Zhu, C.H. Ji, M.G. Allen, IEEE, Microelectromech. Syst, Vol. 21, No. 4, 908~916 (2012)
(3) Juan José Zárate and Herbert Shea, IEEE Trans Haptics, Vol.10, No.1, 106~112 (2016)
(4) 松本 悟志・嶋 脇聡・酒井 直隆 : 人間工学, 261~267 (2011)
(5) 前野 隆司:日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6, 772~775 (2000)
(6) JIS T 0921 : アクセシブルデザイン – 標識，設備及び機器への点字の適用方法 (2017)

©2026 IEE Japan

フレキシブル基板の多重巻きを用いた体腔内 MRI プローブ

竹谷　航大*，鶴岡　典子，芳賀　洋一（東北大学）

Intraluminal MRI probe using multiturn winding of flexible printed circuit

Kodai Takeya, Noriko Tsuruoka, Yoichi Haga (Tohoku University)

１．はじめに

近年、医療分野では出血や傷を抑える低侵襲治療が広がり、内視鏡やカテーテルなど外形が円筒形状の機器が多く用いられている。これらの高性能化、小型化の手段として、本研究ではフォトリソグラフィを用いて作製した単層または多層のフレキシブル基板(FPC)をチューブに接着、巻きつけることで多重化を目指し、巻き付け装置の作製、手法の考案、および試作デバイスとして体腔内磁気共鳴イメージング(MRI)プローブの評価を行った。

本デバイスは MRI 信号の受信コイルを有し、カテーテルの先端に搭載し体内深部の血管や消化管などへ挿入することで、通常の MRI 受信コイルでは撮像困難な冠動脈や胆管等の病変を体内からより高精細に撮像することを目指したデバイスである[1]。現在臨床で使用されている血管超音波内視鏡(IVUS)[2]に比べ、より高精細に広い範囲の情報を得られる。先行研究[1]では電気回路部分のサイズが大きく、血管内への挿入が不可能であったが、巻き付け手法の適用によって電気回路部分の小型化を試み、作製・評価した。

２．作製方法

＜2・1＞巻き付け手法の考案　考案した巻き付け手法と巻き付け装置の写真を図 1 に示す。剛性、耐熱性、生体適合性の観点からポリイミドチューブ(PIT-S、古河電工社)、FPC(厚み 12.5 μm、カプトン、東レ・デュポン社)を使用し、超硬ピンを挿入した状態で巻きつけた。熱硬化型接着剤(EPO-TEK MED-302-3M、EpoxyTechnology.Inc)を卓上型微細塗布装置(NTN 社)を用いて塗布しチューブと FPC を接着し(図 1①)、次にピンバイスにチューブ両端を固定し Z ステージで土台を押し上げ FPC をチューブへ密着させた(図 1②)。その後チューブをピンバイス根本の自動回転ステージ(SGSP-40YAW、シグマ光機社)を用いて回転させ、配線の層間接続を行う場合は導電性エポキシを適宜塗布した(図 1③)。最後に FPC 端に瞬間接着剤を手作業で塗布し、ステージを回転させ工程を終了した(図 1④)。

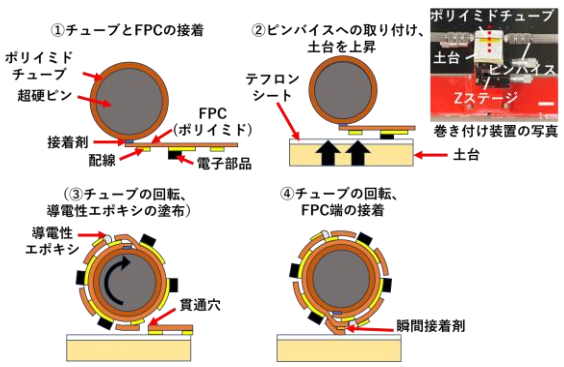


図 1 巻き付け手法

Fig.1. Winding method

＜2・2＞巻き付け手法の評価　巻き付けの定量性、形状の再現性、および性能への影響について評価を行った。性能評価ではポリイミドチューブの径を小さくしていき、15 ×20 mm のポリイミドシートを巻きつけられる最小の径を検証した。評価に用いた端面の観察写真を図 2 に示す。性能評価として最小で内径 0.3 mm、外径 0.38 mm のチューブにシートを巻きつけでき、15 μm 以上の隙間や局所的な剥離は観察されなかった。一方で内径 0.2 mm、外径 0.28mm のチューブでは超硬ピンの剛性が不十分でチューブがたわみ、チューブとシートが密着しないことで巻きつけられなかった。定量性評価として、内径 0.5 mm、外径 0.58 mm のポリイミドチューブに先述したシートを巻き付け、同一サンプルの別断面、別サンプルで 4 つの断面を観察した。4 つの断面での接着剤面積とそれに伴うシートの浮きの面積は 8873 μm²±8.1%に収まっていた。サンプル間とサンプル内のばらつきに有意な差は見られなかった。接着剤の塗布量のばらつきは 2250 μm²であり、巻き付け工程によるばらつきよりも大きかった。巻き付け工程には誤差要因となる手作業が含まれていないことから、ばらつきの主因は接着剤塗布にあると考えられたことから、接着剤をより適したものに変更することで改善が見込める。巻きつけ形状は膨らんでいる部分の面積が径 0.58 mm の円の面積に対し 3.3%であった。真円から形状が変化した分、磁場や電場の分布が変化することが懸念されるが、本研究で使用する径 1.92 mm の場合膨らみは全体の面積の 0.3%であり、影響を無視できると考えている。また、巻き終わりに接着厚みによる膨らみがあった。これは現状手作業である接着剤の塗布を塗布装置によるより精密な塗布に変更することで改善が可能である。

©2026 IEE Japan

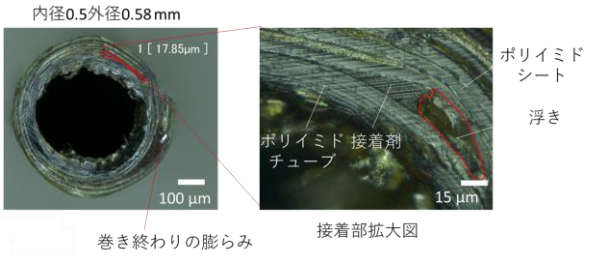


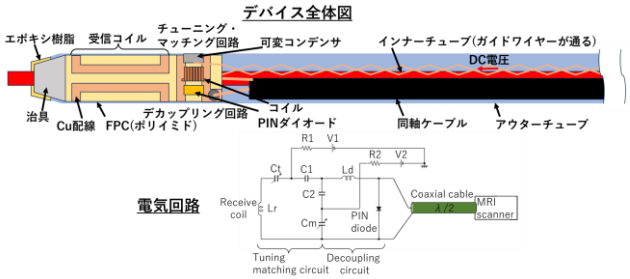
図 2 定量性と形状の評価

Fig.2. Quantitative and shape evaluation

３．体腔内 MRI プローブ

<3・1>デバイスの作製　図 3 に本研究で用いるデバイスの概要を示す。本デバイスは、受信コイル、チューニング・マッチング回路からなる受信回路、およびデカップリング回路で構成され、同軸ケーブルおよび BNC コネクタを介して MRI 装置に接続される。チューニング・マッチング回路は、LC 共振周波数をプロトンのラーモア周波数に一致させ、回路インピーダンスを 50 Ω に整合させる。デカップリング回路は、RF 送信時に PIN ダイオードを ON にして受信コイルを高インピーダンス化し、誘導電流の発生を抑制することで受信コイルおよび MRI 装置を保護する。チューニング・マッチング用コンデンサには、先行研究[1]で試作された MOSFET 型可変容量素子を使用する予定である。MOSFET 型可変容量は、ゲート電圧の印加により容量値を連続的に変化させられるため、制御用としてツイストペアラインの銅線を引き出している。デバイス内部の中空部には、ガイドワイヤー用として内径 0.6 mm、外径 0.72 mm のインナーチューブを挿入し、アウターチューブで封止することで体内挿入を可能としている。デバイスの硬性部長さは 9.6 mm であり、臨床で用いられている IVUS の硬性部長さ 7 mm よりやや長い。また外径は、冠動脈径 3～5 mm に対して 2.3 mm であり、部品実装部では最大 2.8 mm である。

続いて作製プロセスを述べる。厚み 35 μm の銅箔付きポリイミドシート（厚み 12.5 μm、有沢製作所社）を用い、フォトリソグラフィにより受信コイル、配線、電極パッドを含む FPC を作製した。その後、電子部品をはんだ付けで実



装図 3 デバイスの概要図

Fig.3. Schematic diagram of the device

部品が巻き付けに干渉しないよう溝を掘った土台を用いて巻き付けた。最後に層間接続を行い、チューブをカットすることで電気回路部分が完成する。次に同軸ケーブルと銅線を FPC にはんだ付けし、エポキシ系接着剤（Araldite Rapid、KSK 社）で補強した。その後、治具をインナーチューブに通してポリイミドチューブ内腔に挿入し、収縮前内径 3.5 mm、収縮後内径 1.5 mm、肉厚 0.44 mm の熱収縮樹脂製チューブ（TC26-3.0-CR1、ヘラマンタイトン社）で被覆した。最後に 100℃で加熱して熱収縮を行い、先端部を生体適合性のある熱硬化型接着剤（EPO-TEK MED-302-3M、Epoxy Technology Inc.）で封止した。

<3・2>作製結果　作製結果を図 4 に示す。今回はダミーとして定容量コンデンサ、同サイズの非磁性でないダイオード、同軸ケーブルの代わりに銅線へポリイミドチューブを被覆したものを使用した。作製時に部品脱落なく巻き付けでき、断線は観察されなかった。また、受信コイルの層間接続も問題なく行えた。設計に比べ、硬性部長さはエポキシ厚みの増加により 9.9 mm、外径は受信コイル部でアウターチューブ肉厚の影響により 2.6 mm、部品実装部では部品厚み未削減のため 3.5 mm となった。硬性部長さ、外径に関して更なる小型化の必要があり、今後改善を試みる。

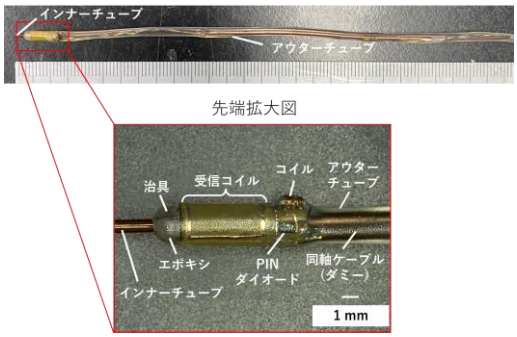


図 4 作製結果

Fig.4. Fabrication results

４．おわりに

考案した巻きつけ手法を提案、評価し、細径なチューブに対し巻き付けが可能であることを示した、MRI プローブとして層間接続を行った配線と部品の多重構造を作製することができ、小型化の可能性を示した。今後はさらなる小型化を目指す。

文　献

(1) 松永忠雄、松岡雄一郎、中園正芳、黒田輝、江刺正喜、芳賀洋一、「小型可変容量を用いた体腔内 MRI プローブの開発 」電気学会論文誌 E（センサ・マイクロマシン部門誌）(2015),Vol.136, No.5, pp.153-159

(2) IVUS マニュアル、本江純子 著、中山書店、2006

©2026 IEE Japan

ヘリカル共振器を用いた３次元バルクキラルメタマテリアルの数値解析

Liu Zhen*, 金森　義明（東北大学）

Numerical Analysis of 3D Bulk Chiral Metamaterials Based on Helical Resonators

Zhen Liu, Yoshiaki Kanamori (Tohoku University)

1. Introduction

Terahertz (THz) waves, spanning the 0.1–10 THz frequency range, have garnered growing attention due to their potential in diverse applications such as nondestructive testing, high-resolution sensing, and sixth-generation (6G) wireless communications[1]. In this frequency range, chiral metamaterials play a pivotal role in manipulating circularly polarized light (CPL), enabling essential functionalities such as circular dichroism (CD) filters and polarization rotators. However, conventional chiral structures are typically designed as periodic arrays or lattices. While these ordered structures exhibit strong chiral responses, they inherently suffer from structural anisotropy, meaning their optical performance depends heavily on the incident angle. This angular dependence often necessitates precise optical alignment mechanisms, limiting their integration into compact or flexible systems. Furthermore, most 2D metasurfaces suffer from limited interaction volumes, restricting the magnitude of polarization modulation. To address these issues, we numerically investigate the optical characteristics of a bulk 3D chiral medium composed of metallic spiral resonators randomly dispersed in a dielectric matrix.

2. Numerical Investigation

In this study, we numerically investigated the intrinsic optical properties of a single metallic spiral resonator using full-wave simulation (CST Studio Suite). The metallic spiral was modeled as gold (Au) with an electrical conductivity of $\sigma = 4.56\times10^7$S/m, while the surrounding medium was set to cyclo-olefin polymer (COP) with a refractive index of 1.52. As illustrated in Fig. 1(a), we analyzed the effect of the geometric dimensions—specifically the number of turns, main radius, pitch, and wire radius—to tune the fundamental resonance frequency to the target THz band and maximize the cross-polarization component. The rationale for focusing on single meta-atom characterization stems from our previously reported bulk fabrication methodology [2,3], conceptually shown in Fig. 1(b). This process entails encapsulating metallic resonators within cubic COP blocks to form discrete meta-grains prior to random dispersion. The physical separation maintained by the COP encapsulation effectively suppresses inter-particle near-field coupling commonly observed in densely packed arrangements. Consequently, the optical response of the bulk medium is predominantly governed by the intrinsic chirality of the individual spirals rather than collective lattice resonances. Therefore, to predict the macroscopic performance of the isotropic bulk medium, we adopted a statistical averaging method wherein the scattering parameters of the optimized unit cell were calculated over full solid angles, thereby emulating the random orientation inherent to the bulk system.

3. Conclusion and discussion

The numerical investigation focused on the optical response of the bulk medium under linearly polarized excitation. By employing the statistical averaging model, we evaluated the transmittance, polarization rotation angle, and ellipticity spectra of the randomized spiral ensemble. The preliminary results indicate that the bulk medium retains significant optical activity, capable of rotating the polarization state of incident light despite the random orientation of the constituent meta-grains. This confirms that the intrinsic chirality of the spiral resonators dominates the macroscopic response, effectively overcoming the structural disorder. Furthermore, the statistical nature of the model suggests that this optical activity is achieved isotopically, independent of the incidence angle. These findings validate the feasibility of the proposed design concept, offering a theoretical basis for the development of alignment-free, bulk THz polarization control devices.

Part of this work was supported by JST Program for co-creating startup ecosystem, Grant Number JPMJSF2312, Japan.

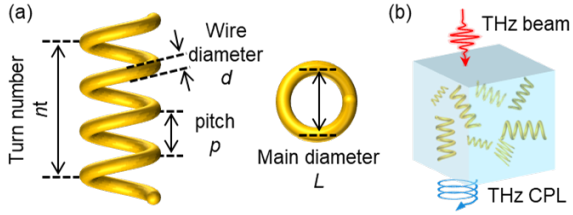


Fig. 1 Schematic of the numerical model. (a) Geometry of the single metallic helical resonator defined by key parameters (turns, radius, and pitch). (b) Concept of the 3D bulk chiral metamaterial, showing helical meta-grains randomly dispersed in a COP matrix to achieve macroscopic isotropic CD.

文　献

(1) R. Fukasawa et al.: IEEE Trans. THz Sci. Technol., 5. 1121 (2015)
(2) T. Okatani et al.: Nanophotonics, 11. 2065 (2022)
(3) Y. Huang et al.: Adv. Sci., 11. 2405378 (2024)

©2026 IEE Japan

MACE による Si ナノワイヤーを用いた液体輸送表面の作製及び評価

風間　李子*，小野　崇人，戸田　雅也（東北大学）

Evaluation of Wicking Surfaces Using Si Nanowires Fabricated by MACE

Riko Kazama, Takahito Ono, Masaya Toda (Tohoku University)

１．緒言

近年，エナジーハーベスティングやマイクロ流体デバイスの分野において，固体表面の微細構造を利用した液体輸送技術が注目されている．特に Si 基板は微細加工技術と親和性が高く，期待されている．本研究では，金属援用エッチング（MACE, Metal Assisted Chemical Etching）による Si 基板表面の微細加工と，ピラニア溶液による化学的修飾を融合させ，Si 基板に毛細管現象による液体輸送機能を付与した．本報告では，これら一連の加工プロセスによって実現した，動力を不要とする水の吸い上げ現象について観察結果を述べる．また，次段階の試みとして，液体移動に伴う電荷移動の計測やエネルギー変換素子への応用も期待できる．

２．実験方法

＜2・1＞金属援用エッチング（MACE）　Si 基板表面に微細構造（ナノワイヤー，ナノポーラス）を形成し，表面積を増大させることを目的とする．洗浄した Si 基板を硝酸銀（$AgNO_3$）0.4 g とフッ化水素酸（HF）50 ml 混合した溶液に 10~40 秒程浸漬させ，Ag ナノ粒子を基板表面に析出させる．次に，HF を 25 ml，過酸化水素（H_2O_2）10 ml，純水（H_2O）5 ml を混合した溶液に Ag ナノ粒子が析出した Si 基板を 5 分程浸漬させる．Ag ナノ粒子を触媒として，その直下の Si が選択的にエッチングされ，垂直方向のナノピラーまたは，多孔質構造が形成される．

＜2・2＞親水化処理　Si 基板表面は疎水性を示すため，孔内に液体が浸透しない．表面基を親水化するため，ピラニア溶液により化学的修飾を行う．濃硫酸（H_2SO_4）と H_2O_2 を 2:1 の割合で混合し，ピラニア溶液を調整する．エッチング後の基板を浸漬し，表面の有機物の除去，および表面基を水酸基（-OH）へと終端させる．処理後の基板は純水で十分にリンスを行い，乾燥させる．

３．結果と考察

＜3・1＞表面加工状態　MACE 処理後の Si 基板表面は，光の反射が抑制されることで視覚的に黒色へと変化した（1）．MACE 処理後の Si 基板の断面 SEM 画像を図 1 に示す．基板表面から約 60 μm の深さまで，エッチングされ，ナノワイヤー構造が確認できる．これにより，平滑な Si 基板表面と比較して比表面積が飛躍的に増大した．次に，基板表面の親水性の変化について述べる．MACE 処理のみのサンプルについては，注射器で滴下した水滴が留まる程度であったが，ピラニア処理後は液体が瞬時に構造内へ浸透する超親水性を示した．

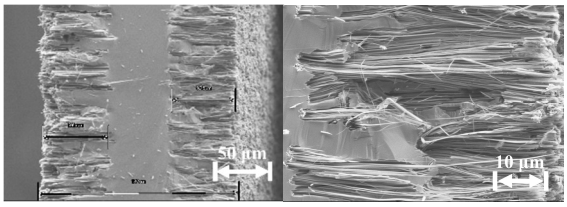


図１　MACE 処理後の Si 基板断面 SEM 画像
Fig. 1 SEM image of Si substrate cross-section after MACE

＜3・2＞毛細管現象の観測　MACE 処理後ピラニア処理を行った基板について，基板端部を水面に接触させた結果，毛細管現象による水の自発的な上昇が観測された．その様子を図２に示す．ナノワイヤー間が微細な毛細管として機能し，ピラニア処理による高い親水性と相まって，ラプラス圧が発生したと考えられる．

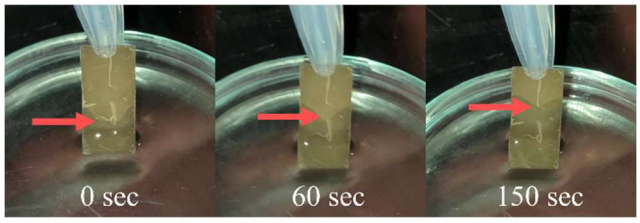


図２　MACE，ピラニア処理 Si 基板の毛細管現象
Fig. 2 Capillary phenomena on Si substrates after MACE and Piranha treatment

４．結言

本実験では，MACE 処理とピラニア処理の併用により，Si 基板への自発的な液体輸送機能の付与に成功した．動力を用いない液体輸送の実証の次のステップとして，液体の移動に伴う電荷の移動を測定することを計画している．固液界面の電気二重層を介した電荷の移動を電気エネルギーとして取り出すことができれば，自立駆動型の環境発電素子としての応用が期待できる．

文　献

(1)　Zhipeng Huang, et al, Advanced Materials. 2011, 23, 285-308 (2011)

©2026 IEE Japan

振動センサによる野生動物の活動検知の試み

二宮　啓*（産業技術総合研究所）

An Attempt to Detect Wildlife Activity Using Vibration Sensors

Hiro Nimiya (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

１．目的と背景

高精度な振動センサ（例えば地震計）は，地盤を伝播する地震動に加え，自然由来の振動や人間の経済活動に伴う振動など，さまざまな環境振動を計測することができる(1,2)。本研究は，地盤を伝播する振動から野生動物の存在を受動的に検知する可能性を検討することを目的とする。

近年，熊による人的被害や，猪・鹿・猿などによる農作物被害が社会問題となっている。これらの野生動物を効率的に検知することができれば，生息状況の把握や被害予防への貢献が期待される。また，高精度な振動センサは，地震発生時には地震動観測や被害把握に利用されており，本研究のような野生動物検知への応用は，振動センサの複数目的利用（マルチユース）を可能にする。その結果，センサ設置・運用における費用対効果の向上にも寄与すると考えられる。

２．観測データ

対象地域は，鹿児島県霧島市福山に位置する私有地内の山間部一区画（約 25 m × 25 m）である。本区画には畑および果樹（栗・キウイ・みかん等）が栽培されており，野生動物（猪・猿）の来訪が確認されている。対象地域内に，地震計 3 台およびトレイルカメラ 4 台を設置し，同時観測を実施した。地震計には，SmartSolo 社製の三成分地震計 IGU-BD3C-5 を用いた。本機器は微小地震や雑振動の観測を目的とした高精度な地震計である。地震計は，地表面の影響を抑えるため，地面に深さ約 20cm にコンクリート平板を敷設し，その上に設置した。また，周囲を簡易的な柵で保護することで，動物接触による影響を低減した状態で観測を行った。トレイルカメラは，赤外線で動物を検知し自動撮影するカメラであり，地震計周辺を撮影可能な方向に，高さ約 1m の位置に設置した。観測期間は 2025 年 8 月 1 日から 8 月 21 日までの約 3 週間である。

３．結果と考察

＜トレイルカメラ＞

トレイルカメラで撮影された画像を目視で確認し，野生動物の有無を判定した。対象地域は雑草を含む草木が繁茂しており，多くの撮影記録は動物を含まない画像であった。また，8 月 9 日以降は雑草の成長により視野が遮られ，動物の検知および撮影を正常に行うことが困難となった。撮影に成功した動物の一覧を表 1 に示す。

表 1　撮影した動物と出現日時
Table 1.　Recorded animals and date of appearance

最初の撮影	最後の撮影	動物種
2025/8/1 23:09	2025/8/1 23:10	猪（1匹）
2025/8/2 0:53	一度のみ	うさぎ（1匹）
2025/8/2 19:56	一度のみ	猪（1匹）
2025/8/4 19:56	一度のみ	たぬき（1匹）
2025/8/5 23:53	一度のみ	猪（1匹）
2025/8/6 4:14	2025/8/6 4:23	猪（1匹）
2025/8/8 7:48	2025/8/8 8:02	猿（複数）
2025/8/8 16:37	一度のみ	猪（複数）

同じ個体種が滞在し，複数回撮影された場合には最初の撮影時刻と最後の撮影時刻を記載している。

＜振動データ＞

図 1 に，8 月 8 日に観測された振動波形に 5Hz のハイパスフィルタを適用した結果を示す。図中の破線は，トレイルカメラにより猿の出現が確認された時刻の前後 10 分間を示している。猿の出現時刻に対応して，明瞭な振動が観測されていることが確認できる。一方で，トレイルカメラにより動物が検知されていない時間帯においても，比較的大きな振動が観測されており，観測された振動のすべてが動物由来であるとは断定できない。

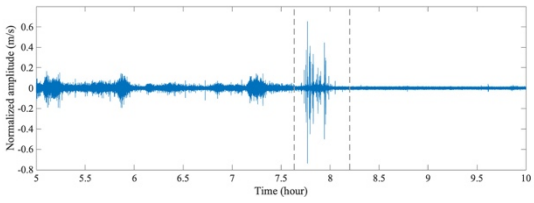


図 1　観測波形の一例
Figure 1.　An example of observed waveform

図 2 は，5 分ごとに算出したパワースペクトル密度（PSD）を全観測期間で平均し，さらに 5-20Hz および 20-40Hz の各周波数帯で平均した結果を，時刻ごとに示したものである。図中のグレー実線は 5-20Hz，黒実線は 20-40Hz の結果を示し，破線は鹿児島県の日の入りおよび日の出の平均時刻を示している。日の出および日の入り時刻は，国立天文台の公開情報を参照した(3)。

©2026 IEE Japan

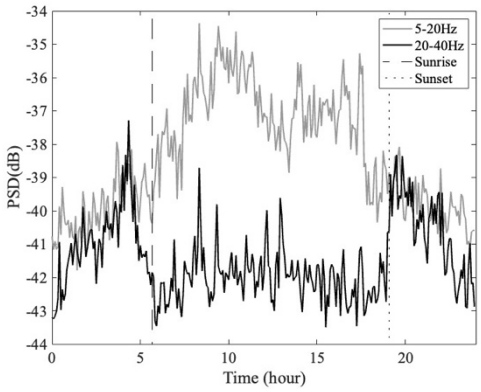


図 2　平均 PSD の時間変化
Fig.2. Time variation of the average PSD

5-20Hz 帯では，日中に振動レベルが高くなる傾向が認められ，人間活動（例えば交通振動）に起因する振動の寄与が大きいと考えられる。一方，20-40 Hz 帯では日中よりも夜間，特に日の入りおよび日の出前後に振動レベルが増加する傾向が確認された。この傾向は人間活動の時間変化とは異なっており，夜行性野生動物の活動に起因する振動が多く含まれている可能性を示唆している。

４．まとめ

本研究では，高精度な振動センサを用いて，山間部における野生動物活動の検知可能性について検討した。地震計とトレイルカメラを併用した同時観測により，動物の出現時刻に対応して振動が観測される事例が確認された。 一方で，トレイルカメラで全ての動物を検出することができず，観測された振動のすべてを動物由来と断定することは困難であった。しかし，パワースペクトル密度の解析から，20-40Hz 帯において夜間に振動レベルが増加する傾向が確認され，人間活動とは異なる振動成分が含まれる可能性が示唆された。このような傾向は，先行研究で報告されている人間活動に起因する振動モニタリングとは異なる特徴を示しており(1)，本観測によって新たな知見が得られた。以上より，振動センサを用いた野生動物の活動評価の可能性が示唆された。今後，本研究で観測した振動が動物由来の振動であるかを明確にするとともに振動成分に着目した動物種の特定などの検討を進める。

文　献

(1)H. Nimiya, T. Ikeda, T. Tsuji: Scientific Reports, 11. 20439 (2021)
(2)二宮啓・宮川歩夢・一木正聡・岡本有貴・桑原正史・池田達紀・辻健 : 電気学会論文誌Ｅ（センサ・マイクロマシン部門誌），143 巻 10 号, 331-336 (2023)
(3)国立天文台，“暦計算室”, https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/, (参照日: 2026 年 1 月 8 日)

©2026 IEE Japan

経鼻挿入可能な超音波プローブのための圧電微小超音波トランスデューサの基礎検討

長屋　育恵*，宮口　裕，吉田　慎哉（芝浦工業大学）

Fundamental Study of Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer for Nasally Insertable Ultrasonic Probe

Ikue Nagaya, Hiroshi Miyaguchi, Shinya Yoshida (Shibaura Institute of Technology)

１．序論

我が国における心房細動の有病者数は 100 万人を超え[1]，今後も増加が予測されている．心房細動は左房内血栓形成の一因であり，形成された血栓が脳動脈を塞栓すると脳梗塞などの重篤な合併症を引き起こす[2]．そのため，左房内血栓の有無の早期診断が極めて重要である．この診断において，経食道エコーが高い検知率と信頼性を有している．しかし，経口挿入の場合は，合併症のリスク[3]，患者の苦痛，手技者に高い専門性を要求されるという課題がある[4]．

これらを解決するため，我々は経鼻的な経食道エコーを提案している．図 1 にコンセプトを示す．まず，バルーンカテーテルを経鼻挿入し，食道内に配置する．次に，バルーンを水で膨らませて食道壁に密着させた後，その内部を細く柔軟な超音波プローブを通し，心臓エコー像を取得する．これにより，上記問題の解決を図る．

本研究では，この小型の超音波プローブの実現手段の一つとして，小型化が容易で量産性に優れた圧電微小超音波トランスデューサ（Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer : pMUT）[5]を用いることを検討した．上記用途に特化した pMUT リニアアレイを設計，試作し，動作実験を通じてその実現可能性と課題についての調査した．

２．デバイス設計

pMUT 素子単体の構造を図 2 に示す．圧電材料には多結晶 PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）を用いた．図内にそれぞれの材料の厚さ情報を記す．pMUT リニアアレイの仕様は，

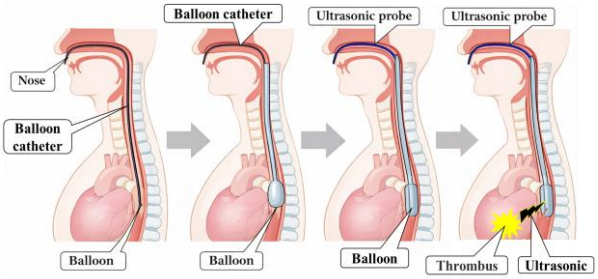


図 1 本研究のコンセプト
Fig.1. Concept of this study.

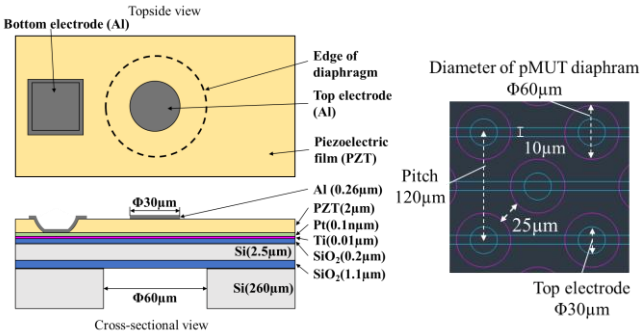


図 2 pMUT 素子の構造
Fig.2. Structure of pMUT element.

図 3 pMUT 素子の大きさ
Fig.3. Size of pMUT element.

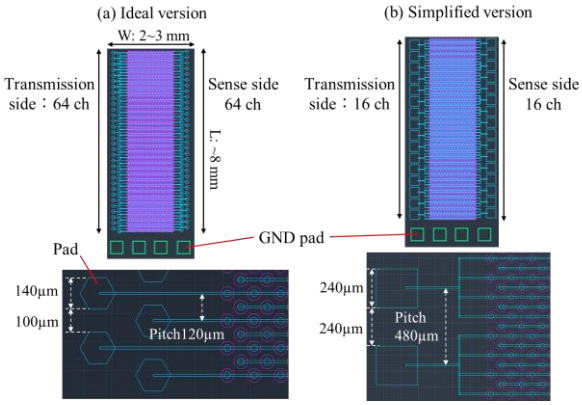


図 4 pMUT リニアアレイのレイアウト
Fig.4. Layout of pMUT linear array.

遠距離撮像 : >5 cm，空間分解能 : <5 mm，駆動周波数 : 5~10 MHz，チップサイズ : 長さ<10 mm，幅<4 mm とした．これを踏まえ，pMUT 素子単体の共振周波数を 7 MHz を狙い，ダイアフラム直径を 60 μm，ピッチを 120 μm と設定した(図 3)．図 4(a)および(b)に示すように，今回 2 種類のアレイデバイスを試作した．各行ごとに接続された素子数は，どちらも 17 とした．デバイス(a)では，送信チャンネルと受信チャンネルをそれぞれ 64 チャンネルとした．配線とシステムは複雑になるが，ビームステアリングの角度分解能を向上させられるという利点がある．デバイス(b)では，1 チャンネルあたり 4 行を並列に接続し，送受信チャンネルをそれぞれ 16 チャンネルに削減することで，配線数の削減を図っ

©2026 IEE Japan

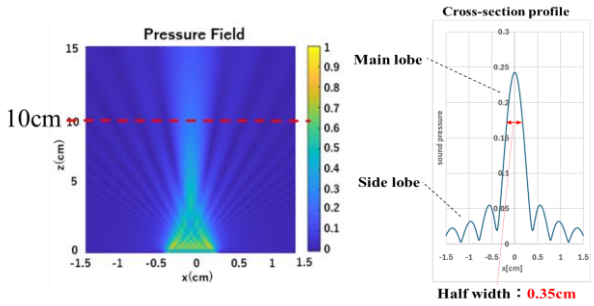


図 5 超音波シミュレーションの結果
Fig.5. Result of the ultrasonic simulation.

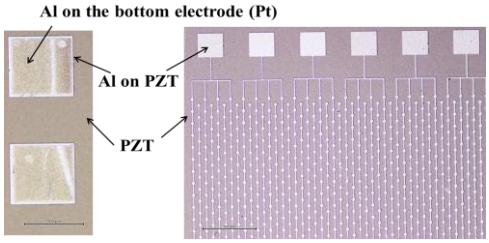


図 6 デバイスの上面図
Fig.6. Topside view of the device.

た. 結果, GND パッドを含めても, チップの寸法は長さ 8 mm, 幅 2~3 mm と仕様を満した.

3．超音波シミュレーション

次に，前述のデバイスの超音波ビームの形状を評価するために, ミシガン大学の開発したソフトウェア FOCUS を用いて，超音波シミュレーションを実施した．図 5 は，駆動周波数を 5 MHz，焦点距離を 8 cm としたときの，音圧分布図，音圧分布図の断面プロファイル，ビームの半値幅を示す．結果，サイドローブとメインローブの音圧差が約 5~6 倍であり，虚像などの発生リスクは低いと考えられる．よってこちらのレイアウトに決定した．

4．デバイス製作と振動解析

図 6 に完成したアレイデバイス(b)の上面図を示す. 次に, 多結晶 PZT を分極処理した後，レーザードップラー振動計を用いて pMUT 素子の振動特性や素子間のクロストークを評価した．その結果，pMUT の共振周波数は，空気中において約 15.5 MHz となった．これは，前述の設計値よりもかなり大きい．この原因は，加工誤差や PZT の残留応力の影響の可能性が考えられる．

また，図 7 に示すように，特定の列に 15.31 MHz の正弦波（1 Vpp）を印加し，その周囲の素子の振動を観察した．結果，電圧非印加部でも大きく振動している素子が確認され，クロストークが生じている可能性が示唆された．クロストークは，機械的結合（図 8）や電気的結合（図 9），音響結合によって生じる．例えば，PZT や Si 弾性板をエッチング し，その間を低誘電率の柔らかい樹脂で埋めて素子間を分離することで，これらを抑制できると思われる．

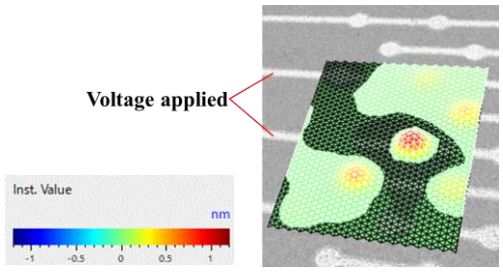


図 7 レーザードップラー振動計により観測したデバイス駆動
Fig.7. Device drive observed by laser Doppler vibrometer.

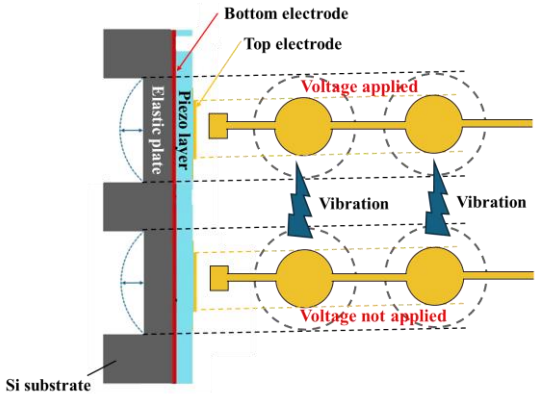


図 8 pMUT 素子の機械的クロストーク
Fig.8. Mechanical crosstalk of pMUT elements.

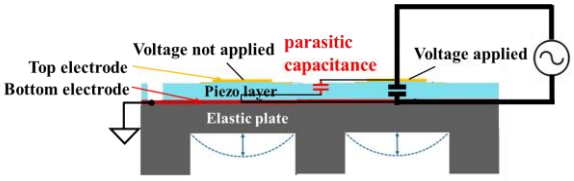


図 9 pMUT 素子の電気的クロストーク
Fig.9. Electrical crosstalk of pMUT elements.

5．結論

本研究では経鼻的に挿入可能な経食道エコーの実現を目指し, 超音波プローブに適用可能な pMUT デバイスを設計, 試作した．今回試作したデバイスの駆動は確認できたが, クロストーク現象が確認された．これに対しては，素子分離構造などを設けることが有効だと思われる．

文　献

(1) H. Inoue et al, International Journal of Cardiology, Vol.137, 102~107, (2009)
(2) S Nattel, Nature, Vol.415, 219~226, (2002).
(3) JN Hilberath et al, Journal of the American Society of Echocardiography, Vol.23, 1115~1127, (2010).
(4) GE Peterson et al, Journal of the American Heart Association, Vol.107, 2398~2402, (2003).
(5) Lee J et al, IEEE International Conference on Solid-State Circuits, Vol.11, 190~192, (2019).

©2026 IEE Japan

XX-XX-XXX

ヘテロコア光ファイバを布素材に組み込んだ ウェアラブルセンサによる脈波・呼吸の同時計測

小林　優斗*　　西山　道子（創価大学）　小山　勇也（千葉工業大学）

Simultaneous Measurement of Pulse Waves and Breathing
Using a Wearable Sensor Incorporating a Hetero-Core Optical Fiber into Fabric Material

Masato Kobayashi*, Yuya Koyama, (Chiba Institute of Technology)
Michiko Nishiyama, (Soka University)

In this study, we developed a wearable sensor incorporating a heterocore optical fiber into fabric material for minimally invasive and unrestricted physiological measurement, enabling simultaneous measurement of pulse waves and respiration. When the fabric sensors were attached to the wrist and elbow and measurements were taken at rest, it was confirmed that pulse wave propagation time could be calculated from the pulse waveform. Furthermore, synchrony was observed between the optical loss changes in the pulse wave and the temperature changes caused by respiration, indicating the potential to estimate the timing and frequency of respiration solely from pulse wave measurements. This method is expected to be applied to simple vital sign measurement using garment-type sensors.

キーワード：ヘテロコア光ファイバセンサ，脈波測定, Bluetooth，ウェアラブル，低侵襲
(Hetero-core optical fiber sensor, pulse wave measurement, Bluetooth, wearable, minimally invasive)

1.　研究背景

近年，医療技術の発展により平均寿命の延長が進み，高齢化社会が深刻化している．日本の総人口のうち 65 歳以上を占める割合は全体の 29.1%（令和 5 年 10 月 1 日現在）[1]となっている．高齢になると感覚機能や運動機能の低下により看護，介護分野において日常的な身体情報の把握は必要不可欠である．従来使用される測定法では袋状のカフを上腕部分に巻き付け，血管を圧迫し徐々に減圧する事で起こるカフ圧の変動により測定する方式が一般的に採用されている．しかしこの方式は血管の圧迫という測定原理上，使用者への身体的負担が大きく白衣高血圧を誘発してしまう恐れがある．そこでカフによる締め付けがなく低侵襲で測定を行うセンサが期待されている．

カフによる圧迫を必要としない方法[2]としてトノメトリ法が挙げられる．これは手首に圧力センサを押し当てることで，加圧に伴って生じる血管形状の変化を通して血圧を計測する手法である．この手法は手首に固形のセンサを押し付ける手法であり原理的な
身体的負担があるといえる．そのため，より低侵襲かつ低拘束な手法が求められる．

低侵襲かつ低拘束に計測可能な方法は，細径・柔軟・軽量の特徴を持つ光ファイバセンサを用いた接触方法での計測が挙げられる．従来研究は，FBG センサを身体の 2 点に取り付け，脈波伝搬時間(PTT)を算出することで血圧の推定に成功している[3][4]．ここで脈波伝搬時間とは心臓からの距離の異なる箇所で到達する脈波の時間差の事を示しており，肘と手首の 2 点間の脈波の立ち上がりの時間の差としている．さらに，脈波と呼吸の同期生も報告されている[5]．しかし，FBG センサは温度補償回路を別途で組む必要があり，構成が複雑になる．

一方，ヘテロコア光ファイバセンサ[1]は，光損失強度を通じてセンサ部における局所的な変化を検出する方式であり，温度補償が不要である．そのため，計測構成をシンプルに組むことができる．これまで，本センサを医療用テープに埋め込み皮膚上の脈圧を検出して得られた脈波伝搬時間により，血圧推定が報告された[1]．本研究では，さらに低拘束なセンサとしてヘテロコア光ファイバを糸に埋め込み布として織り上げたセンサを作製し，無線機器を用いることでウェアラブルな計測システムを構築した．この計測システムにより，更なる低侵襲な計測に有用と考えられる．本報告では布センサを着用した状態において脈波形を検出し，同時に呼吸波形の推定が可能か検証したので報告する．

2.　ヘテロコア光ファイバセンサ

図 1 にヘテロコア光ファイバセンサの構造図を示す．図 1 より，ヘテロコア光ファイバセンサはコア径 9μm の伝送路にコア径 5μm の光ファイバを挿入・融着した．このヘテロコア部では融着部より一部伝送光が漏れる構造をしており，緩やかな曲率付与に対して漏洩量が増加する．ヘテロコア光ファイバセンサは脈動などの皮膚上における微細な振動などの変化を捉え検出することが可能である．

図 2 に布センサの断面図を示す．図 2 より，ヘテロコア光ファイバを毛糸で布上に織り込む部分のみ全体に覆うことで糸状のセンサとし，作成した布センサの中心に位置するように布上に織り込む.布センサのヘテロコア部と動脈箇所が垂直方向に配置する．動脈からの脈圧が皮膚上から織り糸に圧力が伝わり，ヘテロコア部の曲率に変化を与える構造となる．

図 3 および図 4 にヘテロコア光ファイバを用いた布センサを示す．本研究では手首部分と肘部分に巻き付けられる異なるサイズの布センサを作製した．図 3 および図 4 より，毛糸で覆われたヘテロコア光ファイバは，他の糸と共に布として織り上げられている．本研究では手首部分と肘部分に巻き付けられる異なるサイズの布センサを作製した．

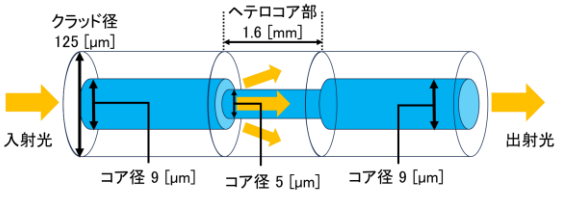


図 1 ヘテロコア光ファイバセンサの構造図

©2026 IEE Japan

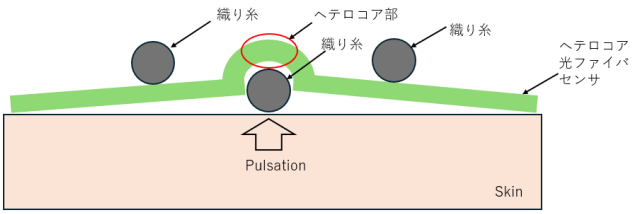


図２　布センサの断面図

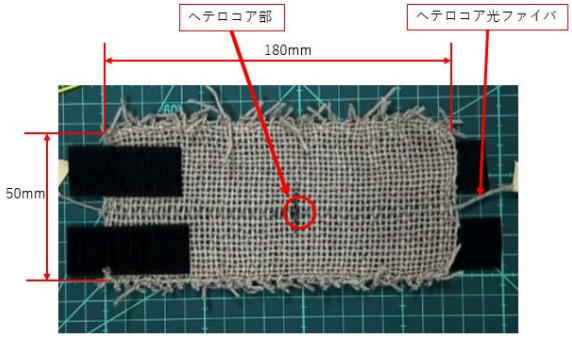


図３　手首部分の布センサ構造

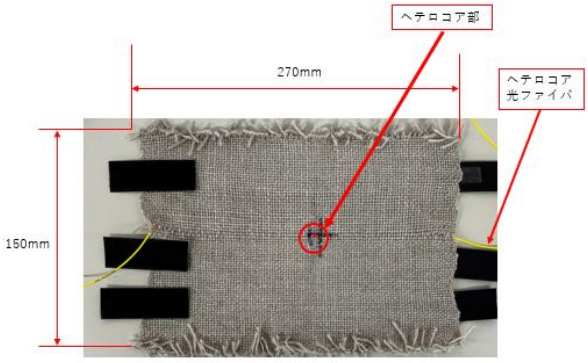


図４　腕部分の布センサ構造

3.　実験構成

図 5 に実験構成を示す．図 5 より，計測には光源に波長 1.31μm の LED，受光部にフォトダイオードを備えた無線計測器を用いて光強度を検出した．サンプリングレートは 58Hz でデータを記録した．手首部分の橈骨動脈と上腕部分の上腕動脈の 2 点にセンサ部分が接触する位置に布センサを巻き付けた．また，動脈に対して垂直方向にそれぞれヘテロコア部を合わせて配置した．呼吸計測については，参照呼吸計測器（マスク型温度計）を用いた．参照計測器のサンプリングレートは 1Hz である．また，被験者は食後から 1 時間以上経過し，椅座位で 10 分間安静にした状態で測定した．尚，被験者は 22 歳の男性である．

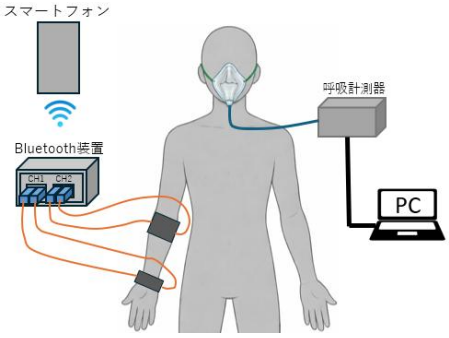


図５　実験構成図

4.　実験結果

図 6 に肘裏の上腕動脈の波形および呼吸をした際の温度波形を示す．図 6 より，呼気と吸気に対する変化を脈波形から検出可能な事を示した．図 7 に，手首の橈骨動脈と肘裏の上腕動脈の 2 点間の脈波形を示す．図 7 より，脈波伝搬時間は 0.012s であった．通常手首及び肘の 2 点間で得られる脈波伝搬時間は 0.023s~0.050s の範囲であるが本研究では 0.012s となり数値は通常より低い値となった．原因として我々の先行研究の計測システムではサンプリングレートが 2kHz であるが時間分解能に大きな差があり脈波伝搬時間の計測精度が低下すると考えられる．今後の方針として，計測精度の向上のために無線計測器のサンプリング数を増加させる必要がある．

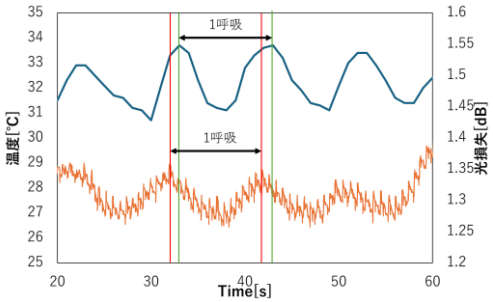


図６　脈波に対する呼吸の関係

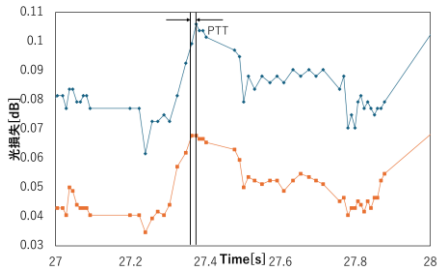


図７　手首の橈骨動脈と肘裏の上腕動脈の PTT について

5.　結論

本研究ではヘテロコア光ファイバを用いた布センサによるウェアラブル計測システムを構築し，脈波形と呼吸の同時計測を行った．脈波形の取得時に見られる光損失量の変化と呼吸による温度変化に一定の同期性が見られる事から，脈波形の取得により呼吸の回数やタイミングを検出することが可能であることを確認した．さらに，血圧計測への応用可能性について考察した．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K12924 の助成を受けたものです．

文　　献

[1] Hiroki Kamada, Yuya Koyama, Michiko Nishiyama, Kazuhiro Watanabe, “Investigation of blood pressure measurement method using hetero-core optical fiber sensor”
[2] 千野駿，石澤広明，児山祥平，藤本圭 ，倉沢進太郎，片山杏子，“FBGセンサ を用いた血圧予測における脈波パターンの影響”，計測自動制御学会論文集，Vol.56，No.4，pp189 -197, 2020
[3] 高木翼，石澤広明，児山祥平，新村正明，“FBG センサを用いた収縮期血圧計測 における基礎検討”，計測自動制御学会論文集，Vol.51，No.4，pp274 -279, 2015
[4] Hiroki Kamada, Takumi Onodera, Yuya Koyama, “ヘテロコア光ファイバセンサによる脈拍数精度の検証”2021 年 電子情報通信学会総合大会
[5] Yuki MIYAUCHI, Hiroaki ISHIZAWA and Masaaki NIIMURA, “Measurement of Pulse Rate and Respiration Rate Using Fiber Bragg Grating Sensor” 計測自動制御学会論文集 Vol.49, No.12 1101/1105(2013)
[6] 小澤利男, “新しい血圧測定と脈波解析マニュアル”, 6/20, メジカルビュー社, 2008

©2026 IEE Japan

緩曲面への回転放物面鏡投影露光リソグラフィ

堀内　敏行*，岩崎　順哉，小林　宏史（東京電機大学）

Projection Lithography on Gently Curved Surfaces Using Circular Paraboloid Mirrors

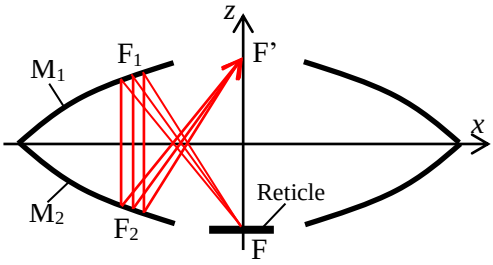
Toshiyuki Horiuchi, Jun-ya Iwasaki, Hiroshi Kobayashi (Tokyo Denki University)

１．まえがき

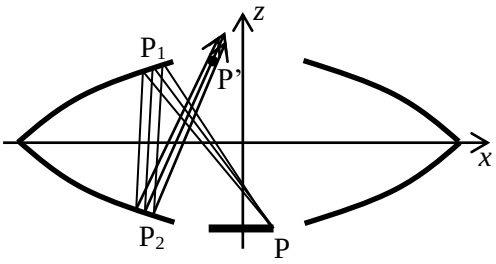
緩曲面に簡便安価に 200～500μm の大パターンを、対向回転放物面鏡光学系を用いて平面レチクルから投影露光で一括転写する技術を開発している[1,2]。小型電子機器内の配線や電極を筐体や蓋の内面などに形成する Molded Interconnect Device (MOD)や屈曲面にぴったりフィットするヘルスモニタなどへの応用を目指している。本報では、解像度への影響要因とプラスチックスプーン面への密集周期パターンの形成結果について報告する。

２．解像度への影響要因とパターンの形成結果

図 1 に示すように、放物面鏡の中央に開口を設け、開口中心が対向する放物面鏡の焦点となるように配置すると、焦点 F から出た光線は、図 1(a)に示すように、点 F_1 でミラーM_1 に当たると光軸に平行に反射し、点 F_2 でミラーM_2 に当たると、焦点 F'に集まる。すなわち、点 F の像が点 F'にできる。したがって焦点 F にレチクルを置けば、焦点 F'に置いた被露光物にパターンを転写できる。しかし、図 1(b)に示すように､開口の中心 F から離れた点 P から出る光は、P_1, P_2 で反射し、P_3 に行くが、上ミラーのどこで反射するかにより、P_3 の位置がずれてしまい、誇張して描くと図のように一点に集まらない。この光学系特有の収差である。このため、工夫として、コリメート LED(波長 405nm)を用いて仰角 55° の斜め平行光によって一方向のみからレチクルを照明した。この結果、焦点深度が深くなり、緩曲面にもパターンが形成できるようになった。しかし、平行光照明の平行度誤差による傾斜光やライン&スペース(L&S)から傾いて出る回折光は本来の結像点からずれる。そして、ずれは開口から被露光物までの距離に応じて増大する。その分、解像度が落ちるが、L&S パターンを深さ 8.3mm のプラスチックスプーンの凸面、凹面に転写した結果、図 2 に示すように、150μm の L&S まで解像した。

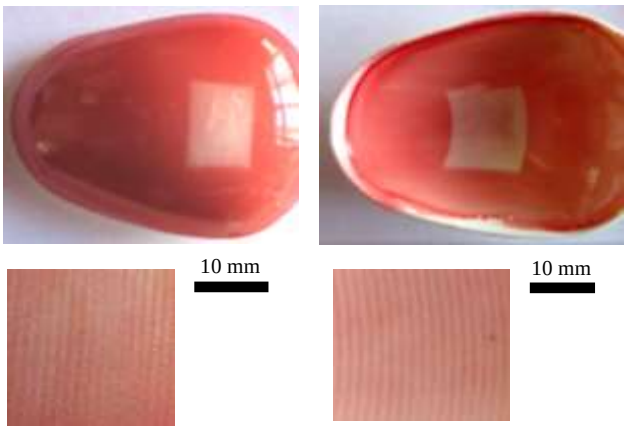


(a) Light rays from the center



(b) Light rays from points at the field periphery

図 1 結像光線の説明図
Fig.1. Figures explaining imaging light rays



(a) On convex surface　(b) On concave surface

図 2 スプーンの凸面、凹面に転写した 150μmL&S パターン
Fig.2. 150-μm L&S patterns printed on curved surfaces of spoons

３．まとめ

対向放物面鏡からなる光学系は収差があり、レチクルの照明方向に依存して像がぼけるが、コリメート光で一方向からのみ照明することにより、緩曲面に線幅 200μm 以下の密集パターンを形成可能であることを実証できた。

謝辞: 本研究の一部は湘南インスツルメンツとの共同研究費により行なった。

文　献

(1) T. Horiuchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 03SP92 (2024).

(2) T. Horiuchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 03SP68 (2025).

©2026 IEE Japan

間欠駆動型 CPU オンチップ化のための 電圧制御 CMOS 発振器の設計

井上　颯士*，佐藤　大樹，横式　康史（青山学院大学大学）

Design of a Voltage-Controlled CMOS Oscillator for On-Chip Integration of an Intermittently Driven CPU

Hayato Inoue, Daiki Sato, Yasufumi Yokoshiki (Aoyama Gakuin University)

１．研究背景・目的

これまで筆者らは、間欠駆動電源を用いることで、エナジーハーベスティングで得られる不安定な電力でも安定動作する間欠駆動型 CPU の実現を目指してきた[1]。チップ上に作製した CPU に、外付けで不揮発性メモリを接続し、間欠的な電源供給でもプログラムが実行されることを実証したが、CPU の動作に必要なクロック信号は外部から与えていた。本研究では、外部クロック不要でオンチップで動作する間欠駆動型 CPU 実現のため、CMOS 発振器を設計した。

２．設計

間欠駆動型 CPU 向けとするため、発振器の低消費電力設計も考慮した。発振器の仕様は、電源電圧は CPU と同様に 1.8 V、生成するクロック信号は振幅が 1.8 Vp-p、周波数は 5 MHz である。消費電力低減のため、発振回路の電源電圧は 450 mV とし、1.8 V 電源から PMOS トランジスタのダイオードラダー回路によって 450 mV の電圧を生成して発振回路の電源とした。また、発振回路で生成された 450 mVp-p のクロック信号を、1.8 Vp-p の信号に変換するために、既存のレベルシフタ回路を流用した。発振回路は、インバータを三段接続したリング発振器[2]に、電圧制御による周波数可変機能を付加した。周波数制御の方式として、バラクタの容量を変化させる方式と、インバータの電源に接続された MOS トランジスタにより電流を制限する方式の二種類を設計した。

設計した個々の回路、およびそれらを接続した発振器について、0.18 μm 1-poly 6-metal 標準 CMOS プロセスで回路を試作した。

３．シミュレーション結果

バラクタを用いた電圧制御発振器のシミュレーション結果の一例を図 1 に示す。25 ℃、TT コーナー条件では、電圧制御による周波数調整範囲は、4.67 ~ 5.51 MHz である。

また、電流制限 MOS トランジスタを用いた電圧制御発振器のシミュレーション結果を図 2 に示す。25 ℃、TT コーナー条件における、電圧制御による周波数調整範囲は、9.50 kHz ~ 6.93 MHz である。バラクタを用いた発振器に比べ、電圧制御で調整できる周波数の範囲が広く、MOS トランジスタの個体差や温度による変動があっても、所望の周波数を出力しやすいと言える。

４．まとめ

本研究では、間欠駆動型 CPU をオンチップで動作させるための、電圧制御 CMOS 発振器を設計した。今後は、設計した回路の実測や、間欠駆動電源と間欠駆動型 CPU を組み合わせた動作検証を行っていく。

５．謝辞

本研究は、東京大学ＶＤＥＣ活動を通して、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社、シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われたものである。また、本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K20760 の助成を受けた。

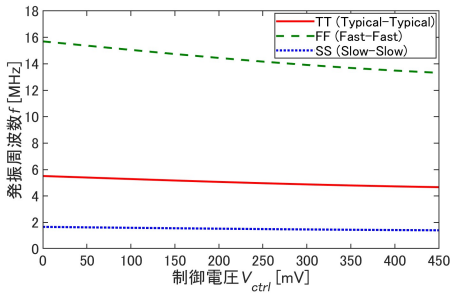


図 1 バラクタつきリング発振器の制御電圧に対する周波数
Fig.1 Frequency versus control voltage for the ring oscillator with a varactor

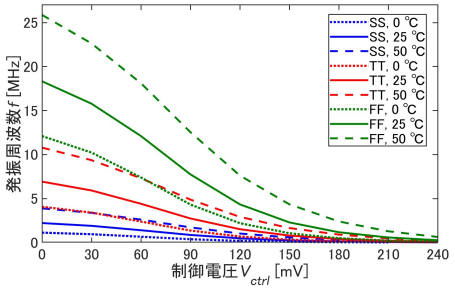


図 2 電流制限 MOS つきリング発振器の制御電圧に対する周波数
Fig.2 Frequency versus control voltage for the ring oscillator with current-limiting MOS

文　献

[1] 井上颯士, 横式康史, 2025 年 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 8a-P07-05（2025 年 9 月 8 日）
[2] L. F. M. Dutra et al., “A 0.3-5 MHz Low-Voltage Digitally-Controlled Oscillator for Energy Harvesting Applications,” IEEE SBCCI, 2022.

©2026 IEE Japan

新型熱電発電素子に関する間欠駆動動作のための特性評価

鎌田　悠貴乃*　笠原　舶斗　横式　康史（青山学院大学）
中村　太飛　田中　直樹（九州大学）

Evaluation of Novel Thermoelectric Generator for Intermittently Driven Power System

Yukino Kamada*, Hakuto Kasahara, Yasufumi Yokoshiki, (Aoyama Gakuin University)
Taito Nakamura, Naoki Tanaka, (Kyushu University)

1.　研究背景・目的

熱電素子は、その特性から排熱などの未使用熱を利用して電力を生み出すことができるため、エナジーハーベスティングなどで注目されている[1]。産業分野における総排熱量の 91 %は中低温領域のガス排熱であり[2]、これらを活用して巨大熱起電力を獲得できると社会インフラや大規模エネルギー活用への貢献が期待できる。しかし、熱電発電素子からは数 mV という低い電圧しか発生せず、一般的な回路を駆動する際には昇圧回路が必要となる。昇圧を行うと負荷側に流れる電流が少なくなるため、一次側にどの程度の電流を供給できるかが重要である。本研究では新型熱電素子の大きさと得られる電流の関係を調査した。その結果について報告する。

2.　新型熱電発電素子の概要

図 1 に本研究で使用した新型の導電性熱電発電素子(以下、e-TEG 素子)を示す。pn-ドープ単層カーボンナノチューブ(SWCNT)膜から作られている。本素子は柔軟性に富んでおり、湾曲部への貼り付けが可能であるため、様々な場面での発電が期待できる。

3.　新型熱電発電素子の特性評価

素子からどの程度電流が取り出せるのかを評価することは、熱電素子の電圧を昇圧する上で重要である。そこで新型熱電発電素子の位置による電圧と電流の評価や、素子を分割してその特性評価を行った。計測結果の一部を図 2 に示す。

4.　実測データ

図 2 のように素子を分割し、素子の電圧と電流を評価した。素子サイズを小さくすると電流が減少すると思われたが、素子を切断しても出力電圧及び電流に大きく差が生じなかった。

5.　まとめ

本研究では新型熱電発素子の評価を行い、その性質を知ることができた。今後も引き続き間欠駆動動作のための特性評価などを進めていく。

図 1　新型熱電発電素子
FIg. 1. e-TEG device

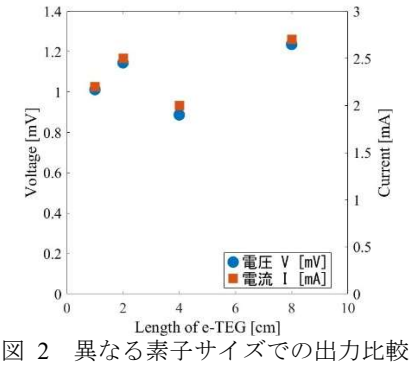


図 2　異なる素子サイズでの出力比較
Fig. 2.　Output comparison among different device sizes.

文　　献

[1]　O. Kosuda, *et al.*, *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 559–566, 2017.
[2]　N. Nadaf *et al.*,*2021 8th ICSCC*, pp. 334–339, 2021,

©2026 IEE Japan

低しきい値 MOSFET を用いた 漏れ電流抑制回路の検討

前田　薫*，佐藤　弘季，佐藤　大樹，　横式　康史（青山学院大学）

Evaluation of Low Vth MOSFET for Dynamic Leakage Suppression Logic

Kaoru Maeda, Hiroki Sato, Daiki Sato, Yasufumi Yokoshiki (Aoyama Gakuin University)

１．研究背景・研究目的

現在、IoT 機器が社会で利用されるようになってきているが、エナジーハーベスタを利用した場合、消費電力の大きい回路は駆動できない。本研究では、デジタル回路の消費電力を大幅に抑制可能な Dynamic Leakage Suppression Logic（DLSL）(1)に着目し、低消費電力ロジックセルの設計・作製と、性能評価を行った。

２．DLSL の仕組みについて

図 1(a)に DLSL インバータの回路を示す。この回路は 0.5V 以下の低電圧動作に加え、通常のインバータに漏れ電流抑制 MOSFET を追加し、貫通電流及びリーク電流を低減するものである。そのため、待機時及び動作時の消費電力を大幅に低減できる。しかし、この電流制限 MOSFET の効果が強すぎると、論理値の切り替わりにかかる時間が長くなり、回路の高速動作を妨げてしまう。そこで、本研究では、この MOSFET を低しきい値 MOSFET に置き換え、動作するか検討した。

３．低しきい値 MOSFET のシミュレーション結果

図 1(b)のレイアウトで回路が動作するのか検討するため、ポストレイアウトシミュレーションを行った。その結果を図 2 に示す。

回路の電源電圧は 300 mV、入力信号の周波数は 1 Hz、入力電圧が 300 mV で出力が十分に駆動しており、出力電圧の立ち上がりと立ち下がり時に平均 26 pA 流れているが、待機時の状態では平均 900 fA 流れた。

また、立ち上がりは通常の MOSFET と比較して、通常は遷移までに約 10 ms を要するのに対し、低しきい値 MOSFET では約 1.7 ms と大幅に短縮された。

４．まとめ

本研究では、DLSL を用いた回路の試作及び性能評価について行った。今後はインバータ以外の素子に関する DLSL 回路の検討を行っていく。

５．謝辞

本研究は、東京大学 VDEC 活動を通して、日本シノプシス合同会社、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社、シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われた。

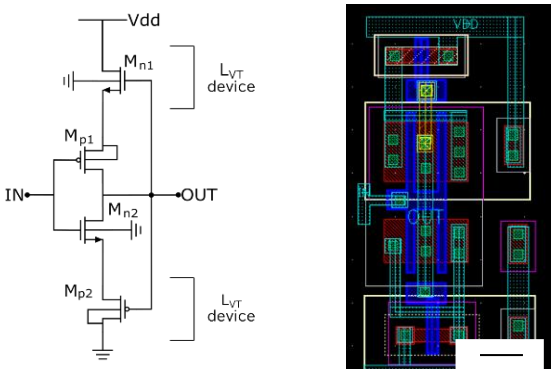


図 1 低しきい値 MOSFET を用いた DLSL インバータの回路図(a)とレイアウト(b)

Fig.1. (a) Circuit schematic and (b) layout of a DLSL inverter employing low-threshold-voltage MOSFETs.

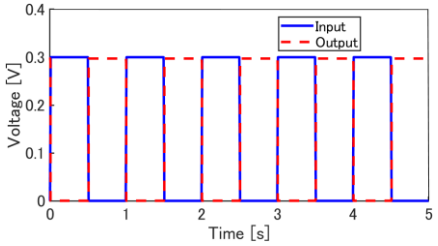


図 2 図 1 の回路のシミュレーション結果

Fig.2. Simulation results of the circuit in Fig.1.

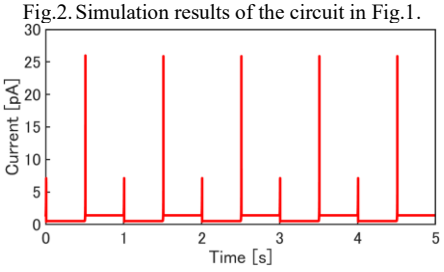


図 3 リーク電流のシミュレーション結果

Fig.3. Simulation results of the leakage current.

文　献

(1) Lim et al. ISSCC 2015, 8.2, pp146,147.

©2026 IEE Japan

周辺回路接続のためのタイマ回路と間欠駆動型 CPU の改良

山上　椿*，井上　颯士，横式　康史（青山学院大学）

Improvements of Timer Circuit and Intermittently Driven CPU for Peripheral Circuit Operation

Tsubaki Yamagami, Hayato Inoue, Yasufumi Yokoshiki (Aoyama Gakuin University)

１．研究背景・目的

我々は一定時間ごとにキャパシタから電力を供給する間欠駆動型の電源に適した CPU として、間欠駆動型 CPU の研究を行っている[1]。間欠駆動型の CPU では、1 度に一命令しか実行できないため周辺回路を動かすための仕組みが必要である。先行研究ではその動作を行うために、CPU のプログラムから動作するタイマ回路を試作した[1]。本研究では試作後のタイマ回路の評価と、CPU のプログラムからタイマ回路の駆動時間を変更可能にした結果を報告する。

２．タイマ回路のチップ評価

タイマ回路の測定結果を図 2 に示す。Digital Discovery を使用し、クロックを 5MHz として評価を行った。タイマは CPU のバスに接続されている。あるアドレスにデータが書き込まれたとき、1 クロックだけ立ち上がる信号である we をトリガとして、タイマ回路が駆動中であることを表す dg_in が出力され、タイマ回路内でカウントが実施される。カウントが指定値である 3000 に達すると dg_in は出力されなくなり、終了信号である finish_flg が出力され、Q にはカウントした 3000 が出力されている。以上から、タイマ回路は設計したとおりに動作しているといえる。

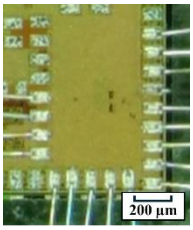


図 1　タイマ回路のチップ

Fig.1. The fabricated chip of the timer circuit.

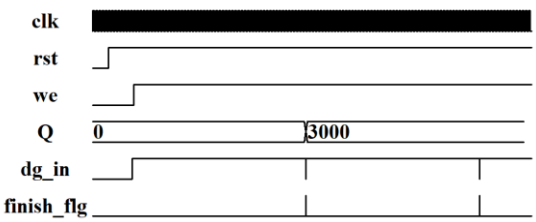


図 2　タイマ回路のチップ測定結果

Fig.2. The measurement result of the timer circuit

３．指定値変更のためのタイマ回路改良

図 1 で示した回路ではカウントする値が固定されていたが、実際には駆動する周辺回路に応じてタイマの時間は変更できなければならない。そのため、今回はプログラム内からカウントできる値を変更できるようにした。

タイマ回路の測定結果を図 3 に示す。図 3 から、プログラム内からバスに書き込まれた WDATA の値が cnt_max にコピーされ、カウントの最大値が変更できていることがわかる。CPU が命令を実行して、タイマを接続しているバスへ書き込み信号 we を送ると、タイマは次のクロックでカウントを開始し、CPU の動作が終了した後もカウントを継続している。カウント値が cnt_max の値に到達するとカウントを終了し、終了信号 finish_flg を出力し、カウント値を Q に出力している。

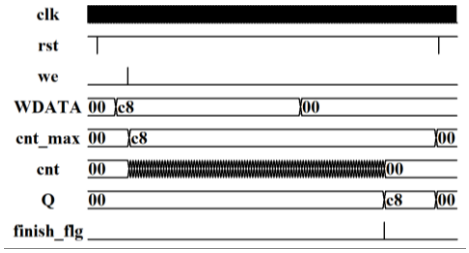


図 3　タイマ回路のシミュレーション結果

Fig.3. The result of the timer testbench

４．まとめ

本研究では間欠駆動型CPU で周辺回路を駆動させるための仕組みであるタイマ回路の評価と、タイマの指定値を変更可能にする改良を行った。今後は周辺回路から不揮発性メモリへデータを保存できるようにするなど、今回のタイマを使った周辺回路駆動のための設計を進めていく。

５．謝辞

本研究は、東京大学ＶＤＥＣ活動を通して、日本シノプシス合同会社、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社、シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われた。また、本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K20760 の助成を受けた。

文　献

[1] 山上椿ら，2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会，8p-N305-9、2025

©2026 IEE Japan

Binary Neural Network 回路の Max pooling 層の設計

岡島　明宏*，横式　康史（青山学院大学）

Design of a Max-Pooling Layer for Binary Neural Network Circuits

Akihiro Okajima, Yasufumi Yokoshiki (Aoyama Gakuin University)

1. 研究背景・目的

筆者らのグループでは、低消費電力な機械学習回路を用いたセンサ情報処理の研究を行っている[1]。バイナリニューラルネットワーク（Binary Neural Network, BNN）は重みが 1 ビットで表されるモデルであり、ハードウェア実装と相性が良い。本研究ではより精度の高い分類を可能にする、CNN ベースのモデルの一部をハードウェア化した結果を報告する。

2. 回路の構成・動作

今回製作した BNN モデルの構成を図 1 に示す。本モデルは、BNN を用いて MNIST データセットの手書き数字分類を行うものである。本研究ではモデル中の max pooling 層に着目し、その回路実装を行った。まず、TensorFlow および BNN 学習用ライブラリである Larq を用いて、手書き数字分類タスクに対する学習を Python 上で実施した。次に、学習によって得られた重みを Verilog で記述した回路内に反映させた。その後、入力データに対する分類結果について、テストベンチによるシミュレーションおよび FPGA 上に実装した回路の双方において評価を行い、学習時と同様の結果が得られるかを確認した。

3. 結果

図 2 に出力結果を示す。このように入力データをもとに max pooling と同様の処理を行うことができていることが確認された。その後、0.18μm 1-poly 6-metal 標準 CMOS プロセスで基本動作を確認するための回路を試作した。そのレイアウトを図 3 に示す

4. まとめ

本研究では、1 ビットの重みで推論を行う BNN において max pooling 層の回路実装を行い、学習結果に基づいて正しく動作していることを確認した。併せて、本回路のチップ製作も実施した。今後は、他の層についても回路実装を進めるとともに、FPGA 上でセンサによる実データによる動作検証を行うことを目標とする。

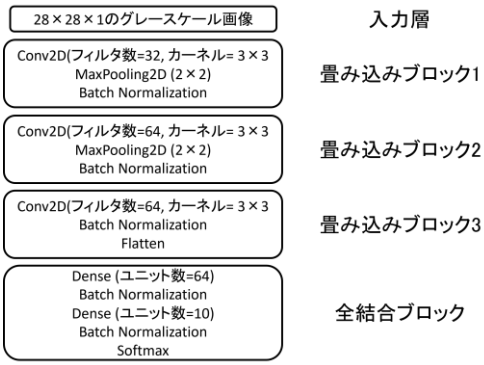


図 1 CNN ベース BNN モデルの構成

Fig.1. Proposed BNN model based on CNN model.

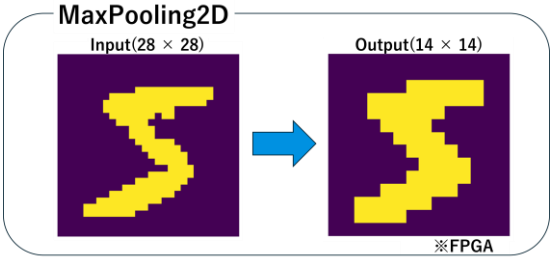


図 2 設計したバイナリ Max Pooling 層の入出力

Fig.2. The input and output of designed binary maxpooling layer.

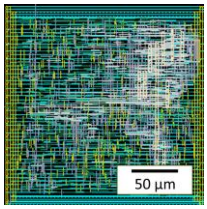


図 3 提案 BNN 回路のレイアウト

Fig.3. The layout of proposed BNN circuit.

[謝辞]

本研究は、東京大学ＶＤＥＣ活動を通して、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社、シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われたものである。また、本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K20760 の助成を受けた。

文　献

[1] 岡島明宏・横式康史：センサデータ処理のための Binary Neural Network 回路, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 16p-K403-11（2025）

©2026 IEE Japan

IEEE 802.15.4 実装のための R-2R Digital Analog Converter 及び制御用デジタル回路

中山　幸翔*，横式　康史（青山学院大学）

R-2R Digital Analog Converter and Digital Control Circuit for IEEE 802.15.4 implementation

Sakito Nakayama, Yasufumi Yokoshiki (Aoyama Gakuin University)

１．研究背景・目的

筆者らのグループは小型デバイスでの超低消費電力の無線通信を目指している(1)。本研究では、この無線通信の変調部に必要な Digital Analog Converter (DAC)およびデジタル回路部を設計しチップの製作を行った。

２．設計した R-2R DAC の構成と評価

本研究では、デジタル信号をハーフサイン波にするための DAC とハーフサイン波を作成するデジタル回路の設計を行った。DAC は R-2R ラダー形式の 6bitDAC であり、スイッチとしてマルチプレクサ（MUX）を用いた。デジタル回路は Verilog HDL で記述し、ビットを I 相と Q 相のチップに分けその出力に応じて正・負のハーフサイン波を作成するように DAC の MUX に信号を入力するように設計した。DAC のレイアウトを図 1 の(a)に、設計した DAC のシミュレーション結果を図 2 に示す。各 bit の MUX の ON/OFF を切り替えることで 0.1μs 毎に値を 0.41～1.45V まで変化することができる。

３．デジタル回路の動作説明

設計したデジタル回路のレイアウトを図 1 の(b)に示す。デジタル回路は DAC の入力値を制御する。0 と 1 のデータがデジタル回路に入力されると、DAC からハーフサイン波が出力されるように時分割で DAC の入力を変化させる。この正弦波は位相が異なるため、O-QPSK 変調のための信号とすることができる。

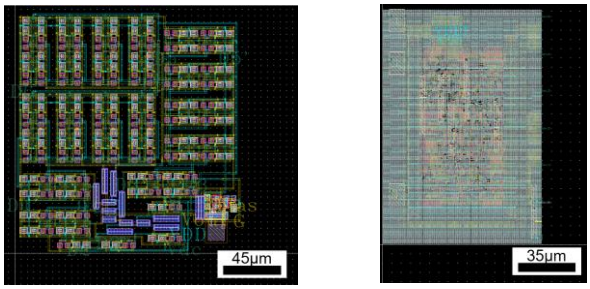
IEEE 802.15.4 で 1 度に送信する 4 ビットのデータは I 層と Q 層の 16 ビットのチップ列に変換されるため、ステートマシンを用いて 16 ビットの入力を受け取れるように実装した。このデジタル回路で DAC を制御すると 0.1μs 毎に DAC から出力される正弦波を変更でき、これは 1Mchip/s のチップレートに相当する。ZigBee の規格ではチップレートが 2Mchip/s であり(2)、これは I 相と Q 相の二つを考慮した時のものであるので今回の回路は仕様を満たす。

４．まとめ

本研究ではハーフサイン波を作成する DAC および、ビットをチップに変換して出力し DAC を制御するデジタル回路の設計を行った。

５．謝辞

本研究は、東京大学ＶＤＥＣ活動を通して、日本シノプシス合同会社、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社、シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われたものである。また、本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K20760 の助成を受けた。



(a)　(b)

図 1 設計した回路のレイアウト(a)DAC (b)デジタル回路
Fig.1.The layouts of fabricated circuits (a) DAC (b) digital circuit

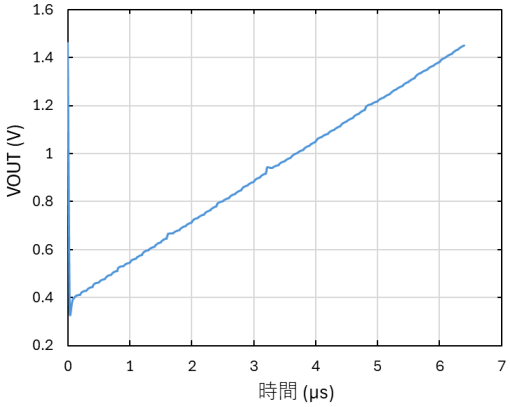


図 2DAC のシミュレーション結果
Fig.2.The simulation reslt of DAC

文　献

(1) 蓮見ら, 2025 年 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 8p-N305-8 (2025 年 9 月 8 日)
(2) Le, Khanh Tuan. "Zigbee system-on-chip (SoC) design." *High Frequency Electronics* (2006): PP. 16-25.

©2026 IEE Japan

間欠駆動回路のためのディクソン型チャージポンプ昇圧回路の検討

笠原　舶斗*，横式 康史(青山学院大学)

Study of Dickson Charge Pump Boost Circuit for Intermittently Driven Circuit

Hakuto Kasahara, Yasufumi Yokoshiki (Aoyama Gakuin University)

１．はじめに

先行研究では効率の良いスイッチドキャパシタを用いたチャージポンプの回路[1]について検討を行ったが、複数のクロックの位相を合わせる必要があり、精度の高いクロック源や PLL などによる位相制御も使用環境によっては必要となる。間欠駆動電源回路では、低消費電力化のためできる限り入力段で動作させる回路は少なくしたい。そこで、本研究では簡単な回路構成で実現できるディクソン型チャージポンプを用いて間欠駆動動作に適した回路を設計できるかどうか検討した。

２．クロスカップルドチャージポンプ昇圧回路

設計に用いたチャージポンプの回路[2]は、ディクソン型チャージポンプを改良したもので、2 個のポンピング容量とクロス接続された MOSFET ペアで構成される対称的な昇圧回路である(図１)。互いに反転した 2 相クロックを用い、片方が入力電圧を予備充電する間に、もう片方が蓄積電荷を昇圧・転送する相補的な動作を繰り返す。最大の特徴は、各スイッチのゲートを対向する昇圧ノードの電位で駆動する構造にある。これにより従来のディクソン型で課題であった閾値電圧による電圧降下を原理的に排除できる。0.8V の低電源電圧下でもスイッチのオン抵抗を低く維持できるため、導通損失を抑えた高い電力変換効率を実現可能であり、低消費電力 IoT 機器向けの電源回路等に適している。

３．提案チャージポンプ昇圧回路

入力を 0.8 V としたとき、設置する昇圧回路の段数を増やすことで 3.2V 程度に昇圧できるようにした。また、出力部にキャパシタを接続することにより、電圧リプルを抑えた。クロック信号源としてはクロックジェネレータ[3]を用い、素子値を調整することで、提案するチャージポンプ昇圧回路で利用できる 0.8V、120kHz のクロックを生成した。これらのシミュレーション結果を図 2 に示す。また、提案するチャージポンプ昇圧回路のレイアウトを図 3 に示す。

４．まとめ

本研究ではペロブスカイト型の超小型太陽電池で動作するようにするため、低消費電力チャージポンプ昇圧回路を作製した。

５．謝辞

本研究は、東京大学ＶＤＥＣ活動を通して、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社、シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われたものである。また、本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K20760 の助成を受けた。

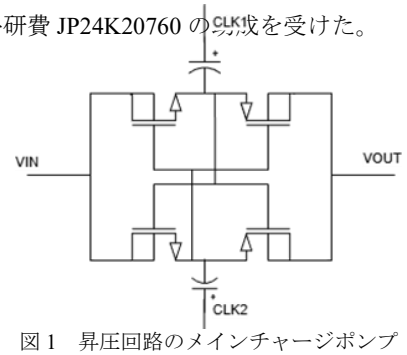


図１　昇圧回路のメインチャージポンプ
Fig.1. The part of main charge pump for boost circuit

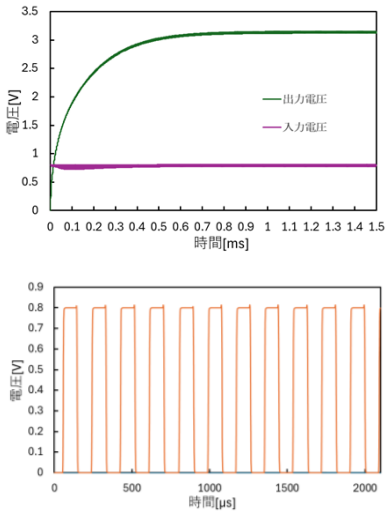


図２ 設計した回路のシミュレーション結果(a) チャージポンプ (b) リラクゼーションオシレータ
Fig.2. The simulation results of the designed circuits. (a) charge pump (b) relaxation oscillator

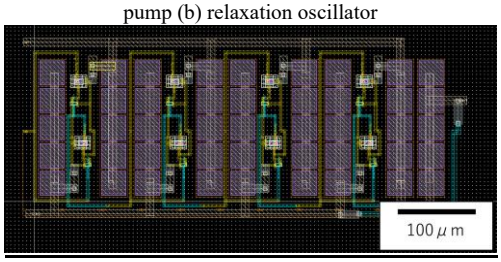


図３ 設計した回路のレイアウト
Fig.3. The layout of fabricated circuits.

文　献

[1] 笠原舶斗, 横式康史, 令和 7 年電気学会全国大会, 3-113.
[2] B. Abaravicius, *et al., IEEE Access*, vol. 9, pp. 94386-94397, 2021.
[3] Krishna *et al.,* RADIOENGINEERING, VOL. 30, NO. 4, PP. 670–679

©2026 IEE Japan

Zigbee の信号変調に用いるノイズ低減フィルタの設計
Design of Noise Reduction Filter for Zigbee Signal Modulation

圖子 颯大*, 蓮見 蒼一郎, 中山 幸翔, 横式 康史 (青山学院大学)
Sota Zushi, Soichiro Hasumi, Sakito Nakayama, Yasufumi Yokosiki (Aoyama Gakuin Univ.)
E-mail：t26343@aoyamagakuin.jp

1. 研究背景・研究目的

我々のグループは、数ミリ角程度の小型センシングデバイスの実現を目的とし、Zigbee 規格に基づく IEEE 802.15.4 の送信部の回路設計を行っている(1)。数ミリ角という寸法では、通常のバッテリーを用いることは難しいため、エナジーハーベスタから得られた電力を外部のキャパシタに蓄積し、その電力を用いて無線通信を行う、間欠的な動作を検討している。数ミリ角を実現するためには、間欠駆動を行うための電圧検出回路と同一のチップに回路を集積化させることが望ましい。今回はその無線通信回路の変調部のフィルタ設計について報告する。

2. 設計したローパス・フィルタ

図 1 に IEEE 802.15.4 に基づく送信部の変調方式の概要を示す。I 相および Q 相のベースバンド信号は D/A 変換によってアナログ信号へ変換された後、直交する搬送波とそれぞれ乗算・増幅を経て高周波信号として送信される(2)。この構成では、量子化ノイズや帯域外成分を抑制するために DAC 出力直後にローパス・フィルタを配置する必要がある。またミキサ後段で発生するノイズの折り返しを抑えることもできる。図 2 に設計したフィルタ通過前と通過後の信号の変化を示す。

間欠駆動回路で動作する無線回路のフィルタとして、本研究では 4 次 RC ローパス・フィルタを採用した。間欠駆動回路では限られた電力を用いて通信を行うため、通信回路の低消費電力化を行いたい。そこでフィルタは受動フィルタとした。その結果遮断特性は悪化するが、次数の増加により遮断特性を急峻化できる高次フィルタで特性を改善した。設計したレイアウトを図 3 に示す。DAC の出力波形 10 MHz 想定とし各段の素子値を R=5.1 kΩ, C=1 pF, カットオフ周波数 fc=1/2πRC=31 MHz に設定することで高周波ノイズを効果的に低減させる特性を実現した。またレイアウト面積は 257×158 μm^2 となり小型実装が可能であることを確認した。

3. まとめ

無線通信回路における送信部の DAC 後段フィルタを製作しノイズ低減を実現することができた。今後は、設計した回路を組み合わせ、ZigBee 規格に基づき送信回路の設計を行っていく。

4. 謝辞

本研究は、東京大学ＶＤＥＣ活動を通して、日本シノプシス合同会社、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社、シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われたものである。また、本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K20760 の助成を受けた。

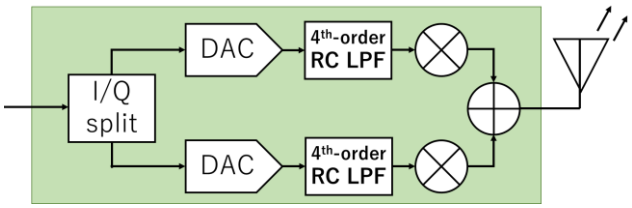


図 1 O-QPSK 変調方式のブロック図
Fig.1. Block diagram of O-QPSK modulation

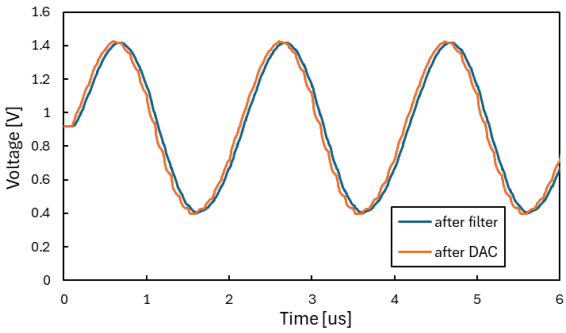


図 2 DAC 通過直後とフィルタ通過後の信号の比較
Fig.2. Comparison of waveforms after DAC and after filter

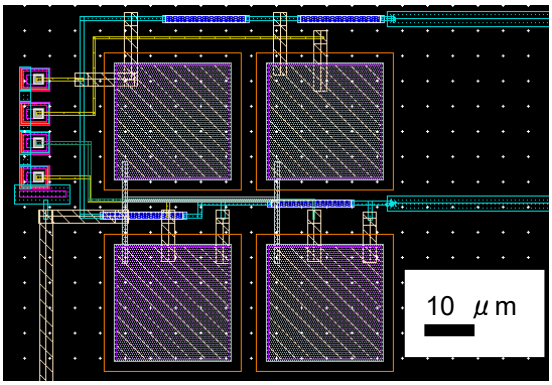


図 3 フィルタのレイアウト
Fig.3. Layout of filter

文　献

(1) 蓮見 蒼一郎, 横式康史, 2025 年 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 8p-N305-8
(2)“ZigBee 開発ハンドブック（実践入門ネットワーク） 65p~67p”, 鄭 立 (著)

©2026 IEE Japan

ペロブスカイト太陽電池向け間欠駆動電源回路の構築

浅野　良成*，横式　康史（青山学院大学）

Construction of an Intermittently Driven Power Supply Circuit for Perovskite Solar Cells

Ryosei Asano, Yasuhumi Yokosiki (Aoyama Gakuin University)

１．研究背景・目的

ペロブスカイト太陽電池は室内のような低照度環境でも発電可能な太陽電池であり、デバイスが自立して駆動するためのエネルギー源として注目されている(1)。しかし、低照度で得られる電力は微小なものであり、それを効率的に利用するためには低消費電力の電源回路が不可欠である。微小電力で効率的に動作を行うための方法として、低消費電力で動作可能な間欠駆動型電源回路が有効である。そこで本研究では低消費電力の昇圧 DC/DC コンバータを用いた間欠駆動電源回路を構築し、その基礎動作を検証する。

２．回路の仕組みと構成

図 1 に本研究で用いた間欠駆動電源回路の構成を示す。また、図 2 に本回路の動作を表したブロック図を示す。電源にはペロブスカイト太陽電池を用い、昇圧回路として極低消費電力で低電圧でも起動することができる昇圧 DC/DC コンバータ IC(AP4470)を使用した。ペロブスカイト太陽電池により発電された微小な電力はキャパシタに蓄積され、キャパシタの電圧値が所定値に到達すると負荷へと供給され、キャパシタの電圧値が一定値まで下がると負荷への供給を停止し、再び充電を開始する。この動作を繰り返すことで、消費電力を抑え、微小電力で負荷への供給を実現できる。

３．検証方法および結果

構築した間欠駆動電源回路の基礎動作を確認するために、LED 光源を用いた一定照度条件下において動作確認実験を行った。充電用キャパシタの容量は 100uF、負荷は 100Ω である。図 3 にキャパシタの電圧値を示す。図の結果から、電圧値が 3.3 V に到達すると放電を開始し、2.6 V に到達すると放電が停止し再び充電を開始する動作が繰り返されていることが確認できた。

４．まとめ

本研究ではペロブスカイト太陽電池を用いた間欠駆動電源回路を構築し、その基礎動作を確認した。LED 光源下においてキャパシタの充放電に伴う電力供給動作が確認され、微小電力環境下における本回路構成の有効性が示された。今後は充電に関して最適化を行い、低照度でも充電できるような仕組みを検討していく。

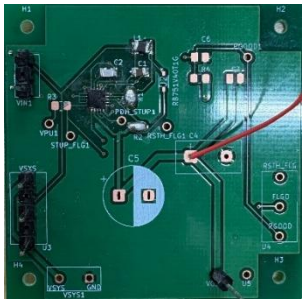


図 1　間欠駆動電源回路テスト基板の図

Fig.1. The image of the test board for AP4470.

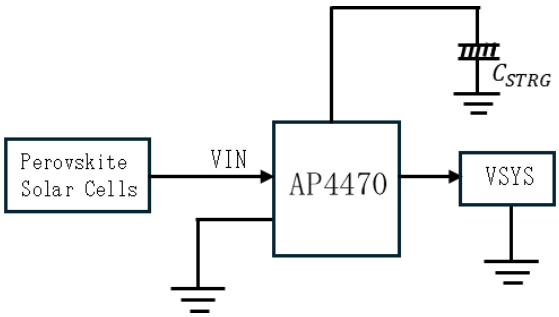


図 2　間欠駆動電源回路のブロック図

Fig. 2 Block diagram of the Intermittently driven power supply circuit

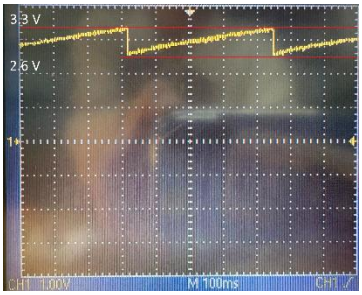


図 3　LED 光源下におけるキャパシタ電圧の測定結果

Fig.3. Measured capacitor voltage under LED illumination

文献

(1) Pirc M, *et al*, ACS Applied Energy Materials, pp 565-575, 202

©2026 IEE Japan

光エナジーハーベスティング向け クロック制御型間欠駆動電源回路の提案

佐藤 大樹，横式 康史(青山学院大学)

Proposal of a Clock-Controlled Intermittent Drive Power Supply Circuit for Optical Energy Harvesting

Daiki Sato, Yasufumi Yokoshiki (Aoyama Gakuin University)

１．まえがき

IoT デバイスや電子機器の省電力化が進み、微弱な電力を効率的に収集・蓄積する電源システムの開発が求められている。本研究では太陽電池と充電用のキャパシタを用い、間欠駆動が可能な新たな低消費電力電源回路を提案する(1)。

２．提案回路の構成

提案回路の構成を図 1 に示す。提案回路は最大電圧判定(MVD)回路、基準電圧生成回路、昇圧回路、リセット回路、タイミング制御(TiC)回路からなる。最初に EH 回路から得られた電力は直接、蓄電用コンデンサに蓄えられる。その最大蓄積電圧は MVD 回路によって、インバータの閾値電圧を基準に検知される。次に TiC 回路内の構成を図 2 に示す。TiC 回路に ENABLE(EN)信号が入力されると、CLK generator(2)によって生成される、Clock(CLK) の Posedge 信号と同期して、Transmission Gate Flip-Flop(TGFF)の後段に伝搬される。この時、同時に検知部のインバータ出力が強制的に High に立ち上がり、状態リセットとなるが、出力は TGFF 回路により、維持される。次の negedge 信号で出力は Low に遷移する。その後次の Posedge 信号で EN 信号が Low のため、出力は Low のまま再度充電用キャパシタの充電完了まで、待機状態となる。図 2 に用いた論理素子は全て Dynamic Leakage Suppresion Logic(3)を採用した。以上の構成を 0.18 μ m 1-poly 6-metal 標準 CMOS プロセスで試作した。

３．シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 3 に示す。間欠駆動の様子が確認でき、Cap1 からの消費電流は静的状態平均 300 pA 程度で、動的状態で約 3 uA という小さい値を達成できた。

4. まとめ

本研究ではクロック制御型間欠駆動電源回路を提案し、放電区間を最大 3.0 V~2.0 V 、平均消費電流を 3 nA とすることができた。

5. 謝辞

本研究は、東京大学 VDEC 活動を通して、日本シノプシス合同会社、シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われたものである。本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K20760 の助成を受けた。

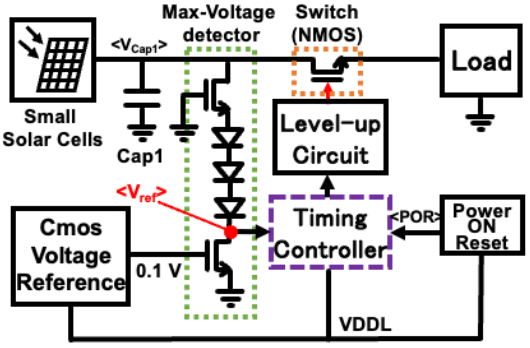


図 1 提案する間欠駆動電源回路
Fig.1. Proposed Intermittently Driven Power Circuit.

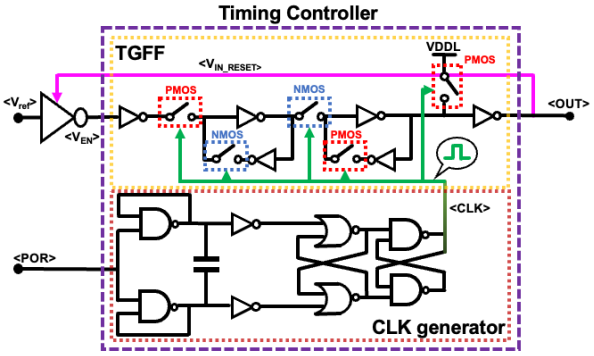


図 2 Timing Controller のブロック図
Fig.2. Block diagram of Timing Controller.

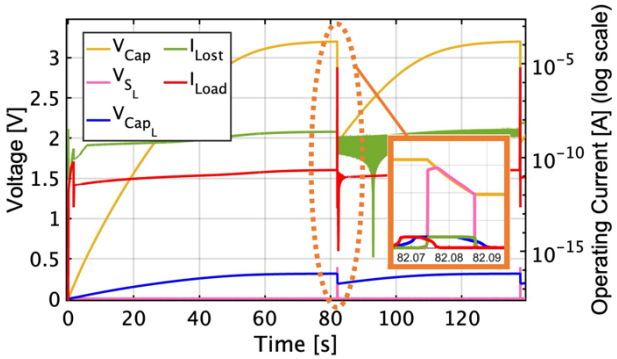


図 3 提案回路のシミュレーション結果
Fig.3. Operating waveforms of the proposed circuit.

文献

(1) D. Sato *et al*, Proc. JSAP, 16p-K403-10, (2025).
(2) O. Aiello *et al*., IEEE Trans. CAS-I, 67, 148–158 (2020).
(3) W. Lim *et al*., ISSCC Dig. Tech. Papers, 322–323 (2015).

©2026 IEE Japan

マルチウェル軸索アレイデバイスを用いたヒト無髄神経軸索束の刺激誘発応答評価

齋藤 淳史*，吉田 映子，中園 聡（電力中央研究所）

Evaluation of Stimulus Evoked Responses in Human Unmyelinated Axon Fascicles Using a Multi-well Axon Array Device

Atsushi Saito*, Eiko Yoshida, Satoshi Nakasono (CRIEPI)

１．はじめに

時間変化する低周波～中間周波帯（主に 1 Hz～100 kHz）の強い電磁界は、誘導電界を介して神経系に刺激作用を及ぼす。そのため、刺激作用は、上記の周波数帯における電磁界から人体防護するための国際的なばく露ガイドラインの生物学的根拠となっている(1)。一方、刺激作用の「閾値」に関しては、依然として科学的な不確かさが指摘されており、特に 10 kHz～30 MHz の中間周波帯では、痛覚に関わる刺激作用の閾値の解明や、得られた知見に基づく数値計算モデルの改良等が求められている (2)。

我々はこれまで、ヒトの痛覚に関わる刺激作用の閾値を細胞レベルで解明することを目標に、ヒト iPS 細胞（hiPSC）から作製されたヒト感覚神経細胞を用い、電気刺激に対する刺激応答を精密に評価するためのマルチウェル軸索アレイ（MAA）デバイスの開発に取り組んできた。本発表では、MAA デバイスを用いて構築したヒト無髄神経軸索束に局所的な電気刺激を印加することで得られる刺激誘発応答の特性について紹介する。

２．材料と方法

＜2・1＞ 細胞培養　ヒトの痛覚に関与する神経細胞を刺激応答の評価に用いるため、Axol Bioscience 社製の axoCells™ から hiPSC 由来感覚神経細胞を作製した。hiPSC 由来感覚神経細胞への分化誘導は、同社が提供する分化誘導プロトコルに従って実施した。

分化誘導の過程では、低接着性の 96 ウェルプレートを使用し、3 次元構造を有するヒト感覚神経スフェロイド（human sensory neural spheroid, hSNS）を形成させた。その後、形成された hSNS を MAA デバイス内に播種し、3 週間以上の培養を行うことで、機能的に成熟したヒト無髄神経軸索束を構築した。

＜2・2＞ 刺激誘発応答評価　ヒト無髄神経軸索への電気刺激による刺激誘発応答の検出は、MAA デバイスに付属する多点電極アレイ（multi-electrode array, MEA）を用いて行った。MAA デバイスには、16 電極×4 列、合計 64 個の MEA が配置されており、各電極列を覆う形で、約 100×100×5000 μm のポリジメチルシロキサン（PDMS）製マイクロ流路が設けられている。このマイクロ流路により、hSNS から伸長する軸索束を電極上に効率的に配置することができ、軸索束のみを対象とした刺激応答評価が可能となる。なお、本実験では、隣接する 2 電極から双極性のパルス電流を印加し、軸索束の形状と刺激誘発応答波形の関係を評価した。

３．結果と考察

図 1 に、異なる培養段階の軸索束に対してパルス電流を 1 μA ずつ増加させながら取得した刺激誘発応答波形の振幅値の比較結果を示す。この結果から、軸索束の形成初期（Early）と成熟期（Mature）では、刺激誘発応答の振幅値に顕著な差異が認められた。特に、成熟期の振幅の最大値は、形成初期と比較より大きくなった。ここで、軸索束のような複数の軸索が連なった神経組織の興奮は、複数の活動電位が加算された複合電位として検出されることが知られている。そのため、本実験においても各培養段階での軸索束を構成する軸索本数の違いが複合電位の差異として検出できたものと考えられた。

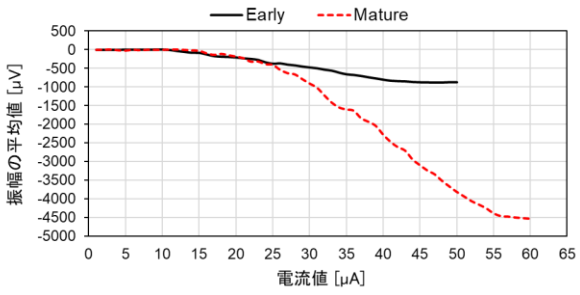


図 1 軸索束による刺激誘発応答の差異

Fig.1 Differences in stimulus responses by axon fascicles

４．謝辞

本研究は、総務省委託研究（JPMI10001）の委託を受け、実施したものである。

文　献

(1) ICNIRP, Health Phys, Vol. 99, No. 6, pp. 818–836 (2010)

(2) ICNIRP, Health Phys, Vol. 118, pp. 533–542 (2020)

©2026 IEE Japan

脳オルガノイド結合界面の細胞外電位計測

坂本　虎之介*，吉田　悟志（九州工業大学），田中　泰圭（福岡大学），
安田　隆（九州工業大学）

Measurement of Extracellular Potentials at the Interface of Brain Organoids

Toranosuke Sakamoto, Satoshi Yoshida (Kyushu Institute of Technology),
Yasuyoshi Tanaka (Fukuoka University), Takashi Yasuda (Kyushu Institute of Technology)

１．緒言

2 つの異なる領域の脳オルガノイドを接触培養することで領域間の相互接続を再現し、構造的・機能的に生体脳に近付けた 3D 培養モデルを脳アセンブロイドと呼ぶ。脳アセンブロイドの電気活動は微小電極アレイ（Microelectrode array; MEA）により計測できるが、従来方法では脳オルガノイド表面の活動しか計測できず、脳オルガノイド間の結合界面で起こる活動を計測することはできなかった[1]。本研究では、この問題を解決する新手法を提案する。

２．方法

MEA および貫通孔が形成された薄膜を挟むように、2 つの脳オルガノイドを接触培養した（図 1）。これにより、貫通孔を通じて各オルガノイドからの細胞移動や軸索伸展が起こり、脳アセンブロイドが形成されるとともに、オルガノイド結合界面における電位計測が可能となる。図 2 に製作したデバイスを示す。厚さ約 1 μm、一辺 2.5 mm の正方形の SiN 製自立膜を製作し、その上面に微小電極を形成し、電極と配線を避けるように 5 個の貫通孔を設けた。電極は、直径 50 μm の円形とし、150 μm の間隔で 4 × 4 のアレイ状に配置した。貫通孔は、中心に孔径 100 μm を 1 個、それを囲むように孔径 60 μm を 4 個配置した。膜裏面に背側前脳オルガノイドを播種し、1 日経過し接着を確認した後に、膜の上面（電極形成面）に腹側前脳オルガノイドを播種し、脳アセンブロイドを構築した。また、比較のために、電極面に各オルガノイドを単独培養したサンプルを準備した。

３．結果

16 個の電極で 5 分間に検出された総スパイク数の最大値を比較すると、腹側前脳オルガノイドは約 7000、背側前脳オルガノイドは約 160000、脳アセンブロイドは約 50000 であった（図 3）。また、7 週目のスパイクパターンを 10 秒間のラスタープロットにより比較した（図 4）。背側前脳オルガノイドではバースト発火と単発のランダムなスパイクが混合し、腹側前脳オルガノイドでは主に単発スパイクで構成された。脳アセンブロイドでは、主にバースト発火で構成された規則正しいパターンとなった。

背側前脳オルガノイドは主に興奮性ニューロンにより構成されるため、単独では極めて活発な活動を示したが、主に抑制性ニューロンから構成される腹側前脳オルガノイドと結合することで、活動がある程度抑制されて、規則的なバースト発火を示すようになったものと思われる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP24K03265 の支援により実施した。

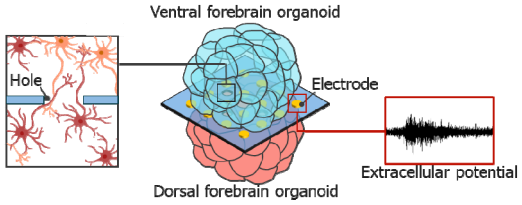


図 1　MEA および貫通孔が形成された薄膜を介して作製されたアセンブロイドの概略図
Fig. 1　Schematic of an assembloid fabricated across a perforated thin membrane equipped with a MEA.

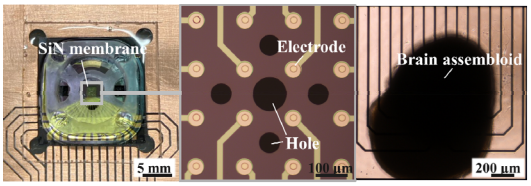


図 2 デバイス全体、微小電極アレイ、脳アセンブロイドの写真
Fig. 2　Photographs of the entire device, microelectrode array, and brain assembloid.

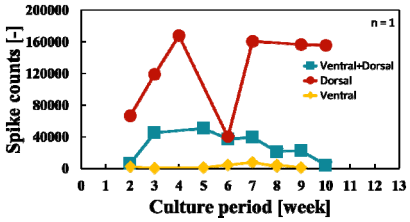


図 3　全 16 電極で計測された総スパイク数の変化
Fig. 3　Changes in the number of spikes measured by 16 electrodes.

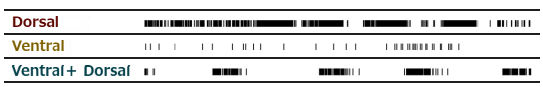


図 4　10 秒間のスパイクパターン
Fig. 4　Spike patterns for 10 s.

文　献

(1) R. M. Walsh *et al*., Neuron, 113(19), 3185-3203 (2025)

©2026 IEE Japan

in vivo 動物実験用小型埋め込み バイオインターフェースシステムの研究

Miniaturized implantable bio-interface system for *in vivo* animal experiments

東京科学大, ○(M1)池上 将平, 坂田 篤典, 齋藤 優人, 徳田 崇

Institute of Science Tokyo,○(M1)Shohei Ikegami, Atsunori Sakata, Masato Saito, and Takashi Tokuda

Email: tokuda@ee.eng.isct.ac.jp

1. はじめに

近年、動物実験は生命科学や医療研究において重 要な役割を果たし、特に *in vivo* (生きたままでの)動物実験は、生体内での実際の反応を観察するために不可欠な手法とされている。我々は、光照射、光計測、電流刺激、および電位測定の機能を有する *in vivo* 動物実験用デバイスの開発を目指している[1]。このデバイスは、小型かつワイヤレスで動作するマイコン制御デバイスであり、低消費電力で長時間利用できるものを目指す。今回、コア機能である生体刺激回路の設計を行った。

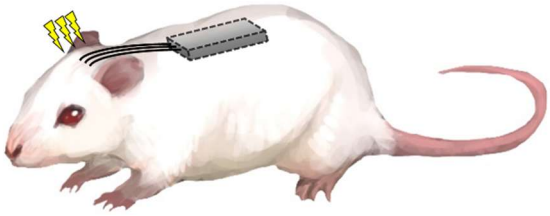


Fig.1 Conceptual diagram

2. 本システムの構成と機能

本研究で提案するデバイスの構成を Fig.2 に示す。本デバイスは、制御や通信を行うマイコン、神経への刺激、神経からの信号を測定するアナログフロントエンドチップ、信号の入出力を行うプローブで構成される。ラットが背負うことを想定し、デバイスサイズ 20 mm×30 mm×10 mm 以下を目標とする。マイコン(SoC)には Silicon Labs 社の BGM11S(ARM Cortex-M4 コア)を用いて、通信は Bluetooth で行う。

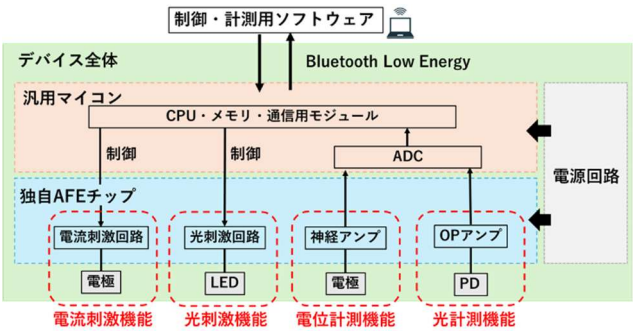


Fig.2 Block diagram of the system

3. 生体刺激回路の設計

生体刺激回路はスイッチング部、可変電流源部、状態制御部で構成される(Fig. 3)。スイッチングには 3:8 デコーダを用い、刺激を行うプローブを選択する。可変電流源部分では、マイコンから供給される 40 µA の基準電流をカレントミラーにより 2 の累乗倍する。電流刺激において、生体内での電気分解による組織損傷を防ぐためにバイフェージックでの刺激を行うことが不可欠である。そこで、状態制御部には C.C.Yang らによる二相性電流刺激回路[2]を採用した。これらの回路を 0.18 µm 1-poly 6-metal 標準 CMOS プロセスを用いて試作(Fig. 4)し、動作を検証する。

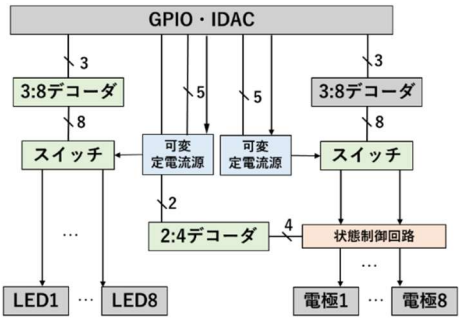


Fig. 3 Stimulation circuit

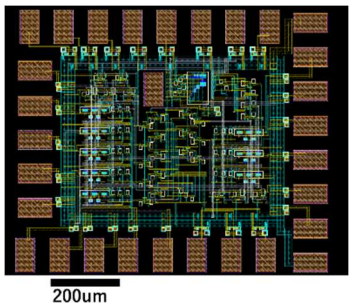


Fig. 4 Layout of the CMOS chip of stimulation circuit

謝辞

本研究は文部科学省革次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 JPJ011438 の支援を受けた。本研究における CMOS 集積回路の設計は東京大学 VDEC を通し、日本ケイデンス株式会社およびシーメンス株式会社の協力で行われた。

参考文献

[1] 池上ほか, 2025 年電気学会全国大会, 3-107,
[2] C. C. Yang *et al.*, Proc. 2025 IEEE Int. Symp. Circuits Syst (ISCAS). pp. 1-5, doi:10.1109/ISCAS56072.2025.11043922.

©2026 IEE Japan

光駆動完全埋め込み型連続血糖値センサの単一チップ集積化

Single-Chip Integration of Optically powered Implantable Continuous Glucose sensor

東京科学大学 [1], 青山学院大学 [2] ○(M1)川瀬 大輝 [1], 板敷 祐斗 [1], 齋藤 優人 [1], 横式 康史 [2], 徳田 崇 [1]

Institute of Science Tokyo.[1] , Aoyama gakuin Univ.[2],

○(M1)Daiki Kawase[1] ,Yuto Itajiki[1], Masato Saito[1], Yasufumi Yokoshiki[2], Takashi Tokuda[1]

Email: tokuda@ee.eng.isct.ac.jp

1. はじめに

糖尿病患者の健康・病態管理のためには日常の血糖測定が重要である。血糖測定は広く用いられている自己血糖測定(SMBG)のほか、近年は連続血糖測定(CGMS)が普及しつつある。既存の CGMS ではセンサデバイス主要部が体外装着型であり、血糖値センサ部が皮膚を貫通して組織内に留置されるため、感染症のリスクがさけられない。我々の研究室では超小型太陽電池による光電力伝送技術[1]を用いた完全埋め込み型 CGMS 実現を目指している[2]。今回、光給電・グルコース計測・送信部を集積化した CMOS チップでの動作に成功したので報告する。

2. 光駆動完全埋め込み型グルコースセンサの概要

本研究で提案するグルコースセンサのコンセプト図を Fig.2 に示す。超小型太陽電池・CMOS チップ・センサ電極・チップアンテナを集積し、外部デバイスへデータ送信を行う。電気化学式のグルコース計測を採用し、グルコースオキシダーゼを一方の電極に搭載した 2 電極電気化学測定(アンペロメトリ)によって行う。本研究では印加電圧は 0.5V とした。ここで流れる電流(ファラデー電流)によりグルコース濃度を計測する。本研究では 0.18 μm 1-poly 6-metal 標準 CMOS プロセスを用いてグルコース計測チップを試作・評価した。ブロック図を Fig.2 に示す。回路は電源部 LDO、グルコース測定回路、積分型 ADC、CLK 発生器、RF 送信回路(900MHz 帯)から構成される。LDO で 1.8V パルス生成して、各ブロックへ印加することで動作する。RF 回路部にシリアルデータを入力して外部にデータを送信する。

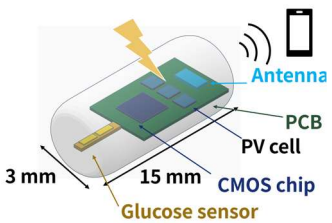


Fig.1 Concept of target device

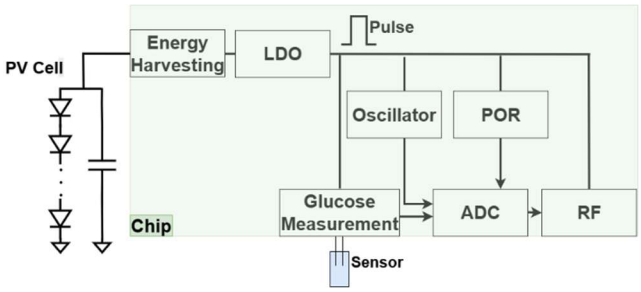


Fig.2 Block diagram of the sensor system

3. 試作回路によるグルコース計測機能の検証

グルコース濃度はファラデー電流値と比例するが、今回は、可変抵抗による電流設定模擬した。測定系の無線通信受信には Analog Device 社のソフトウェア無線システム ADALM PLUTO を用いた。Fig.3 にグルコースセンサ回路からのワイヤレス通信により受信した結果を示す。一回の動作で複数回のデータを送信しており、ファラデー電流とカウント値に相関が見えたことから、正常な回路動作を確認できた。今後は、センサ電極の小型を行いつつ、パッケージングを検討する。

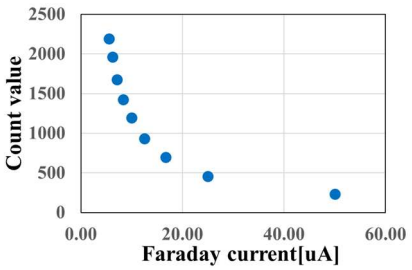


Fig. 3 Correlation of Faraday Current and Count Value

謝辞 本研究は、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 JPJ011438 の助成を受けたものである。CMOS 集積回路の設計は東京大学 VDEC を通し、日本シノプシス合同会社、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社およびシーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われた。

文　献

(1) T.Tokuda *et al*, AIP Advance **8**,045018(2018)

(2) 板敷ほか、2025 年度第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 8p-N305-14 (2025/9/8)

©2026 IEE Japan

人工腸管デバイスの管形状制御による液体輸送評価

加藤　郁人*，簗瀬　裕太，小西　聡（立命館大学）

Evaluation of fluid transport induced by shape control of an artificial intestinal tract device

Fumito Katou, Yuta Yanase, Satoshi Konishi (Ritsumeikan University)

１．はじめに

近年、創薬分野においては、ヒト生体応答をより高精度に再現可能な評価系として、Organ-on-Chip の開発および応用研究が盛んに行われている。我々は、圧力駆動バルーンアクチュエータを複数配列することにより、開閉可能な人工腸管デバイスを開発した[1]。さらに、管形状時のデバイス外側に可動吸盤アレイを導入することにより、デバイスに対して押圧・引張変形を付与可能とし、腸管の蠕動運動を模倣することを実現した[2]。蠕動運動は、腸管内内容物を消化方向へ輸送する生理運動であり、腸管内における薬物の移動および滞留挙動に影響を与える。そこで本研究では、可動吸盤により模倣した蠕動運動の際のデバイス内における液体輸送のための評価を行う。

２．単一吸盤対によるデバイス内の液体移動量評価

図 1 に単一吸盤対の移動による人工腸管デバイス押圧変形時における、デバイス内の液体移動の様子を示す。複数吸盤により蠕動運動を模倣し、デバイス内液体輸送を実現するための基礎評価として、単一吸盤対当たりの液体移動量を評価した。図 2 に吸盤を x 軸方向へ移動させた際の液体移動距離を示す。本結果に基づき、複数吸盤配置時における吸盤移動量および配置間隔を決定した。

内径 1.5 mm の人工腸管デバイスでは、吸盤の x 軸方向移動量が 0.8 mm の場合、対向する吸盤によりデバイス内が閉塞し、内壁の培養細胞へ影響を及ぼす可能性がある。そのため、吸盤の x 軸方向移動量は 0.8 mm 未満とした。この条件下では、吸盤の移動により液体を最大約 3.5 mm 移動させることが可能である（図 2）。また、吸盤配置間隔を液体

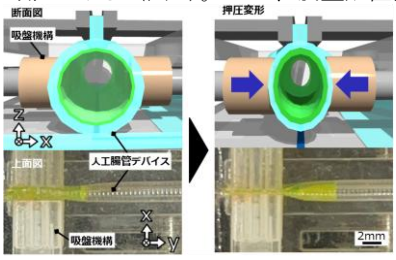


図 1 単一吸盤対による液体移動

Fig.1. Liquid transport by a single pair of suction cups

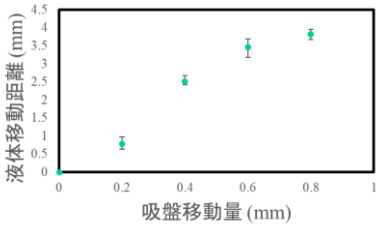


図 2 吸盤移動量に対する液体移動距離

Fig.2. Liquid displacement relative to suction cup displacement

移動量より小さくすることにより、隣接する吸盤位置への引き渡しが可能となる。以上より、吸盤移動量および配置間隔をそれぞれ 0.6 mm および 3.0 mm と設定した。

３．複数吸盤を用いた蠕動運動模倣による液体輸送

図 3 に 3 つの吸盤対による人工腸管デバイス内の液体輸送の様子を示す。単一吸盤対による液体移動量評価に基づき、吸盤配置間隔 3.0 mm で長手方向に 3 つの吸盤対を配置した。始めに流入口側の 1 対目の吸盤を x 軸方向へ 0.6 mm 移動させ、次に 2 対目、3 対目の吸盤を連鎖的に移動させた結果、隣接する吸盤へ液体が引き渡されることを確認した。また、3 対目の吸盤移動後、1 対目および 2 対目の吸盤を初期状態に戻すと、デバイス内の液体が初期位置から輸送され、先頭位置が約 12 mm 進むことを確認した。

以上の結果を踏まえ、今後特性評価をさらに進めていく。

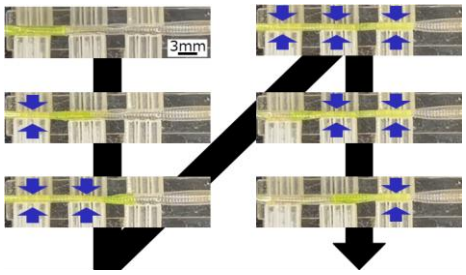


図 3　3 つの吸盤対による液体輸送

Fig.3. Liquid transport by three pairs of suction cups

文　献

(1) S. Konishi, T. Fujita, K. Hattori, Y. Kono and Y. Matsushita, Microsystems & Nanoengineering, vol.1, No.15015(2015)

(2) 簗瀬裕太・加藤郁人・小西聡：第 42 回センサシンポジウム, 11A2-B-4(S-157)(2025)

©2026 IEE Japan

細胞画像解析による脂肪滴サイズ推定への深層学習の適用

宮川　侑己*，尾仲　耕治，小寺　俊介，小西　聡 (立命館大学)

Application of Deep Learning to Lipid Droplet Size Estimation by Cell Image Analysis

Yuki Miyagawa, Koji Onaka, Shunsuke Kotera, Satoshi Konishi (Ritsumeikan University)

１．研究背景

近年、被験者の負担を軽減させるために、培養細胞を用いた評価に関する研究が進んでおり、中でも生活習慣病の予防や対策として、脂肪細胞を用いた評価が行われている。本研究室では、実験者の作業負担軽減や熟練度による実験結果の差異解消を目的として、細胞評価の自動化に関する研究を行っている。先行研究において、ルールベースの画像解析アルゴリズムを用いて顕微鏡画像から脂肪滴サイズを推定し、推定した脂肪滴面積に基づいて薬剤投与を行う閉ループ制御システムが構築されている[1]。また、近年生物学分野において、効率的かつ高精度な評価を可能にする深層学習を用いた画像解析技術が注目されている[2]。本発表では従来の脂肪滴計測手法の代替手段として、深層学習を用いた脂肪滴サイズ計測プログラムを構築した。本手法により、実験者が着目したい形態の脂肪滴を対象とした検出および計測が可能であることを示す。

２．画像解析プログラム

図 1 に構築した脂肪滴サイズ計測プログラムの解析フローを示す。本プログラムの構築には MATLAB R2025b(MathWorks 社)を用いた。脂肪滴検出に用いる物体検出のベースネットワークには、COCO データセットによる事前学習済みモデルである YOLOX(large-coco)を採用した。この事前学習済みモデルに対し、脂肪細胞画像にアノテーションを施した教師データ(40 枚)を用いて、エポック数 200 で転移学習を行うことにより、脂肪滴検出器を作成した。学習の際、汎化性能の向上およびデータの拡充を目的として、画像反転処理や輝度調整によるデータ拡張を適用した。検出器作成においては、輪郭が比較的明瞭な脂肪滴を検出対象としたため、重なりが著しいものや輪郭が極めて不明瞭な領域においては、ノイズとして除去した。作成した検出器に対して未学習の脂肪細胞画像(テストデータ、8 枚)を入力し、検出性能を評価した。その結果、単一クラスの検出性能を評価する指標である Average Precision(AP)は 0.7145 となった。次に、検出器に対してテストデータ 3 枚を入力し、脂肪滴の検出を行った。検出された脂肪滴の各矩形領域(ROI)に対して、幅および高さを長軸・短軸とする楕円近似を行った。全画素数に対する脂肪滴画素数の割合を脂肪滴面積率と定義し、算出した。

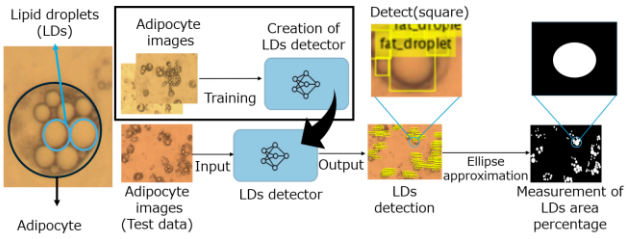


図 1 脂肪滴画像解析の流れ
Fig.1.Flow of lipid droplet image analysis

３．従来手法と深層学習手法の比較

図 2 に、3 枚のテストデータ(Image#1~3)に対する脂肪滴面積率の算出結果を示す。比較は本手法と従来手法(ルールベース型)、および ImageJ を用いた手動計測の 3 手法を用いて行い、テストデータを入力した際の脂肪滴面積率を示している。なお、手動計測条件は、教師データ作成時と同様である。比較の結果、従来手法は輪郭の不明瞭な領域も脂肪滴として検出したため高い値を示した。一方、本手法による計測値は手動計測の結果に近い値を示した。これはアノテーションにおいて、輪郭が比較的明瞭な脂肪滴を学習対象としたことに起因すると考えられる。したがって、本手法は学習データの調整により、選択的な所望の脂肪滴サイズ計測が可能であると考えられる。今後は従来手法に加えて本手法を閉ループ制御システムに適用予定である。

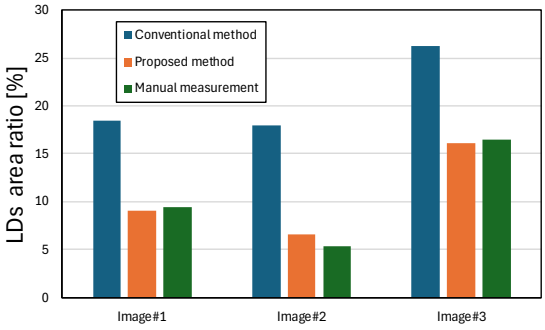


図 2 各手法の比較
Fig.2.Comparison of each method

文　献

(1) Satoshi Konishi, Takeshi Hashimoto, Tsubasa Nakabuchi, Takatoshi Ozeki & Hiroki Kajita, Scientific Reports,11, (2021)
(2) Erick Moen, Dylan Bannon, Takamasa Kudo, William Graf, Markus Covert, David Van Valen, Nature Methods, 16, (2019)

©2026 IEE Japan

フィルタフリー波長センサを用いた グルコース水溶液の糖度特性評価

島田　隼虎[1,2*]，マックラレン　ルダン　アナック　バダ[1]，
權　益賢[2]，崔　容俊[2]，澤田　和明[2]，秋山　正弘[1]，（長野高専[1]，豊橋技術科学大学[2]）

Sugar Content Evaluation of Glucose Aqueous Solutions Using a Filter-Free Wavelength Sensor

Hakuto Shimada[1,2], Mclaren Ludan Anak Bada[1], Ik-Hyun Kwon[2], Yong-Joon Choi[2], Kazuaki Sawada[2], Masahiro Akiyama[1],
(National Institute of Technology (KOSEN), Nagano College[1], Toyohashi University of Technology[2])

１．はじめに

果物の品質評価には大きさや色などの外見などの他に糖度が用いられている(1)。果物の糖度測定には糖度計を使うのが一般的であり、糖度計には破壊式と非破壊式の 2 種類が存在する。破壊式のものは屈折計と呼ばれており、糖度と屈折率の関係を利用している。この方式は安価で手軽という利点があるが、試料を破壊する必要があるという欠点がある。非破壊式では糖が特定の波長の光を吸収しやすいことを利用している。この方式は試料を破壊する必要がなく、全数調査に向いている。これらの方法は果物の一部の糖度を測定するものであり、果物全体の糖度分布を測定することができない。しかし、果物は場所によって糖度が異なることがあり、一般的にりんごでは上部よりも下部の糖度が高いことが知られている(1)。

成分分布は品質評価に重要な指標であるため、2 次元や 3 次元で対象成分の分布を計測する「近赤外分光イメージング手法」の研究が種々行われている(2)。本研究で使用したフィルタフリー波長センサは半導体センサなので集積化をすることで 2 次元データを得ることができ、上記の問題を解決することができると考えられる。そこで本研究では、1 つのセンサのみで糖度の異なる水溶液の測定を行い、フィルタフリー波長センサを用いた糖度測定の可能性を検討した。

２．原理と計測方法

＜2・1＞フィルタ波長センサの測定原理　　図 1 にフィルタフリー波長センサの断面図を示す。フィルタフリー波長センサは光の吸収係数の違いを利用したセンサである。吸収係数は光の波長ごとに異なり、波長の短い光は吸収係数が大きく、波長の長い光は吸収係数が小さいという特徴がある。吸収係数の大きさによって光が吸収される深さが異なり、吸収係数が大きいほどシリコンの浅い位置で光が多く吸収される。フィルタフリー波長センサは、フォトゲート電圧と呼ばれる VPG を印加することによってポテンシャルピークが発生し、光照射によってシリコン内に発生した電子を IFD という表側の電極と、INW という裏側の電極に分けることができる。吸収係数の違いによって波長ごとに電子が発生する分布が異なるので、波長ごとに値の異なる IFD と INW を得ることができる。フィルタフリー波長センサの測定値は、この 2 つの電流値の比率(INW/IFD)であり、波長が長い光ほど比率が大きくなる。糖は近赤外領域に光の吸収帯があるとされており、近赤外線を用いた果物の糖度測定が多く研究されている(3)。本研究ではフィルタフリー波長センサで測定可能な近赤外光よりも低い波長領域の光を糖度の異なる水溶液に照射し、その透過光を測定する。糖の量の違いによって特定の光の吸収量が変化する場合、その変化を比率の変化として測定することができると考えられる。

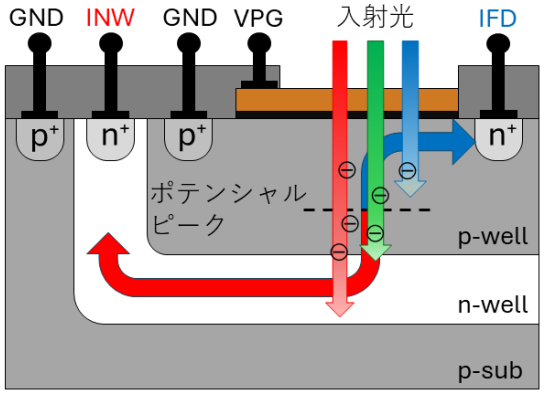


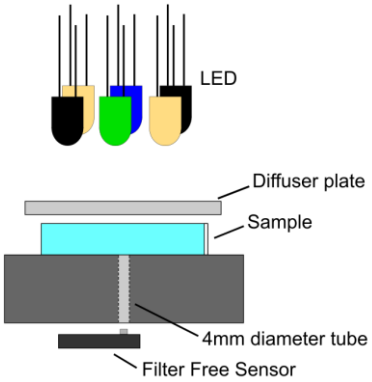
図 1　フィルタフリー波長センサの断面図(4)
Fig.1.Cross section of filter-free wavelength sensor

＜2･2＞測定系　　図 2 に本研究で用いた測定系を示す。光源には近赤外 LED (2 種類を 2 つずつ)と、青 LED、緑 LED を使用した。フィルタフリー波長センサの測定原理より、近赤外光のみを照射すると IFD の測定値が小さくなりノイズに弱くなる。そこで本研究では青と緑の光を入れることで安定したデータを取得できるようにした。また、フィルタフリー波長センサは光の吸収する深さによって測定値が

©2026 IEE Japan

決まるため、光が様々な角度から入射すると測定値がばらつく。そこで、直径 4mm、長さ 12mm の筒をセンサの直前に設置した。試料は Brix 値が 0%、5%、10%、15%、20%のグラニュー糖水溶液を使用する。Brix 値の測定には DiFluid のデジタル糖度計を使用した。それぞれの糖度で 30 回の連続測定を行い、糖度と比率の相関関係を求める。

図２　測定系
Fig.2.Measurement system



３．水溶液の電流比率測定

図 3 にそれぞれの糖度の水溶液の透過光をフィルタフリー波長センサで測定した結果を示す。グラフより、糖度が増加すると比率も増加することが分かる。それぞれの糖度での測定結果のばらつきは 0%から、0.0505、0.0512、0.0596、0.0446、0.0482 であり、平均 0.05082 であった。

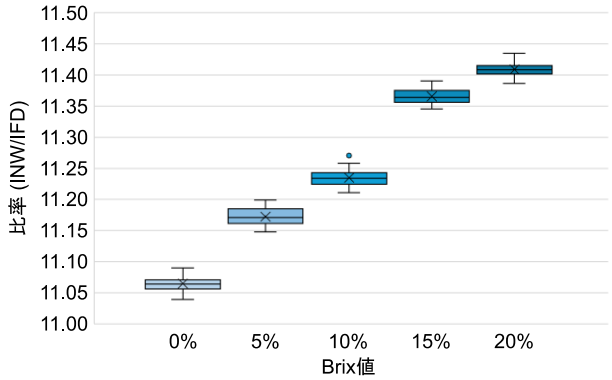


図３　水溶液の比率測定結果
Fig.3.Aqueous solution ratio measurement results

また、30 回の連続測定のデータの平均値を用いて近似直線を作成すると図４のようになる。比率を y、Brix 値を x とすると近似直線は式(1)で表される。

$$y = 0.0176x + 11.0732 \quad (1)$$

また糖度と比率の相関係数は 0.991 であった。

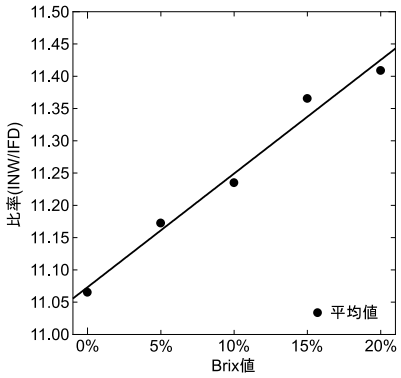


図４　平均値の近似直線
Fig.4.Best fit line of the average value

４．まとめ

本研究ではフィルタフリー波長センサを用いた糖度測定の可能性を示した。Brix 値が 0%、5%、10%、15%、20%のグラニュー糖水溶液に近赤外光を含めた光を照射し、その透過光を、筒を通した後にフィルタフリー波長センサに照射した。それぞれの糖度で 30 回の連続測定を行い Brix 値との比較を行った。糖度と比率の関係は $y = 0.0176x + 11.0732$ (R^2=0.991)の式で表すことができ、高い正の相関があることが分かった。現在の測定法では測定結果に 0.05 ほどのばらつきがあるので、比率を用いた糖度の推定は 2.84%の分解能で行えると考えられる。実用化するには不十分な分解能であるが、非常に高い相関関係があり、果物全体の糖度分布を測定することにつながる成果と考えている。

５．謝辞

本研究は、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 JPJ011438、JST さきがけ JPMJPR24L8 の助成を受けたものである。

文　献

(1) 尾花 紫織・篠田 一馬・長谷川 まどか・山本 裕紹・柏嵜 勝 ， 映像情報メディア学会学年次大会講演予稿集, p.34B-3- ， 2016

(2) 蔦 瑞樹・杉山 純一・相良 泰行，映像情報メディア学会誌 56 巻 12 号，p.2037-2040，2002

(3) 関 隼人・柏嵜勝 ，農業食料工学会誌 83(4) ，p.282-289 ，2021

(4) Yong-Joon Choi, et al.: “Demonstrating a Filter-Free Wavelength Sensor with Double-Well Structure and Its Application“, Biosensors, Vol. 12, No. 11, p. 1033 (2022).

©2026 IEE Japan

二つの匂いセンサを用いた方向検出

志村　匠音[1,2]*，岡田　陽[1,2]，淀　優介[1]，滝沢　善洋[1]，澤田　和明[2]，秋山　正弘[1]，
（長野工業高等専門学校[1]，豊橋技術科学大学[2]）

Odor Source Direction Detection Using Two Smell Sensors

Takuto Shimura[1,2], Asahi Okada[1,2], Yusuke Yodo[1], Yoshihiro Takizawa[1], Kazuaki Sawada[2], Masahiro Akiyama[1],
(National Institute of Technology (KOSEN), Nagano College[1], Toyohashi University of Technology[2])

１．はじめに

国際社会の課題の一つとして，世界各地に埋設された地雷が大量に存在しており，一般市民に対する被害やその地域の復興と開発に大きな障害になっている(1)。そして現状，解決のための確実な地雷の除去には膨大な時間と費用が必要となっている。近年，ネズミや犬の嗅覚を利用することで，従来の金属探知機よりも格段に早い地雷探知を実現している。しかし，高い訓練コストや生物特有の不確実性，動物愛護などの課題が懸念される。本研究の最数目標は，二つの場所に匂いセンサアレイを配置する事で匂いの方向検知だけでなく判別を可能にすることである。

２．概要

本研究では，二つの匂いセンサを用いて生物の鼻の構造を模した能動的なセンシングを可能にすることを研究の目標とする。 本発表では，3D プリンタを用いた測定治具の設計・製作を行った。図 1 に作製した治具を示す。具体的には，材料に SLA/レジンを用い，左右の吸引口間隔を 0.5cm，壁の幅を 0.2cm，壁の高さを 3.6cm，壁の長さ 1.0cm の治具を作製した。また，使用する匂いセンサは長野高専の先行研究で作製されたものを用いる(2)。この測定治具を用いて方向検知の実験を行い，匂いの発生源をどの程度の精度で特定可能か、その角度分解能を明らかにすることを目的とする。

図１3D プリントで製作した治具
Fig.1. Jig made with 3D printing

３．原理

＜3･1＞匂いセンサの動作原理　　匂いセンサには，匂い感応膜として導電性高分子であるポリアニリンが使用されている。Nicolas-Debarnot らの研究によると，匂い感応膜にアンモニア分子が付着すると，水素イオンがアンモニア分子と配位結合し，アンモニウムイオンになる。この際に，膜の正孔が固定化されることによって抵抗値が増加すると考察されている(3)。この電気的特性が変化を検出することで匂いの検知を実現している。

＜3・2＞方向検出の原理　　図 2 に方向検出の原理図を示す。匂いの発生源が右または左にあるとき，匂いの発生源に近いセンサが匂い分子を最初に検知し，その後もう一方のセンサが反応する。反応の開始時間の差（差分時間）が小さい場合は，匂いの発生源はセンサの間の中心付近に位置していると推測することができ，逆に差分時間が大きい場合は，匂いの発生源が一方のセンサに近いことが推測できる。

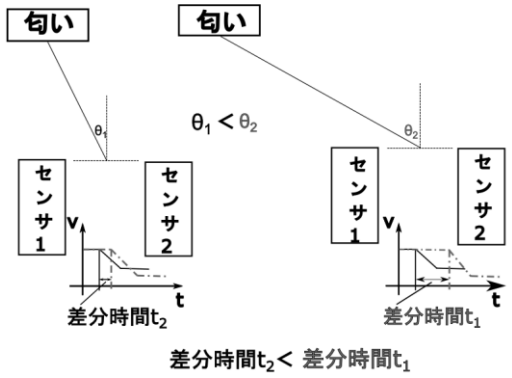


図２方向検出の原理図
Fig.2.g Diagram of direction detection

４．実験方法

図 3 のように測定系を構築する。本実験では，匂いの発生源の方向を検出するために次の手順で実験を行った。まず，0.1L/min の流量で空気を吸引し，センサに一定の流量で空気を供給する。測定系から 10cm 離れたところで直径 4mm のチューブから 0.5L/min の流量で気体を放出する。初めに，20 秒間加湿空気を吸引し，センサ出力の安定性を確

©2026 IEE Japan

認後，三方コックを切り替え，アンモニア揮発空気を 40 秒間吸引する。その後もう一度加湿空気に切り替え，400 秒加湿空気を吸引しセンサを安定状態に戻す。その間に二つのセンサからの出力結果から差分時間を測定する。次に，アンモニア揮発空気の放出角度を変更する。放出角は 15° 毎に設定し，180° の範囲で実験を繰り返し，各角度 5 回ずつ差分時間を測定する。

図３測定系の簡易図

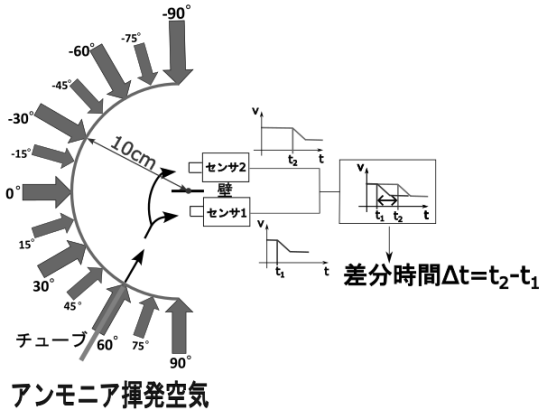


Fig.3.g Simplified diagram of the measurement system

５．実験結果

実験結果を図 4 と図 5 に示す。図 4 より，±90° に近づくほど正負に差分時間が大きくなるという結果が得られ，差分時間は±90° では約 2.5 秒，±15° では約 0.17 秒，0° の時は差分時間がほとんどなかったことから，作製した治具はセンサの中心からの角度の増加に伴い差分時間が増加する結果が得られた。さらに，左右のポンプの吸引量やセンサ配置などの微小な左右非対称性を考慮して差分時間を絶対値平均化し感度を求めた。0° から 30° の低角度領域では 5.8ms/deg，30° から 60° の中角度領域では 52.7ms/deg，60° から 90° の大角度領域では 19.6ms/deg となり，中角度領域での感度が一番高いという結果が得られた。

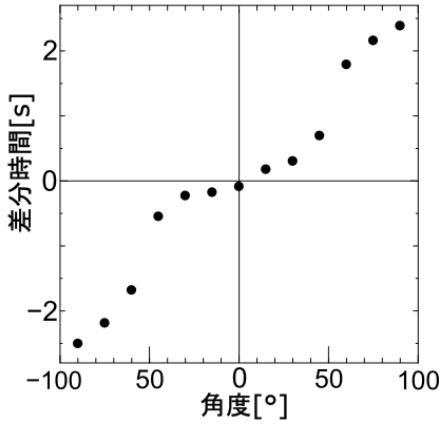


図４　角度に対する平均差分時間特性

Fig.4. Average differential time characteristic for angle

また，図 5 より角度が大きくなるほど誤差が大きくなるという結果が得られた。特に±75° から±90° の差分時間分布が半分重なっていることから角度の識別誤差が大きくなるという結果が得られた。一方で，0° から±75° の範囲では差分時間分布より 15° ごとに識別が可能であることから，この範囲では 15° の角度分解能が得られた。

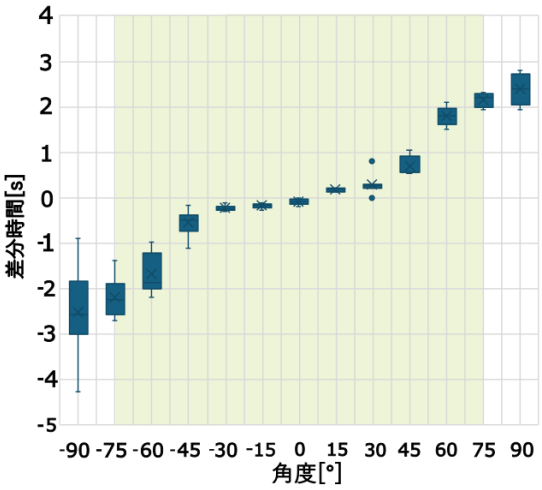


図５　角度に対する差分時間分布

Fig.5. Differential Time Distribution with Respect to Angle

６．まとめ

作製した治具は，センサの中心からの角度の増加に伴い差分時間が増加し，中角度領域での感度が 52.7ms/deg で最も高いという結果が得られ，0° から±75° 範囲において 15 度の角度分解能が確認できた。一方で，大きい角度での誤差の増加による角度分解能の低下，小・大角度での測定感度の向上が今後の課題としてあげられる。

文　献

(1) 外務省：地雷問題・対人地雷禁止条約（オタワ条約）の概要，https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/arms/mine/genjo.html，（参照 2024-01-10）

(2) 岡田 陽・淀 優介・滝沢 善洋・野田 俊彦・澤田 和明・秋山 正弘，”くし形電極を用いた匂い感応膜の高感度化に関する研究”，第 6 回高速信号伝送研究会 学生研究発表会，no. 4，pp. 1-2，2025.

(3) Dominique Nicolas-Debarnot, Fabienne Poncin-Epaillard: “Polyaniline as a new sensitive layer for gas sensors” ,Analytica Chimica Acta, Vol 475, p.1~15 (2003).

©2026 IEE Japan

近赤外分光センサを用いた
廃プラスチックの分別手法の一考察

佐藤　成浩*，小林　　匠，渡辺　誠一（長野工業高等専門学校）

Consideration of Method for Separating Waste Plastics Using Near-infrared Spectroscopic Sensor

Naruhiro Sato, Takumi Kobayashi, Seiichi Watanabe (National Institute of Technology, Nagano College)

１．まえがき

廃棄物の中には様々な種類のプラスチックがある．これらのプラスチックを適切に分別することで，プラスチックの再生が容易になる．包装材や食品トレーは識別マークによって容易に分別が可能であるが，産業用や農業用資材に用いられた廃プラスチックは，汚損や劣化によって種類を判別することが困難である．

筆者らは，プラスチックの種類によって近赤外光の吸光度特性が異なること利用して，近赤外分光センサによる廃プラスチックの分別精度の向上に関する研究を行ってきた．本稿では，プラスチックの種類の違いによって近赤外線の吸光度特性のピークが不明瞭な場合でも特徴を抽出する手法について検討した結果について述べる．

２．近赤外分光特性の測定方法と二次微分処理

プラスチックの吸光度特性の測定は近赤外分光センサ NIRONE S2.0-EV（Spectral Engines 製）を用いた．このセンサは，反射測定用にタングステンランプを内蔵して，波長が 1,500～1,950 nm の吸光度特性が測定可能である．

近赤外分光センサで測定したプラスチックの吸光度特性に対して，Savitzky-Golay 法による二次微分処理[1] を行うことで，プラスチックの厚みや不明瞭となったスペクトルのピークの識別性の向上を試みた．吸光度特性の処理には，Google Colaboratory 上で Python を使用した．Python の scipy ライブラリに含まれる scipy.signal.savgol_filter 関数により，平滑化および二次微分処理を行った．

３．吸光度特性に対して二次微分処理した結果

図 1 に劣化が進行していない 5 種類のプラスチック（ポリエチレン（PE），ポリエチレンテレフタレート（PET），ポリプロピレン（PP），ポリスチレン（PS），ポリ塩化ビニル（PVC））の吸光度特性を示した．吸光度の最大値は，PE は 1,770 nm，PET は 1,730 nm，PP は 1,740 nm，PS は 1,690 nm，PVC は 1,760 nm となった．プラスチックでそれぞれ異なる波長のピークが得られたが，厚みの増加に伴い反射光が減衰して吸光度が高くなり，ピークが不明瞭となった．

図 2 に，図 1 に示した吸光度特性に対して二次微分処理を行った場合の各種プラスチック（PE，PET，PP，PS，PVC）の吸光度特性を示した．二次微分処理後のスペクトルの最大ピークのある波長は，PE は 1,740 nm，PET は 1,670 nm，PP は 1,730 nm，PS は 1,690 nm，PVC は 1,730 nm となった．二次微分処理によって各プラスチックの厚みによるピークの不明瞭さが改善され，特徴的なピークが得られた．

二次微分処理を行った結果，PET と PS については特徴を抽出することができた．一方で，PE，PP，PVC は特徴的なピークのある波長が近く，判別することが困難であることがわかった．今後，測定サンプルを増やすことで，ピークが明確になるか検証を進めたい．

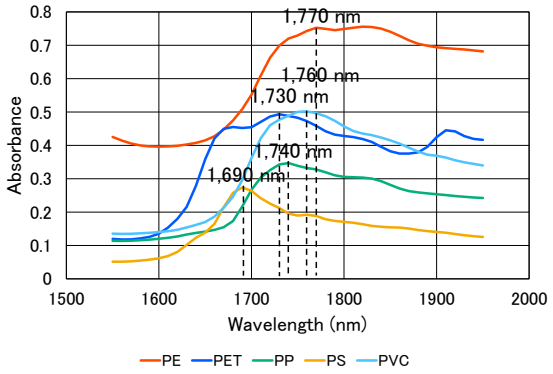


Fig.1. Absorbance characteristics of various plastics.

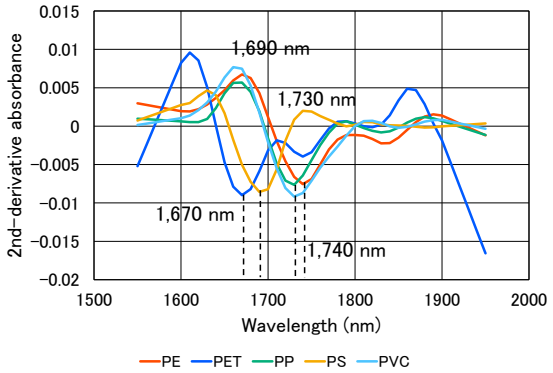


Fig.2. Absorbance characteristics after second derivative processing.

文　献

(1)　北村桂介・森田栄次・穂積啓一郎：薬学雑誌，Vol.105, No.2，pp.161-165(1985)

©2026 IEE Japan

混合溶液系を用いた緑色燐光電気化学発光素子の発光特性

上田　楓葵*,　山口　紗羅,　榑松　一樹,　笠原　崇史（法政大学）

Evaluation of a Green Phosphorescent Electrogenerated Chemiluminescence Cell Based on a Mixed Solution System

Fuki Ueda,　Sara Yamaguchi, Itsuki Kurematsu, Takashi Kasahara (Hosei University)

１．緒言

イリジウム錯体は室温で三重項励起状態から光（燐光）を取り出せることから，これまで高効率有機発 EL 用の発光材料として広く研究されてきた。イリジウム錯体は配位子を変えることで発光色を変えることができ，特に，2-フェニルピリジン（ppy）配位子を持つものは代表的な緑色燐光材料であり(1), $Ir(ppy)_3$, $Ir(ppy)_2(acac)$, $Ir(mppy)_3$ を用いた有機 EL が報告されている。

近年，発光溶液を 2 枚の透明電極で挟み作製される電気化学発光（ECL）素子が注目されている。従来の溶液は一般的に，Single ECL systems と呼ばれる，単一種類の有機半導体分子を有機溶媒に溶解することで調製されてきたが，我々はこれまでに複数の有機半導体分子を用いた Mixed ECL Systems の検討を進めてきた(2)-(4)。そして, 2024 年には，2-フェニルベンゾチアゾール（BT）配位子を有する $Ir(BT)_2(acac)$と，酸化還元メディエーターとしてカルバゾリルジシアノベンゼン誘導体(2CzPN)とを組み合わせることで，黄色燐光素子の発光特性を大幅に向上させている(3)。用いた分子の酸化還元特性から，素子内では，イリジウム錯体のラジカルカチオンと，メディエーター分子のラジカルアニオンが生成され，それらの電子移動反応により効率的にイリジウム錯体の三重項励起状態が生成されたと考察している。さらに 2025 年には，1-フェニルイソキノリン（piq）配位子を有する $Ir(piq)_2(acac)$を有する赤色燐光素子の性能向上も実証している(4)。

本研究では，よりエネルギーギャップの大きい緑色燐光性イリジウム錯体を有する Mixed ECL system の発光特性を，マイクロ流体 ECL 素子を用いて評価した(2)-(4)。発光性分子としては $Ir(mppy)_3$ を，酸化還元メディエーターとしては電子求引性の強いトリアジン環を有する SF3-TRZ を用いた。

２．実験方法

図 1（a）に $Ir(mppy)_3$ と SF3-TRZ の分子構造を示す。調製した ECL 溶液は 1, 2-dichlorobenzene と acetonitrile の混合溶媒(2:1(v/v)) に, $Ir(mppy)_3$ を 5 mM, SF3-TRZ を 20 mM 溶解させた。さらにイオン伝導を補助するために 1, 2-diphenoxyethane を 180 mM 添加した(5)。

３．実験結果および考察

図 1 (b) に電流密度-電圧-輝度(*J-V-L*)特性を示す。6.5 V 印加時に最高輝度 265 cd/m^2 を観測した。挿図は 6.5 V 印加時の素子の発光の様子である。この値はこれまでに報告された緑色燐光 ECL 素子で最も高いものであり，黄色および赤色燐光素子と同様, $Ir(mppy)_3$ と SF3-TRZ のラジカルイオン種間の電子移動反応により効率的に $Ir(mppy)_3$ の三重項励起状態が生成されたと考えられる。

４．結言

Mixed ECL systems が緑色燐光 ECL 素子の高輝度化に有用であることが明らかになった。

５．謝辞

本研究は，日本学術振興会科研費番号 JP21K14170,（公財）高橋産業経済研究財団の助成を受けて行いました。

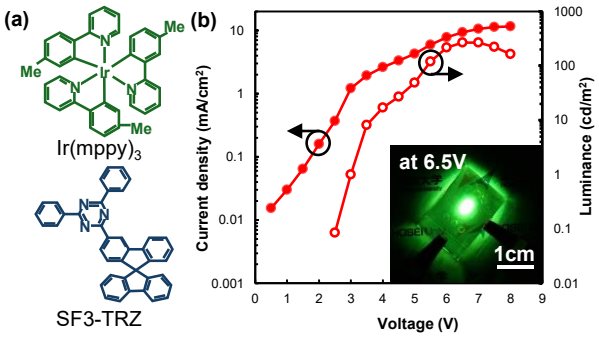


図 1（a）分子構造（b）素子の *J-V-L* 特性

Fig.1.(a) Chemical structures of $Ir(mppy)_3$ and SF3-TRZ.
(b) *J-V-L* characteristics of the microfluidic ECL cell.

文　献

(1) D Tanaka et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 46. L10 (2007)

(2) E. Kato et al.: Electrochemistry, 91. 047002 (2003)

(3) N. Ichinohe et al.: Electrochemistry, 92. 027004 (2024)

(4) M. Kobayashi et al.: Electrochemistry, 93. 027015 (2024)

(5) K. Nishimura et al.: Jpn. J. Appl. Phys., 40. L1232 (2001)

©2026 IEE Japan

くし電極を用いた電気剥離シートによるセンサ簡易脱着手法

劉　桐楊，碓井　隆，李　永芳(東芝　総合研究所)

A Simple Sensor Detachment Method Using an Electric-Release-Sheet with Comb Electrodes

Tongyang Liu, Takashi Usui, Yongfang Li(Toshiba Corporate Laboratory)

１．背景

インフラモニタリングにおいて、センサーの取り付け・取り外しの簡易化は重要な課題である。加速度センサーやAEセンサーなどの各種センサーを一時的に対象物に設置する場合、両面粘着テープが用いられることがある。一般的に粘着テープは十分な保持力を有する一方、取り外し時には困難を伴い、粘着物の残留などの問題が発生することがある。

近年、強い保持力を有し、かつ通電により容易に剥離可能な電気剥離シートが実用化されている[1]。この接着剤は導電体間に適用された場合、導電体に通電することで、接着面にバブルが発生し、表面の粘着力が低下する[2]。センサーの固定に導電剥離シートを用いることで、取り外し時に通電により粘着力を低下させ、容易にセンサーを取り外すことが可能となる。

しかしセンサーの設置に適用する場合、接着面にバブルを発生させるために、接着される両面が導電体である必要がある。インフラ構造物はコンクリートをはじめ、非導電体の場合が多く、センサーにもセラミックなどの非導電材が使用されることが多い。従来では測定対象の表面およびセンサー底面に導電体を導入して通電を可能にしていた。しかし、この方法はコストを増加させるだけでなく、対象構造物に導電体が残留することで現場復旧に時間を要するという課題もあった。

２．導電剥離サンドイッチ構造の導入

以上の課題を解決するため、我々は導電剥離サンドイッチ構造を設計した。本構造は、通常両面接着剤、くし電極フィルム、および電気剥離シートによって構成され、測定対象とセンサーの間に配置される接着体である。

＜2・1＞くし電極フィルムの機能　　図1(a)のように、正負電極を複数の平行部に延長し、櫛状の構造を形成することで、これらの平行部を正負交互に配置している。この二つの櫛状電極が嚙み合わせるパターンを「くし電極」と名付ける。そして図1(b)の断面図の黒い部分のように、くし電極底面に支持フィルムを用いてパターンを維持する。この支持フィルム付きのくし電極パターンを全体的に「くし電極フィルム」と名付ける、図1(c)はくし電極フィルムサンプルの左上角の写真である。

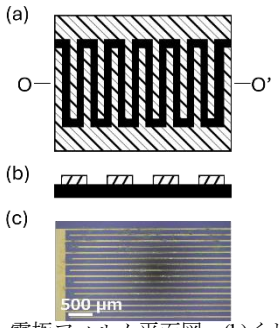


図1 (a)くし電極フィルム平面図；(b)くし電極フィルム断面図；(c)くし電極フィルムサンプル

正負電極に電圧を印加することで、図 2(a)に示す従来のように両面の導電体間に垂直方向の電界を形成するのではなく、図 2(b)のように正負のくし電極の間に面内方向の電界を形成することが可能となる。これにより、従来は導電体接着面で発生していたバブルが、くし電極の縁部で発生するになる。したがって、剥離シートの両面に導電体を貼付する必要がなく、くし電極フィルム1枚で代替できる。

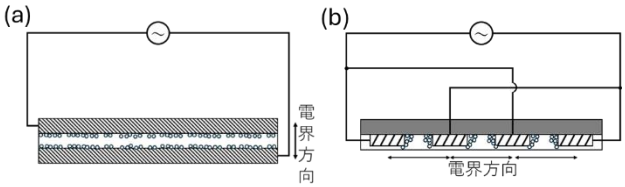


図2 (a)従来の通電剥離方法；(b)くし電極フィルムを導入した通電剥離方法

＜2・2＞導電剥離サンドイッチの使用方法　　図 3 のように、くし電極フィルムの非電極面は通常の両面接着剤を介してセンサー底面に貼り付けられ、電極面は導電剥離シートを介して被測定対象に接着される。測定対象とセンサーの間に形成されるこの三層構造を「導電剥離サンドイッチ構造」と名付ける。

©2026 IEE Japan

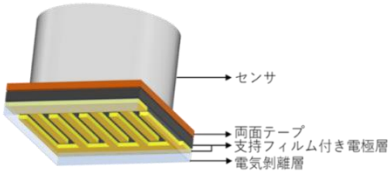


図 3 センサー付きの導電剝離サンドイッチ構造

センサーの設置時に図 4(a)のように導電剝離サンドイッチ構造を用いて、センサーを被測定対象の表面に固定する。図 4(b)のように取り外しが必要な場合、外部に露出した正負電極に交流電を印加し、一定時間維持することで電極縁部に十分なバブルを発生させる。その後、図 4(c)のように、センサーを容易に取り外すことができ、そして図 4(d)のように測定対象表面に残留した剝離シートも容易に除去することが可能となる。

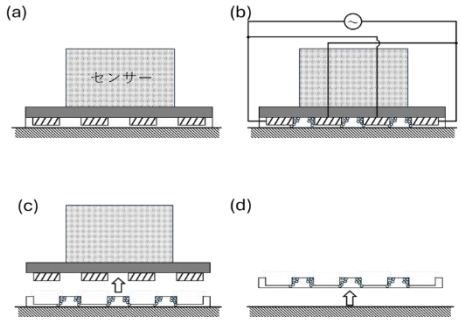


図 4 (a)センサー装着；(b)通電；(c)センサー撤去；(d)剝離シート片付け

3. 導電剝離サンドイッチ構造の使用条件最適化

安全性と粘着力低下の最大化を達成するため、導電剝離サンドイッチ構造の最適な使用条件をさらに検討した。使用条件は大きく二つに分類される。くし電極の最適寸法と、導電剝離操作における最適な通電条件である。

＜3・1＞最適通電条件　　実用上、通電時間は 1 分を超えないことが望ましい。そして電圧および電流の増加に伴い、バブルの生成速度が上昇するが、安全性の観点から、最大電圧は 30V 以下、電流は 0.1A 以下とする必要がある。したがって、大きな範囲で調整できるパラメータは通電周波数である。

同仕様の導電剝離サンドイッチ構造サンプルに対して、1 分間で 0.1Hz、1Hz、10Hz、20Hz の周波数におけるバブル生成効果を図 5 に示す。

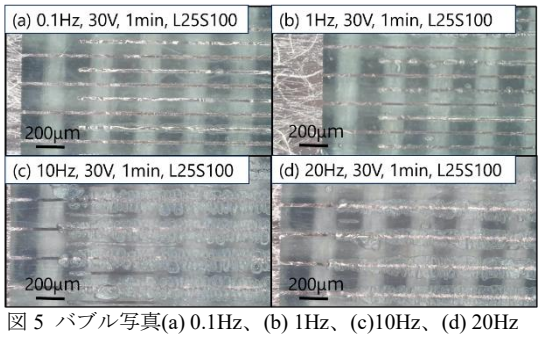


図 5 バブル写真(a) 0.1Hz、(b) 1Hz、(c)10Hz、(d) 20Hz

周波数の上昇に伴い、バブル生成量は徐々に増加することが確認された。しかし、10Hz を超えると明白な変化がなく、わずかに低下する傾向が見られた。したがって、通電周波数の最適値は 10Hz である。

＜3・2＞最適くし電極寸法　　くし電極間の間隔が大きくなると抵抗が増加し、一方電極幅が広くなると導電面積が増加する。そこで、図 6(a)のように電極間隔 S および図 6(b)のように電極幅 L をそれぞれ調整し、通電後の剝離力の最小値を測定した。通電条件は＜3・1＞の最適通電条件である。最適導電剝離条件下の剝離性能テスト結果を図 6(c)に示す。その結果、通電後に剝離力が最も低下する最適くし電極寸法は電極幅 150 μm、電極間隔 100 μm であり、平均通電後剝離力は初期粘着力の約 1/3 まで低下した。

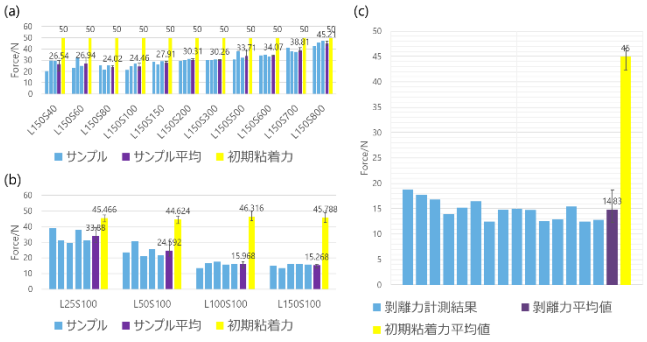


図 6 (a)S 調整後の剝離力計測結果；(b) L 調整後の剝離力計測結果

4. まとめ

本研究では、インフラモニタリングにおけるセンサーの取り付け・外しの課題を解決するため、導電剝離サンドイッチ構造を提案した。本構造は、くし電極フィルムと導電剝離シートを組み合わせることで、非導電体表面でも容易な剝離を可能にする。最適化実験により、通電条件は 10Hz、電圧 30V 以下、電流 0.1A 以下が適切であり、くし電極寸法は幅 150μm、間隔 100μm が最良であることを確認した。これにより、初期粘着力の約 1/3 まで低下し、安全かつ効率的なセンサー取り外しが実現できる。

文　献

(1) https://www.iwatani.co.jp/jpn/business/material/electronic-materials/products/electric -release-tape/

(2) C. Anduix-Canto et al., “Unraveling the Mechanism of Electrically Induced Adhesive Debonding: A Spectro-Microscopic Study,” Advanced Materials Interfaces, 2101447 (2021), doi: https://doi.org/10.1002/admi.202101447.

©2026 IEE Japan

対称型 Dynamic Leakage Suppression Logic インバータの提案

佐藤　弘季*，前田　薫，佐藤　大樹，横式　康史(青山学院大学)

Proposal of Symmetrical Dynamic Leakage Suppression Logic Inverter

Hiroki Sato, Kaoru Maeda, Daiki Sato, Yasufumi Yokoshiki (Aoyama Gakuin University)

１．まえがき

エナジーハーベスタによる IoT 機器の駆動を実現するためには、デジタル回路の低消費電力化が必要となる。電流制限 MOSFET をデジタル回路のスタンダードセル内に追加し、論理回路自体の消費電力を低減することで大幅な低消費電力化を達成する手法がある[1]。本研究では Dynamic Leakage Suppression Logic (DLSL)回路を改良した対称型の DLSL インバータについて報告する。これは小型通信機器に搭載する CPU やデジタル回路向けの低消費電力論理回路実現につながるものである。

２．従来の論理回路

INV は定常状態の時、必ず PMOS か NMOS のどちらかが OFF になるため、電流が小さくなり定常状態の消費電力が非常に小さくなる。チャネル幅 W を 500 nm, 温度 T を 27 ℃、V_{DD} を 0.2 V にしたとき、INV の定常状態の消費電力の平均値は、633 fW であった。V_{DD} を 1.8 V にすると、35.9 pW になる。電源を低電圧にする事が低消費電力化に寄与するが、MOSFET を追加する Stack 型の構造でも低消費電力化が達成できる。チャネル幅 W を 500 nm, 温度 T を 27 ℃、V_{DD} を 0.2 V、Deep N well を使い V_{BS}=0 V にしたとき、stack 型の INV の定常状態の消費電力の平均値は、332 fW であった。

３．論文で提案されていた低消費電力論理回路

先行研究[1]で提案されていた低消費電力論理回路は Dynamic Leakage Suppression Logic (DLSL)と呼ばれている。DLSL は定常状態の時、V_{GS}<0 V となり、定常状態の電流が抑えられる。そのため、stack 型の INV や INV と比べて低消費電力になる。チャネル幅 W_{MNT} を 9 μm, 他の W を 500 nm、温度 T を 27℃、V_{DD} を 0.2 V にしたとき、DLSL の INV の定常状態の消費電力の平均値は、154 fW であった。W_{MNT} を 500 nm にした時、定常状態の消費電力の平均値は、134 fW であった。チャネル長 L はすべて 180 nm である。

４．提案する低消費電力論理回路

先行研究[1]で提案されていた低消費電力論理回路は、非対称的であった。さらに、基板バイアス効果が発生し、非線形性が強くなっていた。対称性があり、基板バイアス効果がない回路を提案する。この回路では、ゲート-ソース間に加わる負の電圧の絶対値が大きくなるため、電流がより抑えられ、低消費電力になる。チャネル幅 W を 500 nm、温度 T を 27 ℃、V_{DD} を 0.2 V にしたとき、定常状態の消費電力の平均値は、58.5 fW であった。

５．今後の展望

今回は対称型の DLSL インバータを報告した。今後はより多様な電源電圧や回路構成を変えて検討するほか、DLSL 回路を利用したデジタル回路の設計を行う。

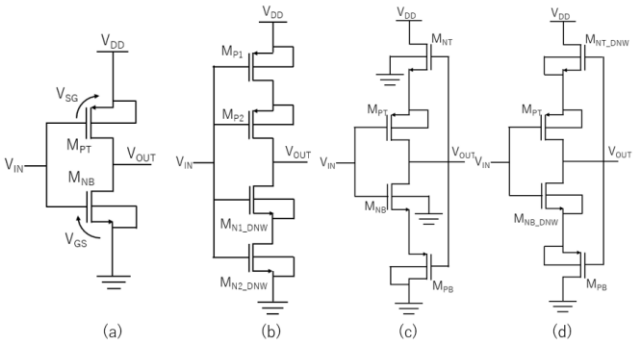


図 1 低消費電力論理回路(a)INV (b)stack INV(c)DLSL-INV(d)symmetrical DLSL-INV
Fig 1. Low-power consumption logic circuit (a)INV (b)stack INV(c)DLSL-INV(d)symmetrical DLSL-INV

表 1 低消費電力論理回路の定常状態の消費電力の平均値
Table 1. Average steady-state power consumption of low-power logic circuits

	$P_{STEADY_AVERAGE}$ [fW]
INV	633
stack INV	332
DLSL-INV	134
symmetrical DLSL-INV	58.5

６．謝辞

本研究は、東京大学 VDEC 活動を通して、日本シノプシス合同会社、日本ケイデンス・デザイン・システムズ社、シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われた。

文　献

(1) Lim et al. ISSCC 2015, 8.2, pp146–147.

©2026 IEE Japan

MEMS マルチモーダル触覚センサを用いた近接・接触・離脱過程の動的同時計測

髙橋　瑞樹*，中村　眞子，安部　隆，寒川　雅之（新潟大学）

Dynamic and Simultaneous Measurement of Approach, Contact, and Separation Processes Using a MEMS Multi-modal Tactile Sensor

Mizuki Takahashi, Mako Nakamura, Takashi Abe, Masayuki Sohgawa (Niigata University)

１．はじめに

近年、農業の労働力不足解消に向け、作業ロボットで農産物を傷つけない把持を可能にするための多機能な小型センサが求められている[1]。そこで我々は、MEMS 技術により熱・力・近接感覚を同時測定できる小型触覚センサを開発した。本研究では熱と光の検出素子のレイアウトと作製プロセスを再検討し、力の検出素子とともに同一チップ上に集積化することで、同一箇所の温度、力、光という異なるモダリティを動的かつ同時に測定することを可能にした。触覚と近接覚の両方を備えたセンサは、より正確な把持制御を可能にすることが期待される。

２．設計および実験

図 1 に各検出素子を集積化した MEMS 触覚センサの概略図を示す。伝熱による接触物の温冷感評価のため、チップ上にはセンサ温度を制御するためのヒータが集積されている。図 2 に実装後のセンサの写真を示す。各検出素子は PDMS によって封止されており、また光計測のためのチップ LED が搭載されている。このセンサを 33.9 ℃に昇温させた後、図 3 に示す各対象物を近接、接触、離脱させた際の各素子の抵抗変化を出力として同時に測定した。

３．結果

図 4 に温度、力、光の各検出素子の出力変化を示す。なお、ひずみゲージとフォトレジスタは温度変化の影響を受けるため、測定データに対して温度に応じた補正を行った。温度測定については、対象物の温冷感の違いによって接触後の温度変化に差異が生じている。力測定については、対象物の種類によっては応力緩和による緩やかな出力変動があるものの、接触中のひずみゲージ出力はほぼ一定であり、センサが静止保持されている状態を検出できている。光測定については、対象物の接近によって対象物からの反射光が増加したことによる、フォトレジスタの出力変化が確認できた。また対象物の材料や表面状態の違いにより、出力の減少幅に差があることや、接触直前で出力増加に転じることが確認できた。以上の結果から、温度、力、近接の 3 つの異なる感覚を動的かつ同時に測定可能であることが示された。

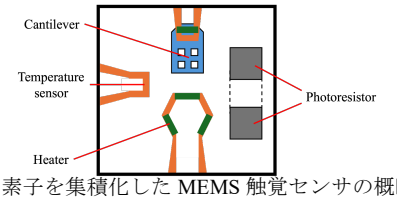


図 1 各検出素子を集積化した MEMS 触覚センサの概略図
Fig.1. Schematic illustrations of the MEMS tactile sensor integrated with each sensing element

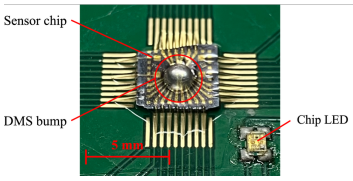


図 2 実装したセンサ
Fig.2. Mounted on PCB sensor

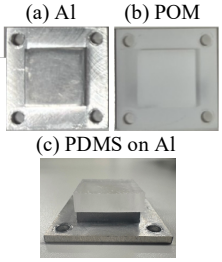


図 3 接触対象物
Fig.3. Contact objects (a) Al, (b) POM, and (c) PDMS on Al

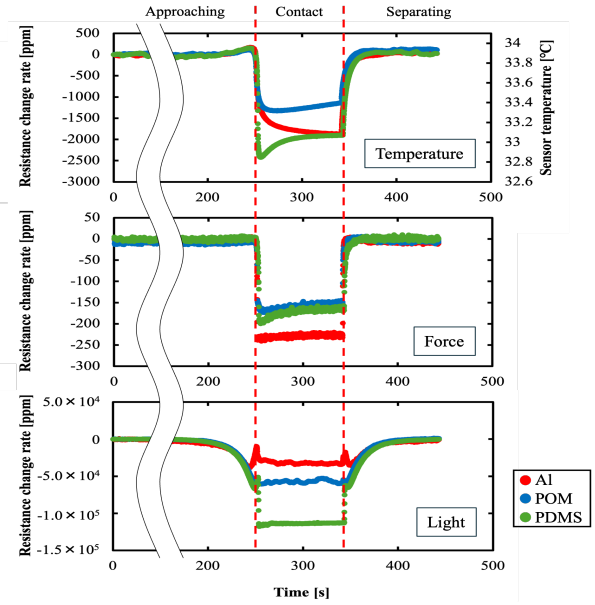


図 4 測定開始時を基準とした温度、力、光に対する抵抗変化率
Fig.4. Resistance change rate as a function of temperature, force, and light, relative to the initial measurement

文　献

(1)　J. Ao, et al.: Agronomy, 15, 2650 (2025)

©2026 IEE Japan