ISSN 0918-9939

公益財団法人 立石科学技術振興財団

助成研究成果集

【第35号】

2026年（令和８年）

助成研究成果集

第　35　号

2026年（令和8年）

公益財団法人　立石科学技術振興財団

Tateisi Science and Technology Foundation

設　立　趣　意　書

今日，日本の科学技術の進歩・発展は著しいものがありますが，エレクトロニクス及び情報工学の分野における技術革新も，いまでは社会的・経済的にきわめて大きな影響を及ぼしています。たとえば，工場では各種工程のオートメーション化が進むとともに，オートメーション機器をコンピュータや通信機器とつなぎ，工場全体を統合的に動かすシステムの実現へと向かっています。

一方，オフィスでは，ワークステーションやパソコンなどのOA機器の普及が目覚ましく，また通信技術を利用することにより，データベースへのアクセスや情報交換も盛んになりつつあります。さらに，家庭においても，いわゆるホームオートメーション機器が浸透しはじめています。

このように，人間が働き生活する環境に，エレクトロニクス技術に支えられた各種機器がどんどん入ってきており，しかもその技術は年々高度化・システム化してきています。しかしながら，その技術革新のスピードが速いだけに，技術革新がそれら機器やシステムを使う主体である人間に及ぼす影響が十分考慮されない傾向があります。このため，本当に使いやすい機器・システムの開発が大きな課題になっています。

一方，今後の技術の飛躍的な発展のためには，人間の素晴らしい知識能力を規範にしたファジィなどの人工知能技術を確立し，使いやすい機器・システムの提供はもちろん，人間がより楽しく創造的な活動をするのに広く役立たせることが期待されます。

このような情勢に鑑み，オムロン株式会社，立石一真及び立石孝雄の醵出資金により「立石科学技術振興財団」を設立し，エレクトロニクス及び情報工学の分野で，人間と機械の調和を促進する研究及び国際交流に対し助成をおこない，技術革新を人間にとって真に最適なものとすることに寄与せんとするものであります。

1990年3月

助 成 研 究 成 果 集

［本研究成果集は当財団ホームページより PDF で閲覧可能です］
https://www.tateisi-f.org/research_r/books/list.html

目　　次

1．ごあいさつ …… 6
立石文雄（理事長）

2．財団関係者寄稿 …… 7
中鉢良治（評議員）　　東京情報デザイン専門職大学　学長

3．研究室訪問 …… 8
東京大学　定量生命科学研究所　船水研究室

4．研究助成成果報告（59 件）

研究助成（S）

1．スモールデータ機械学習に基づくリアルタイム音コミュニケーション能力拡張システム …… 13
猿渡　　洋　　東京大学

2．手話言語等の多文化共生社会に向けた ICT を活用したコミュニケーション基盤構築 …… 18
高橋　裕樹　　電気通信大学

研究助成（A）

1．生体磁場計測装置を用いた筋活動電流評価による神経筋疾患診断方法の確立 …… 24
赤座　実穂　　東京科学大学

2．高度な表現力を備えるアンドロイドの感性評価に基づく対人印象制御法の開発 …… 28
石原　　尚　　立命館大学

3．AI センサ融合基盤が拓く次世代の日常行動認識 …… 33
石丸　翔也　　大阪公立大学

4．ヒトの変性膝関節症を考慮した運動学習モデルの開発 …… 40
王　　森彤　　弘前大学

5．人間 - 機械系の振動伝搬を時空間稠密に捉える実時間高速ボリュメトリックビジョン …… 45
WANG FEIYUE　　広島大学

6．人間と機械の安全な触れ合いを実現する熱変色センサの開発 …… 50
大澤友紀子　　慶應義塾大学

7．サブミリ波によるがんの早期診断に向けた高感度電界イメージングシステムの開発 …… 55
岡田　竜馬　　奈良先端科学技術大学院大学

8．外骨格ロボットを用いて運動パフォーマンスを向上させる仕組みの解明 …… 61
加藤　辰弥　　一般社団法人NeuroPiano

9．医療事故回避に貢献する医用画像技術構築のための生体計測に基づく間接的画像評価 …… 66
菊池　洋平　　東北大学

10. 多彩な脳情報を読み出す認知デコーディング技術の創出 …… 70
北西　卓磨　　東京大学

11. 日常生活の中で植物バイオセンサーを利用して生活習慣病を早期に発見する技術の開発 …… 74
木下奈都子　　筑波大学

12. AIロボットと迷走神経刺激によるデュアル・クローズドループ型手指機能訓練法の開発 …… 79
桐本　光　広島大学

13. 力覚情報に基づく把持加工動作のスキルトランスファ技術の開発 …… 84
桑原　央明　芝浦工業大学

14. 経皮的脊髄刺激による下肢筋協調パターンの変調：動作向上のニューロモジュレーション …… 89
斎藤　寛樹　東京工科大学

15. やわらかい予期の臨界的不安定性が導く人間と機械のリズム同調システムの開発…… 93
笹井　一人　茨城大学

16. 言語指示による群ロボット協調輸送のための深層強化学習技術の開発 …… 98
柴田　一騎　奈良先端科学技術大学院大学

17. 隠消現実感技術に基づく運転者支援システムの開発 …… 103
柴田　史久　立命館大学

18. 静電容量の全支配因子を活用する人の皮膚感覚を模擬した液晶触覚素子の創製 …… 107
柴田　陽生　長岡技術科学大学

19. 柔軟性立体可変抵抗型力センサによる血管モデル機能解析システムの構築 …… 112
趙　炳郁　東京大学

20. 病理医が信頼を寄せる人協調型AI診断システムの開発…… 116
助川信太郎　香川大学

21. 視知覚特性に基づく物体の光沢感の正確な画像再現手法の開発…… 121
田中　緑　千葉大学

22. 歩行アシストに滑らかさと柔らかさを吹き込んだロボティック・ハンドフリーステッキ …… 126
田中　良幸　長崎大学

23. イオノエレクトロニクスに基づく生体微粒子の機能解明 …… 131
田畑　美幸　東京農工大学

24. 単眼ビデオによる物体操作を含む人間の4D再構成およびアクション編集への応用 …… 136
鄭　銀強　東京大学

25. 体内深部でも見える色素：多色磁性粒子画像法の開発 …… 140
Tay Zhiwei　国立研究開発法人産業技術総合研究所

26. 食品形状設計技術と高精度フード3D造形技術の開発による食感デザイン法の確立 …… 144
長井　超慧　東京大学

27. 人体模倣ソフト触覚センサネットワークによるヒトと同様に高度な触知覚能力の実現 …… 148
永野　光　京都工芸繊維大学

28. 慣性センサ搭載耳装着型デバイスを用いた重心動揺計測手法の開発 …… 152
西山　勇毅　東京大学

29. 骨格筋電気刺激と人間の適応性を活用した身体動作変容システムの開発 …… 157
萩生　翔大　京都大学

30. ウェアラブル深部体温センサの暑熱対策応用に向けた実用化研究 …… 162
橋本　優生　東京科学大学

31. 高効率ストレッチャブル有機太陽電池材料の創成 …… 165
東原　知哉　山形大学

32. 全身体BMI …… 169
平　理一郎　東京科学大学

33. 動的プリミティブの運動制御仮説に基づく歩行・走行への介入と訓練効果 …… 174
平井　宏明　大阪大学

34. AI自動評価技術を用いた内視鏡手術技術の定量化と次世代教育システムの開発 …… 179
福田　篤久　九州大学

35. 医療器具への多数センサ集積のための配線レスな信号スイッチング機構 …… 182
坊野　慎治　立命館大学

36. 海馬系の脳計測との融合を目指した人工知能技術の開発 …… 187
細谷　晴夫　株式会社国際電気通信基礎技術研究所

37. ウェアラブル視線推定システムのための眼瞼皮膚歪みセンサ…… 191
松久　直司　東京大学

38. 生体インプラントを見据えた細胞シート型バイオメモリの開発…… 196
望月健太郎　京都府立医科大学

39. 身体的特徴のデータ解析による定量的技術評価・向上システムの開発 …… 200
森　健太郎　舞鶴工業高等専門学校

40. RLHF を用いた自閉症児の個性に合わせた LLM の最適化と寄り添う対話ロボットへの実装 …… 205
吉村　優子　金沢大学

41. 材質同定・全天球透視検査に向けたカーボン・ゴム印刷式のビーチボール型カメラの創出 …… 210
李　　恒　中央大学

研究助成（B）

1．骨導デバイスを利用した聴覚拡張現実の実現 …… 215
鵜木　祐史　北陸先端科学技術大学院大学

2．生体内デバイスのための超フレキシブル電力伝送装置開発 …… 220
藤田　克彦　九州大学

3．Investigating the Effect of AI on Meaningful Interpersonal Communication …… 224
楊　　期蘭　東京大学

研究助成（C）

1．高齢者向けの身体接触を伴うカウンセリングロボットの実現…… 228
秋吉　拓斗　奈良先端科学技術大学院大学

2．エレクトロニクス技術を駆使した脳卒中者へのリハビリテーション介入基盤の確立…… 233
伊藤　実央　埼玉県立大学

3．脊椎圧迫骨折高齢者の立位バランスを向上させる視覚フィードバックシステムの開発 …… 238
澤井　　舜　京都橘大学

4．運動技能獲得支援に向けた共収縮の機能の解明―高速性と正確性のトレードオフへの挑戦 …… 243
須藤　佑介　東京大学

5．深層学習を用いた OCT における網膜下液のセグメンテーションと黄斑浮腫早期診断 …… 248
XUE XIAOZHONG　京都工芸繊維大学

6．大脳駆動型および小脳駆動型運動学習における VR から実環境への運動学習転移…… 253
竹尾　雄飛　大分大学

7．人間機械系の能力向上に向けた情報改変の普遍的設計論の構築…… 258
田中　健太　大阪大学

8．筋電波形を用いた腕の動きに同調するパワーアシスト …… 262
田中　太一　長岡技術科学大学

9．切り紙・折り紙構造を用いた MEMS 三軸触覚センサアレイ …… 267
中島利八郎　慶應義塾大学

10. 人工知能を用いた骨盤正面 X 線画像からの四肢筋肉量推定と活動量調査 …… 270
西村　亮祐　愛媛大学

11. 生体利用型マルチモーダルセンサ系と匂い情報を活用した人捜索システムの構築…… 275
福井　千海　千葉大学

12. ヒト疾走中のアキレス腱 最大 Strain を医工計測から予測する …… 279
藤森　俊秀　筑波大学

13. 能動的なヒト脳活動における脳内言語情報解読手法開発への挑戦 …… 283
LIU MUXUAN　お茶の水女子大学

5．国際交流助成一覧（24 件）

国際交流助成（国際会議発表）（10 件） …… 287

国際交流助成（短期在外研究）（ 6 件） …… 288

国際会議開催助成（8 件） …… 289

ご あ い さ つ

助成研究成果集第 35 号の発行にあたり，ご挨拶申し上げます。



はじめに，本年発生した「令和 8 年熊本地震」により被災された皆様に，心よりお見舞い申し上げます。被災地の一日も早い復旧・復興をお祈り申し上げます。このような時代にあって，科学技術が人々の暮らしや社会の安全・安心に果たす役割の大きさを，あらためて感じております。

公益財団法人立石科学技術振興財団は，オムロン株式会社創業者・立石一真の卒寿を機に，「人間と機械の調和」の促進を趣意として，1990 年に設立されました。以来，研究助成および国際交流助成を継続的に行い，これまでの助成件数は 1,800 件を超え，累計助成金額も 37 億円に迫る規模となりました。これもひとえに皆様からのご支援とご協力の賜物であり，深く感謝申し上げます。

本成果集は，助成対象となった研究成果を広く共有し，財団が掲げる理念のさらなる普及と，研究者間の交流・連携の促進を目的として，毎年発行しております。本号にご寄稿いただきました研究者の皆様，またご協力いただいた関係者の皆様に，心より御礼申し上げます。また，本成果集が研究者の皆様にとって新たな着想の契機となり，ひいては社会課題の解決につながる一助となれば幸いです。

本年 5 月に開催された助成金贈呈式では，新たに助成を受けられた 52 名の皆様から，研究テーマと今後の抱負が語られました。そこには，未来を切り拓こうとする高い志と，研究にかける真摯な熱意が感じられました。皆様が「人間と機械の調和」に資する研究を推進し，科学技術による社会課題の解決に貢献され，その研究の進展を今後の成果集で拝見できることを期待しております。

当財団は設立 35 年目を迎えました。生成 AI の急激な進展に加え，ロボティクスやセンサーなどを通じて実世界と接点を持つフィジカル AI への関心が高まるなか，科学技術と社会との関係があらためて問い直されています。こうした時代であるからこそ，当財団が掲げる「人間と機械の調和」の理念は，これまで以上に重要な意味を持つものと考えております。

当財団はこれからも，設立の趣意を踏まえ，人間中心の科学技術を通じて，よりよい社会の実現を志す研究者の皆様の夢と情熱を支え，日本発の挑戦的かつ独創的な研究の発展に貢献してまいります。

引き続き，皆様のご支援とご指導を賜りますよう，心よりお願い申し上げます。

2026 年 10 月
理事長　　立　石　文　雄

財団関係者寄稿

「人にやさしい」を求めて



技術革新が成長の絶対条件と信じられていた時代にあって，あくまでも人間を基準として「人間と機械の調和」を唱えた当財団の理念は，技術のあり方を考える我々にとって今なお重要な視点である。「機械」とは，今日ならロボットやスマホ，インターネット，AI などの先端技術を指すのであろうが，これらの「機械」がストレスフリーで人間と共存する世界を目指していたということである。

かつて「人にやさしい」という言い方が流行った。改めて「人にやさしい」を AI で検索してみると，「人間の身体的・心理的な特性や負担に配慮し，誰もが無理なく使える・過ごせるように設計する」とある。ならば安直ではあるが「調和」は「やさしい」と読み替えることもできる。人にやさしい技術は人間が技術と立ち向かう際の出発点でありゴールでもある。

一方，人間も機械も時代と共に変化するものであるから，調和の度合を測るためには「やさしさ」の基準が必要となる。前職の研究機関では計測の基準作りに「原器」を用いていた。実際キログラム原器，メートル原器などを保有し，この原器を基にさまざまな用途に用いられる計測器を認定している。

認定を受けた計測器は使用される分野によって精度も異なれば素材も異なる。いずれも日常的に使用されるため定期的に更新される。今日ではモノとしての「原器」は物理定数に置き換えられているが，「原器」の概念は変わらない。「人間と機械の調和」の理念は，言わば技術開発の「原器」と言ってもよい。

財団の理事会・評議員会では，理念の今日的理解について白熱の議論が行なわれている。これは計測器作成プロセスそのものである。社会科学的アプローチの必要性，グローバル展開のあり方，ソフトウェアやソリューションへの分野拡大，環境配慮，AI の活用，財団広報の強化など話題は尽きず，知識や経験の異なる意見の応酬は興味深い。現時点では明確な結論には至っていないものの，全員が理念のより良き理解に努めている。この熱い思いは疑いなく研究助成のテーマの選考基準にも反映されている。

本成果集は研究者たちが財団の理念に果敢に挑戦した証であり，当財団のメッセージと言ってもよい。是非ご高覧あれ。

東京情報デザイン専門職大学　学長　中　鉢　良　治（評議員）

研究室訪問

東京大学　定量生命科学研究所　船水研究室

本郷のキャンパスに蝉しぐれが響き渡る 7 月末，2022 年度研究助成（A）の受領者* である東京大学定量生命科学研究所 講師 船水章大先生の研究室を，選考委員の椹木委員，中嶋委員とともに訪問しました。船水先生の研究室では，脳が感覚情報をどのように解釈し，過去の経験や知識と結びつけて行動を選ぶのかを，脳科学と AI を組み合わせて明らかにしようとされていました。大変興味深かったのは AI を単なる解析道具として使うのではなく，脳の情報処理との共通点，違いを照らし出す手段とされていたことです。AI のこれからと限界，そして当財団が掲げる「人と機械の調和」のあり方を考えさせられる刺激的な一日となりました。お楽しみください。

*受領時研究課題：「意図を読み取る基盤技術開発」

リポーター　事務局 片岡宏隆

――神経科学や脳科学の研究に取り組まれるようになった経緯などを教えてください。



子どもの頃，「ドラえもん」みたいな機械を作りたいと思ったことがきっかけで，ロボットや人工知能（AI）を学ぼうと工学部に進学し，情報理工学，知能機械情報学と学びました。しかし，2000 年初頭の当時は深層学習がまだ登場しておらず，AI 研究は現在のように活発ではありませんでした。私自身もこれで脳のように考える AI を作れるんだろうか，と疑問に思い始めたのです。そこで，まずは脳そのものについて知ろうと考え，神経科学の道に入りました。その後，銅谷賢治先生（沖縄科学技術大学院大学）と Anthony Zador 先生（Cold Spring Harbor Laboratory）の下で，理論と実験の融合研究を学び，脳の神経回路も人工知能と同様の最適機能が実装されていることを知りました。とはいえ，動物の脳には可能でも機械学習には困難な課題があります。そうした課題をマウスを使って神経活動を計測して機械学習との違いを調べる研究を開始しました。将来的には，動物の脳で得た知見を人工知能に応用したいと考えています。

――現在は，どのような研究を進めておられますか。

意思決定の神経科学研究を進めています。生きものの意思決定は感覚刺激だけでなく，日頃から蓄積された経験に多く依存していると考えられます。脳の中で感覚刺激と経験がどのように結びつき，行動に繋がるかを解明しようというものです。私たちの研究の最大の特徴は，神経活動を計測するなど，脳をダイレクトに研究するだけではなく，今後，意思決定の多くを担うであろう AI 側の知見を取り入れていることです。例えば，ベイズ推定を用いれば感覚刺激と経験をどのように統合すれば最適になるか，モデル化することができますし，AI を使って最適行動に結びつく回路の

仮説を立て，そこから人工ニューラルネットワーク（ANN）や制御理論を比較することもできるのではないか。また，AIと脳活動を統合することで新しい計算理論を作れるのではないかと考えています。さらに脳にはできて，AIにできないことは何なのかも探っていきたいと考えております。

――感覚刺激と経験は，表象レベルは同じと見なすのでしょうか。あるいは，経験は感覚プラスαを伴って，行動に繋がるとされているのでしょうか。

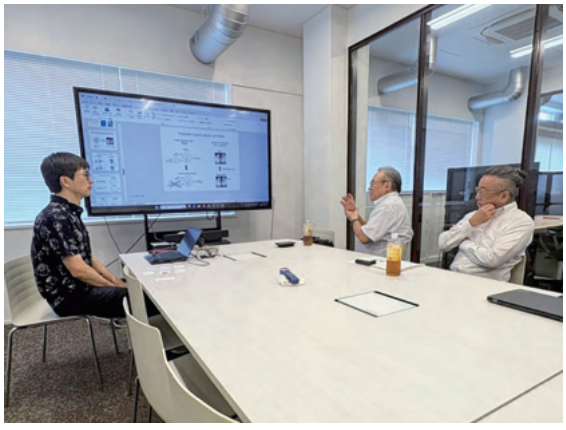
経験は感覚刺激と同様に脳の中で蓄積されますが，神経活動といった表象レベルでは，感覚刺激と経験に階層的な違いがあるのかを知るのは難しいです。

――長期記憶のスキーマ等を連想するのですが，感覚刺激はその一部，ひも付けのようなものとしてとらえられてきました。それがどのように統合されるのでしょうか。

以前，これがあれば餌がもらえたといった長期的な記憶も含めて経験としています。が，両方を含みます。「最近，納豆を食べた」という短期的な経験と，「子どもの頃から食べてきた納豆はおいしい」という長期的な記憶も統合して，経験とします。

感覚刺激による経験は，マウスを用いて行動実験を行いました。マウスが音刺激の周波数の高・低に応じて，左・右のスパウトを舐め分け，正解ならば報酬として水を得ることができる行動実験を行いました。左右のスパウトからもらえる水の量をバイアスさせることで，どちらのスパウトから多く水を得られるかを予測させる系を立ち上げ，感覚刺激と音の周波数，認知機能，左右どちらに運動するか，それらが脳の中でどのように表現されているかを計測しました。その結果，大脳皮質の運動野や聴覚野は，マウスの左右スパウトの選択，音刺激の選択を表現し，前頭葉・運動野・聴覚野は，報酬の予測を均等に表現していることがわかりました。興味深かったのは，音を聞いて「今ならどちらを選ぶか」というピュアな経験を表現するのは，全ての領域から経験の活動パターンが見られることです。脳は場所ごとに異なる機能を担っているものですが，経験は脳の中で広く共有されているという知見を得ました。

その後，マウスの神経活動から行動選択を最も早くできる脳領野の同定を目指しました。まず，行動実験中に聴覚野の神経活動を計測し，情報学的デコーディング手法でマウスの左右選択を予測したところ，予備検討の段階ではありますが，5秒以上前の神経活動からマウスの行動選択を予測できました。ただし，マウスの身体の動きからのほうが，聴覚野の神経活動よりも，高精度に行動選択を先読みできたため，複数の脳領野の神経活動を計測し，行動予測の精度と時刻を領野間で比較することで，行動選択の意図がどの領野から始まるかを検証できると考えています。



――事前知識や経験に基づく行動には，脳の機能局在をつなぐようなネットワークがあるということですか。

技術的進歩によって，同時に計測できるニューロンの数は劇的に増加しましたが，神経科学の手法では依然として脳全体のニューロン活動を捉えることはできていません。脳全体が意思決定をどのように駆動しているかを理解するためには，計測されていない脳領域の役割と活動を予測することが重要になります。脳の機能局在構造は，ある場所に電気刺激等を行って体がどう機能するか，機能阻害した場合はどういう機能が損なわれてしまうかといった実験で得たものが多いと考えられます。ひとつの仮説として，ある領野で表現されているものと機能は少し違うのではないかと考えられるのではないかと思うのですね。不思議なもので，脳全体で表現しなくてもいいのではないか，あるいは何のために表現しているのかも現時点では謎が多いです。

感覚刺激による経験が蓄積されている状態で，意思決定がどのように行われるのか，また，感覚刺激がどのように身体運動を作るのかがポイントになります。行動実験中にパソコン上でこの行動実験の様子を AI で再現できないかと考えました。脳と AI を統合するわけです。意思決定における大脳皮質の機能をモデル化するために，人工ニューラルネットワーク（ANN），特にリカレントニューラルネットワーク（RNN）に焦点を当てて，マウスから計測した神経活動を AI の入力として使い，AI 側の回路を学習させ，結合パターンを構築して，マウスの神経細胞パターンをリアルニューロン，AI の活動パターンをサイバーニューロンとしました。それらを統合して，ひとつのモデルに双方が混在する「Real-cyber hybrid neural network（HNN）」を提唱しました。

従来の方法では認知機能の中から意思決定に関わる神経活動は，マウスではごく限られた範囲しか計測することができませんでしたが，HNN を用いれば計測していない部分の神経細胞についても，人工知能の神経活動パターンから予測できると考えています。これを検証したところ，マウスの舌の動きをカメラで計測した身体運動では，左右スパウトの選択直後の行動をほぼ 100% 予測することができました。音の刺激提示以前の身体運動でも選択行動を予測でき，行動選択の 0 ～ 5 秒前では 50% 以上の精度で選択行動を予測できました。聴覚野の神経活動も身体運動と同じように左右スパウト選択を予測できましたが，神経活動での識別精度は身体運動での精度よりも低くなりました。聴覚野の神経活動は行動選択において，身体運動と重複した表現しか持たない可能性があります。

――顔の動きのみで予測しているように見えるのですが，体の動きにも連動しているのですか。

行動実験中のマウスは，体全体を動かしています。AI の入力に用いる神経細胞の数をふやすと，身体運動の予測の成績が向上します。おそらく，異なる細胞が異なる運動を表現しており，その表現情報を AI を使うことで，性能が向上したのだと考えていますが，まだまだ AI 側の改良が必要というのが現状です。ただ，可能性があるのが AI には 300 細胞程しか入力できません。しかし，マウス脳には少なくとも数



千万の神経細胞がありますから，神経活動の数を増やすことによって結果が変わるかもしれません。また，現状では電極を刺入したり，二光子顕微鏡で神経活動を計測していますが，弊学にある広視野の二光子顕微鏡を使えば数 1000 細胞の活動を計測できるので，「脳のような AI」に繋がる可能性があります。

――ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）等の研究にも関わってくるでしょうか。

私たちの研究はヒトではなくマウスを対象としているという違いはありますが，BMI にも密接に関わってくると考えています。私達の技術は，マウスの神経活動から意図や感覚入力を読み取ることができます。「マウスロボ」を構築すれば，BMI で操作することが可能になるかもしれません。フィジカル AI 研究にも役立つ可能性はあります。

――迷路における経路学習みたいものが経験からの知識だとされてきたように思っていたのですが，マウスが感覚刺激を受けて動的に体を動かすケースよりも，ヒトではさらに複雑な知識が行動に繋がるのだろうと感じました。

実は，そのあたりも研究してきたところです。今回扱った意思決定は複雑さがありません。実験では左のスパウトを選んで水がもらえたから，次も左のスパウトが良いかもしれないという非常に単純な経験です。他方，例えば海馬は，今歩いたら状態が変わるというメンタルシミュレーション，内部状態の変化を表現する可能性が示唆されています。頭の中で想像を巡らせるような経験は，海馬だけでなく頭頂部の皮質でも表現していることを発見しております。意思決定の研究は本当に面白いです。

――文脈であったり，いわゆる空気を読みことに関しては，どうでしょうか。「人と機械の協調」を考える際には，文脈は重要な意味を持つかと考えられるのではないでしょうか。

文脈は難しいかもしれないですね。私の研究ではマウスを使っているので，行動実験を工夫する必要があります。現状の実験では，音を聞かせて報酬を経験させても，それが異なる文脈にあるかどうかは対象にできないところがあります。

――今後の展望をお聞かせください。

現在，AI は大規模言語モデル等で発展していますが，リアルワールドや未学習の実環境にいきなり放り込まれた場合に対応が十分でないといった課題があります。ヒトや動物は対応に柔軟性があり，未知の環境に放り込まれてもそれなりに行動できます。これからは AI や機械側の柔軟性が重要になってくるでしょう。AI にはできないことを脳はどのように処理しているのかを探り，機械側に応用することで大規模言語モデル等を改良できればと考えています。

脳への理解を進めるということは，教育分野，精神疾患を扱う医療や創薬分野に貢献できると考えています。現在は神経活動と人工素子を融合した AI の作成に取り組んでいますが，遺伝子発現パターン等を AI に組み込むことができれば，精神疾患の病態を引き起こすパターンを予測できる

かもしれません。脳の知見から将来の脳型 AI の開発に繋がることを期待しています。人間と機械が手を取り合っていく社会の実現に向けて，研究を進めてまいりたいと考えています。

――最後に，当財団の助成についてご意見，ご感想などありますか。

応募した当初は，神経科学が主たる内容で「人間と機械の調和を促進する研究活動」への助成は大丈夫なのだろうかと不安でしたが，人間の脳と AI（機械）で互いを理解し，人類の幸せに貢献できる可能性を認めてくださり，とても感謝しています。



研究助成成果報告

［研究助成（S）］

スモールデータ機械学習に基づく リアルタイム音コミュニケーション能力拡張システム

2238001



研究代表者（助成金受領者）	東京大学 大学院情報理工学系研究科	教授	猿　渡　　洋
共同研究者	慶應義塾大学　理工学部情報工学科	准教授	高　道　慎之介
	東京大学 大学院情報理工学系研究科	講師	齋　藤　佑　樹

［研 究 の 目 的］

本研究では，スモールデータ機械学習に基づく音情報処理及びその音バーチャルリアリティ（VR）・拡張現実感（AR）システムへの展開を通じて，人間の音コミュニケーション能力拡張の実現を主たる目的とする。具体的には，「なるべく少ない事前情報から複雑な音情景を独立成分に分解し，加工・拡張再現する」という自律的音入出力システムの開発を基盤とし，このシステムの実証的アプリケーションとして「音メディア VR・AR」を開発する。両耳補聴器やスマホ等の不特定多数の音波動センサが一致団結してユーザの受聴を助ける音コミュニケーション能力拡張システムの実現を通じて，人間と機械の融和によるライフイノベーションへ貢献する。

本研究の基盤技術は，近年のビッグデータ機械学習では不可能であった「スモールデータ（事前データが全く用意できない・非常に少ない）」における新しい数理工学・情報処理の発展に関するものであり，データ利活用で遅れをとった本邦における学術的な貢献が大きい。またライフイノベーション技術の側面から眺めた場合，視力に関しては眼鏡という補助機器が普及しているのに対し，聴覚に関してはその支援技術の開発は大変遅れているという現実がある（例えば 2025 年度において補聴器の利用率は約 16% に留まる）。本研究で提唱するシステムは，従来の専門家を介したハイコストなオーダーメイド装置（従来補聴器等）を大きく改善する技術であると言える。本研究では，新しい形態「不特定多数の音波動センサが一致団結してユーザの受聴能力拡張へ貢献する自律カスタムメイドかつ協創型システム」を最新の数理工学及び IoT 情報処理を駆使して実現する点に大きな社会貢献がある。また健聴者においても，音 VR・AR により対話対象固有の声質を加工して，明瞭性補償のみならず好みの人格への変更（安心声の実現）・感情の平滑化（受聴者ストレス軽減）等により，カスタムメイドかつ安心な新しい対話コミュニケーション能力拡張が人類にもたらされる。

［研究の内容，成果］

1. 開発システムの概要

提案する聴覚能力拡張システムは大きく分けて 2 つの要素（1）音情景分解処理，（2）音情景拡張・合成 VR・AR 処理から成る（システム概念図は図 1 参照）。（1）では，申請者らが長年研究してきた音源分離理論である「独立低ランク行列分析（ILRMA）」等を活用し，両耳補聴器やスマホマイク等の位置不定センサ群で観測された多次元信号の中から統計的に独立な音源をリアルタイムで抽出する。次に（2）で

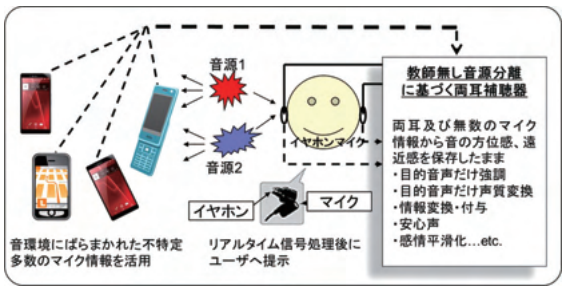


図1　音コミュニケーション能力拡張システムの概観。

はリアルタイム DNN 声質変換処理を基盤とし，(1) で推定された目的音声の話者性を自由に変換する。この統合によりリアルタイム音コミュニケーションに適用可能な聴覚能力拡張システムが実現できる。次章以降において，開発した具体的な処理系の説明を行う。

2. 音情景分解処理 1（教師無し音源分離）

ILRMA を含む一般的なブラインド音源分離アルゴリズムでは，全ての音源を個別の点音源生成モデルで表現し，それらの独立性に着目して最適な分離系を推定する。しかしより一般的な環境を考慮する場合，特に音声以外の環境音（騒音・BGM・生活音等）は点音源では表現できず，かつそれらを個別に扱うのは効率的ではない。よってこれを「音声＋それ以外」の 2 音源群モデルへ拡張する。本研究では，前記の機能を実現するため，著者らが提案していたランク制約付き空間共分散行列推定法（RCSCME）[Kubo+, IEEE Trans. ASLP 2020] を用いる。図 2 に基本となる音源分離手法の概観を示す。

この音源分離処理を音コミュニケーション能力拡張システムに導入する場合，人間のコミュニケーション処理の即時性より，リアルタイム信号処理系（入力から数十～百 ms 程度の遅延を許容した上ですぐに分離出力が出ること）として実装することが必須である。ここで図 2 の信号処理概観図を見ると，以下の特徴がある事が分かる。

(a) 前段の ILRMA 部は音源の統計的独立性を測るためある程度長いデータバッファが必要となり，その最適化に時間がかかる。つまり，リアルタイム処理化におけるボトルネックであると言える。

(b) 後段の RCSCME 部は，前段の ILRMA で推定された特徴量を基に欠落している情報を再推定するものであり，高速に稼働することが出来る。

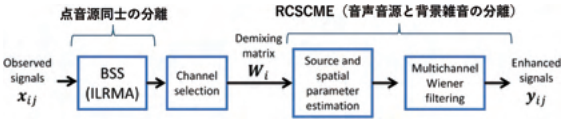


図2　音源分離手法概観。前段では ILRMA を用いてランクの欠落した雑音推定及び目的音声の情報を推定し，後段の高速パラメータ推定部分（RCSCME）において背景雑音を除去する。

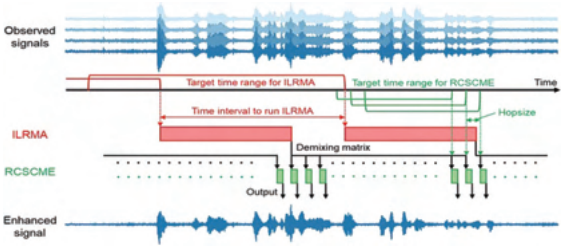


図3　リアルタイム音源分離処理フロー。前段の ILRMA は最適化に時間がかかるので長い周期で更新し，後段の RCSCME は短時間フレームで処理することによりリアルタイム音源分離を実現する。

これらの特徴に鑑み，前段の ILRMA 部はある程度長い周期でゆっくり更新し，それを補うため後段の RCSCME は短時間（即時）時間フレームで処理するという 2 層構造の信号処理フローを提案した（図 3 参照）[Ishikawa+, IEEE Access 2025]。この構造を導入することにより，リアルタイム音源分離を実現する。またボトルネックとなる前段 ILRMA 部において，その数値演算を高速もしくは数値誤差安定に実行するアルゴリズムも独自に開発した。このリアルタイム教師無し音源分離アルゴリズムを補聴器模擬システム（図 4 参照）へ導入し，より現実的な状況における音声強調性能評価を行った。

実装した補聴器模擬リアルタイム音源分離処理は，合計 8 個のマイクロホンから構成される（両耳に各 3 マイク＋不特定位置スマホ内蔵 2

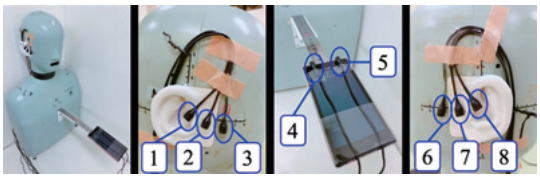


図４　補聴器を模擬した音源分離システム概観。頭部・胴体とマイクロホン配置を示す。ここで４・５番マイクロホンは手元の補助デバイス（スマホ等）を模擬している。

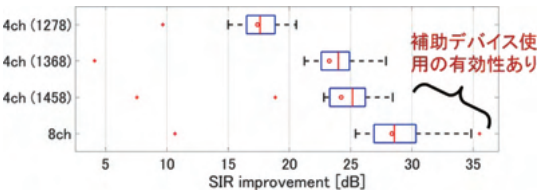


図５　リアルタイム目的音声抽出性能結果。特に４・５番マイク（手元の補助デバイスを模擬）の併用が効果的である事が分かる。

マイク）。なお，マイクロホン位置座標は使用しないので位置不定マイクロホンアレーとみなすことが出来る。そこで得られた最大８チャネルの入力信号において，前述のリアルタイム音源分離処理を実行した。音響環境としては，補聴器ユーザの正面から１～1.5 m 離れたところに居る１人の話者が発話しており，その周辺で不特定多数の会話騒音が発生していると仮定した。観測音における入力 SN 比は 0 dB である。

リアルタイム音源分離処理は汎用 PC 上の GPU もしくは CPU で計算されている。その遅延時間を計測したところ，GPU を使用した場合は４マイク使用時で 40 ms，８マイク使用時で 80 ms 程度であった。これは人間の知覚の観点から見ても，十分に速いリアルタイム処理系であると言える。一方 CPU を使用した場合，４マイク使用時ではリアルタイムで動作するものの，８マイク使用時はリアルタイム動作が不可能であることが分かった。目的音声抽出性能結果を図５に示す。ここでは Signal-to-Interference（SIR）比を示している。４マイク使用時と８マイク使用時を比較すると，明らかに８マイク使用時の性能が高い。また，同じ４マイク使用時においても，両耳付近のマイク群

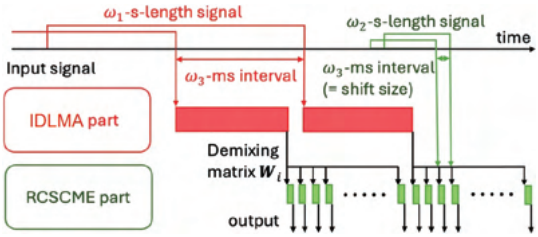


図６　リアルタイム半教師有り音源分離の概観。

を使用するだけでなく，補助デバイス（手元のスマホ）に付設されたマイクロホンも併用した場合が最も音声抽出性能が高く，位置不定マイクロホン群を活用する提案システムの有効性が確認された。

3. 音情景分解処理 2（半教師有り音源分離）

前述の教師無し音源分離では，大量の音響データベースを使って事前にモデルを学習する必要がないという利点がある。一方，近年においては，典型的な雑音下において音声信号を推定する学習済み DNN は比較的容易に入手可能である。そこで教師無し ILRMA の音源モデル部を音声推定用 DNN（Denoiser）に置き換えた半教師有り音源分離「独立深層学習行列分析（IDLMA）[Makishima+, IEEE TASLP 2019]」をリアルタイム拡張して実装した。このリアルタイム IDLMA に RCSCME を接続したシステムの評価を行った。

実装したリアルタイム半教師有り音源分離の概観を図６に示す。ここでは前述の教師無しシステムと同様，前段の IDLMA は最適化に時間がかかるので長い周期で更新し，後段の RCSCME は短時間フレームで処理することによりリアルタイム音源分離を実現している。また，IDLMA において使用される音声推定用 DNN は，音声のスペクトログラムを推定するだけでなく，音声の無音区間も提供する。これにより，雑音空間相関行列を自己推定し，その情報を雑音事前分布として後段の RCSCME に用いることとする。

図４に示す補聴器模擬システムを用いて半教

師有り音源分離処理の評価を行った。まず遅延時間を計測したところ，GPU を用いた場合においては，前章で述べた教師無し音源分離処理系とほぼ同等となり十分なリアルタイム性が確保された。一方で，CPU を用いた場合において，DNN が高速に推論できなくなるため，リアルタイム動作は確認できなかった。目的音声抽出性能を測定したところ，通常のリアルタイム ILRMA と比べて約 2 dB ほどの SIR 改善がみられた。ただし，前章で述べたリアルタイム ILRMA は音源方位に関する事前分布を導入しており，さらに性能が高かった。これらの結果をまとめると，以下のようになる。

（1）事前学習済み DNN を用いる半教師有り音源分離は，目的音声のスペクトログラム情報を確率モデルとして保持するものの，空間的な情報は持っていない。一方，雑音に関しては，無音区間推定によってその空間相関行列（空間情報）を自己推定して RCSCME 部の事前分布を構成する。（2）一方で先に開発した教師無し音源分離は，目的音声の空間的事前分布を活用しており，その方が分離性能に与える影響が大きい。つまり，この「目的音の空間情報」の存在が前記の事前学習されたスペクトログラムモデルよりも強力に働くと考えられる。

4. 音情景拡張・合成 VR・AR 処理および統合システム評価

本研究で目指す補聴器等の音コミュニケーション能力拡張システムにおいては，前段の音情景分解処理のみならず，対話コミュニケーションの即時性よりリアルタイム声質変換処理の開発・高精度化は必須となる。本研究ではこれを音メディア VR・AR レイヤーととらえ，前章までに述べた音情景分解処理（センシング・解析レイヤー）と統合し，最終的な統合システム評価を行った（図 7 参照）。

本研究では，声質変換を行う DNN モデルとして，著者らの技術をベースに開発された Paravo model v2 を基礎にし，JVS 音声コーパス（51 名話者）を用いて話者の多様性を拡大したものを用いた。この Paravo 声質変換は CPU 上で動作し，遅延は 60 ms 以下である。よって，前段の音源分離処理系（遅延は 40 ms）と合わせても 100 ms 以下の遅延でユーザに音響拡張された音を提示することができる。この遅延量は人間の聴覚においてはほぼ許容できる量であり，リアルタイム性は十分に確保されている。

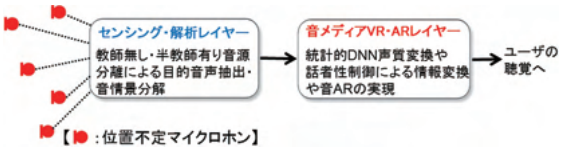


図 7　音コミュニケーション能力拡張システムにおける 2 レイヤー構造。

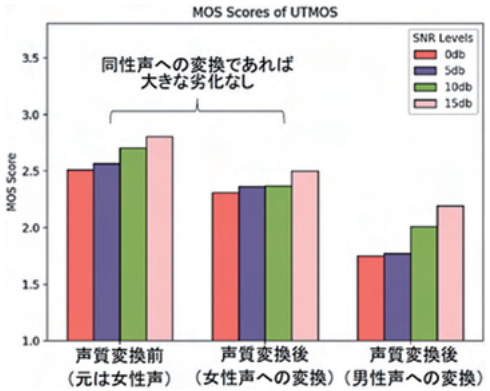


図 8　UTMOS による統合システムの品質評価結果。

統合システム評価として，まず初めに，音質評価を行った。ここでは，前段の音情景分解として 2 章で述べた教師無し処理系を用いた。ここで抽出された目的音声に対して DNN 声質変換を施し，その変換音声の品質を UTMOS によって数値化した。この UTMOS は Mean Opinion Score（MOS：5 段階主観評価）値を自動で算出するものであり，人間の聴覚印象に近い特性を持つ。元音声は若年女性声であるが，それを様々な女性声もしくは男性声に変換するタスクを採用した。入力 SN 比別の実験結果を図 8 に示す。

図 8 より，（1）単純に音源分離を施した音声は 2.5 以上の MOS 値となっており十分な品質が確保されている，（2）同性への変換でもおお

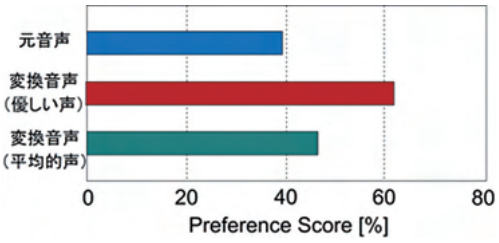


図 9 「優しい声」への人格変更 AR に関する評価。

むね同等の値となっており劣化は少ない，(3) 異性への変換は劣化が見られるが特に入力 SN 比が高い場合にはそれほど問題ではない，という事が分かる。

次に VR・AR 的な拡張として，好みの人格への変更（安心声の実現・受聴者ストレス軽減）を想定し，51 変換話者のうち「優しさ」素性の一番高い話者への変換を評価した。ここでは「優しさ」に着目した二対比較による Preference Score を算出した。図 9 に評価結果を示す。本結果より，元音声と比べ 20% 以上好まれる音声に音響拡張できた事が分かる。よって，本統合システムは，目的音声を強調するという単純な補聴器機能だけでなく，ユーザの聴覚ストレス軽減機能も有する音メディア AR システムになっている事が示された。

[今後の研究の方向，課題]

本研究では，音コミュニケーション能力拡張の実現を目指し，リアルタイム性を有した音情景分解・声質変換処理を統合したシステムを提案した。今後の課題としては，(1) 更なる遅延時間の短縮とエッジデバイスで使用できる軽量 CPU 上での動作保証，(2) さらに大規模な位置不定センサ群の統合，(3) 感情まで含めた柔軟な声質制御の実現，等が挙げられる。

[成果の発表，論文など]

・原著論文

[1] Y. Ishikawa, T. Nakamura, N. Takamune, D. Kitamura, H. Saruwatari, Y. Takahashi, K. Kondo, “Real-time speech extraction based on rank-constrained spatial covariance matrix estimation and spatially regularized independent low-rank matrix analysis with fast demixing matrix estimation,” IEEE Access, vol. 13, pp. 88683-88706, 2025.

[2] K. Seki, N. Ito, K. Yamauchi, Y. Okamoto, K. Yamaoka, Y. Saito, S. Takamichi, H. Saruwatari, “Language-queried target speech extraction using para-linguistic and non-linguistic prompts,” Acoustical Science and Technology, vol. 46, no. 6, pp. 671-675, 2025.

[3]K. Imamura, T. Nakamura, N. Takamune, K. Yatabe, H. Saruwatari, “Stride conversion algorithms for convolutional layers and its application to sampling-frequency-independent deep neural networks,” Signal Processing, vol. 242, no. 110420, 12 pages, 2026.

・国際会議発表（全て査読有り）

[1] K. Seki, S. Takamichi, N. Takamune, Y. Saito, K. Imamura, H. Saruwatari, “Spatial voice conversion: voice conversion preserving spatial information and non-target signals,” Proc. Interspeech, 5 pages, 2024.

[2] Y. Ishikawa, N. Takamune, K. Yamaoka, H. Saruwatari, “Theoretical formulation of online independent vector analysis using framewise probabilistic generative model,” Proc. EUSIPCO, 5 pages, 2025.

[3] Y. Haruyama, K. Yamaoka, N. Takamune, H. Saruwatari, “Decentralized independent low-rank matrix analysis for blind source separation on distributed microphone arrays,” Proc. EUSIPCO, 5 pages, 2026.

他 23 件

・国内発表（査読無し）

合計 21 件

・受賞

[1] 石川，日本音響学会学生優秀発表賞，2024 年

[2] 小川，日本音響学会学生優秀発表賞，2024 年

[3] 石川，IEEE Signal Processing Society Tokyo Joint Chapter Student Award，2024 年

[4] 小川，応用音響研究会学生研究奨励賞，2026 年

［研究助成（S）］

手話言語等の多文化共生社会に向けた ICT を活用したコミュニケーション基盤構築

2238002



研究代表者（助成金受領者）	電気通信大学 大学院情報理工学研究科	教授	高　橋　裕　樹
共同研究者	筑波技術大学	教授	加　藤　伸　子
	筑波技術大学	教授	白　石　優　旗
	電気通信大学	教授	内　海　　彰

［研究の目的］

現社会システムは無意識にきこえる人を前提として構築されており，きこえない人は日常生活や社会参画において多大なコミュニケーションの障壁に直面している。本課題では，視覚情報処理技術を用いた日本手話翻訳の研究開発を通して，これまでコミュニケーションが困難であった場面でも円滑なコミュニケーションの補助が可能な基盤構築を目指す。きこえない人には視覚言語である日本手話が母語となるが，きこえない子供にとって音声言語である日本語を習得することには，課題があることが知られている。また，日本語の音声の語順に合わせて手話単語や指文字を表示する日本語対応手話から「てにをは」を省いた方法では，日本手話の文法の重要部分が抜け落ち，論理的な表現を十分に伝えることが困難である。きこえない人の母語である日本手話や中間型手話では，時制，様態，疑問，あるいは格関係といった重要な文法構造が，顔の表情や頭の動きなどの非手指要素（Non-Manual Signals: NMS），および手の動く方向や位置といった空間要素によって表現されるためである。

したがって，文化的所産である日本手話の普及を促し，きこえない人ときこえる人の双方向の円滑なコミュニケーションを可能にするためには，これら非手指・空間要素を正確に解釈可能な日本手話の文法に対応した翻訳技術が不可欠である。しかし，こうした高度な日本手話翻訳の実現には，非手指要素や空間軌跡を詳細にタグ付けした大規模かつ高品質なコーパスが求められるが，そのアノテーション付与は極めて多大な労力と時間コストを要するという課題がある。

本課題では日本手話と日本語対応手話の双方の特徴を持ち日常会話で多用される中間型手話に頻出する一致動詞，指差し，表情，首・頭の動作などの非手指・空間要素を自動的に解析・アノテーション支援するシステムを構築すること，および翻訳技術の基礎を検討し，きこえない人が社会において不自由なくのびやかに自己実現できる「共生的かつ共創的な多文化共生社会」の基盤を構築することを目的とする。

［研究の内容，成果］

1. はじめに

日本語の語順に手話単語を並べるだけの日本語対応手話では，格関係や重要な文法規則が欠落し，論理的なニュアンスが伝わりにくい。日本手話や，日常会話で多用される中間型手話では，手指表現に加え，顔の表情や頭の動きなどの非手指要素，および空間を立体的に活用する

空間要素が極めて重要な文法役割を担う。

本課題は，これら非手指要素と空間要素を考慮した手話翻訳コミュニケーションシステムの構築に向け，開発のボトルネックである手話コーパス構築を劇的に高速化する Interactive and Automated Annotation Assistance for Pidgin Sign Japanese（IA3-PSJ）の提案と，これまでデータが存在しない中間型手話を含む論理的表現の手話文収集を行った。各シーン 13 名の話者多様性を保持し，260 文のデータを収集した。また，手話話者である筑波技術大学の学生の協力を得ることで適切なアノテーション付与作業を行った。さらに，空間的格関係を捉える翻訳アルゴリズムの基礎検討を行った。

2. 中間型手話における文法要素解析とシーン選定

手話には，日本手話，中間型手話，日本語対応手話がある。本課題では，まず，それぞれの手話をより厳密に定義する。中間型手話の一端を日本語対応手話，もう一端を日本手話として，その中間のすべてを「中間型手話」とする［1］。ここで言う「日本語対応手話」とは，「てにをは」などの助詞をすべて指文字で表すなど，日本語を完全に手指で表す手指日本語である。一方，助詞がないものは中間型手話の一つと考えることができ，また，空間を使う一致動詞が含まれるなど，日本手話と共通する性質が見られる場合もある［2］。このように中間型手話は日本語対応手話に近いものから日本手話に近いものまで多岐にわたり，普段の手話による会話ではこの中間型手話が用いられている。まず，統語情報が失われると文意が伝わらない可能性がある文を選定し，日常的に手話を使っている筑波技大の学生 4 人に普段の会話と同じように手話表現をしてもらった。その手話表現に含まれる日本手話文法要素の種類，頻度を調べ，主要な文法要素を明確にした。中間型手話では，単に手指動作からなる手話単語だけでなく，空間や表情を用いて表される日本手話と共通する性質が多く含まれる。このような例として，動詞を表す手話表現がある位置から別の位置へ移動することによって行為者と対象者が誰であるかという情報も表現可能な一致動詞などがある。今回の調査では，代表的な例として，一致動詞，指さし，首の動作（うなづき，首振り），眉の動作（肯定的・否定的などの態度的極性），程度を表す段階的形容詞，口形の有無を調べた。調査結果から一致動詞と指さしが中間型手話で重要な役割を果たすことが明らかになった。一致動詞の例として，図 1 に示すように「男が女を見る」を「てにをは」を使わず表現する場合には，男と女はそれぞれ異なる位置におかれ，男の位置から女の位置の方向に，「見る」という動作をすることで表現できる。そのため，単語が提示された位置や，動詞の方向の情報が必要となる。本課題では，主要文法要素として，一致動詞，指差しを含む表現の翻訳を具体的な目標とし，首や眉の動作，口型の情報も同時に収集可能な会話文を選定した。会話文で用いる一致動詞としては，見る，見せる，伝える，尋ねる，送る，メールする，助ける，与える，もらう，教える，話す，呼ぶ，貸す･借りる，怒る･叱る，殴る，行く・来る，歩く，車で行く・来るの 18 語を選出した。

3. Automated Annotation Assistance for Pidgin Sign Japanese（A3-PSJ）［成果 1］

非手指要素である表情や空間のジェスチャを自動アノテーションする初期プロトタイプシステム A3-PSJ を構築した。

1）非手指要素の自動検出

a）身体・手先・顔骨格の抽出：BlazePose［3］



図 1 「男が女を見る」という手話を，空間を用いて表した例

による身体姿勢推定，HDR［4］による遮蔽に頑健な手指姿勢推定形状，および dlib ベースアルゴリズム［5］による顔の高精度な特徴点検出。時間的な連続性を維持するため TAPIR による頑健な特徴点追跡。

b）表情・頭部動作の識別：Facial Action Unit（FAU）の自動識別［6］によって，眉の上下，ひそめ，うなずき，首の左右の動きなどの非手指要素を自動タグ付け。

2）空間アノテーション：一致動詞や指差し等の解釈に必要な空間情報を得るため，図 2 に示す話者の両肩中心と鼻を結ぶ安定した参照点から「動的な中央領域」および「周囲 8 領域」を定義し，ジェスチャが実行された空間領域と 3 次元の指差し方向ベクトルの自動取得。

予備データセットとして YouTube から公開手話動画 30 本を収集し，94 個の非手指要素インスタンスを評価対象とした。2 クラスの顔の表情，6 クラスの頭部の動きの分類を行った。図 3 に特徴点検出と空間アノテーション例を示す。従来は作業者がフレーム毎に手動でタグ付けしていた高度な非手指表現や手の空間軌跡に対して，システムが初期タグを自動付与してアノテータが微調整する A3-PSJ を実現し，作業負担の軽減を実現した。一致動詞の開始点・終了点および方向ベクトルを数値データとして自動抽出可能にしたことで，誰が誰にアクションを行っているかという手話特有の空間的文法特性を数理的に解釈し，高精度な自然言語翻訳システムへ連携させるための基盤を作成した。

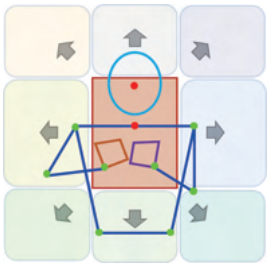
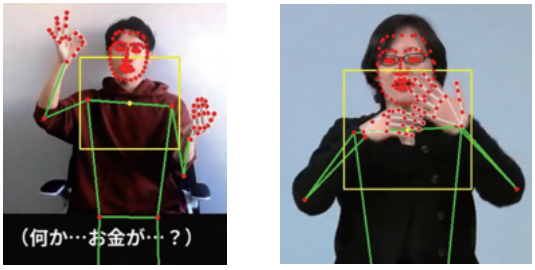


図 2　空間アノテーション



（a）　（b）

図 3　特徴点検出と空間アノテーション例

図 3 は（a）https://youtu.be/zy7cZeCuwwE?si=nK7wN2ZtMYlAXBP（b）https://youtu.be/jh0xc4IoTrU の動画を利用

4. Interactive and Automated Annotation Assistance for Pidgin Sign Japanese（IA3-PSJ）［成果 2］

指ドラッグや手先補間などの四つのインタラクティブ機能を A3-PSJ に導入し効率的かつ高精度なアノテーション支援システムを提案した。図 4 に IA3-PSJ のユーザインタフェースを示す。

1）フレーム単位検出による軽量化：従来の複雑な時間軸追跡戦略を排し，あえてフレーム単位の検出に特化するアーキテクチャへと変更した。これによって，検出精度を同等に維持したまま，計算オーバーヘッドを大幅に削減し，アノテーション作業中の極めて滑らかで応答性の高い操作画面を実現した。

2）4 インタラクティブ編集機能の導入：A3-PSJ では，オクルージョンやモーションブラーによってエラーを起こすことがあった。これを解決するため，アノテータがその場で



図 4　IA3-PSJ ユーザインタフェース

微調整できる「ランドマーク直接編集」,「指全体のドラッグ移動」,「手先形状のコピー＆ペースト」,「手先位置の自動補間」の四つの手動補正機能を実装した。

3）空間的格関係の自動アノテーション：A3-PSJ の処理を継承。

実用性と効率性を評価するため，A3-PSJ で作成した予備データセットを用いた比較実験を行った。

a）作業時間の削減: 完全に手動でアノテーションを行う場合平均 40.62 秒と比較し，自動検出の初期結果を提案ツールでインタラクティブに微調整する手法では平均 24.37 秒へと大幅に短縮され，アノテーションに必要な時間を一律で 40.0% 削減した。

b）アノテータの負担軽減とデータ品質向上: 計算負荷の低いフレーム単位処理と柔軟な手動補正ツールの統合は，作業者の疲労を最小限に抑えつつ，手先の欠落など自動アノテーション技術の限界を高いユーザビリティでカバーすることが可能になった。これにより，手話翻訳システムの学習に必要不可欠な，大規模かつ高品質な日本手話アノテーションコーパスの構築プロセスを劇的に加速させた。

5. 自動アノテーション結果を用いた手話日本語変換方法の検討

手話の映像や動作を, 対応する単語（形態素）のラベル（グロス）の列として 1 次元的に表現する際に，グロス列が「女」「男」「見る」だった場合には，女が男を見る，男が女を見る，女と男が見る，など，複数の日本語文の候補が考えられる。本研究では，中間型手話でも多く使われていた手の位置と一致動詞の動きの方向等の情報から，統語情報の抽出を検討する。

1）手の位置について

図 5 の例において，右手を RH，左手を LH とし，自動アノテーションにより空間位置として右（R），左（L），中央（C）や動作方向が付

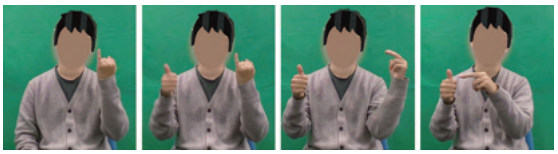


図 5　空間位置を使った表現の例

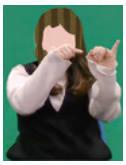


図 6　指差し例



図 7　空間位置の利用例

与できれば，「女（LH:L)」「男（RH:R)」「見る（LH：L->R)」という情報を統合し「女が男を見る」を訳の第一候補として提示できる可能性がある。

現行ツールでは，各フレームの手座標や指差し情報が保存される。ただし遮蔽等により検出できない場合もあり，文法的に機能する位置をどの時点で抽出するかという課題がある。代表的な 3 つの例について実際のデータを元に検討する。

（1a）指差しがあった場合

指差しがあった場合には，その位置が参照されていることを表す。自分を指差す PT1，相手を指差す PT2，他の特定の空間を指差す PT3 がある。図 6 は，左手を指差して参照している例である。図 6 の例では PT3 として，取得された指差し情報とグロスを対応付けることで，指差し先を「女」に対応する空間位置の候補としてあつかえる可能性がある。

（1b）左右の空間を使いわけている場合

指差しは行っていないが，左右の空間を使い分けている例は，中間型話者に多く見られた。ただし，図 7 右側の例のように両手共に顔の近くに配置されると，両手が同じ領域にあると判断される場合があり，領域の設定には調整が必要である。

図 8 に手の動きの例を示す。左手が上に動いて静止し保持したまま，右手が上に動いて静止



図８　自動アノテーションによる頭部の動きの抽出例と手の動きの例

している。この静止時の手座標とグロス区間を対応付け，名詞表現に対応する空間位置を推定する方法を検討した。両手表現の手話で空間に配置する場合も同様に静止時の位置情報で把握することが可能である。

（1c）一致動詞の方向を用いる場合

「見る」を表出している際には，左手が「見る」の手形のまま右手の位置の近くに移動している。そのため，「見る」のグロス区間の開始時と終了時の手の座標から移動方向を推定する方法を検討した。

2）うなずきと頭部の動きについて

自動アノテーションツールを用いた場合，うなずきは「nod」と判定される場合の他，「down」と「up」等と判定される場合も見られた。頭部の動きの速さの個人差もあり判定の調整方法を検討する必要がある。

また手の動き始めと同時に頭部も動く事例があるなど，目視では気づきにくい細かな頭部動作が検出された。さらに映像上で視線を特定の方向へ向けた場面で，それに対応する頭部動作が検出された事例もあった。このような情報は統語情報を得るための有効な手掛かりになることが期待される。

中間型手話は話者の数と同じだけ変種があると言われているが［1］，指差し，手座標，動作方向，頭部動作等を組み合わせることで，日本語訳候補の絞り込みに利用できる可能性がある。

［今後の研究の方向，課題］

1. 特徴点検出技術の高度化とロバスト性向上

高速動作に伴うモーションブラーや自己遮蔽が生じる複雑な会話シーンで，既存手法では安定した特徴点検出が困難であるという課題も明らかになった。現在，指先姿勢推定手法の適切な評価手法の検討と事後処理として推定値補正を行う手法の検討も行っており，より安定した特徴点検出を可能とし，アノテーション支援や手話翻訳性能の向上を目指す。

2. 空間格関係を表現する時空間グラフの改善

「一致動詞」と「指差し」は，話者と対話者，仮想対象の３次元的な空間配置，および動詞の移動方向ベクトルによって日本語の格関係を符号化している。この関係を「時空間グラフ構造」として適切なモデルを用いた翻訳ネットワークを構築し，手話特有の空間文法に対応した日本手話翻訳の性能向上を目指す。

3. 手話日常会話コーパスの多様性拡大

手話話者ごとの表現の多様性や論理的会話の文脈の十分な学習のため，話者多様性や会話文例を拡充するとともに，多方向から捉えた「見る」といった空間的多様性を含む単語データも拡充する。

［参考文献］

［1］菊澤（編），吉岡（編）：“しゃべるヒト　ことばの不思議を科学する”，原大介：“影響する言葉，”pp. 266–276，文理閣，2023.

［2］松岡和美：“日本手話で学ぶ手話言語学の基礎”，くろしお出版，（2022）.

［3］V. Bazarevsk, et al. “Blazepose: On-device Real-time Body Pose tracking”, arXiv: 2006.10204, 2020.

［4］H. Meng, et al. “3D Interacting Hand Pose Estimation by Hand De-occlusion and Removal”, ECCV, 2022.

［5］N. Feldman “81 Facial Landmarks Shape Predictor”. Original date: 2018-05-19.

［6］C. Luo, et al. “Learning Multi-dimensional Edge Feature-based AU Relation Graph for Facial Action Unit Recognition”. IJCAI, 2022.

［成果の発表，論文など］

［1］G. Benitez-Garcia, N. Kato, Y. Shiraishi and H. Takahashi, “Automatic and Interactive Annotation of Non-Manual and Spatial Features in Pidgin Sign Japanese for SLR”, Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS) 2025, 2025.

［2］G. Benitez-Garcia, N. Kato, Y. Shiraishi and H. Takahashi, “Automated Annotation Assistance for Pidgin Sign Japanese in Sign Language Recognition”, CyberWorlds 2024, pp. 104–107, 2024.

［3］加藤，白石，他，“専門場面における手話コミュニケーション～中間型手話のパラメータの検討～”，信学技報，125(279), ET2025-40, pp. 18–22, 2025.

［研究助成（A）］

生体磁場計測装置を用いた筋活動電流評価による神経筋疾患診断方法の確立

2251001



研究代表者（助成金受領者）	東京科学大学 生命情報応用学分野	准教授	赤　座　実　穂
共同研究者	東京科学大学 先端医療技術応用学分野	特任教授	川　端　茂　徳
	金沢工業大学	教授	足　立　善　昭
	東京科学大学 先端医療技術応用学分野	特任助教	大　谷　　泰

［研 究 の 目 的］

神経筋疾患の診断には針筋電図検査が広く用いられているが，侵襲性が高く，被験者負担が大きい。皿電極を用いた表面筋電図は非侵襲的であるが，生体組織の電気抵抗の影響を受け，高周波成分が減衰するため，異なる運動単位の波形分離が困難である。一方，生体活動に伴う磁場は生体組織の透磁率の影響を受けにくく，磁場計測では高い空間分解能で生体活動電流を評価できる可能性がある。東京科学大学では金沢工業大学とともに，磁場の直交する３方向成分を同時に検出可能な平面配置型 Superconducting Quantum Interference Device（SQUID）磁束計を開発した（図 1）。本装置では，従来広く用いられてきたダイポール推定法ではなく，空間フィルター法を用いることで，複雑な活動電流分布を推定可能であることが報告されている。

本装置を用いて，経皮的電気刺激による誘発筋活動および自発収縮時の筋内活動電流を推定し，運動単位の非侵襲的評価法を構築することを目的とした。

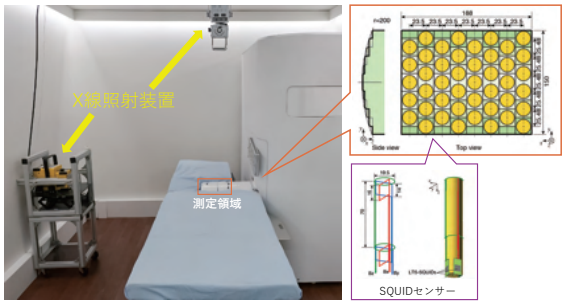


図 1　生体磁場計測装置

［研究の内容，成果］

本研究では大きく分けて **1. 誘発筋磁場計測による活動電流評価**，および **2. 自発収縮時の筋磁場計測と運動単位の抽出**を行った。

1. 誘発筋磁場計測による筋内電流評価

健常者を対象に，センサー上に手掌を置き，運動単位数推定法の刺激漸増法に準じて正中神経肘部を微弱電気刺激した。短母指外転筋（abductor pollicis brevis：APB）由来の単一運動単位が誘発されていることを，他筋に貼付した表面電位波形により確認した。誘発された筋磁場はオフラインで加算平均し，電気刺激や動きによるアーチファクト除去には Dual signal subspace projection を用いた。電流分布推定には空間フィルター法（Unit gain constraint recursively applied null-steering spatial filtering：UGRENS）を用いた。また，電流推定にはセ

ンサーと電流源の位置関係が必要であるため，高周波プローブを用いた超音波検査により刺激により収縮する運動単位を確認し，皮膚からの距離を測定した。推定された電流分布はX線画像上へ重ね合わせて評価した。代表的な運動単位では，短母指外転筋中央付近に筋線維方向へほぼ垂直な内向き電流（initial inward current），同時に，筋中央部から筋線維方向へ近位および遠位方向へ向かう電流も可視化された（initial proximal current, initial distal current）。その後，筋線維近位部で遠位方向へ向かう電流（proximal-to-distal current），筋線維遠位部に近位方向へ向かう電流（distal-to-proximal current）が得られた（図3abc）。

さらに，APB上に1 cm間隔で電位電極を貼付し，電位波形から推定されたmotor pointと，筋磁場より推定されたinitial inward currentの位置関係を比較した。健常者8名から得られた12個の運動単位において，initial inward currentの位置は概ねmotor pointと一致していた。これは，筋磁場計測により筋活動を引き起こす電流を非侵襲的に推定できる可能性を示唆する結果であった（図4）。

健常者12個の運動単位と比べ，運動ニューロン患者2名から推定された電流は大きかった（図5）。これは疾患の進行に伴う運動神経の脱落を補うため，残存した運動ニューロンが神経再支配を生じ，1つの運動ニューロンが支配する筋線維数（運動単位のサイズ）が代償的に肥大化した病態を，非侵襲的な磁場計測によっても直接的に捉えられる可能性を示唆している。

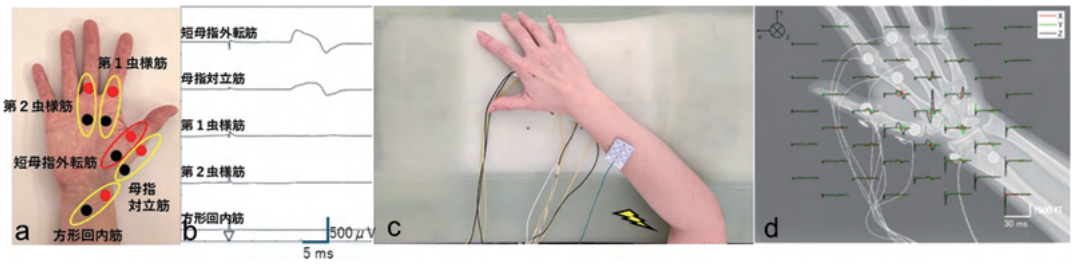


図2　誘発筋磁場計測方法
a：記録電極貼付部位　b：電位波形　c：筋磁場計測体位　d：各センサーでの磁場波形

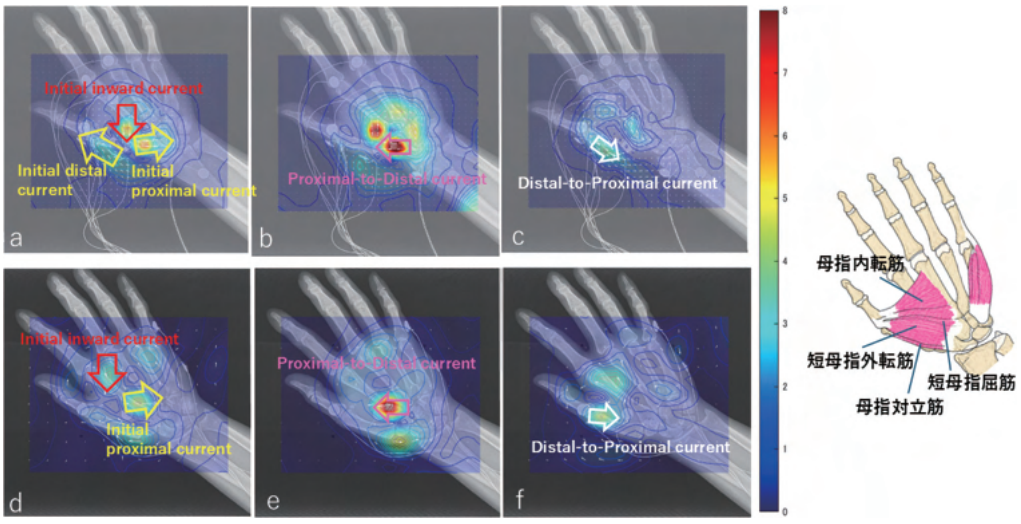


図3　運動単位の推定電流
abc：経皮的電気刺激による誘発運動単位推定電流　def：自発筋活動による運動単位推定電流

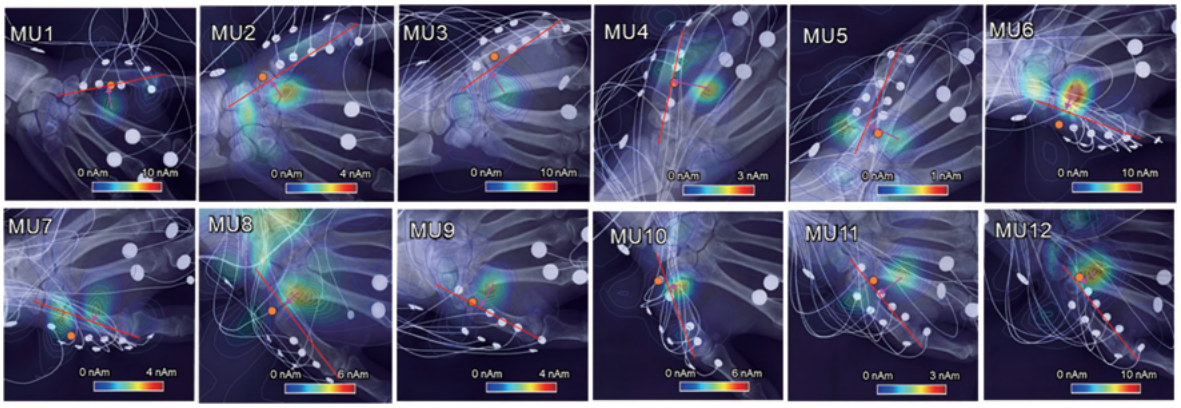


図 4　電位波形による motor point と Initial inward current の位置関係
健常者 8 人より得られた 12 個の運動単位。オレンジ色は電位波形から推定された motor point，赤矢印は initial inward current を示す。Brain Communications 2025:fcaf294 より改変

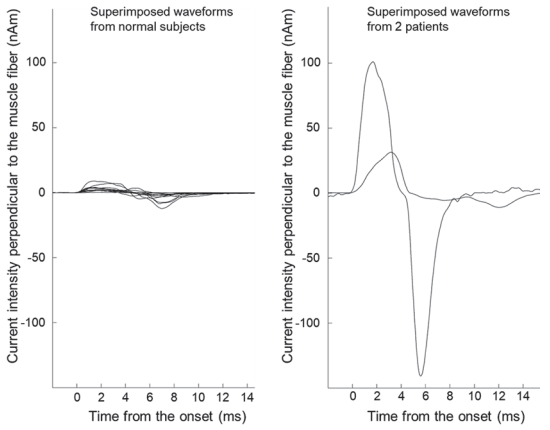


図 5　Initial inward current 電流値
健常者 12 個（左），運動ニューロン疾患患者 2 名（右）
Brain Communications 2025:fcaf294 より改変

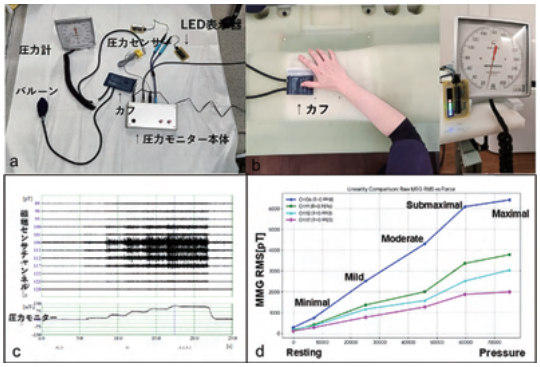


図 6　ランプ収縮による筋磁場計測
a：圧力モニター全容，b：測定時
c：ランプ収縮時，代表磁場センサーと圧力モニター生波形
d：ランプ収縮時，磁場センサー RMS と圧力との関係

2.　自発収縮時の筋磁場計測と運動単位の抽出

2-1.　ランプ収縮による筋磁場計測

自発筋活動評価のためには，計測中の筋力を把握する必要がある。本研究では，アネロイド血圧計を改造し，磁場計測中に筋力を半定量的に評価可能な非磁性圧力モニター装置を試作した。カフに加わった力を圧力センサで検出し，電圧信号として磁場測定装置へ入力するとともに，血圧計目盛りおよび LED 表示器を用いて被験者へ視覚的に提示可能とした（図 6ab）。被験者には母指基節部のみを動かすよう指示し，短母指外転筋を中心とした漸増収縮（ランプ収縮）を行わせた。複数チャネルの磁場強度の root mean square（RMS 値）と圧力モニター出力の経時的変化を解析した（図 6cd）。その結果，発揮張力の増加に伴い，各チャネルにおける 0.2 秒間の RMS 値は直線的に増加した。代表チャネルでは，圧力モニター値と RMS 値の間に強い正の相関を認めた。また，同一時間帯でもチャネル間で RMS 値分布に差を認め，筋活動の空間分布を反映している可能性が示された。これらの結果より，本計測系は筋出力増加に伴う運動単位追加動員（recruitment）および発火頻度増加（rate coding）を非侵襲的に反映できる可能性が示唆された。

2-2.　自発運動単位電流の推定

次に，本計測系を用いて，自発収縮時における単一運動単位の抽出を試みた。被験者には弱

い力で母指基節部のみを動かすよう指示し，磁場および APB 上に貼付した表面電位を同時記録した。表面筋電図波形を用い，振幅や立ち上がり形状に基づく閾値設定に加え，目視によるテンプレートマッチングおよび発火間隔（inter-spike interval）の規則性を確認することで，異なる運動単位の混入を除外した。その後，73 個分の筋活動を加算平均し，運動単位由来と考えられる筋磁場を抽出した。推定された電流分布では，誘発筋活動時と同様に initial inward current，initial proximal current，proximal-to-distal current，distal-to-proximal current に対応すると考えられる電流分布が観察された。一方で，initial distal current は明瞭ではなかった（図 3def）。また，推定された電流位置から，本運動単位は短母指外転筋ではなく母指内転筋由来である可能性が考えられた。通常の表面筋電図では母指球筋内の筋分離は困難であるが，本装置では SQUID および空間フィルター法により高い空間分解能で各筋を分離評価できる可能性が示唆された。

今後の展望

本装置は，筋線維方向およびその垂直方向の活動電流を分離して評価可能な特徴を有している。今後も，作成した非磁性圧力センサを用いた随意収縮時の筋磁場計測を継続し，複数の運動単位活動の分離や神経筋疾患における病態評価指標の構築を目指したい。

参考文献

1. J Clin Neurophysiol. 1996;13:401-22.
2. Muscle Nerve. 1988;11:151-9.
3. Muscle Nerve. 1993;16:355-66.
4. Electromyogr Clin Neurophysiol. 1974;14:423-36.
5. IEEE Trans Biomed Eng. 1999;46:810-20.
6. J Electromyogr Kinesiol. 2000;10:313-26.
7. Clin Neurophysiol. 1999;110:384-9.
8. IEEE Trans Appl Supercond. 2017;27:1600604.
9. Clin Neurophysiol. 2020;131:951-7.
10. Clin Neurophysiol. 2021;132:382-91.

［成果の発表，論文など］

Otani T, Akaza M (equally first), Kawabata S, Natsui H, Watanabe T, Miyano Y, Hanazawa R, Adachi Y, Sekihara K, Kanouchi T, Yokota T. Magnetoneurographic evaluation of motor unit size that is robust to changes in distance to sensor. Brain Commun. 2025;7:fcaf294.

［研究助成（A）］

高度な表現力を備えるアンドロイドの感性評価に基づく対人印象制御法の開発

2241003



研究代表者（助成金受領者）　立命館大学　デザイン・アート学部　教授　石　原　　尚

［研 究 の 目 的］

本研究では，顔を含む身体の多数の動作軸を時空間的に操ることで感情や気分といった様々な心情を人に近い表現で人に訴えかけるコミュニケーションロボットに，場面に応じて人に与える印象を適切に調整する能力を与えることを目指す。

ロボットに心情状態を人並みに表現させるには，ハードウェア・ソフトウェア両面での大きな革新が未だ必要な状況である。一方で，人の反応に対して心情表現をどのように変化させるべきか，また，変化のさせ方によって印象はどのように変わるのか，といった人の感性評価を含めた印象制御法の研究は，ロボットの表現力が今後増すほどに重要になっていくことは想像に難くない。高い心情表現能力と印象制御能力を兼ね備えたロボットの実現により，機械であるロボットが人に言語情報を伝える際に，その場に相応しい心情を表現することで，説得力を高めるだけでなく，過度に人の心情を揺さぶって不安を煽ったり，本来緊急性が高い情報を安直に受け止められたりしないように相手の反応を見ながら印象を調整することができるようになると期待できる。

本研究は，このような未来の実現に向けて，ロボットの心情表現を人に調和させる技術の確立のための取り組みを実施するものである。

［研究の内容，成果］

上記の目的を踏まえ，ロボットの心情表現を人に調和させる技術の確立に必要な取り組みを実施した。具体的には，①動的な心情表現を人に調和させるアルゴリズムの実現，②心情表現を人に調和させる度合いの違いによるロボット印象の変化の調査，③顔部位動作が与える性格印象の評価と解析，④意識と無意識の葛藤の表現手法の開発，の４つの研究課題に取り組んだ。①および②に関しては，心情の基礎的な題材として，眠気や興奮の度合いを表す「覚醒度」を採用した。人の覚醒度の変化を時々刻々推定して，ロボットが自身の覚醒度をその推定値に追従するように変化させる深層的表情模倣の仕組みを提案し，その深層模倣が対人印象を全面的に向上させることを実験的に確かめた。③は，人に与える印象をより精度よく操れるようにするための取り組みである。ロボットの顔の動作箇所と伝達される印象の関係を把握する印象評価実験と解析を実施し，狙った印象となるように心情表現を行うためにはロボットが顔のどこの部分を動かすのが望ましいかを決定するために必要な知見を得た。④は，印象を操る手段を増やすために実施した取り組みである。人は無意識的にあくびなどの顔運動が発生した際，意識的にそれを抑制しようとするも，抑制は完全にはうまくいかず，半目になったり，逆に目が変に見開いたりするような葛藤の様子を示す。このような意識・無意識の葛藤の表現は，人ら

しい意識の存在や意思の強さ・弱さを人に伝えるうえで有用である可能性があるため，本研究で表現の仕組みの開発に取り組み，一定の成果を得た。

研究課題①については，(a) アンドロイド頭部の導入，(b) アンドロイド頭部への自動覚醒度表現生成アルゴリズムの搭載，(c) 人の覚醒度の推定，(d) 推定した人の覚醒度へのロボット側の覚醒度の追従アルゴリズム（深層表情模倣アルゴリズム）の実装，をこの順で実施した。

(a) では，合計で 16 の動作箇所を有するアンドロイド頭部を，ロボット開発企業の汎用モデル（株式会社 A-Lab 製）を一部特注改変する形で購入した（図 1）。

購入したアンドロイドには，顔の各動作部の位置を 0 から 255 までの値で指定することができるソフトウェアが同梱されている。ただし，人の動作部とはある程度対応するものの異なるため，このままでは人のような表情を設計することは難しい。そこで，アンドロイドの各動作部を動かした際に顔にどのような変形が現れるかを一つずつ確認し，各動作部の位置の指令値 (0 から 255) と，人の顔動作（口角挙上など）の出現レベル（–1 から 1）を関係づけるマップを作成した。このマップを利用することで，人の顔動作を想定する形でアンドロイドの表情を設計することが可能になる。

(b) では，(a) で導入したアンドロイド頭部に対して，仮想的覚醒度のパラメータを持たせ，そのパラメータで設定された覚醒度を表現する顔の動きを時々刻々と自動的に生成するアルゴリズム（自動覚醒度表現アルゴリズム）を実装した。この仮想的覚醒度は，–1 から 1 の実数で表される値であり，–1 が強い眠気を，0 が平静状態を，1 が強い興奮を表す。この覚醒度をアンドロイドに表現させる手法として，申請者が先に提案した自動覚醒度表現アルゴリズム（Ishihara ら．Journal of Robotics and Mechatronics．2024）を採用した。この手法は，人に現れる様々な無意識的な顔の運動（あくび，呼吸，眼球振動，首の揺れなど）の現れ方を再活性化する減衰波としてモデル化し，各運動の減衰波活性の重ね合わせによって複雑かつ合理的な表情を生成するものである。人の覚醒度が異なる際に各運動がどのように現れるかの観察結果に基づいて覚醒度と波形パラメータ（振幅，周期，減衰比，振動中心，再活性化時間）を適切に結びつけておくことで，アンドロイドの仮想的覚醒度の値を変化させた際，各運動の波形が自動的に変調して覚醒度変化を表現する仕組みになっている。この手法を (a) のアンドロイドに適用し，仮想的覚醒度を様々な値に設定した場合に適切な顔の動き（たとえば，中程度の眠気を示す –0.5 に設定した場合，瞼が重くゆらゆらと閉じかけて，首が不安定に前後に揺れ，軽いあくびが出るなど）が実現されることを確認した。



図 1　導入したアンドロイド頭部

(c) では，人が顔を動かしている動画の画像フレームから顔各部の動作の出現度合いを抽出（オープンソースの顔運動抽出ソフトウェアである OpenFace を使用）し，出現の程度やその時間微分値，あるいは閾値以上の出現の頻度を計算し，それらを総合することで，人の覚醒度の程度を –1 から 1 の範囲の値として推定するアルゴリズムを開発した。

(d) では，(c) で推定した人の覚醒度に合わせるようにアンドロイドが自身の仮想的覚醒度を変化させる仕組みを開発した。これは，相手が眠くなるとこちらも眠くなる，あるいは，相手が興奮しているとこちらも興奮する，といったような共感的な振る舞いを生み出すものであ

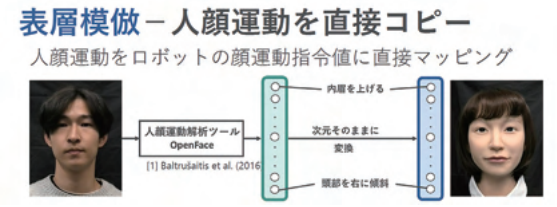


図２　表層模倣の概念図

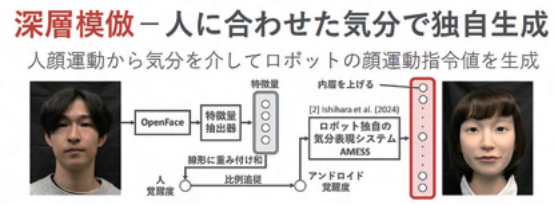


図３　深層模倣の概念図

る。単に顔の形態をなぞるように模倣する「表層模倣（図 2)」とは異なるため，このような模倣を「深層模倣（図 3)」と呼ぶものとした。

人の覚醒度の推定値は推定精度不足に起因して振動的に変動するため，そのままアンドロイドの仮想的覚醒度のパラメータに代入すると，アンドロイドが強い眠気でうとうとした直後に興奮して目を見開いて息を荒げ，またすぐうとうとする，といったような情緒不安定な印象となることが判明した。そこで，ある時刻のアンドロイドの仮想的覚醒度の値は，前時刻の値と，人の推定覚醒度の値の内分となるような形を採用した。このような比例制御的な追従を採用することで，情緒不安定な印象を人に与えることなく，人の覚醒度が急に変化した際にもアンドロイドが覚醒度を大きく変化させるような，覚醒度の調和の仕組みを実現した。

研究課題②については，（e）深層模倣の印象評価実験の実施，（f）評価結果の統計解析，を実施した。

（e）では，研究課題①で開発した深層模倣がアンドロイドの印象をどのように変えうるかを調査した。比較対象として，アンドロイドが平静状態を表現し続ける場合（非模倣条件），アンドロイドが人の顔の形態を模倣する場合（表層模倣条件），アンドロイドが深層模倣をしつつ，顕著な顔動作は表層模倣をする場合（多層模倣条件）を設けた。公平な比較のため，アンドロイドの模倣対象として，眠気や興奮を表現する人の動画を採用し，この動画の横に，アンドロイドによる各種模倣の様子を撮影した動画を並べた合成動画を作成し，それを実験刺激とした。150 名を対象として，人らしさ，生き物らしさ，好ましさ，知性の印象を問うオンラインアンケートで評価値を収集した。図 4 に，採用した人の動画（Human Video），表層模倣（Postural Mimicry），深層模倣（Mood Mimicry），多層模倣（Multilayer Mimicry）のスナップショットを示す。

（f）では，上記（e）で収集したデータに対して分散分析および多重比較を実施した。その結果，非模倣と比べて，深層模倣ではアンドロイドは上記の 4 項目全てにおいて高く評価された。表層模倣と多層模倣は，4 項目全てにおいて深層模倣よりも高く評価された。この結果から，覚醒度を人に調和させる深層模倣は，より生き生きとして人らしく，好ましく，また知性のある印象を人に与えることができることが確認された。また，明示的で分かりやすい表層模倣と併用することでさらに強い印象を与えることができることも確認された。表層模倣は共感の表現としてわかりやすいもののわざとらしいため，長く継続することは現実的ではない。この深層模倣は，暗黙的な形での調和で長く共感を示す新しい手法として価値がある。この結果は，国内会議 Human Agent Interaction シンポ

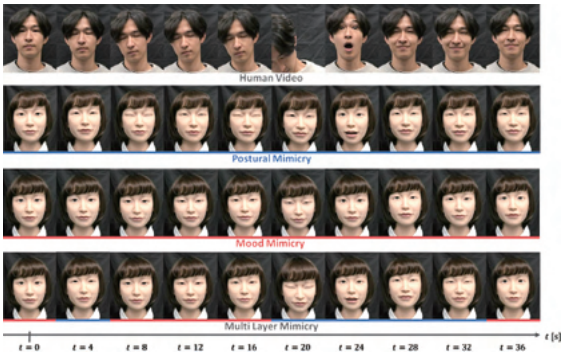


図４　各模倣による動きの比較

ジウムにおけるポスター発表にて公表した［1］。現在，論文原稿の準備が整ったところであり，近日中に査読付き論文誌に投稿予定である。

研究課題③については，（g）顔部位動作が与える性格印象の主効果の評価実験と解析，（h）顔部位動作が与える性格印象の交互作用の評価実験と統計解析，を実施した。

（g）では，アンドロイドの顔の各部位の動き毎に，個人的親しみやすさ，社会的望ましさ，力強さ，の３つの観点で伝わる印象の違いを実験的に評価した。口角を挙げる動き，眉を挙げる動き，口を開く動き，頭部を上に向ける動きなどを様々に組み合わせて動かした様子（組み合わせは実験計画法に則り決定）を撮影し，100 人を対象として，その動画から感じる印象をオンラインアンケートで収集した。ある単一の動きがそれ単体でどの印象を変えるかという主効果を解析したところ以下のような知見が得られた。まず，個人的親しみやすさは，目を細める動きと頭部を上に向ける動きによって低減し，口を窄める動きと口を開く動きでは向上した。社会的望ましさは，目を細める動きで低減し，口を窄める動きと口を開ける動きで向上した。力強さは，口角を挙げる動き，眉を挙げる動き，頭部を上に向ける動きで向上した。これは，顔部位を動かす毎に性格印象を変化させる情報が人に伝達されていることを示している。所望の性格印象を人に与えようとする場合には，これらの部位はむやみやたらに動かすことは避け，所望の印象が維持されるように動かす場所と向きを決定すべきであると考えられる。より高精度に印象を制御するうえで有用なこの知見は，国内会議 Human Agent Interaction シンポジウムにおけるポスター発表にて公表した［2］。その後，認知科学誌に原著論文として採録され，2026 年 6 月に掲載された［3］。

（h）では，上記の（g）を発展させた研究として，顔各部が他の部位の動きと組み合わさって初めて伝わる印象があるか（交互作用）を実験的に検証した。交互作用の確認に必要な組み合わせは，実験計画法に則り決定した。その結果，統計的に有意な交互作用は確認されなかった。この結果は，顔部位を動かすことによる印象伝達を図る場合，他の動きとの組み合わせを考慮する必要は無いという，印象制御の実現上非常に都合のよい結果である。この成果は，現在論文誌投稿に向けて原稿執筆中である。

研究課題④については，（i）意識・無意識の葛藤を表現する手法の構築，（j）葛藤表現により伝わる印象の評価，を実施した。

（i）では，無意識の眠気を意識的に抑制しようとする葛藤した表情は，眠気による無意識な動きを意識が完璧に抑制できない様子によって表現されるという仮説を立て，表現手法を構築した。真顔を維持しようとする意識的な抑制が不足して無意識のあくびの動きが優勢的に漏れ出たり，逆に抑制が過剰になって通常では生じない変な動き（あくびで目が閉じるのに抗おうとかえって目が開きすぎるなど）になったりするなど，抑制がうまくいっていない様子が様々な動きとして顔に現れるためには，「無意識システムが生成する動作信号が時々刻々変化すること」「無意識の動作信号を意識システムが遅れて検知すること」「実現しようとする真顔と実際の顔姿勢の差分を意識システムが非線形に知覚すること」「意識システムが注意を向けて操れる顔部位の数が，無意識システムが操る顔部位に比べて少ないこと」の４つの条件が揃う必要があるとの作業仮説を設け，図５のようなシステムを構築した。

このシステムを動作させた場合，図６のようにロボットが動作する。図左は，ある時間帯の口を開ける動きを取り出して示したものである。値が正に向かうほど口が開いていることを

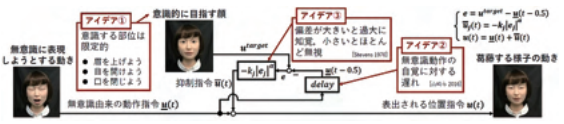


図５　意識・無意識の葛藤表現システム



図 6　葛藤システムの挙動の例

意味し，今回の場合，眠気を表現する無意識側のシステムは値を正の方に増加させようとし（あくびの実行），意識側のシステムは，それを抑制しようと負の方向に値を動かすものとなっている。

このシステムの基本的な振る舞いは国内会議 Human Agent Interaction シンポジウムで公表した［4］。また，このシステムに含まれる各種パラメータを変更した際の出力信号の調査結果については，国内会議のシンポジウムで口頭発表を行い［5］，現在査読付きの国際会議に投稿準備中である。

（j）では，上記（i）で開発したシステムにおける，意識が無意識を抑制する強さ（図 5 の比例ゲイン k）を様々に変えた際に伝わる印象がどのように変化するかを実験的に評価した。意識的抑制無しの条件，中程度の抑制がかかる条件，強い抑制がかかる条件，の 3 条件で動作させたアンドロイドの表情の動画を実験刺激とした。100 人を対象として，人らしさ，生き物らしさ，好ましさ，知性，の 4 項目の印象を問うオンラインアンケートを実施し，評価値を収集した。その結果，これら 4 項目について，抑制が無い場合に比べて，抑制がかかると印象が向上する結果となった。すなわち，無意識に生じるような動きを強く抑えようとするも，完全にはうまく抑えきれない，という様子をダイナミックにロボットに表現させることで，より人らしく，活き活きとして，好ましく，また知性がある印象を与えられる可能性を示すものである。研究課題①と②で利用する深層模倣では，無意識の覚醒度表現を用いるため，この表現と併せた利用による印象の調整にも利用できる可能性がある。この成果は，現在論文誌投稿に向けて原稿執筆中である。

上述の通り，本研究では，アンドロイドの心情を人に調和させる表現手法に関する様々な仕組みの開発と評価に取り組んだ。人の顔運動から推定される覚醒度を模倣する深層的表情模倣の仕組みを開発し，アンドロイド対人印象の全面的向上を確認した。また，印象制御の高精度化に向けて，顔部位毎に伝わる性格印象の違いを評価し，確かめた。さらに，印象制御の手段拡充に向けて，意識・無意識の葛藤の様子を表現させる仕組みを開発し，印象改善効果を評価し，確かめた。

［成果の発表，論文など］

［1］木下邑輝，平山聖輝，大原颯太，林里奈，石原尚．情動的共感表現の実現に向けた多層模倣システムの開発とアンドロイド実装．HAI シンポジウム．近畿大学東大阪キャンパス．2026 年 2 月 27 日．

［2］大原颯太，林里奈，吉田尚弘，西井尋紀，萩原広道，石原尚，大須賀公一．アンドロイドの笑顔を構成する顔動作が人格特性の印象に与える影響の予備的解析．HAI シンポジウム．近畿大学東大阪キャンパス．2025 年 3 月 1 日．

［3］大原颯太，林里奈，吉田尚弘，西井尋紀，萩原広道，石原尚，大須賀公一．アンドロイドの笑顔を構成する顔動作が人格特性の印象に与える主効果の解析．認知科学．33(2). pp. 165–176. 2026.

［4］平山聖輝，木下邑輝，大原颯太，林里奈，石原尚．意識と無意識のせめぎあいによるアンドロイドのかわいい仕草の動的表現．HAI シンポジウム．近畿大学東大阪キャンパス．2026 年 2 月 27 日．

［5］石原尚．赤ちゃんの身体に学ぶ未来のロボットのデザイン．日本赤ちゃん学会大会企画シンポジウム．神奈川県相模原市．2025 年 8 月 22 日．

［研究助成（A）］

AIセンサ融合基盤が拓く次世代の日常行動認識

2251002



研究代表者
（助成金受領者）　大阪公立大学　研究推進機構　教授　石　丸　翔　也

1. 研究の目的

本研究の目的は，安価で日常的に装着可能なセンサを用いて認識できる人間の日常行動の種類を大幅に拡大し，機械が一人一人の生活全体を継続的に把握できる基盤を構築することにある。これは，機械の支援によって人間が無意識のうちに合理的な選択を行える環境を実現するうえで，その前提となる「個人の日常生活の全体像の把握」を可能にするものである。

人間の日常行動は，歩行や睡眠といった身体的行動と，読書や会話といった認知的行動に大別できる。このうち身体的行動については，身体に装着するモーションセンサによる認識手法が広く確立されている。一方，認知的行動は顕著な身体運動を伴わないため，モーションセンサのみでの認識が困難であり，従来はカメラ・マイクによる計測や，眼球運動・脳波の解析といった高機能なセンシング手法が用いられてきた。しかし，これらの手法は装置上の制約やプライバシーへの配慮から実験室の外での利用が難しく，結果として，深層学習に堪えうる大規模データの収集や，実利用を想定したアプリケーション開発が進みにくいという課題が存在する。

そこで本研究では，AI技術による性能強化を通じて，安価で日常使いが可能なセンサがどの程度多様な行動を認識できるようになるかを明らかにすることを目指す。具体的には，物体認識や自然言語処理の分野で機械学習の性能を飛躍させた基盤モデル（foundation model）の考え方を人間の行動認識タスクに適用する。対照学習（contrastive learning）や自己教師あり学習（self-supervised learning）に基づく事前学習によって，加速度センサ等から得られる情報により豊かな文脈を持たせ，これまで捉えることが難しかった微細かつ文脈依存的な人間の動きの認識を可能にする。

センサの性能と利便性は一般にトレードオフの関係にあるが，利便性の高いセンサには，多様なデータを長時間にわたり多人数から収集できるという利点がある。本研究は，この利点が大規模な事前学習を前提とする基盤モデルの構築と高い親和性を持つという着想に基づいており，利便性の高いセンサの弱点をAI技術によって補うアプローチの有効性を検証する。これにより，高機能センサに依存せずとも認知的行動を含む幅広い日常行動を認識できる道筋を示し，日常生活に溶け込む形で人間の意思決定を支援する技術の実現に貢献することを目的とする。

2. 研究の内容，成果

研究目的の達成に向けて，本研究では自己教師あり学習・対照学習・大規模言語モデルといったAI技術を人間の行動認識に適用し，安価で日常的に装着可能なセンサが認識できる行動の種類を拡大するための一連の検討を行った。得られた成果は，（1）モダリティ欠損に頑健なマ

ルチモーダル自己教師あり学習の基盤構築，(2) ラベルを必要としない言語モデル駆動のゼロショット行動認識，(3) 装着型デバイスによる認知的状態の推定，(4) 安価な音響センサによる摂取行動のセンシング，(5) 一般的な機器への視線推定モデルの展開，の5つに大別される。以下，それぞれについて詳細を述べる。

2.1 マルチモーダル自己教師あり学習による認知状態推定基盤の構築

認知的行動の認識には，加速度センサに加えて視線や音声といった複数のモダリティを活用することが有効である。しかし実世界では，センサの装着不良やバッテリー制約，遮蔽などによって一部のモダリティが欠損することが頻繁に生じる。我々の研究グループでは，まずこの課題に取り組むための概念的枠組みCognifySSLを提案した［Cisse 2025］。この枠組みは，視線追跡，環境音，慣性運動（IMU）の3つのモダリティを入力とし，それぞれを専用のエンコーダ（視線位置・瞬目・瞳孔径を扱うCNNベースのGazeNet，生音声・スペクトログラムを扱う1次元CNNのWaveEncoder，逐次的な運動データを扱うTransformerベースのIMUエンコーダ）で符号化したうえで，対照学習，マスク信号モデリング，クロスモーダル予測を組み合わせて共有表現空間に整合させる。予測ヘッドはモジュール化されており，人間行動認識（HAR），精神的疲労の検出，エンゲージメント推定といった多様な下流タスクに対応する。また，学習時に一部のモダリティをランダムにマスクするドロップアウト型の訓練により，モダリティ欠損への頑健性を確保する設計とした。

この枠組みの設計にあたっては，IEEE Xplore，ACM Digital Library，arXiv，PubMedを対象に2020年から2025年までの関連研究を体系的にレビューした。自己教師あり学習の技術を含むこと，2つ以上のモダリティを融合すること，認知的・感情的状態の認識を扱うことという3条件のうち少なくとも2つを満たす研究を対象とし，使用モダリティ・自己教師ありパラダイム・対象とする認知状態・評価プロトコルといった観点から各研究を分類した。その結果，既存研究の多くが身体的な行動認識に集中しており，視線や音声といったモダリティが十分に活用されていないこと，自己教師あり学習が理想的な完全モダリティの条件下で評価される傾向にあり，欠損や破損したデータ流に頑健な融合手法がほとんど存在しないことを明らかにした。この体系的なギャップ分析が，後述するモジュール型アーキテクチャの設計指針となった。本構想をCognifySSLとして公開し，将来的には脳活動や心拍変動といった認知的な基準信号との照合による検証を計画するものとして位置づけた。

次に，上記枠組みを実装・評価・改良し，CognifySSL v2.0として発表した［Cisse 2026］。CognifySSL v2.0は，欠損したモダリティをリアルタイムに検出し修復することを目的とし，対照学習とマスクモデリングの目的関数を組み合わせる。本研究では，訓練時のランダムなモダリティドロップアウトが実世界のセンサ故障をどの程度模擬できるか，対照学習による整合とマスク再構成がそれぞれ潜在空間の形成にどう寄与するか，未知のモダリティの組み合わせや異なるセンサ利用可能性に対してどこまで汎化できるか，という3つの問いを設定した。アーキテクチャは，モダリティごとのエンコーダ，ドロップアウトシミュレーションを伴う注意機構ベースの融合層，モダリティの存在を予測する分類器，および欠損チャネルを再構成するデコーダから構成される。各エンコーダはカーネルサイズ（5, 3, 3）・チャネル数（64, 128, 128）の3層からなる1次元畳み込みネットワークとし，全体の損失は重み付けしたマスク再構成損失（平均二乗誤差）と対照整合損失の和とした（重みは$\lambda_{rec} = 1.0$，$\lambda_{con} = 0.5$）。学習はAdam（学習率1×10^{-3}，バッチサイズ32）・対照学習の温度パラメータ0.5・固定乱数シードのもと

で行い，（1）MobiAct での IMU エンコーダの単一モダリティ事前学習，（2）WESAD でのモダリティドロップアウトを伴うマルチモーダルマスク事前学習，（3）両ヘッドを有効化した端から端までの結合最適化，という 3 段階の訓練手順を採用した。

評価には，IMU に基づく行動認識データセットである MobiAct（57 名，9 種類の活動，200 Hz）と，生理･運動信号を含む感情状態認識データセットである WESAD（15 名，ECG・EDA・呼吸・皮膚温・加速度を含む，64 Hz にダウンサンプリングし 10 秒窓・50% 重複で分割）を用い，ユーザ非依存の評価のため WESAD では Leave-One-Participant-Out 交差検証を採用した。30% のモダリティ欠損下において，CognifySSL v2.0 は EDA・皮膚温・ECG・呼吸の再構成誤差（RMSE）でそれぞれ 0.108，0.061，0.096，0.124 を達成し，下流タスクの分類精度も MobiAct の行動認識で 91.5%，WESAD の感情状態分類で 82.6% と，比較手法である COCOA, MU-MAE, CroSSL を上回った。全モダリティが利用可能な設定での F1 スコアは 92.2% であり（MU-MAE 89.6%，CroSSL 88.7%），IMU のみの場合でも 85.5%，EDA のみの場合でも 84.3% を維持した。アブレーション分析からは，訓練時のモダリティドロップアウトが欠損時の頑健性を高めること（ドロップアウトなしでは 74.1% であった F1 スコアが 85.5% に向上），対照学習と再構成を組み合わせたハイブリッドな目的関数が再構成のみ・対照のみのいずれをも上回ること（F1 スコアでそれぞれ +3.7%，+4.1%，再構成誤差では再構成のみに対し平均 RMSE で 0.085 対 0.096），注意機構ベースの融合が単純な連結を上回ること（部分欠損下の F1 スコアで +2.9%）が確認された。また学習済みエンコーダは MacBook Pro（16 インチ，2021，Apple M1 Max）の上で 1 入力窓あたり 90 ミリ秒未満の推論遅延で動作し，準リアルタイムでの動作可能性を示した。コードと対話的な可視化ダッシュボードも公開している。

2.2 大規模言語モデルを活用したゼロショット行動認識

認識できる行動の種類を拡大するうえで大きな障壁となるのが，新しい行動ごとに大量のラベル付きデータを収集・注釈する必要があることである。そこで我々は，この障壁を取り除くため，ラベル付きの訓練例を一切用いずに両手首の加速度信号と自然言語による行動記述とを対応づける，ゼロショットの行動認識枠組みを提案した［Bhatt 2026］。本検討は，ラベルからテキストへの移行を促すコンペティション NHIC-ABC2026 への応答として行ったものである。提案手法は 3 段階のパイプラインから成る。第 1 段階では，大規模言語モデル（Gemini, gemini-2.5-flash）を用いて，各行動の自然言語記述から，エネルギー，規則性，周波数，手の関与，想定継続時間といった属性で構造化された意味的プロファイルを抽出する。第 2 段階では，両手首に装着した加速度センサ（64 Hz）のデータを 5 秒の窓（50% の重複，ステップ 2.5 秒）に分割し，意味的プロファイルと同型（isomorphic）になるよう設計された特徴量（エネルギー，規則性，周波数，手の関与，対称性）を各窓について計算する。データの前処理では，左右の信号を 50 ミリ秒の許容幅で最近傍照合により同期させ，欠損値はリストワイズ削除で処理した。第 3 段階では，これらの特徴量に対し，エネルギー 0.30，周波数 0.25，規則性 0.20，手の関与 0.15，対称性 0.10 という経験的に定めた重みを付した規則ベースの類似度関数と top-K ランキング（$K = 3$，閾値 $\tau = 0.6$）を適用し，各窓に対して複数の有力な候補を保持することで，ゼロショット推論に内在する不確実性を保持する。この枠組みは，自然言語を構造化属性に変換する意味抽象化層，センサ信号を解釈可能な特徴量に変換する特徴変換層，両者を規則ベースで照合する整合層という 3 層構造として実装した。

サラダ調理データセットの8種類の衛生関連動作（3種類の手伸ばし動作，手洗い，すすぎ，乾燥，2種類の着用動作）を対象とした評価では，全長1359.7秒・6チャネルにわたる87019サンプルから得た542個の解析窓に対し，top-Kマッチングが合計1542個のランク付き検出を生成し，窓レベルで94.8%の検出率を達成した（514/542の窓で3つの候補が得られ，閾値を超える候補が得られなかったのは28窓（5.2%）のみであった）。すすぎのような意味的に特徴的な動作は比較的高い確信度（0.740）で照合された一方，運動学的に類似した手伸ばし動作は低い確信度（0.635）にとどまり（両者の差は16.5%），現在の特徴空間では区別できないことが示された。特に3種類の手伸ばし動作は同一の意味的プロファイル（低エネルギー，散発的，周波数なし，利き手主体，2秒）を共有するため，同一の類似度スコアが付与され，多くの窓で常に同じ順位に並ぶことが観察された。また，スライディング窓の重複に起因する継続時間の系統的な過大評価を補正する手法（検出区間の和集合を求める区間併合）により，過大評価を2.2%低減した。本検討を通じて，ラベルなしで動作する端から端までのゼロショットパイプライン，不確実性を保持するtop-Kランキング，重複を補正する時間解析という方法論的貢献を示すとともに，手首装着型の加速度センサのみでは対象に向かう手伸ばし動作が区別できないという運動学的エイリアシングの問題を実証的に明らかにし，文脈情報を取り入れた将来のマルチモーダルセンシングの必要性を示した。

2.3 装着型ARデバイスの運動データによる認知負荷の推定

認知的な状態の一つである認知負荷は，従来NASA-TLXのような主観評価や，侵襲的になりがちな生理センサによって測定されてきた。本研究グループでは，拡張現実（AR）ヘッドセットに内蔵されたセンサが取得する運動データのみから認知負荷を推定できるかを検討した［Melo 2026］。産業的な組立作業と認知的・運動的特徴を共有する課題として，難易度を操作したタングラムパズルを用い，高低2水準の認知負荷を誘発する実験を設計した。パズルはTangram Builderを用いて47種類作成し，ピースの輪郭の見えやすさで難易度を定め，低難易度40種・高難易度7種とした。実験はPsychoPyで構築し，HoloLensの生データ取得にはHL2SSプラグインを用いた。参加者はMicrosoft HoloLens 2（頭部・手・視線の運動データを名目30 Hz，実効21.34 Hzで取得）とEmpatica E4（血液量脈波を64 Hz，EDAと皮膚温を4 Hzで取得）を装着し，30秒の窓（10秒の重複）に区切ってデータを解析した。運動データからは瞬目・注視・サッカードに関する特徴量を，生理データからはNeuroKit2を用いて心拍変動やEDAのトニック・フェイジック成分を抽出した。技術的問題による欠損を除いた最終的な分析対象は23名であり，運動データのみのデータセットでは21名分を用いた。

主観評価（NASA-TLX）と課題完了時間は，認知負荷の実験的操作が成功したことを裏付けた。高難易度パズルの平均完了時間は202.53秒（SD 127.79），低難易度は31.84秒（SD 8.45）であり，Wilcoxon検定によって両者の差は統計的に有意であった（$W = 136.0$，$p < .001$）。NASA-TLXでは，精神的要求・時間的要求・達成度・努力・フラストレーションのいずれの下位尺度でも高難易度条件で有意に高いスコアが報告された一方，身体的要求には条件間で有意差が見られなかった（$p = .501$）。これは，パズルの複雑さを増しても解くために必要な身体活動は本質的に変わらないという想定と整合する。分類にはロジスティック回帰・サポートベクタ分類器・ランダムフォレスト・XGBoost・LightGBM・AdaBoostの6種類のモデルを用い，leave-one-participant-out交差検証によって未知の参加者への汎化を評価し

た。その結果，運動データのみで学習したランダムフォレストモデルが最も高い F1 スコア 0.886 を達成し，これは生理データのみ（最大 59%）や両者を統合した場合（F1 スコア 0.831）を上回るものであった。特徴量の重要度を分析した結果，視線運動が全体の 54.1% を占め（最重要の特徴量は注視距離の平均），次いで手の運動（23.5%），頭部の運動（22.4%）の順であり，視線運動が認知負荷分類において最も重要な要素であることが示された。先行研究［Hou et al.］では Transformer モデルでより高い F1 スコア（96%）が報告されているが，これは計算負荷の大きいアーキテクチャに依存し，データ漏洩の影響を受けていた可能性がある一方，本成果は軽量なランダムフォレストと厳密な交差検証によって資源制約環境に適した性能を示した点に意義がある。構築したデータセットは公開している。

2.4 二つのマイクロフォンを用いた飲料摂取の音響センシング

いつ・何を・どれだけ飲むかという飲料摂取は，日常的で生理的に重要な行動であるが，従来の容器装着型センサやカメラベースの分類器は，量と種類のいずれか一方しか扱えなかった。我々の研究グループでは，イヤフォン型マイクロフォンと咽喉マイクロフォンを融合させ，飲料の種類と量を同時に認識する小型の装着型システム SipSense を提案した［Ueshima 2026］。10 名の実験参加者（男性 9 名，女性 1 名，平均年齢 24.3 歳）を対象に，10 種類の飲料（リンゴジュース，コーヒー，コーラ，エナジードリンク，緑茶，オレンジジュース，プロテイン飲料，炭酸水，トマトジュース，水；このうちコーラ・エナジードリンク・炭酸水は炭酸あり，緑茶とコーヒーは温かい飲料）について各 10 回，合計 1000 回の飲水イベントを収集した。収録の際には時刻同期の基準として実験参加者に明瞭な「ah」を発声させ，摂取量は飲用前後のタンブラーの質量を電子はかりで測定して算出し，各飲水イベントの音響データに対応づけてグラウンドトゥルースとした。摂取量はあらかじめ固定せず，実験参加者が自然な量を飲むものとし，平均摂取量は 11.58 mL であった。

咽喉マイクロフォン（48000 Hz）と AirPods Pro によるイヤフォン型マイクロフォン（16000 Hz）の音声から，メル周波数ケプストラム係数（13 次元，librosa で算出）を特徴量として抽出し，分類にはランダムフォレスト・サポートベクタ分類器（RBF カーネル，標準化前処理）・XGBoost（10 クラスのソフトマックス）を，量の推定にはランダムフォレスト回帰（決定木 100 本）・サポートベクタ回帰を用いた。評価には leave-one-out 交差検証を採用し，量の推定には平均絶対誤差（MAE）・平均誤差率（MPE）・平均絶対誤差率（MAPE）を用いた。その結果，両マイクロフォンを統合したランダムフォレスト回帰が飲料量の推定で最も高い精度を示し，MAE は 3.89 mL を達成した（咽喉のみ 3.95 mL，イヤフォンのみ 4.28 mL）。10 クラスの飲料種類分類では，両マイクロフォンを統合したランダムフォレストが F1 スコア 0.56 を達成し，これは咽喉マイクロフォン単独の性能と同等であった。粘性の高いプロテイン飲料は量の推定で最も小さい誤差（3.09 mL）を示し，種類分類でも統合構成で 68% と最も高い精度を示した一方，オレンジジュースは 44% にとどまり，温度の高いコーヒーと緑茶は相互に誤分類されやすい傾向が見られた。これらの誤分類は，温かい飲料における口に含む量や嚥下速度の類似性に起因すると考えられる。参加者ごとの Macro F1 スコアは 0.24 から 0.74 まで幅があり，飲水行動や咽喉の構造などの個人差が音響特徴に影響することが示唆された。本成果は，装着型の音響センサによって飲料の種類と量を同時に把握できる可能性を示すものである。

2.5 軽量なオンデバイス微調整による視線推定の汎化

視線は認知的状態を反映する重要なモダリティであるが，外観ベースの視線推定モデルは，訓練データに含まれない機器上で展開すると精度が低下するという課題を抱える。そこで我々は，スマートフォンとタブレットから収集された GazeCapture データセットのみで訓練された iTracker が，ノートパソコン上では下向きの視線が訓練分布外となるため画面下部で誤差が増大することに着目し，事前学習済みモデルを未知の機器構成へ適応させる軽量な微調整手法を提案した［Kokado 2026］。iTracker は顔画像（224 × 224 画素），左右の目の画像（各 224 × 224 画素），顔の位置を表すフェイスグリッド（25 × 25 の二値マスク）を入力とするモデルであり，本手法ではこれを Core ML 形式に変換したうえで，最終全結合層のみを微調整する。キャリブレーションには，画面中央・四隅・8 つの中点からなる 13 点グリッドを用い，各点で 10 フレームずつ，計 130 枚の顔画像を約 30 秒で収集する。微調整は Apple Core ML に搭載の MLUpdateTask API によってデバイス上で完結して実行され，確率的勾配降下法と平均二乗誤差損失を用いた（学習率は FT-Self で 0.005，FT-Others で 0.0001，バッチサイズ 32，エポック数 10）。比較対象として，キャリブレーションの点対応から 3 × 3 行列を最小二乗推定する幾何補正であるホモグラフィ変換も実装した。

11 名の参加者（男性 8 名，女性 3 名，いずれも日本人，20 ～ 30 歳）を対象に，MacBook Pro（14 インチ，M4 チップ，画面解像度 1512 × 945，カメラ 1280 × 720・30 fps，視距離 30 ～ 40 cm）上で，ベースライン，ホモグラフィ変換，他ユーザのデータによる微調整（FT-Others），対象ユーザ自身のデータによる微調整（FT-Self）の 4 条件を比較した。ベースラインの平均誤差は 6.17 cm であり，モバイル機器で報告される 1.7 ～ 2.5 cm と比べて大幅に大きかった。これに対し FT-Self は平均推定誤差を 2.91 cm へと 52.8% 低減し，ホモグラフィ変換（3.38 cm，45.2% 低減）を上回った。特に誤差が大きかった画面下部の領域では，FT-Self は誤差を 8.83 cm から 2.68 cm へと 69.6% 低減し，同領域でのホモグラフィ変換の低減率（61.8%）を上回った。また，対象ユーザのデータを用いない FT-Others でも誤差を 4.47 cm まで低減し（27.6% の低減），必要な適応のかなりの部分がユーザ固有ではなく機器固有であり，機器に適応させたモデルをユーザ間で部分的に転用できる可能性を示した。補足的な汎化評価として，周辺 8 点のみで較正し中央 5 点で評価した場合でも，FT-Self は 3.59 cm（22.3% 低減）を達成した。キャリブレーションデータの収集は約 30 秒，微調整は約 10 秒で完了し，全工程が 1 分未満でデバイス上において実行できることから，特別なハードウェアを必要とせずに実世界で展開できる実用的な手法であることを示した。

［成果の発表，論文など］

[Cisse 2025] Aboul Hassane Cisse and Shoya Ishimaru. “From Signals to Cognition: Self-Supervised Multimodal Learning for Cognitive State Inference from Wearable Sensor Streams”. In Adjunct Proceedings of the 2025 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2025 ACM International Symposium on Wearable Computers (UbiComp '25 Adjunct), pp. 105-109, 2025.

[Cisse 2026] Aboul Hassane Cisse and Shoya Ishimaru. “Detect and Repair: Robust Self-Supervised Wearable Sensing Under Missing Modalities”. Sensors 26 (8), p. 2419, 2026.

[Bhatt 2026] Ankur Bhatt and Shoya Ishimaru. “From Language to Sensors: Zero-Shot Activity Recognition via LLM-Driven Semantic Alignment and Top-K Ranking”. International Journal of Activity and Behavior Computing 2026 (2), p. 1-22, 2026.

[Melo 2026] Javier Melo, Leyla Akinci, Ko Watanabe, Nicolas Großmann, Shoya Ishimaru and Andreas Dengel. “SensCogAR: Cognitive Load Estimation Via Movement Data in Assembly Tasks”. International Journal of Activity and Behavior Computing 2026 (1), p. 1-20, 2026.

[Ueshima 2026] Ryugo Ueshima, Shunta Sato, Ko Watanabe, Liu Mengxi, Sungho Suh, Paul Lukowicz, Andreas Dengel, Shoya Ishimaru, Shingo Ata and Manato Fujimoto. "SipSense: Acoustic Sensing of Beverage Type and Volume Using Dual-Microphone Wearable System". International Journal of Activity and Behavior Computing 2026 (1), p. 1-18, 2026.

[Kokado 2026] Soki Kokado, Ko Watanabe and Shoya Ishimaru. "Expanding the Range of Pre-Trained Gaze Estimation via Lightweight On-Device Fine-Tuning". In Proceedings of the 2026 Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA '26), 2026.

［研究助成（A）］

ヒトの変性膝関節症を考慮した運動学習モデルの開発

2251004



研究代表者（助成金受領者）　弘前大学　理工学研究科　助教　王　森彤
共同研究者　埼玉県立大学　准教授　小栢進也

［研究の目的］

変形性膝関節症（膝 OA）は，高齢化社会の進行に伴い患者数が増加している代表的な運動器疾患であり，国内では約 3000 万人が罹患していると推定されている。膝 OA では，関節軟骨や半月板の変性，関節不安定性，疼痛などが生じ，歩行能力の低下を引き起こす。その結果，生活の質（QOL）の低下だけでなく，介護負担や医療費増加など，社会的にも大きな問題となっている。従来の研究では，膝 OA を関節局所の変性疾患として捉えることが多く，骨や軟骨などの構造的変化に着目した解析が主流であった。しかし近年では，膝 OA 患者において筋活動パターンや歩行動作が健常者と異なることが報告されており，関節変性だけでなく，神経制御機構そのものが変化している可能性が示唆されている。すなわち，膝関節構造の変化に対して，脳神経系や脊髄神経系が適応的に再編成され，新たな運動遂行則を獲得している可能性があるが，その詳細なメカニズムは未だ十分に解明されていない。

本研究の目的は，変形性膝関節症に伴う関節構造変化が神経制御機構および歩行運動生成に与える影響を，神経・筋骨格・関節モデルにより数理的に解明することである。具体的には，膝 OA の関節変性を再現した有限要素筋骨格モデルに対し，筋シナジー理論を導入することで，関節構造変化に適応した歩行動作の学習過程をコンピュータ上で再現した。さらに，筋活動，筋シナジー，関節運動，感覚フィードバックの相互作用を解析することで，膝 OA 進行に伴う神経回路再編成の特徴や，代償動作発生のメカニズムを明らかにすることを目指した。また，モーションキャプチャ，床反力計などによる実験データとの比較検証を行うことで，モデルの妥当性を評価した。本研究成果は，膝 OA 患者に対する新たなリハビリテーション支援技術，運動機能改善手法，支援機器設計への応用が期待され，人間と機械の調和に基づく次世代医療・福祉技術基盤の構築に貢献することを目的としている。

［研究の内容，成果］

本研究では，変形性膝関節症（膝 OA）に伴う関節構造変化が神経制御機構および歩行運動生成に与える影響を明らかにすることを目的として，筋シナジーを統合した神経・筋骨格・関節モデルの開発を行った。膝 OA は，関節軟骨や半月板の摩耗，骨変形，関節不安定性などを伴う代表的な運動器疾患であり，歩行能力や日常生活動作の低下を引き起こす。しかし従来の研究では，膝関節局所の構造変化に着目した解析が中心であり，関節変性に対して神経制御機構がどのように適応・再編成されるかについては十分に解明されていなかった。そこで本研究では，関節系と神経系の相互作用を統合的に

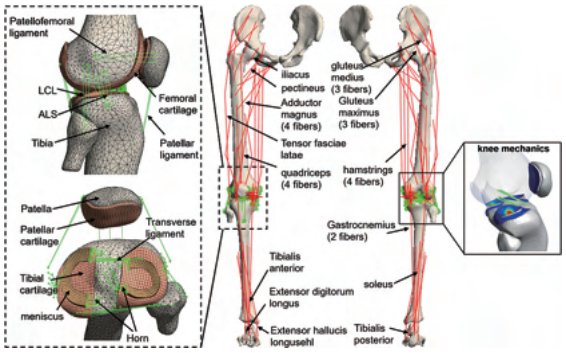


図1　下肢の筋骨格モデル

評価可能なシミュレーション基盤の構築を目指した。

まず，膝 OA 患者の MRI 画像を基に，関節軟骨や半月板の摩耗・変形を反映可能な有限要素筋骨格モデルを構築した（図 1）。膝関節の幾何学的特徴を反映するため，画像特徴点抽出技術および FFD（Free-Form Deformation）を用いて，標準筋骨格モデルを膝 OA 進行度に応じて変形させる手法を導入した。これにより，膝 OA の重症度分類である KL 分類（Kellgren-Lawrence 分類）に対応した関節構造モデルの再現を可能とした。また，関節接触，軟骨変形，半月板応力などの生体力学的状態を計算可能な有限要素解析を行った。

変形性膝関節症（膝 OA）に伴う関節構造変化が，歩行運動および神経制御機構に与える影響を明らかにすることを目的として，図 2 に示すような神経・筋骨格・関節統合解析基盤を構築した。従来の膝 OA 研究では，X 線画像や MRI 画像を用いた形態学的評価，あるいは歩行時の関節角度や関節モーメントなどの運動学・動力学的評価が主流であった。しかし，ヒトの歩行運動は神経系，筋系，骨格系，関節系が相互作用しながら形成されるため，関節局所のみを評価するだけでは，膝 OA 患者特有の歩行障害や代償動作の本質的理解には限界がある。そこで本研究では，歩行計測，逆運動学解析，逆動力学解析，筋力推定，膝関節接触解析，筋シナジー解析を統合することで，膝 OA 進行に伴う運動機能低下の力学的・神経学的メカニズムを総合的に解析した。

まず，歩行時のヒト運動を高精度に取得するため，光学式モーションキャプチャシステムおよび床反力計を用いた三次元動作計測を実施した。被験者の骨盤，大腿，下腿，足部に反射マーカーを貼付し，歩行中のマーカー位置を計測した。また，床反力計を用いて歩行中に地面から作用する反力を取得した。得られたマーカー座標データに対して逆運動学解析を行い，股関節，膝関節，足関節の三次元関節角度を算出した。さらに，床反力および身体節段の位置，速度，加速度情報を用いた逆動力学解析により，歩行周期中に各関節へ作用する関節モーメントを求めた。これにより，膝 OA 患者における歩行中の関節運動学的特徴および関節負荷特性を定量化した。

次に，算出された関節モーメントを基に筋力推定解析を行った。ヒトの関節運動は多数の筋が協調して生成しているため，単純な力学方程式のみでは各筋力を一意に決定することができない。本研究では，筋張力の総和や筋活動コストを最小化する最適化計算を用いて，歩行中の各筋の筋力を推定した。これにより，大腿四頭筋，ハムストリングスなど，歩行中に重要な役割を果たす筋群の活動状態を評価した。また，膝 OA 患者では，関節安定性を補償するために筋活動パターンが変化する可能性があり，特に膝周囲筋の共同収縮増加や，荷重応答期における筋活動タイミングの変化などが確認された。

さらに，本研究では筋骨格解析に膝関節接触解析を統合した。推定された筋力および関節反力を入力条件として，膝関節有限要素モデルを用いた関節接触解析を実施した。有限要素モデルでは，大腿骨，脛骨，関節軟骨，半月板などを再現し，歩行中の接触圧力，軟骨変形，半月板応力などを計算した。特に，膝 OA では内側コンパートメントへの荷重集中や半月板負荷増加が病態進行と関連しているため，本解析を通じて膝関節内部の局所的力学環境を評価し

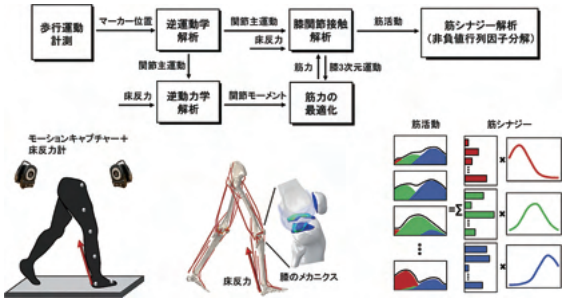


図２　筋シナジー解析

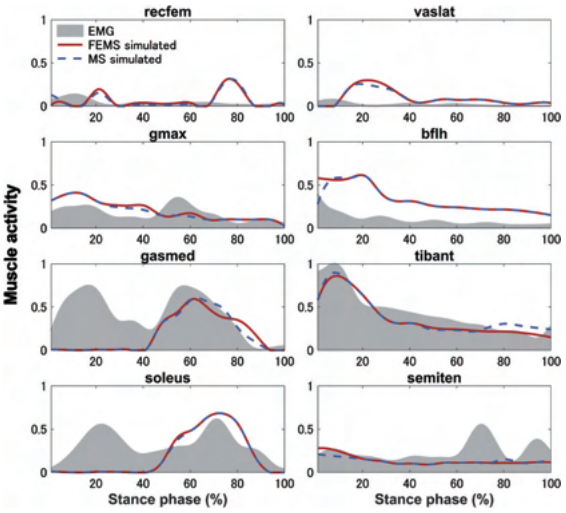


図３　歩行における下肢の筋活動性

た。その結果，膝 OA 患者では歩行中に内側軟骨接触応力が増加する傾向が確認され，関節構造変化に伴う力学的負荷集中が示唆された。また，筋活動変化によって関節接触状態も変化することから，神経制御と関節負荷が密接に関連していることが明らかとなった。

本研究では筋シナジー解析を導入し，神経制御機構の評価を行った。筋シナジーとは，多数の筋活動を少数の協調活動パターンとして表現する概念であり，中枢神経系が運動を効率的に制御するための基本単位と考えられている。本研究では，推定された筋活動に対して非負値行列因子分解（NMF）を適用し，筋シナジーの抽出を行った。図２に示すように，複数筋の活動波形は，いくつかの筋シナジーとその時間的活動パターンの組み合わせとして再構成できる。本解析により，膝 OA 患者では健常者と比較して筋シナジー構造が変化し，一部の筋シナジーが統合･簡略化される傾向が確認された。また，膝 OA 進行に伴い，筋シナジーの活動タイミングが変化することで，関節安定化を目的とした代償的神経制御戦略が形成されている可能性が示唆された。

さらに，筋シナジー解析結果と膝関節接触解析結果を統合することで，神経制御変化と関節力学環境との関係性を検討した。その結果，筋シナジー変化による筋力分配の違いが，膝関節内接触応力分布に影響を与えることが確認された。特に，膝周囲筋の共同収縮増加は関節安定性向上に寄与する一方で，関節接触力増加を招く可能性があり，膝 OA 進行の一因となる可能性が示唆された。これは，膝 OA における「関節構造変化―神経制御変化―関節負荷変化」の相互作用メカニズムを示す重要な知見である。

図３は，図は，歩行立脚期における主要下肢筋の筋活動パターンについて，実測筋電図（EMG）と，本研究で開発した有限要素筋骨格モデル（FEMS simulated），および従来型筋骨格モデル（MS simulated）によるシミュレーション結果を比較したものである。横軸は歩行立脚期（0 ～ 100%），縦軸は正規化した筋活動量を示している。灰色領域は被験者群における実測 EMG の平均値およびばらつきを示し，赤線は本研究モデル，青破線は従来型モデルの推定結果を示している。対象筋は，大腿直筋（recfem），外側広筋（vaslat），大殿筋（gmax），大腿二頭筋長頭（bflh），腓腹筋内側頭（gasmed），前脛骨筋（tibant），ヒラメ筋（soleus），半腱様筋（semiten）であり，歩行中の下肢の運動，関節安定化に重要な役割を担う筋群である。

結果より，本研究で構築した有限要素筋骨格モデルは，従来型筋骨格モデルと比較して，実測 EMG に近い筋活動パターンを再現できることが確認された。特に，立脚初期から中期にかけての筋活動タイミングや活動量において，本研究モデルの推定結果は実測 EMG と良好に一

致していた。これは，本研究モデルが単なる剛体リンク構造ではなく，関節軟骨，半月板，接触力学などを考慮した有限要素解析を統合しているため，筋力推定時に関節内部の力学状態をより適切に反映できたことが要因と考えられる。

前脛骨筋（tibant）では，立脚初期における活動ピークが実測 EMG とよく一致していた。前脛骨筋は踵接地直後に足関節底屈を制御し，足部接地を安定化させる役割を担う筋である。本研究モデルでは，この初期接地時の筋活動が良好に再現されており，歩行開始時の足関節制御メカニズムを適切に表現できていると考えられる。一方，従来型モデルでは時間や活動量にずれがみられ，筋活動の立ち上がりを十分に再現できていなかった。ヒラメ筋（soleus）および腓腹筋内側頭（gasmed）では，立脚後期における活動増加が分かった。これらの筋は立脚中期において足関節底屈モーメントを発生させ，身体を前方へ推進する重要な役割を持つ。本研究モデルでは，立脚後期の筋活動ピークが実測 EMG と比較的良好に一致しており，特に筋活動ピーク時期や活動持続時間が適切に再現されていた。一方，従来型モデルでは筋活動ピークが過大あるいは過小評価される傾向がみられ，歩行推進期の力学的再現性に限界があることが示唆された。これは，有限要素モデルによる関節接触状態の考慮が，筋力推定結果に影響を与えているためと考えられる。

また，大腿直筋（recfem）および外側広筋（vaslat）では，立脚初期の荷重応答期において筋活動が増加していた。これらの筋は膝関節伸展に関与し，荷重支持および膝折れ防止に重要な役割を果たす。本研究モデルでは，実測 EMG に近い活動タイミングが確認された一方，一部の被験者では活動量のばらつきも存在した。これは，歩行速度，筋力，関節安定性などの個人差に加え，表面筋電図特有のクロストークやノイズの影響も含まれている可能性がある。しかし，全体として本研究モデルは膝伸展筋群の協調活動を概ね再現していた。

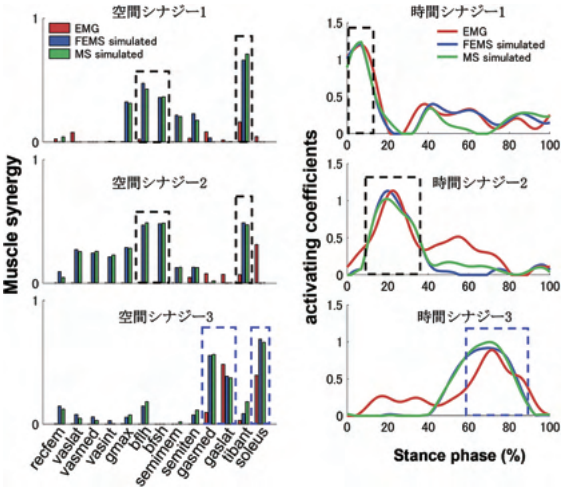


図 4　歩行における下肢の筋シナジー

さらに，大腿二頭筋長頭（bflh）および半腱様筋（semiten）などのハムストリングス群では，立脚終期から遊脚初期にかけて活動増加がみられた。本研究モデルでは活動傾向自体は再現できているものの，実測 EMG との間に差異も確認された。ハムストリングスは二関節筋であり，股関節および膝関節の双方に影響を与えるため，筋付着位置や筋腱特性，神経制御戦略のわずかな違いが筋活動推定結果に影響しやすい。また，歩行中の共同収縮や個人特有の運動戦略も影響している可能性がある。

図 4 は，歩行立脚期における筋シナジー解析結果について，実測筋電図（EMG），本研究で開発した有限要素筋骨格モデル（FEMS simulated），および従来型筋骨格モデル（MS simulated）を比較したものである。左側には各筋シナジーにおける空間シナジー（各筋の寄与割合），右側には時間シナジー（歩行周期中の活動性）が示されている。対象筋は，大腿直筋，外側広筋，大殿筋，大腿二頭筋，前脛骨筋，腓腹筋，ヒラメ筋など，歩行中の主要下肢筋群である。

結果より，本研究で構築した有限要素筋骨格モデルは，従来型筋骨格モデルよりも実測 EMG に近い筋シナジー構造を再現できることが確認された。空間シナジー 1 では，立脚初期

に活動する大腿二頭筋および前脛骨筋の寄与が大きく，本研究モデルはこれらの筋活動バランスを実測結果に近い形で再現していた。一方，従来型モデルでは一部筋の寄与が過大評価される傾向がみられた。

空間シナジー２では，大腿二頭筋および前脛骨筋の協調活動が確認され，本研究モデルは筋活動分布を比較的良好に再現していた。さらに，空間シナジー３では，腓腹筋およびヒラメ筋の寄与が大きく，歩行後期の推進動作に関連する筋活動特徴が示された。本研究モデルでは，これらの筋群の活動比率が実測 EMG と近い傾向を示していた。

時間シナジー解析では，本研究モデルは筋活動ピークの発生タイミングや活動持続時間を良好に再現していた。特に，時間シナジー１では立脚初期の活動ピーク，時間シナジー２では荷重応答期から立脚中期にかけての活動，時間シナジー３では立脚後期の推進期に対応する活動が確認された。従来型モデルではピーク時期のずれや活動幅の違いがみられたのに対し，本研究モデルでは実測 EMG に近い時間変化が得られた。

［成果の発表，論文など］

論文：

1. 王森彤，長谷和徳，舩戸徹郎，後十字靭帯断裂が膝関節に及ぼす生体力学的影響を評価するための筋骨格モデルの開発，臨床バイオメカニクス，46, 18-25, 2025.
2. S. Wang, I. Fujita, K. Yamauchi, S. Ota, K. Hase, Feature-based modeling of subject-specific lower limb skeletons from medical images, ***Biomechanics***, 5(3), 63, 2025.

発表：

1. 櫻井翔，佐川貢一，大竹真央，王森彤，AI 姿勢推定技術に基づく身体動作推定システムの開発，第 36 回バイオフロンティア講演会 2025 年 12 月 7 日
2. 王森彤，膝関節の接触挙動を考慮した筋骨格モデル，日本臨床バイオメカニクス学会第 52 回学術集会 2025 年 11 月 7 日
3. S. Wang, R. Gong, K. Hase, Does anterior cruciate ligament rupture lead to changes in knee joint mechanics distribution? A single framework for the knee finite element musculoskeletal study The XXX Congress of the International Society of Biomechanics 2025 年 7 月 28 日

［研究助成（A）］

人間 - 機械系の振動伝搬を時空間稠密に捉える実時間高速ボリュメトリックビジョン

2251005



研究代表者（助成金受領者）	広島大学　大学院先進理工系科学研究科	助教	WANG FEIYUE
共同研究者	広島大学　先進理工系科学研究科	教授	石　井　　抱

［研究の目的］

人間と機械が相互作用するシステムでは，機械振動が人体へ伝搬することで，作業快適性，疲労，安全性，操作性などへ大きな影響を及ぼすため，人間―機械系における振動伝搬特性の解析は重要である。しかし，従来広く用いられている加速度センサを用いた接触式計測では，測定点数や設置位置に制約があり，全身にわたる時空間稠密な三次元振動分布を取得することは困難である。近年では，高速ビジョンや三次元点群計測を用いた非接触振動計測法が注目されているが，人体のような非剛体対象では，大きな姿勢変化と微小振動が同時に存在するため，高精度な三次元振動解析は容易ではない。特に，高速カメラによる画像解析では，人体運動に伴う見え方の変化や点群形状変化により，時系列データ間で安定した対応関係を維持することが難しい。さらに，異なる実験条件間では，三次元点群の位置や形状が一致しないため，従来手法では実験間におけるポイントワイズな定量比較が困難であるという課題が存在する。

そこで本研究では，高速ステレオカメラとToF カメラを統合した高速ボリュメトリックビジョンを構築し，人間―機械系における振動伝搬の三次元可視化および定量解析を行うことを目的とした。具体的には，人体の非剛体運動に対応するため，三次元モデルを基準として追跡更新しながら微小振動を推定するモデルベース 3D-DIC 法を提案し，人体表面における高密度な三次元振動分布を高精度に計測した。さらに，異なる実験条件間における比較を可能とするため，標準化 3D モデルに基づくポイントワイズ比較法を導入し，異なる計測データを共通三次元座標系上へ対応付けることで，振動エネルギー分布の定量比較を実現した。本研究を通じ，人間―機械系における複雑な振動伝搬を非接触・全視野で可視化し，人間中心の機械システム設計や快適性評価に資する基盤技術の構築を目指した。

［研究の内容，成果］

1. 人体姿勢変化に対応した三次元振動計測

(1) 技術課題

従来の人体振動計測では，加速度計を人体へ取り付ける接触式計測が広く用いられている。しかし，測定点数や設置位置に制約があるため，人体全体における三次元振動分布を取得することは困難である。また，センサ装着や配線が必要であり，人体や座席系へ影響を与える可能性もある。これに対し，ステレオ高速ビジョンを用いた非接触・全視野の振動計測法が注目されている。しかし，図 1 に示すように，人体は非剛体対象であるため，呼吸や姿勢変化などの大きな運動成分が，機械振動に由来する微小振動成分を埋没させてしまうという課題が存在する。さらに，人体表面形状の変化により画像間

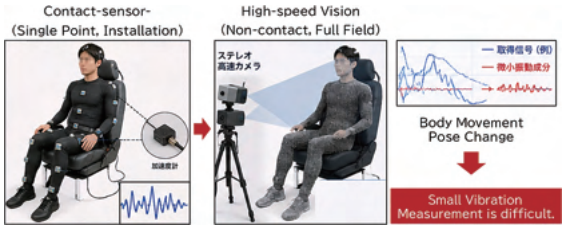


図 1　Challenges in Human Vibration Measurement

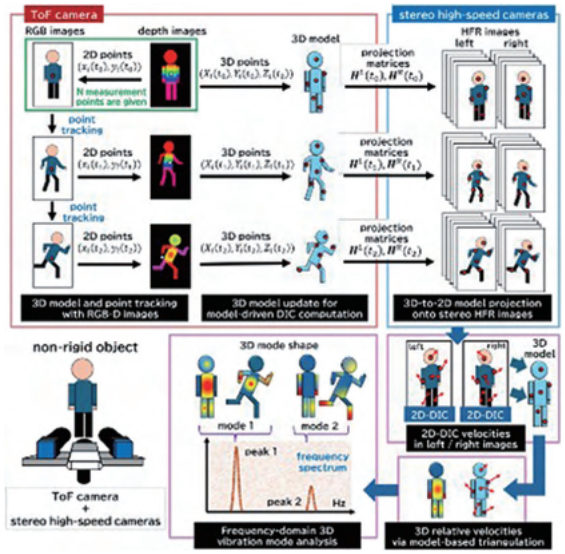


図 2　Model-Based-Tracking 3D-DIC

の対応点追跡が不安定となり，高精度な三次元振動解析が困難となる。

(2) 提案手法

本研究では，人体姿勢変化に伴う大きな運動成分の影響を抑制しながら，人体表面における微小振動を高精度に計測するため，高速ステレオカメラと ToF カメラを統合したモデル追跡型 3D-DIC 法を提案した。図 2 に提案手法の概略を示す。まず，ToF カメラにより取得される RGB-D 画像を用いて人体表面の三次元点群モデルを生成し，各フレームにおいて人体姿勢変化に応じた三次元モデル更新を行う。次に，更新された三次元モデル上の計測点を左右高速カメラ画像へ投影し，対応する ROI 画像に対して二次元 DIC 解析を適用することで，サブピクセル精度の二次元変位分布を算出した。さらに，左右画像から得られた二次元変位情報を三角測量により統合することで，各計測点における三次元相対速度分布を推定した。

また，得られた三次元速度時系列に対して短時間フーリエ変換（STFT）を適用することで，周波数領域における三次元振動モード解析を行った。これにより，人体姿勢変化による大きな運動成分と，機械振動に起因する微小振動成分を分離しながら，人体全体における振動伝搬の三次元可視化を可能とした。提案手法では，ToF カメラによる三次元モデル追跡を基準として高速画像解析を行うことで，人体の非剛体変形や姿勢変化に対して安定した対応点追跡を実現した。これにより，従来法では困難であった人体全体における時空間稠密な三次元振動計測を非接触で実現した。

(3) 実験結果

IMV 社の 4 自由度振動試験機上に座席シートを設置し，実車市街地走行（60 km/h）で取得した振動を 30% 強度で再現した着座振動試験を実施した。図 3 左に撮影システムを示す。高速ステレオカメラには EoSens 2.1CXP12（3840 × 2144@200 fps），ToF カメラには Azure Kinect DK を用い，被験者および座席シートを対象として 13 秒間の三次元振動計測を行った。図 3 右に ToF カメラにより取得した着座者と座席シートの三次元点群を示す。取得した点群から一様サンプリングにより計測点を抽出し，全視野三次元速度解析に用いた。

図 4 には，抽出した 9,540 点の 2D 速度場の可視化と，10.3 秒間における 2 秒間隔での 3D 速度可視化を示す。2D 速度は ROI サイズ 128 × 128 で IC-GN アルゴリズムにより算出され，全測定点が精度良く 2D 空間にマッピングされ

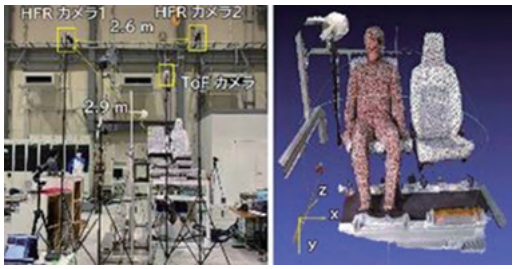


図 3　Experiment scene and ToF-scanned 3D model

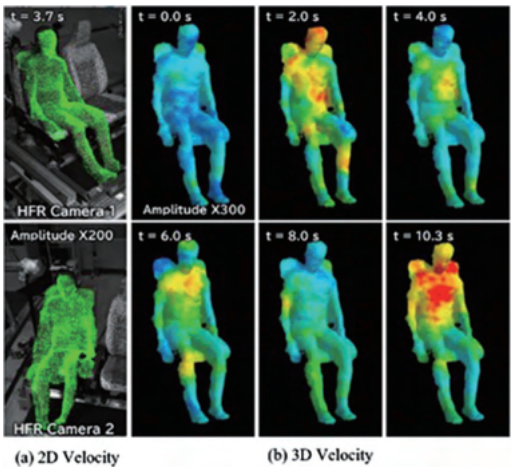


図 4　Estimated 2D and 3D velocity distribution

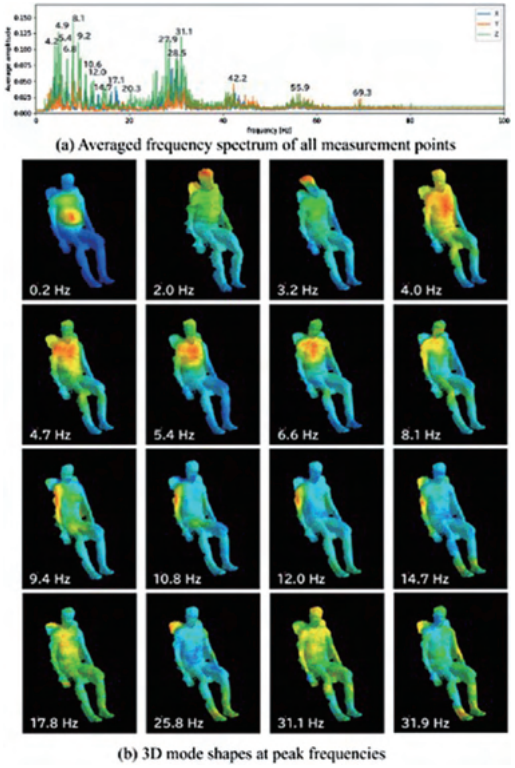


図 5　Frequency Spectrum and 3D Mode Shapes

ていることが確認できた。

さらに 3D 速度の可視化から，振動が主に着座者の腹部から上の上半身に集中していることが示され，これはシートベルト非着用時に体感される振動分布と一致していた。

図 5 に全計測点の平均周波数スペクトルおよび主要ピーク周波数に対応する三次元振動モードを示す。0.2 Hz では腹部を中心とした振動が観測され，呼吸動作の影響を反映していると考えられる。2.0 Hz および 3.2 Hz では頭部の揺動が支配的であり，4.0 Hz では全身にわたる振動分布が確認された。また，4.7 ～ 8.1 Hz では胸部周辺，9.4 ～ 14.7 Hz では左肩部周辺に局所的な振動が現れ，人体振動に非対称な周波数特性が存在することを確認した。さらに，高周波帯域では人体と座席の同時振動や座席固有振動に対応するモードが観測された。これらの結果より，提案手法により人体各部位における周波数依存的な振動伝搬特性を三次元的に可視化可能であることを確認した。

2. 標準化 3D モデルに基づく実験間振動比較

(1) 技術課題

従来の三次元振動解析では，各実験において取得される三次元点群の位置や形状が異なるため，異なる実験条件間における振動分布を定量的に比較することが困難であった。特に，図 6 に示すように，人体を対象とした場合，着座姿勢や体形のわずかな変化によって三次元点群形状が変化するため，同一部位における振動特性をポイントワイズに比較することができないという課題が存在する。そのため，従来手法では座席条件や振動条件の違いが人体振動へ与える影響を定量的に評価することが難しかった。

(2) 提案手法

本研究では，異なる実験条件間における人体振動分布の定量比較を実現するため，図 7 に示すように，標準化 3D モデルに基づく振動比較手法を提案した。図 8 に提案手法の概略を示す。

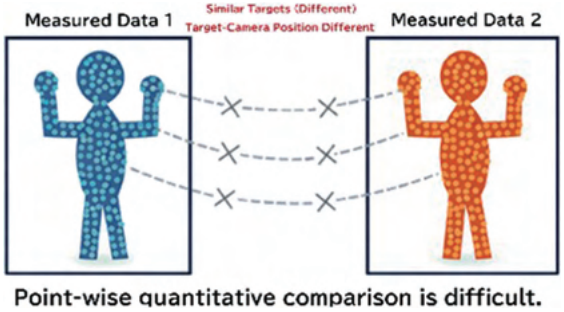


図 6　Challenges in Data Comparison

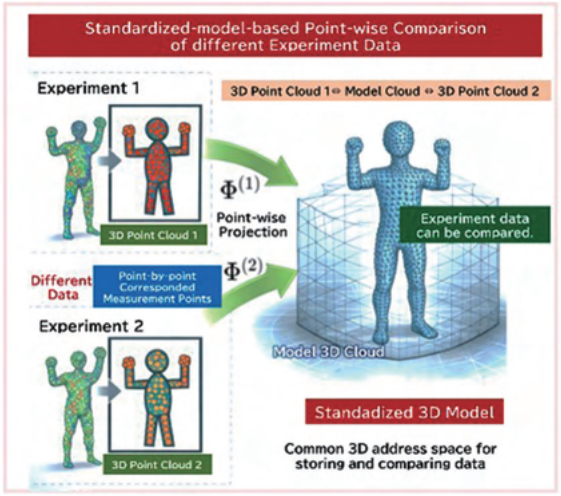


図 7　Standardized-model-based Comparison

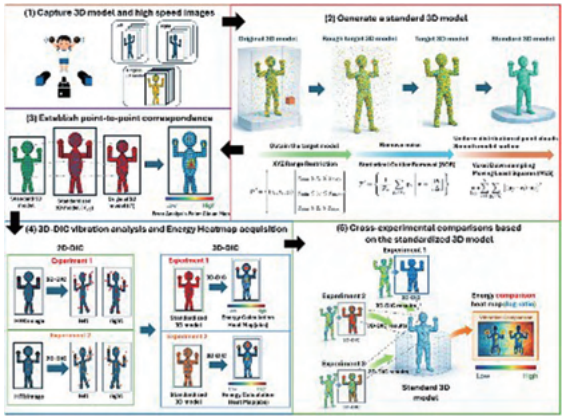


図 8　Flowchart of Proposed Concept

まず，高速ステレオカメラおよび ToF カメラを用いて，高速画像列と人体表面の三次元点群を同時計測した。次に，各実験で取得された三次元点群に対して，点群範囲制限，外れ値除去，ダウンサンプリングおよび平滑化処理を適用し，標準化三次元モデルを生成した。その後，各実験で取得された三次元点群と標準化 3D モデルとの間でポイント間対応付けを行い，共通三次元座標系上におけるポイントワイズ対応関係を構築した。さらに，各実験に対して 3D-DIC 解析を適用し，標準化 3D モデル上へ三次元振動速度および振動エネルギー分布を投影した。最後に，異なる実験条件間における振動エネルギー分布を同一標準 3D モデル上で比較することで，人体各部位における振動伝搬特性の差異を可視化した。これにより，従来困難であった異なる実験条件間における人体振動分布のポイントワイズ比較および定量評価を実現した。

(3) 実験結果

図 9 に振動比較実験時の撮影環境を示す。IMV 社の 4 自由度振動試験機上に座席シートを設置し，BYD 車両の 60 km/h 都市走行時振動データ（20%，25%，30% 加振）を入力した状態で，着座者を対象とした 20 秒間の振動試験を実施した。図 9 左にシートベルト非装着時，図 9 右にシートベルト装着時の撮影場面を示す。

図 10 に三次元点群と高速画像間における対応付け処理を示す。まず，解析用三次元点群を左右高速カメラ画像へ投影し，2D-DIC 解析により三次元振動分布を推定した。次に，基準となる標準化 3D モデル上の各計測点に対して三次元点群内で対応点探索を行い，ポイントワイズな振動比較を実現した。図 11 にシートベルト有無条件における振動エネルギー比較結果を示す。赤色はシートベルト装着時に振動エネルギーが増大した領域，青色は非装着時に振動エネルギーが増大した領域を表す。比較結果より，0–3 Hz 帯域ではシートベルト装着時に上半身周辺の振動エネルギーが増大する傾向が確認さ

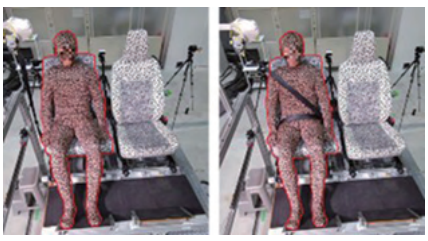


図 9　Comparison of with and without seatbelt

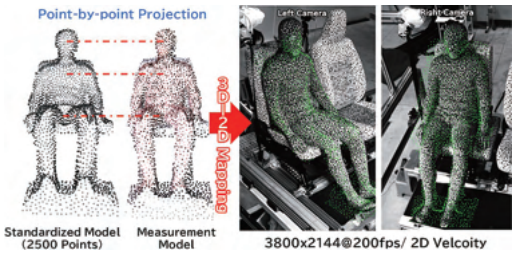


図 10　3D Model and 2D Velocity

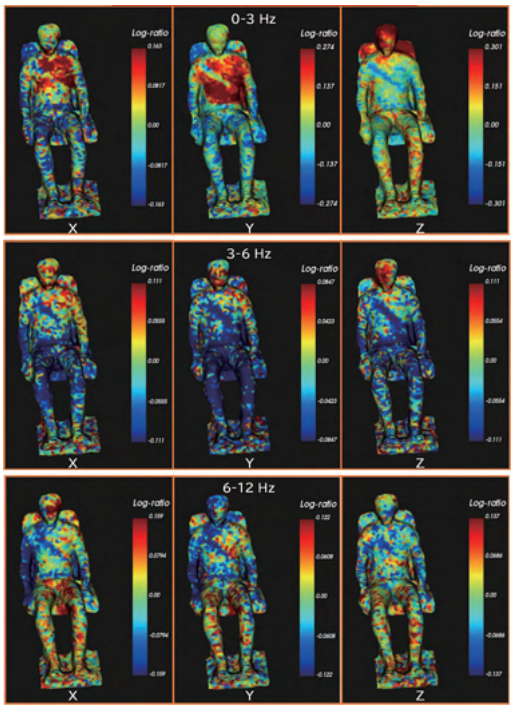


図 11　3D Energy Comparison

れた。3–6 Hz 帯域では頭部周辺のエネルギー増大と，下半身周辺のエネルギー低下が観測された。また，6–12 Hz 帯域では脚部周辺において振動エネルギーの増大が確認された。これらの結果より，シートベルト装着は全周波数帯域において一様な振動抑制を実現するものではなく，周波数帯域や人体部位によっては局所的な振動増幅が発生する可能性が示された。提案手法により，人体各部位における周波数依存的な振動伝搬特性を定量的に比較可能であることを確認した。

［成果の発表，論文など］

1. Mori T, Wang F*, Shimasaki K, Ishii I: High-Speed Volumetric Capture for Vibration Propagation in the Human Body, IEEE Sensors Letters, Vol. 9, No. 5, 2025.
2. 王 飛躍，島崎 航平，石井 抱，北川 哲也，古舞 隆司：座席シート振動試験における着座者のボリュメトリック振動可視化，第 26 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2025），2025.

［研究助成（A）］

人間と機械の安全な触れ合いを実現する熱変色センサの開発

2251006



研究代表者
（助成金受領者）
慶應義塾大学　理工学部
物理情報工学科
専任講師　大　澤　友紀子

［研 究 の 目 的］

人間と機械の調和には，触れ合い（物理的な接触）の安全性を確保すると同時に，人間にとってその接触は快適かどうかが重要となる。特に機械システム（ロボットなど）の外装（ロボットスキン）は見た目や触感など，ロボットを印象付ける支配的な要素となる。しかしこれまで多くの研究はロボットの表面に多数のセンサを取り付けるなど，外部の認識精度の向上に焦点が当てられており，人にとって好ましいとされる外装の設計については十分に考慮されてこなかった。本研究は多数のセンサをロボット表面に取り付けるのではなく，接触対象に応じて色が変化するロボットスキンを開発することで，ロボットの外装自体をセンサ化する。これにより表面にセンサを取り付ける必要がなくなり，人間にとって心地よい触感を残しながら，色の変化の過程から接触対象の材質・形状の認識を実現することができる。本課題の達成により人間の動作や人肌・着衣など接触部位を考慮した安全な接触が可能となり，介護をはじめとする繊細なタスクへのロボット応用が想定され，人間と機械の調和の促進が期待できる。

［研究の内容，成果］

1. 熱変色顔料を用いたセンサの開発

1.1 材料識別の原理

提案するセンサ表面には，thermochromic-pigment と呼ばれる熱変色顔料を塗布した薄膜が複数層重ねられている。本顔料はある温度閾値を超えると化学反応により無色になる特性があり，異なる色・温度閾値の顔料を組み合わせることで，温度応答と色変化に所望の相関を持たせることができる。本研究では複数の基礎実験により，色・温度閾値が異なる 3 層の熱変色顔料を塗布したフィルムを用いて熱の流れを可視化し，その色変化の様子をセンサ内部のカメラによって取得，HSV または LAB 色空間に変換することで色の変化を数値化する（図 1）。

センサの表面温度と接触対象の初期温度に温度差がある場合，接触面に熱流が発生し，それぞれの表面温度は接触面温度に収束する（図 2）。

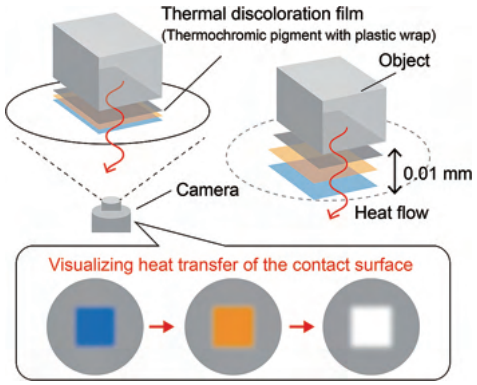


図 1　熱変色センサの原理

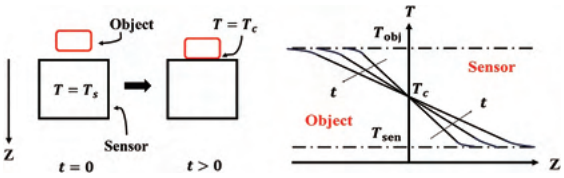


図 2　センサの熱伝達モデル

収束する接触面温度（T_s）は，モデルに基づき（1）式のように表すことができる。

$$T_s = \frac{T_{obj}e_{obj} + T_{sen}e_{sen}}{e_{obj} + e_{sen}} \quad (1)$$

ここで，T，e はそれぞれセンサ（下付き文字 sen）と接触物体（下付き文字 obj）の初期温度と熱浸透率を示す。したがって，接触面温度はセンサ・接触対象の初期温度と材料特性（熱浸透率）によって決まることがわかる。収束する接触面温度によって温度応答が変化するため，それぞれの初期温度が定まっている場合はその温度変化から物体の材料特性を抽出することができる。本センサはこの温度変化が色変化として現れるため，材料の空間分布が可視化される。

1.2　提案センサの構成

いくつかの試作を経て，開発したセンサの構成を図 3 に示す。センサの表層に 3 層の熱変色顔料を塗布したフィルム（厚み 0.01　mm），センサ下層にはカメラが設置され，全体は 3D プリンタで作製した黒色（外光を遮るため）のボディで構成されている。

3 層の熱変色顔料について，本研究ではセンサの内側から青色（温度閾値：31℃）・橙色（温度閾値：43℃）・黒色（温度閾値：50℃）の組み合わせを採用した。これは，接触対象が加熱されている場合，接触後に表面温度が室温から上昇していく過程で，HSV 色空間の H 値（色相）が徐々に減少することで温度上昇との相関を実現するためである。表層の黒色層は，初期段階で外光を遮断し，温度上昇に合わせて色相（または明度）を上げていく目的で用いられている。

基礎検証のため，センサ表面に温度制御した熱電変換素子を接触させ（図 4），温度を室温から 50℃ へと上昇させたときの色変化を H 値に変換した。熱電変換素子の表面温度を上昇させていくと，カメラから見て熱変色部が初期状態は青色，接触面温度が 31℃ に達すると青色層が無色（このときカメラは橙色を捉える），さらに 43℃ に達すると橙色層が無色（このとき黒色層も変色が始まっているためカメラは灰色～無色）と色が変化していき，H 値が温度との負の相関を持っていることが実験的に示された（図 5）。

色と温度の相関については，本配色以外にも作り出すことが可能である。たとえば温度差 10℃ 以下の小さな温度域での変化が検出できれば良い場合では，一層の熱変色顔料でも十分に機能することが基礎実験により確かめられている。また LAB 空間の L 値（明度）など，用いる色空間の変換パラメータによって，温度との相関が出る組み合わせはさまざまである。今回は青色から橙色にかけて値が減少する H 値を用いたため，このような配色を選択した。

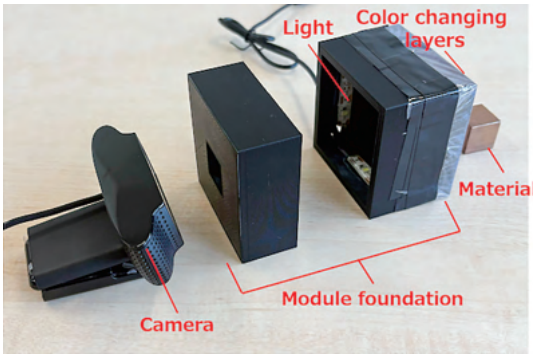


図 3　開発した熱変色センサの構成

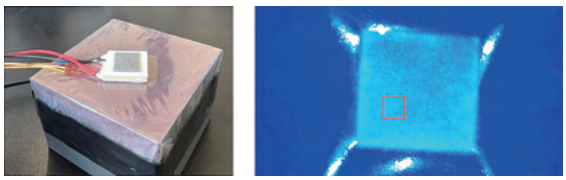


図 4　熱変色実験の様子

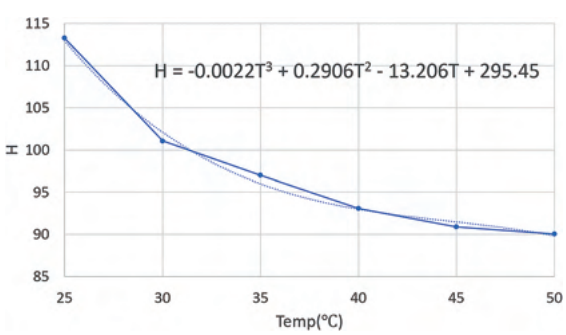


図 5　変色（H 値）と温度変化の相関

2. 提案センサの評価

2.1 材料特性の可視化

図 6（a）に示す接触対象物体（20 mm × 20 mm × 20 mm の銅・アクリル・スポンジキューブ）について，材料特性の可視化における評価実験を実施した。まず 1 つのキューブについて図 6（b）のように提案センサの表面にキューブを接触させ，各材料の特性が色変化に現れるか検証を行った。ここで，センサと接触対象は温度差が必要であるため，キューブはあらかじめ 40℃ に熱した状態でセンサと接触させた。

またセンサが抽出し得る材料特性の空間分解能を検証するため，図 6（c）のように異なる材料のキューブを隣り合わせにセンサと接触させる実験を行った。センサ接触時の熱応答はそれぞれ物体が持つ物理パラメータのみを抽出できるよう，接触面を固定するために同じ接触面積（体積）で，熱浸透率の異なる材料を接触対象として選んだ。

それぞれの物体に接触した際のセンサの変色の様子は図 7 の通りである。

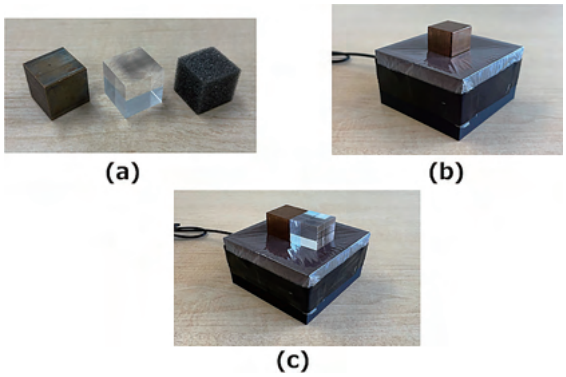


図 6　材料識別の接触対象

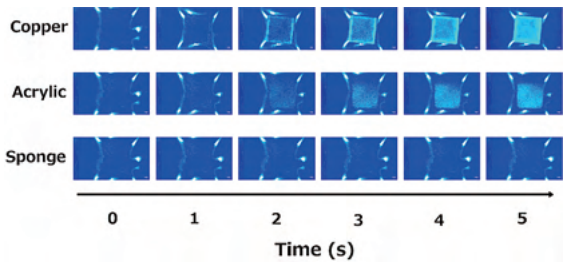


図 7　銅・アクリル・スポンジに接触した際の色変化

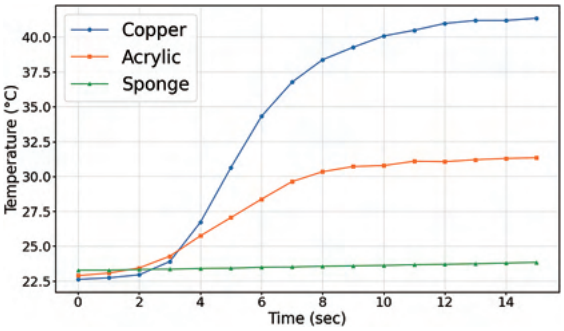


図 8　色変化から変換した温度応答値

図 7 を見ると，銅のような熱浸透率の高い材料は熱浸透率の低いアクリルやスポンジと比較して変色が大きいことがわかる。この色変化について H 値に変換し，図 5 で得られた温度との相関式を用いて温度応答値に変換すると図 8 のプロットが得られた。

図 8 より，3 種類の接触対象について明確に区別ができることがわかる。本提案センサを温度センサとして用いるためには，温度と色変化の相関係数についてさらに検証が必要であるが，材料を識別するという目的においては有用であると言える。

また，図 6（c）で示すように銅とアクリルキューブを隣り合わせでセンサに接触した際の変色の様子を図 9 に示す。これにより，銅のキューブとアクリルキューブの部分での変色の様子が異なっていることが見て取れる。また本実験結果から，接触対象の材料，形状，位置関係の情報が一度に得られていることがわかる。従来の温度・熱流束センサでは，このような温度分布の情報を得るために無数のセンサを敷き詰める必要があり，さらに形状まで把握するのは困難である。提案するセンサでは，接触時の熱の移動を可視化することで，1 つのカメラのみで熱の移動とそれに伴う温度分布を取得することができる。提案センサが取り得る空間分解能については，今後も検証していく。

図 9 より得られた色変化に基づき，それぞれの物体が位置する部分を温度応答値に変換したものを図 10 に示す。図 10 より，1 つの変色動

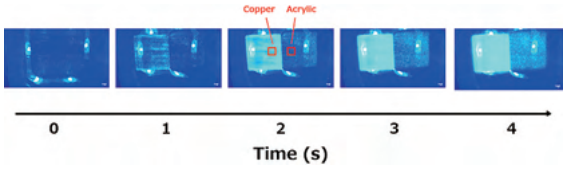


図 9　銅・アクリルに同時に接触した際の色変化

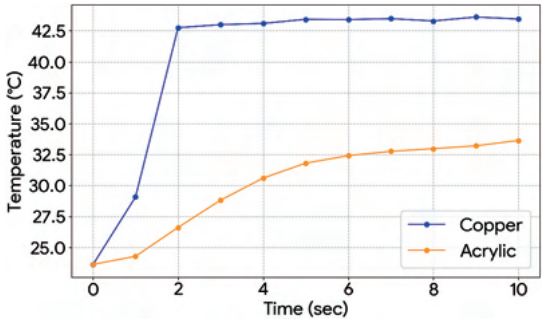


図 10　銅・アクリルに同時に接触した際の色変化

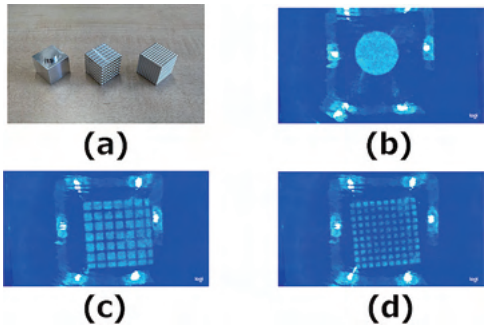


図 11　表面粗さの異なる対象に接触した際の色変化

画から任意の位置での温度応答値が得られることがわかる。

2.2　表面粗さの可視化

図 11（a）に示される表面粗さの異なる接触対象（接触表面が円状･3 mm 刻みのメッシュ･1.6 mm 刻みのメッシュのアルミキューブ）についてもセンサ評価のための実験を行った。

提案する熱変色センサの色変化を図 11（b）～（d）に示す。これにより，それぞれの接触面の状態が色変化により識別できることがわかる。センサが表現し得る空間分解能については改めて評価が必要であるが，本実験により 1.6 mm 刻みの粗さまで可視化できることを確認した。

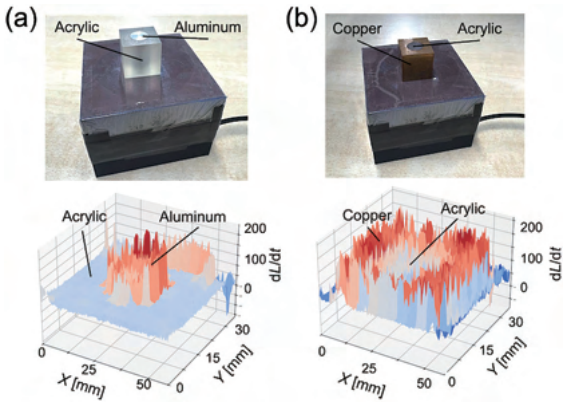


図 12　材料の空間分布の可視化

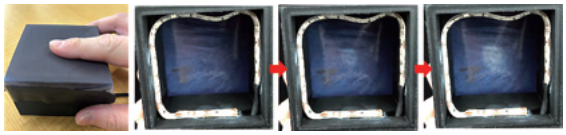


図 13　指の接触に伴う熱変色センサの色変化

2.3　材料分布の可視化

次に，複数の材料が含まれている対象物について，材料分布の可視化実験を行った。図 12 に，熱したアクリルキューブの中央にアルミの円筒（図 12（a）），銅キューブの中央にアクリルの円筒（図 12（b））が入った対象物に接触した際の熱変色率（色空間 L 値の変化率）を示す。なお，キューブの一辺は 20 mm，円筒の直径は 10 mm である。

図 12 より，10 mm の空間分解能で材料の空間分布が可視化できることを示すことができた。

2.4　人の接触の可視化

最後に，人の接触について検証を行った。指を熱変色センサの表面に置いた際のセンサの色変化を，図 13 に示す。

図 13 より，指の接触部分が色変化していることがわかる。接触動作や接触箇所によって色の変色の過程は変化することが予想させるため，今後人の動作識別手法へも活用していく。

［課題・今後の展望］

本研究では，接触対象との熱交換を可視化する計測技術について試作，検討を行った。熱変色センサの開発とその評価実験を通し，銅・アクリル・スポンジキューブといった熱浸透率が大きく異なる材料について，熱応答の違いを熱変色顔料の色変化の違いとしてカメラで捉え，温度との相関からその材料特性を空間分布と共に抽出する方法について模索した。

本研究課題を通して得られた課題は，下記の通りである。

1. 熱の流れを可視化するために用いる熱変色顔料において，色や温度閾値の組み合わせについて引き続き検討が必要である。温度との相関についても，外光の影響で試行ごとに分散が見られるため，十分再現性のあるセンサの構成について再検討する必要がある。また熱を可視化することができる材料として，今回用いた顔料以外の候補材料についても，合わせて検討していく。
2. 提案センサが抽出し得る材料特性の空間分解能について，さらなる検証が必要である。
3. 熱を扱う以上，他センサと比較した際の応答性の悪さは避けられない。特に時間が経過するにつれて熱が拡散され，色変化がぼやけていく傾向にある。接触対象の形状や表面粗さの可視化について，時間応答の観点からも検証していく必要がある。
4. 機械システムへの応用を見据え，センサの小型化，また繰り返し環境との接触を可能にする耐久性を考慮したセンサの開発が必要である。

本研究課題を通し，多くの知見を得られることができた。今後も引き続き検討を続けていきたい。

［謝辞］

本研究に助成頂いた立石財団にこの場を借りて改めて御礼申し上げます。

［成果の発表，論文など］

［1］ Hirokazu Iwane and Yukiko Osawa, “Visualizing Spatial Heat Transfer Using Thin-Thermochromic Sensor,” *IEEE Sensors Journal* (Q1, IF:4.5), 2026 (Early access).

［2］ Hirokazu Iwane and Yukiko Osawa, “Thin-Film Thermal Discoloration Sensor for Distributed Material Identification,” *Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 438-443, January 11-14, 2026.

［3］ Hirokazu Iwane and Yukiko Osawa, “Design of Thermal Discoloration Sensor for Shape and Material identification,” *Work-in-Progress Papers (WIP) of the IEEE World Haptics Conference*, July 9, 2025.

［研究助成（A）］

サブミリ波によるがんの早期診断に向けた高感度電界イメージングシステムの開発

2251008



研究代表者
（助成金受領者）
奈良先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
助教　岡田竜馬

［研究の目的］

皮膚がんの診断には組織を切除することによる病理診断が行われている。病理診断は痛みを伴うため，がん検診の障壁となる。また，ダーモスコピーによる光学的な診断では，確実な診断ができない。それに対して，サブミリ波をがん診断に応用する手法では，がん組織とそれ以外の組織で誘電率が異なることを利用する。この手法は，痛みを伴わず，精度の高い病理診断が可能である（Mirbeik, A. *et al. Sci Rep* 12, 4971 (2022)）。さらに，サブミリ波を用いることで，高い空間分解能での検出が可能となり，早期発見につながる。しかし，従来手法では，アンテナ走査が必要であり１回の診断に長い時間を要する。本研究の最終目標として，高感度なサブミリ波電界イメージングシステムをがん診断に応用することで，従来の診断方法に比べて高速かつ高空間分解能な計測を実現する。これにより，診断と治療を同時に行うことができるシステムが構築される。また，このシステムを発展させ，フレキシブル導波管と組み合わせることで，内視鏡として構築し，皮膚がんだけでなく，体内の胃や大腸等のがん診断と治療に応用が期待できる。

がん組織と他組織の誘電率の違いを検出するためには，観察対象に向かってサブミリ波を照射して，反射された電界強度と位相情報から計算を行う。一次電気光学（EO）効果に基づく高周波電界イメージングはEO結晶で誘起される微弱な複屈折変化をイメージセンサで一括して計測することで，電界の強度と位相分布を高速に可視化することが可能である。しかしながら，この手法は，動画像として電界分布が取得できるが，検出感度が低く，電界計測応用に利用することが難しかった。この理由として，偏光イメージセンサの微弱な変化に対する感度の低さと，撮像速度が遅く，ノイズレベルの高い領域での撮像となっていたためである。

本研究では，高感度な電界イメージングに向けて，高速撮像システムの構築および偏光イメージセンサの近赤外領域における性能改善を行った。高速撮像に対しては，チップ内信号処理回路の搭載とリアルタイム処理システムを構築した。性能改善には，画素間に溝を形成し拡散キャリアの流入を抑制する構造を採用した。これらにより，高感度と高速性を両立したシステムを実現した。

［研究の内容，成果］

研究項目１：高速撮像システムの開発

観察対象の電界周波数はイメージセンサのフレームレートに対して非常に高いため，EO結晶に照射する光を予め変調し，EO結晶と偏光子を光学ミキサとして利用することで，光ヘテロダイン検波による周波数変換を行う。光ヘテロダインによって，光変調周波数と電界周波数の差周波成分の電界に比例した光強度変化として検出される。先行研究では，フレームレート

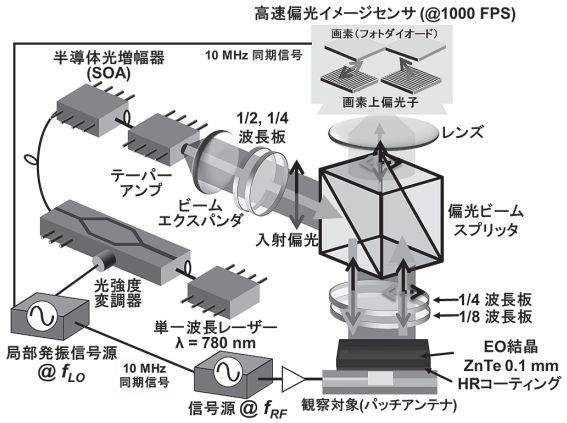


図1　電界イメージングシステム構成

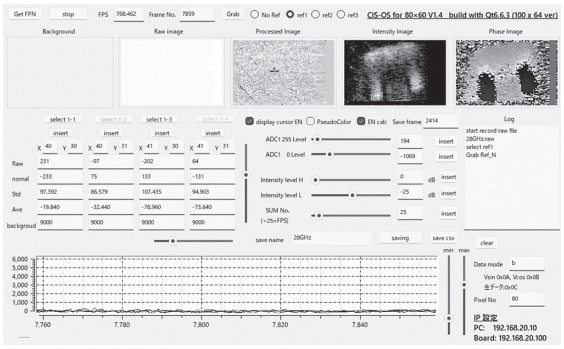


図2　作製したリアルタイム電界イメージングソフトウエア

を 360 FPS，中間周波数をフレームレートの 1/4 となる 90 Hz に設定し，電界イメージングの実証を行ってきた。しかし，この周波数帯では，機械的ノイズなどの影響を受けやすく，高感度計測に向け中間周波数を上げる必要があった。さらに，高速撮像を行うことで，単位時間当たりの積算枚数を増加させることによって，感度と高速性が両立される。

本研究では，リアルタイムイメージングシステムの開発およびチップ内信号処理回路を搭載した偏光イメージセンサの開発およびを行った。

(1) リアルタイムイメージングシステムの開発

ロックイン検波の手法では，中間周波数をフレームレートの 1/4 に設定し，4 フレームの信号（$i_1 \cdots i_4$）を 1 セットとし，

$$v_{cos} = -i_1 + i_2 + i_3 - i_4$$

$$v_{sin} = i_1 + i_2 - i_3 - i_4$$

を求めることで，位相差 π/2 の矩形波信号の取得，各信号へ乗算と同様の結果を得る。それぞれが複素成分の実部と虚部に相当する。次にこれらを積算する。

$$V_{cos} = \sum_{n=1}^{N/4} v_{cos}$$

$$V_{sin} = \sum_{n=1}^{N/4} v_{sin}$$

ここで n は周期番号であり N は積算フレーム数である。この演算はローパスフィルタとして機能する。この結果から強度 $V_{cos}^2 + V_{sin}^2$ と位相 arctan V_{sin}/V_{cos} を求める。この演算では，単純な加減算のみでロックイン検出動作が実現される。

本研究では，イメージセンサを 1,000 FPS 以上で動作させ，FPGA 上でフレーム分離および積算動作を行った，V_{cos} および V_{sin} の結果を PC に Ethernet パケットとして転送するシステムの開発および，得られたデータからリアルタイムに強度と位相を計算し，表示するソフトウエア開発を行った。

本研究で作製した電界イメージングシステムでは，これまでに作製してきた，80 × 60 画素イメージセンサでは最大で 2,000 FPS で動作し，110 × 100 画素イメージセンサでは最大で 1,000 FPS で動作可能となった。FPGA から PC へ UDP パケットとして転送されたデータをリアルタイムに処理し，データの表示および保存ができるソフトウエアを開発した。図 1 に作製した電界イメージングシステムの構成を示し，図 2 に作製したソフトウエア画面を示す。この画面では，テスト対象デバイス（DUT）として，30 GHz 帯のパッチアンテナを用いた計測例を示しており，撮像結果は左上に表示されている。パッチアンテナに約 28 dBm の f_{RF} = 30 GHz 信号を入力し，f_{LO} = 30 GHz + 250.1 Hz の光強度変調を行った。EO 結晶は，3 × 3 × 0.1 mm の (100)-ZnTe 結晶を用いて計測を行った。

図2のソフトウエア上で観察されている，パッチアンテナ電界分布では，アンテナ端において共振効果により，またそれに接続するマイクロストリップライン上では電界集中効果により，それぞれ高い電界強度が観測された。位相分布については，アンテナの左右，およびアンテナ上と外部とで，それぞれπ radの位相反転が確認された。

なお，イメージングソフトウエアでは，FPGAで積算した結果をPCに転送し，その結果をさらに積算し，電界強度と位相分布の演算を行った。開発したソフトウエアでは，積算フレーム数に達したのち逐次表示を行うモードと移動窓処理を行うモードの2種類を搭載している。移動窓処理を行うモードによって，積算によるノイズ抑制と高い時間分解能を両立し，電界の動的な変化を滑らかにリアルタイム表示することが可能となった。

図3（a，b）に各撮像結果に対して計測された電界強度を正規化した値をA，位相をθとして，$A\cos\theta$として計算することで，パッチアンテナ上の電界分布の連続画像として計算を行った結果を示す。イメージセンサを1,000 FPSに設定し，FPGAでフレーム分離を行い，その結果を20フレーム積算し，PCに転送した。その結果，250 Hz成分の強度分布と位相画像が12.5 FPSで得られる。本実験では，DUTに入力する信号とLO光の周波数差は$|f_{RF} - f_{LO}| = 250.1$ Hzに設定したため，検出周波数との差分である0.1 Hzで位相が変化する電界分布像が得られる。どちらの計測結果でも，1周期が10秒の信号が検出されており，ミリ波電界を高速に撮像できていることが示された［1］。

本システムの開発によるフレームレートの向上は，中間周波数の高周波化と入射光量上限の拡大，および単位時間あたりの積算枚数の増加が可能となる。これにより，先行研究を上回る高速な電界分布の可視化を実現した。先行研究の課題であった中間周波数の低さ（90 Hz）に起因する機械的ノイズや1/fノイズについては，中間周波数の向上によって効果的に抑制され，SNRが大幅に改善した。

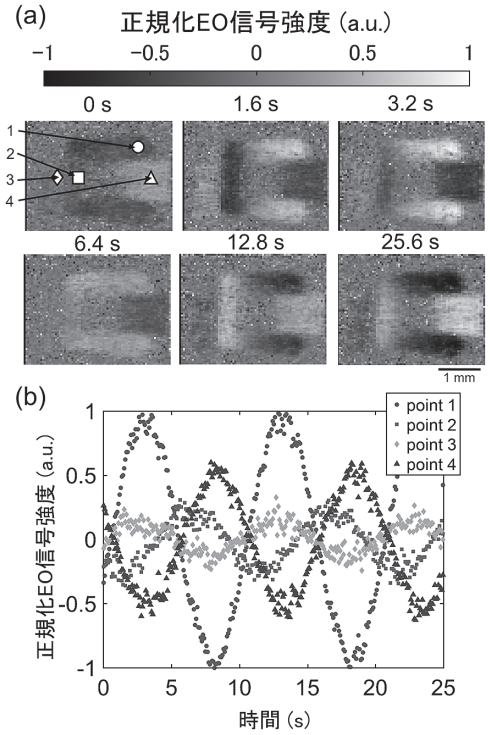


図3　(a) パッチアンテナ上の電界分布の連続画像，(b) (a) に示した点における正規化されたEO信号強度

(2) チップ内信号処理回路を搭載した偏光イメージセンサの開発

イメージセンサのフレームレート向上に伴い，データ転送やロックイン検波をはじめとする信号処理の負荷が課題となる。そのため，ロックイン検波の一部をイメージセンサ内で処理する回路を搭載した偏光イメージセンサ作製した。これにより，後段処理の負荷を軽減し，撮像速度の向上を図った。本研究では，(1) に記載したロックイン検出の演算順序を入れ替えても結果は変わらないことに着目し，チップ内でi_1からi_4を先に積算することで転送データ量を削減する。具体的には，チップ内でi_1からi_4を積算した$\sum i_1 \sim \sum i_4$を取得し，PCへ転送し，

$$V_{cos} = \sum i_1 - \sum i_2 - \sum i_3 + \sum i_4$$
$$V_{sin} = \sum i_1 + \sum i_2 - \sum i_3 - \sum i_4$$

を計算することで同様に強度と位相を求める。

このチップ内で$\sum i_1 \sim \sum i_4$を演算する回路を

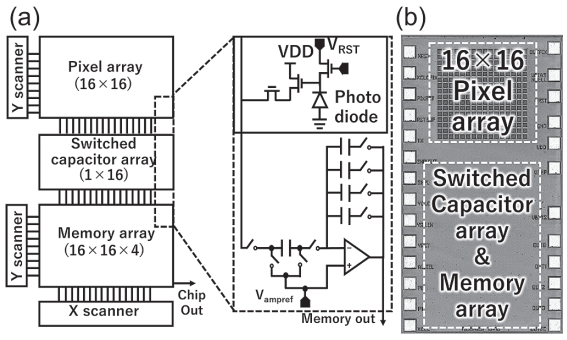


図4 （a）試作チップのブロック図，（b）チップ写真

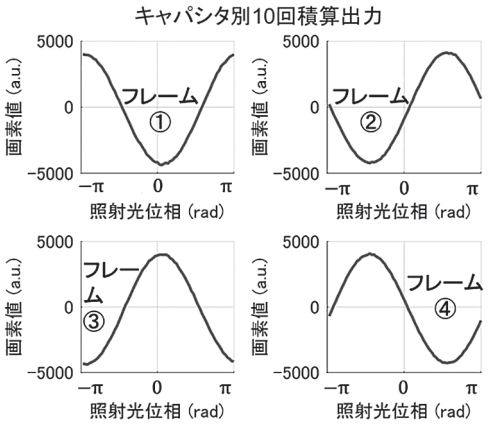


図5 試作チップに正弦波変調光を照射し，変調光の位相を変化させた際の各フレームの出力結果

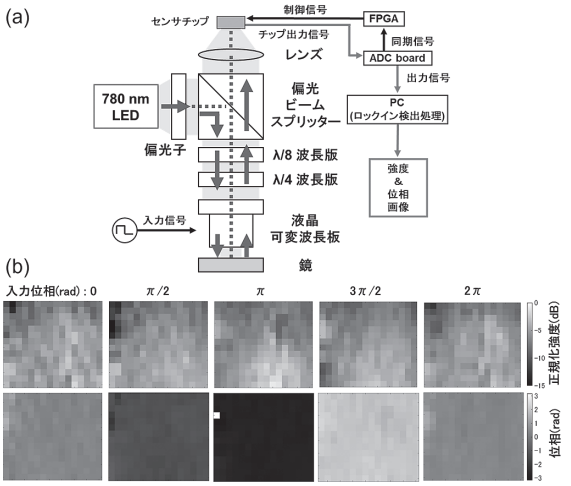


図6 （a）変調光検波動作確認のための光学系模式図，（b）入力位相変化に対する強度分布および位相分布

搭載した試作イメージセンサを作製した。試作チップのブロック図およびチップ写真を図4に示す。本チップは，隣り合う画素に偏光透過軸が0°と90°の画素上偏光子を持つ16 × 16の画素アレイと1 × 16のスイッチドキャパシタ積分器アレイ，4行で1ブロックとする4 × 16 × 16のメモリキャパシタアレイで構成される。各画素にはメモリキャパシタは4つ配置される。

本回路は，4フレームの各信号（I_1-I_4）を1セットとして，各フレームの信号を積算した（$\sum I_1$ - $\sum I_4$）を取得する動作を行う。画素信号成分はスイッチドキャパシタ積分器により基準電位との差分を電荷に変換され，メモリキャパシタに転送・格納される。サンプリング動作と転送動作は信号ごとに行われ，転送先のメモリキャパシタを順次切り替えることで，画素信号に対応したメモリキャパシタへ電荷が蓄積される。これを複数回繰り返すことで，メモリキャパシタに蓄積された電荷量が信号の総和として出力される。

電界イメージングにおいて，微弱な偏光変化を検出するためには，フォトンショットノイズが支配的となる条件で動作させる必要がある。そのような条件下で複数のフレームを画素内で蓄積するキャパシタを用意することはプロセスの都合上困難であるため，信号電圧を蓄積するキャパシタを画素外に配置し，十分な容量を確保するとともに，基準電位との差分を積算することで，多数フレームの積算を実現した。

図5にイメージセンサのフレームレートを1,000 FPSに設定し，LEDの照射光強度を250 Hzで正弦変調し，位相が−πからπへ，π/18刻みで変化させた際の各メモリからの出力を示す。各位相条件において，10回の積算出力を測定した。4フレームごとの分離積算が正しく行われている場合には，正弦変調光に対応した振幅成分が積算出力として現れる。結果より，各フレームの積算出力は互いに1/4周期ずつ位相がずれて変化していることが確認され，目的通りに動作していることが確認された。

作製した試作チップを用いて，入射光強度を一定に保った条件下で偏光変調を付与し，ロックイン検出処理によって得られる強度分布および位相分布の妥当性を評価した。図6（a）に

本評価で用いたイメージングシステムの模式図を示す。光源には波長 780 nm の LED を用い，偏光子および偏光ビームスプリッタ，λ/4 波長板，λ/8 波長板により入射偏光状態を整えた後，液晶可変波長板（LCC1111T-B，Thorlabs）を挿入した。液晶可変波長板は，印加電圧に応じてリターダンスが変化する素子であり，電界印加による複屈折変化を示す EO 結晶の代替として用いた。イメージセンサを 1,000 FPS で動作させた。液晶可変波長板に印加する変調信号の周波数は，イメージセンサのフレームレートの 1/4 に相当する 250 Hz に設定した。センサチップ内部での積算枚数は 10 枚とし，積算された信号を 1,000 フレーム分取得し，強度および位相分布を計算した。なお，強度分布は最大値が 0 dB となるように正規化した。液晶可変波長版に印加する電圧は，位相変調が約 λ/2 となる電圧値 1.4 V を基準に設定し，液晶可変波長板の偏光変化の変調度は 7% に設定した。図 6(b) に，入力位相を π/2 rad ずつ変化させた際の強度分布および位相分布を示す。強度分布においては，照射光の空間的不均一性に起因する分布が観測されるものの，入力位相変化に伴う顕著な強度分布の変化は確認されなかった。一方，位相分布では，入力した位相変化に対応して，画素全体にわたり位相が π/2 rad ずつシフトしている様子が明確に観測された［2］。

本研究で作製したチップは 16 × 16 画素と非常に少ないものの基本的な動作を確認することができた。今後，画素数の増加を行い，電界イメージングを実施する。また，画素部分と並列積算回路部分の動作を独立化することにより，さらに画素を高速駆動しつつ読み出し速度を低速化させる動作を行うことで，さらなる撮像速度の向上を目指す。

研究項目 2：偏光イメージセンサの近赤外領域における性能改善

本研究では，偏光イメージセンサの画素上偏光子構造の最適化および画素構造の変更を行うことで，波長 780 nm 帯の近赤外領域における消光比改善を行った。

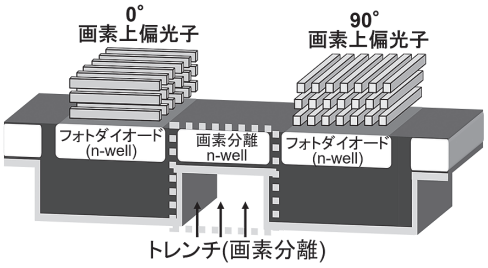


図 7　作製した画素構造

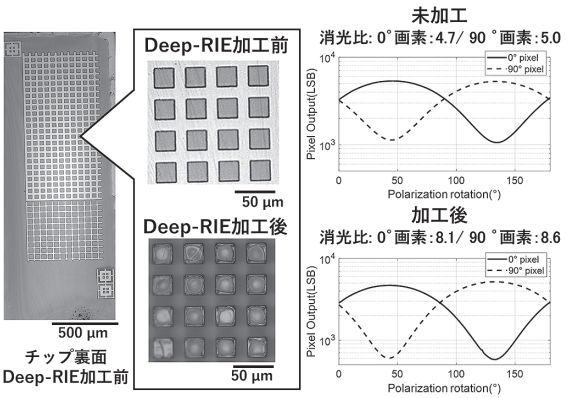


図 8　試作チップを用いてトレンチ構造作製したチップ写真および未加工チップおよび加工後のチップ消光比の比較

本研究で作製した画素構造を図 7 に示す。画素上偏光子は先行研究までに最適化を行った，Line/Space = 0.7/0.7 μm の構造を踏襲しつつ，CMOS 金属配線を 3 層積層することで最大の消光比が得られることを確認した。また，電界イメージングで利用する近赤外帯は，Si の深い領域で発生した拡散キャリアの隣接画素への流入などの影響により，実効的な消光比が低下する。そこで，画素間に n-well レイヤを配置し，そこに定電圧を与えることにより，拡散キャリアの隣接画素への流入を防ぐ構造を作製した。この n-well レイヤに印加する電圧を 7 V に設定することで，消光比が最大 6.1 まで改善された［3］。

さらに，画素間に溝（トレンチ）を作ることで，拡散キャリアの流入を防ぐ構造を作製した。本研究では，トレンチを作製し，評価を行うためのテストチップを試作した。図 8（a）に示

されるように，テストチップを 100 μm 程度まで研磨し，OAP および，OFPR8600 を用いてレジストを作製し，両面アライナを用いてフォトリソグラフィを行った。その後，チップ裏面からシリコン深堀リアクティブイオンエッチング（Deep-RIE）により 15 μm 幅のトレンチを形成した。その結果，消光比が 5.0 から 8.6 へ向上した［4］。この消光比改善によって，二重偏光子構造における理論計測感度が 67% から 79% に改善することに相当する。

本研究のまとめ

本研究では，サブミリ波を用いたがんの早期診断への応用を最終目標とし，高感度かつリアルタイムなサブミリ波電界イメージングシステムの構築を行った。

高速撮像システムの開発においては，1,000 FPS 以上で動作するイメージセンサと，FPGA および PC ソフトウエアを連携させたリアルタイム処理システムを構築した。これにより，中間周波数を高周波化することで先行研究の課題であった機械的ノイズや 1/f ノイズを効果的に抑制し，SNR の大幅な改善と電界分布の動的な可視化を実現した。また，ロックイン検波の一部をセンサチップ内で実行する並列積算回路を搭載し，データ転送負荷の軽減とさらなる高速駆動の両立を図った。加えて，偏光イメージセンサの近赤外領域における性能改善として，画素間に拡散キャリアの流入を抑制する n-well レイヤやトレンチ構造を導入した。特にシリコン深堀エッチングによるトレンチ形成により，消光比を 5.0 から 8.6 へと大幅に向上させ，理論計測感度を 79% まで改善することに成功した。

以上の成果により，高感度と高速性を両立した電界イメージングが可能となった。今後は，電界イメージンングシステムのさらなる高感度化および，本システムを用いて実際にがん部位と正常部位における誘電率や複屈折性の差異の詳細な解析を行う。さらに，本研究で得られた成果は，電界イメージングだけでなく，微弱な複屈変化を観察する複屈折顕微鏡への応用等も期待される。

［成果の発表，論文など］

［1］岡田 竜馬，水野 麻弥，竹原 浩成，春田 牧人，田代 洋行，太田 淳，笹川 清隆，“高速偏光イメージングシステムを用いたミリ波電界の高速撮像，”電子情報通信学会論文誌 C, vol.J109-C, no.3, pp.194-201, 2026.07.01.

［2］兵頭 克哉，岡田 竜馬，竹原 浩成，春田 牧人，田代 洋行，太田 淳，笹川 清隆，“高速かつ高感度な電界撮像に向けたチップ内並列積算回路搭載 CMOS 偏光イメージセンサ，”映像情報メディア学会 2025 年冬季大会，2025.12.19. 慶應義塾大学 矢上キャンパス

［3］Ryoma Okada, Maya Mizuno, Hironari Takehara, Makito Haruta, Hiroyuki Tashiro, Jun Ohta, Kiyotaka Sasagawa, “On-Pixel Polarizer Structure for High-Sensitivity Millimeter-Wave Electro-Optic Imaging,” Electronics, vol.14, no.20, 20240742, 4026, 2025.10.14.

［4］大原 千躍，岡田 竜馬，竹原 浩成，春田 牧人，田代 洋行，太田 淳，笹川 清隆，“電界撮像向け偏光 CMOS イメージセンサの画素分離構造による性能向上，”LSI とシステムのワークショップ 2026，2026.5.13. 東京大学 武田先端知ビル 5 階　武田ホール.

［研究助成（A）］

外骨格ロボットを用いて運動パフォーマンスを向上させる仕組みの解明

2251009



研究代表者
（助成金受領者）　一般社団法人NeuroPiano　プロジェクトリサーチャー　加　藤　辰　弥

［研 究 の 目 的］

本研究の目的は，自分では実行することが難しい高速な指の動きを受動的に経験することが，その後の能動的な運動パフォーマンスをどのように改善するのか明らかにすることである。運動技能は通常，自分で繰り返し練習することで上達すると考えられている。しかし，スポーツや音楽演奏のような高度な技能では，現在の自分の能力を超える動きを自力で経験することが難しく，それがさらなる上達を妨げる一因となる可能性がある。近年，外骨格ロボットなどの技術を用いることで，人が自発的には行えない速さや複雑さの運動を身体に経験させることが可能になってきた[1,2]。このような受動運動トレーニングは，従来の能動的な練習とは異なる新しい学習方法として期待される。

一方で，受動的に指を動かされる経験が，どのような仕組みで能動運動の向上につながるのかは十分に分かっていない。単に同じ感覚入力を繰り返し受けるだけで運動が改善するのか，それとも，その動きがどのような系列であるかを理解し，予測しながら経験することが重要なのかは未解明である。そこで本研究では，外骨格ロボットを用いて，参加者の指を一定の系列に従って高速に動かすトレーニングを行い，系列に関する事前知識の有無が，その後の能動的な系列指運動の改善に影響するか検証した。

さらに本研究では，長年の訓練によって精密な指運動を獲得しているピアニストと，専門的な演奏経験を持たない非演奏家を比較した。ピアニストは，複雑な指の動きに関する感覚運動の表象をより精緻に持っていると考えられるため，事前知識を利用して高速な受動運動を意味のある系列として捉えやすい可能性がある。したがって，本研究では，事前知識によるトレーニング効果の増強は，非演奏家よりもピアニストで顕著に現れると予測した。

以上より，本研究は，自発的には実行困難な高速受動系列運動による能動運動パフォーマンス改善の背後には，単なる感覚入力への曝露だけでなく，系列に関する事前知識と熟練した感覚運動表象によって，その入力が意味のある系列として予測・構造化されることが重要である可能性を検証するものである。本研究により，受動運動トレーニングによる運動学習機序解明だけでなく，ロボットを用いた受動運動トレーニングの効果を高めるための認知的条件を明らかにし，音楽演奏，スポーツ，リハビリテーションに応用可能な新しい運動学習法の基盤を築くことを目指す。

［研究の内容，成果］

本研究では，外骨格ロボットによって指を高速に動かされる受動的なトレーニングが，その後に能動的に行う複雑な指運動のパフォーマンスを向上させるかを検証した。特に，参加者がトレーニング中に経験する指の系列について事前に知っていることが，トレーニング効果に影

響するかを調べた。

実験には，音楽大学に所属している，または卒業後も継続して専門的な訓練を行っているピアニスト 17 名（22.8 ± 3.9 歳；女性 14 名）と，楽器演奏歴が 5 年未満の非演奏家 17 名（22.5 ± 2.5 歳；女性 14 名）が参加した。参加者は，外骨格ロボットによる 15 分間の受動トレーニングの前後で，複雑な系列指運動をできるだけ速く正確に行った（図 1B）。テストでは，5 つの指運動からなる系列を 15 秒間に何回繰り返せるかを評価した。2 種類の系列について，それぞれ 3 試行ずつテストした。トレーニングは右手に対して行われたが，テストは右手と左手の両方に対して行われた。2 つの系列を比較することで，トレーニング効果が系列を超えて汎化するか，左手の技能を評価することで，効果が対側手へ転移するかを評価した。また，テストの前には，各系列について同じく 3 試行ずつ練習を行った。

外骨格ロボットによるトレーニングでは，参加者の右手の指を 10 Hz のテンポで高速に動かした。具体的には，ある指が 100 ミリ秒で 45 度屈曲し，その直後に次の指が屈曲した。このとき，同時に，先に屈曲していた指は伸展し，元の位置に戻った。トレーニング前のテストにおける指運動のテンポは，ピアニストで 7.8 ± 1.1 Hz, 非演奏家で 3.2 ± 1.0 Hz であったため，参加者は自分で実行するよりもはるかに速いテンポで, 連続的に指を動かされる経験を受けた。15 分間のトレーニングのうち，10 分間はテストで用いた 2 つの系列のうち一方が繰り返し提示された。この系列をトレーニング系列とした。残りの 5 分間には，トレーニング系列と一部が類似している別のランダムな系列を挿入した（図 1C）。実際のトレーニングでは，15 ～ 45 秒程度のトレーニング系列と，約 10 秒間のランダム系列が交互に現れるようにした（図 1C）。また，同じランダム系列が時間的に近接して繰り返されないようにし，ランダム系列自体に対する学習効果が生じにくいよう設計した。徐々

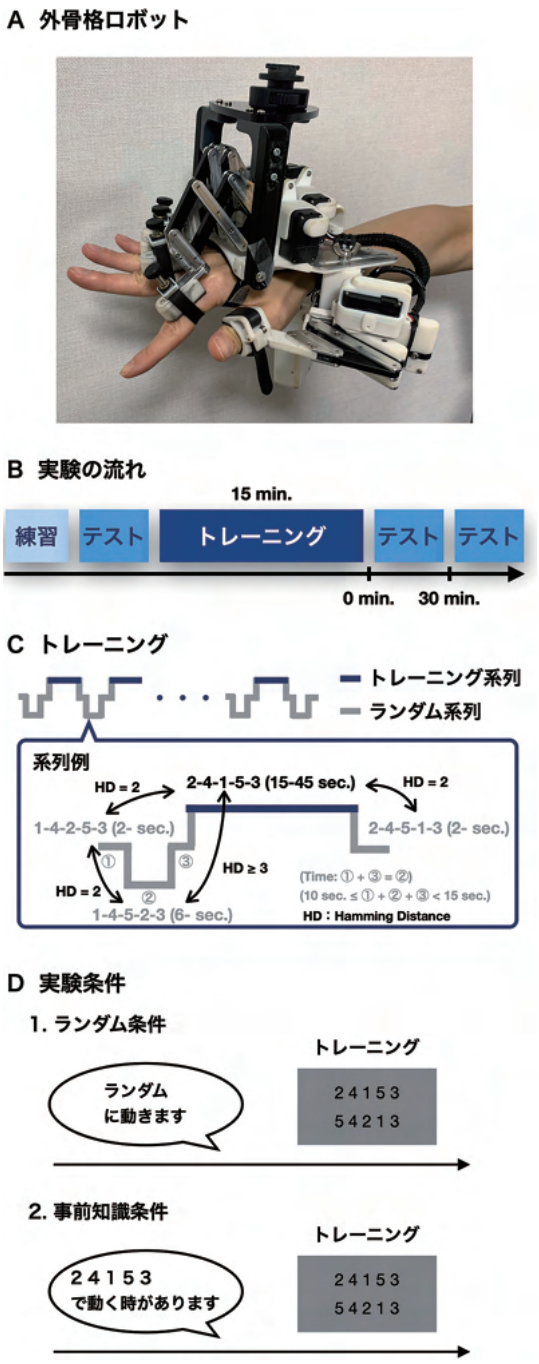


図 1　実験概要

に系列が切り替わることで，参加者がトレーニング中にどの系列で指を動かされているかを判断することは難しくなっていた。実際，事前知識がない場合，テストした 2 つの系列のうちどちらがトレーニング中に繰り返し提示されていたかを知覚できたと報告した参加者は，ピアニスト 1 名を除いていなかった。

実験条件は，ランダム条件と事前知識条件の

2つであった（図1D）。すべての参加者が両方の条件を行い，条件間には3日以上の間隔を空けた。各条件では異なる系列を用い，どの系列を用いるかは，あらかじめ用意した3つのペアの中から参加者ごとにランダムに決定した。また，ランダム条件と事前知識条件のどちらを先に行うかは，参加者間で偏りが出ないように調整した。ランダム条件では，参加者に「ロボットはランダムな系列で指を動かします」と説明した。一方，事前知識条件では，「テストで行った2つの系列のうち系列Aが，15分間のどこかで繰り返し差し込まれます」と説明した。いずれの条件でも，参加者にはトレーニング中に指の動きに意識を向けるよう指示した。

さらに，トレーニング中の注意の程度を評価するため，15分間の中に8～12回，通常よりも遅く指が動くイベントを挿入した。通常は100ミリ秒で45度屈曲するところを，このイベントでは500ミリ秒かけて45度屈曲した。参加者には，このゆっくりした指の動きが何回あったかを数えるよう求めた。これにより，条件間でトレーニング中の注意の向け方に大きな違いがないかを確認した。実際，非演奏家群でもピアニスト群でも，カウントの誤りに条件間で統計的有意差はなく，条件間でトレーニング中の指運動への注意に大きな差はないことが示唆された。

トレーニング中は，テストで用いた2つの系列が描かれた画面が表示され，参加者はできるだけ画面を見るよう指示された。外骨格ロボットによる実際の指の動きは布で隠し，視覚的に確認できないようにした。

この実験により，自発的には実行困難な高速受動系列運動が，その後の能動的な指運動パフォーマンスを高めるか，またその効果が単なる感覚入力への曝露だけでなく，系列に関する事前知識に依存するかを検証した。さらに，ピアニストと非演奏家を比較することで，長期的な訓練によって形成された精緻な感覚運動表象が，高速受動トレーニングの効果を高めるか明らかにすることを目指した。

はじめに，トレーニング中に参加者が指の動きへどの程度注意を向けていたかを確認するため，通常よりもゆっくり指が動くイベントの検出成績を解析した。実際に提示された低速イベントの回数と参加者が報告した回数との差をエラーとして評価したところ，ピアニスト群，非演奏家群のいずれにおいても，ランダム条件と事前知識条件の間に統計的に有意な差は認められなかった（図2A）。このことから，事前知識の有無によって，トレーニング中の指の動きへの全般的な注意水準が大きく異なっていた可能性は低いと考えられる。

次に，外骨格ロボットでトレーニングを受けた右手について，トレーニング中に繰り返し提示された系列のパフォーマンス変化を評価した。その結果，ピアニストでは非演奏家よりも大きなパフォーマンス向上が認められた（図2B）。さらに，ピアニストでは，トレーニング30分後において，事前知識条件の方がランダム条件よりも有意に大きな向上を示した（$p < 0.001$）。この結果は，ピアニストでは，受動トレーニング中に経験する系列への事前知識が，その後の能動的な系列指運動の改善を促進したことを示している。

一方，右手の非トレーニング系列，すなわちトレーニング中に繰り返し提示されていない系列についても，両条件でパフォーマンス向上が認められた（図2C）。この改善には，群間差や条件差は認められなかった。したがって，高速な指運動への受動的曝露そのものにも，後続の能動運動パフォーマンスを全般的に高める効果がある可能性が示唆された。つまり，本トレーニングの効果には，特定の系列に限られない非特異的な促進効果が含まれると考えられる。

ただし，トレーニング系列の改善量と非トレーニング系列の改善量の差を評価したところ，ピアニスト群の右手・事前知識条件のトレーニング30分後においてのみ，この差が0よりも有意に大きかった（$p < 0.05$）（図2F）。すな

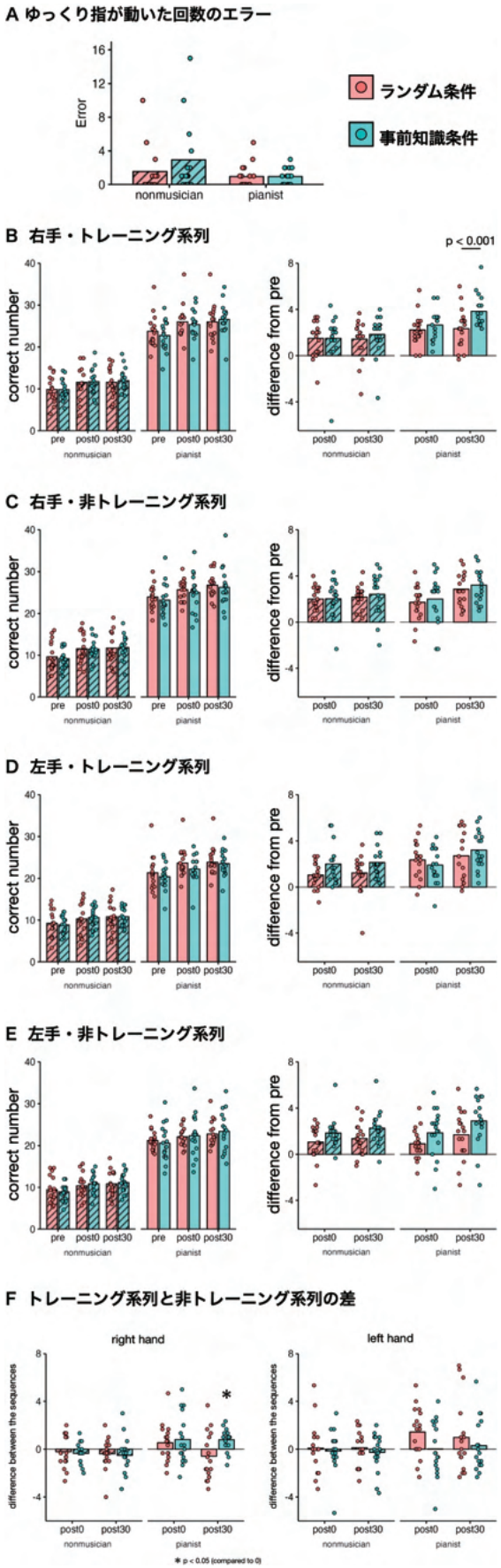


図２　実験結果

わち，ピアニストが事前に系列を知っていた場合には，単なる全般的な速度向上に加えて，実際に受動的に経験した系列に特異的な改善が生じたことが示唆された。この結果は，高速受動トレーニングの効果が，単なる感覚入力への曝露だけでなく，系列に関する事前知識と，熟練によって形成された精緻な感覚運動表象に依存して強まる可能性を支持する。特に，10 Hz という自発的には実行困難で，感覚のみから系列を同定しにくい速度であっても，既知の系列として予測・構造化できる場合には，その受動入力が後の能動運動を改善する有効な学習信号として利用された可能性がある。

さらに，トレーニングしていない左手についても解析を行った。左手のトレーニング系列では，両条件でパフォーマンス向上が認められ，群間差は認められなかった（図 2D）。一方，非演奏家では，事前知識条件でランダム条件よりも大きな向上を示した。左手の非トレーニング系列についても，両条件でパフォーマンス向上が認められ，ピアニスト，非演奏家のいずれにおいても，事前知識条件の方がランダム条件よりも大きな改善を示した（図 2E）。これらの結果は，右手で受けた高速受動運動の効果が，反対側の手にも一定程度転移することを示唆している。ただし，左手では右手のトレーニング系列で認められたような明確な系列特異的効果は確認されなかった（図 2F）。そのため，左手での改善は，特定の系列表象の更新というよりも，高速受動指運動の経験によって，系列指運動全般の実行が促進された可能性がある。

以上の結果から，外骨格ロボットによる高速受動トレーニングは，その後の能動的な系列指運動パフォーマンスを向上させることが改めて確認された。この効果には，少なくとも二つの機序が関与していると考えられる。第一に，非トレーニング系列や反対側の手にも改善が認められたことから，高速な多指運動を受動的に経験すること自体が，複数指運動における各指運動の準備や遂行を早めた可能性がある。第二に，

ピアニストの右手・事前知識条件でのみ系列特異的な改善が確認されたことから，受動的な感覚入力による学習効果が，入力の予測・構造化により促進された可能性がある。すなわち，機械によって身体へ与えられる感覚入力は，それ単独で効果を持つだけでなく，人間側の知識，予測，熟練した感覚運動表象と結びつくことで，より選択的で強い運動学習効果を生むと考えられる。

この知見は，「機械と人間の調和」という観点からも重要である。外骨格ロボットは，単に人間の身体を機械的に動かす装置ではなく，人間が持つ認知的・身体的特性に合わせて感覚経験を提示することで，能動的な運動能力を引き出す手段となり得る。本研究は，機械が一方的に人間を制御するのではなく，人間の内部状態と調和することで学習を促進するという，新しい人間 – 機械協調の可能性を示した。これは，音楽演奏やスポーツの技能向上に加え，リハビリテーションにおいて，自力ではまだ実行困難な運動を安全に経験し，その後の能動運動へとつなげる技術の開発にも貢献し得る。

今後は，今回観察された効果が数日後あるいは数週間後まで持続するかを検証する必要がある。また，系列に依存しないパフォーマンス向上について，完全にランダムな系列を用いた場合を調べることで，受動トレーニングに特定の系列を用いる必要性を明らかにする。さらに，今回は参加者の事前パフォーマンスによらず 10 Hz のテンポでトレーニングしたが，適切なトレーニング速度がある可能性についても調べていき，人間の学習を最も効果的に引き出す機械側の条件を検討していく。

［引用文献］

1. Furuya, S., Oku, T., Nishioka, H., and Hirano, M. (2025). Surmounting the ceiling effect of motor expertise by novel sensory experience with a hand exoskeleton. Sci. Robot. *10*, 3802. https://doi.org/10.1126/scirobotics.adn3802.
2. Michałko, A., Di Tommaso, F., Peperoni, E., Capitani, S.L., Noccaro, A., Parri, A., Gener, C., Conti, R., Di Stefano, N., Tagliamonte, N.L., et al. (2026). Robot-mediated haptic feedback outperforms vision in violin duo coordination. Sci. Robot. *11*. https://doi.org/10.1126/scirobotics.aeb1901.

［成果の発表，論文など］

加藤辰弥：卓越した技能の更なる高みを目指す技能向上戦略，運動神経科学研究会，2025 年 8 月，長野

［研究助成（A）］

医療事故回避に貢献する医用画像技術構築のための生体計測に基づく間接的画像評価

2251010



研究代表者（助成金受領者）	東北大学　大学院工学研究科	准教授	菊　池　洋　平
共同研究者	東北工業大学　工学部	教授	三　浦　直　樹
	東北大学　大学院工学研究科	准教授	狩　川　大　輔
	東北大学　加齢医学研究所	助教	竹　本　あゆみ
	秋田県立循環器・脳脊髄センター	主任研究員	篠　原　祐　樹
	秋田県立循環器・脳脊髄センター	主任研究員	佐々木　文　昭

［研究の目的］

近年，医療 AI や高度画像処理技術の発展により，医用画像技術は急速に多様化している。低線量画像に対する深層学習ベースのノイズ低減や画像補正技術の実用化が進む一方で，画像視認性に起因する医療事故・過誤は依然として重要な課題である。

本研究では，従来の画像の画素値に基づいた定量的な画像評価に加え，人間の反応を利用した「人間を介した間接的画像評価」という概念を提案した（図 1）。従来の画像評価では，コントラストなどの数値指標を中心として画像品質を評価してきた。しかし，実際の医療現場では，画像を閲覧する人間の認知・判断過程が介在するため，これらのみでは捉えられない潜在的な視認性問題が存在する可能性がある。



図 1　医療安全のための高感度画像評価

例えば，血管内治療（IVR）領域では，“ワイヤ先端の視認不良”や“穿通枝迷入の誤認”など，画像視認性に関連した事故要因が報告されている［1］。このような臨床的課題を背景として，本研究では模擬 IVR 透視画像を用いた視覚課題を構築した認知実験を行った。画像視認性に起因する問題には，行動成績として明確に顕在化するものだけでなく，実際の診療環境において長期間蓄積した結果として事故へ寄与する潜在的な問題も存在すると考えられる。実験で得られた行動成績を顕在的指標，眼球運動および fMRI を潜在的指標として位置付け，生体計測情報による高感度の画像評価手法の成立可能性を検証した。

［研究の内容，成果］

1. 模擬 IVR 画像を用いた眼球運動計測/fMRI 実験

画像視認性の変化が人間へ与える影響を定量的に評価するため，模擬 IVR 透視画像を用いた実験系を構築した（図 2）。視覚刺激として，人体の透視画像内を移動するワイヤ（ガイド

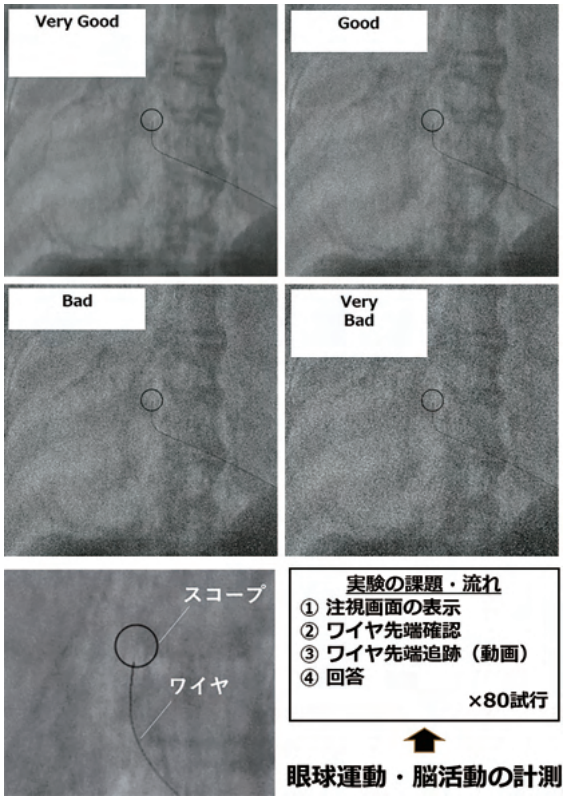


図２　模擬透視画像課題および生体計測の概要

ワイヤーを想定）の先端を含む IVR の模擬動画を作成した。ワイヤ先端の視認性（CNR: Contrast to Noise ratio）が異なる 4 条件（Very Good（CNR = 3）/Good（CNR = 1.4）/Bad（CNR = 1）/Very Bad（CNR = 0.7））を設定し，段階的な視認性変化が人間へ与える影響を評価できるようにした。被験者はワイヤ先端を追跡する課題を実行し，課題終了後に所定の設問への回答を行った。ワイヤ先端は人体の呼吸等を模擬した体動により移動し，先端周辺には位置が固定された円形の枠（スコープ）が表示されている。設問は「動画再生中に先端がスコープ外に出た／出ていない」を判断するものである。

本研究では生体計測のモダリティとして，それぞれ，アイトラッカーと MRI 装置を用いた 2 つの実験を行った。前者ではワイヤ先端を追跡しながら課題を遂行し，その際の視線情報を記録した。また，後者では fMRI 環境下で同様の課題を実施し，課題遂行中の脳活動を計測した。被験者から見た課題内容は共通であり，異なるのは取得する生体情報のみである。この設計により，同一の視認性変化に対して，行動，眼球運動，および脳活動という異なるレベルの反応を比較することが可能である。本研究において重要な考え方は，各指標が異なる感度を持つ評価指標として機能するという点である。一般に，画像の不都合が大きい場合には行動成績（回答の正答率，等）に明瞭な影響が現れる。しかし，不都合が小さい場合には，少なくとも実験的アプローチの調査規模では，その影響は行動成績に現れにくい。実際の医療現場では，このような小さな不都合が多数の症例や長期間の診療の中で蓄積し，結果として医療事故や医療過誤へ進展する可能性がある。そのため，本研究では行動成績を顕在的指標，眼球運動を中間的指標，fMRI を高感度指標として位置付け，各特徴を比較した。本研究は東北大学の倫理承認に基づいて実施された。

2. 解析①：行動（被験者数：28 名）

MRI 実験時の回答に対して行動の解析を行った。False Alarm 率（“先端がスコープ外に出た／出なかった”の誤答率）を評価指標とした結果，視認性低下に伴い False Alarm 率が増加する傾向が確認された（図 3）。特に Very Bad 条件では最も高い False Alarm 率を示し，画像視認性の低下が課題遂行へ影響することが確認された。この結果は，本研究で設定した視認性操作が実際に被験者への課題遂行に影響していたことを示すものである。一方で，視認性変化のすべてが行動成績へ明瞭に反映さ

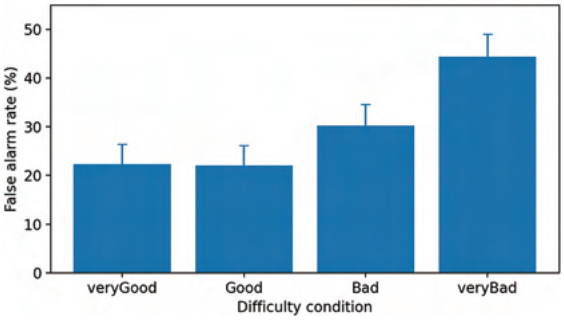


図３　行動成績解析：誤回答率の結果（N = 28）

れるわけではなく，比較的軽度な視認性低下条件では，行動成績のみからその影響を評価することの難しさも示唆された。

3. 解析②：眼球運動（視線）

眼球運動の指標として本研究ではAOI（Area of Interest：関心領域）Dwell Ratio，および，Gaze Spreadを主要指標として解析した。AOI Dwell Ratioはターゲット近傍への視線集中の程度を表し，Gaze Spreadは視線分布の広がりを表す指標である。解析の結果，視認性低下に伴いこれらの指標に変化が認められた。AOI Dwell Ratioでは視認性が良好な条件間（Very Good vs Good）においての条件依存性が比較的明瞭に観察された。これらは前述の行動分析におけるFalse alarm率では差が見られなかった条件群であり，GoodはVery Goodと比較して潜在的な不都合を含むと考えられる。これらから視認性低下ではターゲット周辺への注視割合が増加し，被験者が視認性低下を補うためにより強く対象へ注意を向けている可能性が推測される。またGaze Spreadにも視認性悪化に伴う緩やかな低下傾向の相関が観察され，探索様式そのものが変化していることが示唆された。

これらの結果は，眼球運動が単に「どこを見ていたか」を示すだけでなく，画像視認性変化に対する人間の適応や補償行動を反映している可能性を示している。重要な点としては，眼球運動指標は行動成績では差が見られなかった範囲の画質の変化を高感度に検出しえたことである。すなわち，行動成績では差が小さい条件であっても，眼球運動には変化が現れる可能性が示された。このことから，眼球運動は画像視認性変化を評価するための中間的な生体計測指標として有用であると考えられた。

4. 解析③：脳活動（fMRI）

fMRIによる脳活動の解析では，Very BadおよびBadの視認性不良の条件と，視認性最良のVery Good条件を比較した結果，後頭葉および視覚野を中心とした活動増加が認められた（図5の①および②）。これらの領域は視覚情報処理に関与する領域として知られており，

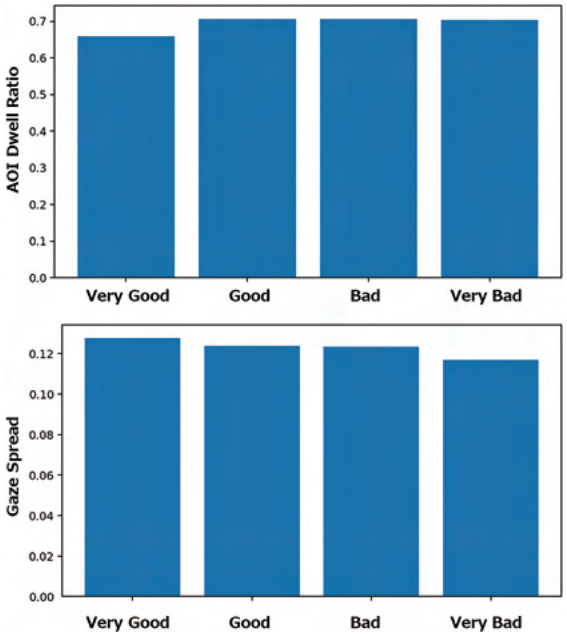


図4　視線追跡解析結果（Mean。N = 20）

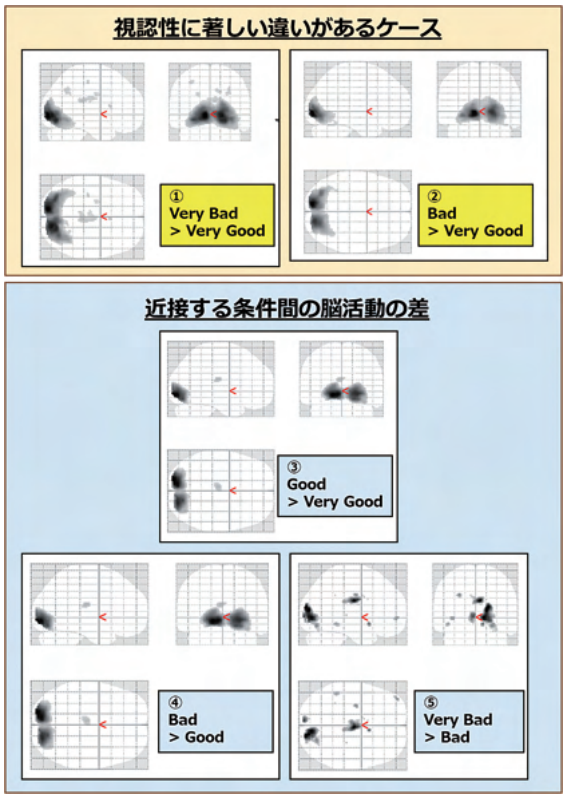


図5　課題条件間における脳活動の比較（N = 28）

本研究で観察された活動増加は視認性低下に伴う視覚処理負荷の増大を反映している可能性が高いと考えられた。

また，同様の結果が隣接する条件間でも観察された。図５の③～⑤は，それぞれ，Good > Very Good，Bad > Good，Very Bad > Bad となる脳活動領域を示しているが，すべての条件間において当該部位の視認性悪化に伴う負荷増大が確認できる。ここから，広範な潜在的な不具合の検出可能性が示唆された。

5. 本研究の成果

本研究では，行動成績，眼球運動，および fMRI を同一課題下で比較することにより，それぞれの評価感度の違いを検討した。その結果，行動成績は顕在化した問題を反映する指標，眼球運動は中間的な感度を有する指標，fMRI は最も高感度に視認性変化を検出する指標として位置付けられる可能性が示された。この構造は，従来の画像評価では得られなかった新しい知見である。

さらに本研究は，画像評価と医療安全を結び付ける新たな視点を提示している。従来型の性能評価では，画像そのものの品質は評価できるが，人間が実際に画像を利用する際の潜在的な不都合を評価することは困難であった。本研究で提案した人間を介した間接的画像評価では，人間の反応そのものを評価対象として利用することにより，そのような潜在的問題を早期に検出できる可能性がある。これは，即ち，医療現場に画像モダリティの実機が導入される前の開発段階において，装置や画像技術単体の性能だけでなく，それを医師等が活用した際の“診療の質”の評価できることを示唆している。

以上の結果から，本研究で提案した手法は，画像視認性に起因する問題を顕在的指標から高感度指標まで多層的に評価できる新しい画像評価の工学的アプローチとして有望であることが示された。今後，行動指標，眼球運動指標，および fMRI 指標の統合解析を進めることで，それぞれの相補性や検出感度の違いをより詳細に明らかにできると考えられる。特に，fMRI データに対する定量的な解析を通じては，不都合判断のバイオマーカとして利用できる特定の領域等の脳活動が見つかる可能性もある。また，将来的には画像 AI や高度画像処理技術の開発段階において，人間への影響を高感度に評価するための基盤技術として活用されることが期待される。

［参考文献］

［1］日本脳神経血管内治療学会法務・医療安全委員会，東登志夫，桑山直也：ガイドワイヤー穿通事故全国アンケート調査結果報告，脳血管内治療，3，2，87-90，2018.

［研究助成（A）］

多彩な脳情報を読み出す認知デコーディング技術の創出

2251011



研究代表者（助成金受領者）　東京大学　大学院総合文化研究科　准教授　北　西　卓　磨

［研 究 の 目 的］

脳と機械を直接に接続するブレイン･マシン･インターフェース（BMI）は，次世代の医療技術として注目されている。BMI の中核は，神経活動から情報を解読するデコーディングである。最も高い性能を達成できると期待されているデコーディングは，脳に電極を埋植する侵襲型である。これまで，侵襲型デコーディングは，大脳皮質運動野の神経活動によるロボットアームの操作を実現するなどの成果を挙げてきた。一方で，デコーディングの精度や時間安定性に課題をかかえている。また，解読対象とする脳領域はおもに一次運動野に限られており，高次脳領域が保持するさまざまな認知情報のデコーディングは実現されていない。たとえば，空間認知に重要な領域である海馬体には，動物のいる場所・道順・移動速度・周囲の壁や物体など，空間に関連する多彩な情報が表現されており，こうした情報を自在に解読できれば BMI の可能性は大きく広がると期待できる。

本研究は，空間探索行動を行うラットの海馬・海馬台から高密度の神経活動計測を行ったデータを用いて，局所フィールド電位（local field potentials, LFP）からのデコーディングとその様態を明らかにすることを目的とした。具体的には，（1）LFP から動物の位置情報を解読（デコーディング）できるか，（2）デコーディング性能の時間安定性はどれほどか，（3）時間安定性は活動電位に基づくデコーディングの場合と異なるか，の 3 点を検証した。

［研究の内容，成果］

背景

ひとつの脳領域は多数の神経細胞を含む。個々の神経細胞は 1 ミリ秒ほどの短い電気的パルス（活動電位）を発し，これが他の神経細胞へとシナプスを介して伝わることで神経系における素早い情報伝達が成り立っている。局所神経回路内の多くの細胞の集団的な活動は，神経回路にもうひとつの電気的シグナルである局所フィールド電位（local field potentials, LFP）を生み出す。LFP はおもに多数の神経細胞へのシナプス入力の集合的なリズムを反映すると考えられており，局所回路の状態について多彩な情報を含む。

生体脳に微細な電極を挿入して神経活動を電気生理学的に計測（細胞外計測法）すると，上記の 2 種類の神経活動―活動電位と LFP―を共に計測できる。活動電位は，個々の神経細胞の活動そのものであり豊かな情報を含む。そのため，これまでの海馬体からのデコーディング研究の多くは，活動電位から情報を読み出すアプローチを採用してきた。これに対して，細胞集団の平均的な活動を反映する LFP には，デコーディングに耐える十分な情報は含まれないと思われてきた。ところが，多点電極（>64 電極）を用いて海馬 CA1 野から高密度に同時計測した LFP を用いると，波形の揺らぎから動

物の位置情報を高精度にデコーディングできることが2014年に示された（Agarwal et al., Science, 2014）。この研究は，LFPによる海馬の空間情報の解読という新たなデコーディング手法を提供した点で重要である。一方で，この手法がどれほど一般的なのか（たとえば異なる脳領域にも適用できるのか），また，どのような性質を持つのか（たとえば，時間的に安定なのか）は不明瞭であった。

そこで本研究は，研究代表者らが，海馬CA1野および海馬台（Subiculum, SUB）にまたがり大規模神経活動計測（256電極）を実施したデータセット（Kitanishi et al., Sci Adv, 2021）を用いて，上記の課題を明らかにすることを目的とした。

手法

20分間の線形トラック課題（図1）を行うLong-Evansラット（オス11匹）から，256電極のシリコンプローブ（Buzsaki256など，NeuroNexus）を用いて記録した海馬CA1野および海馬台の神経活動データを解析に用いた。LFPの時系列信号にヒルベルト変換を適用し，主成分分析により海馬の主要なLFP成分であるシータ波を除去することで，LFPの揺らぎを抽出した。この揺らぎ（復調LFP，demodulated LFP）を特徴量として用い，動物の空間位置を推定する線形デコーダーを構築した。デコーディング性能の評価には，位置誤差の累積分布関数下面積（AUCDF）を用いた。デコーディング性能の時間安定性の評価は，ラットが線形トラックを走行している時間を5つの時間窓に分割し，ひとつの時間窓で構築したデコーダーを他の時間窓に適用することで実施した。



図1　線形トラック課題
ラットは直線状のトラックの上を走行して両端の水報酬を取りに行く。

結果

第1の検討として，海馬台のLFPから空間情報をデコーディングが可能かを検証した。海馬台は，海馬CA1野の1シナプス下流に位置し，海馬外のさまざまな下流領域へと海馬の情報を分配する脳領域として重要な役割を果たすと考えられている（Matsumoto et al., Neurosci Res, 2019）。海馬台LFPの揺らぎの成分を特徴量とした線形デコーダーを構築したところ，動物の現在位置をデコードできることが明らかとなった（図2）。デコード精度をAUCDFで評価すると，海馬台LFPのデコード性能はシャッフル条件を上回り，CA1野LFPと同程度であることが示された。この結果から，海馬の出力層にあたる海馬台におけるLFPが，CA1野と同様に空間情報を豊富に保持していることが明らかになった。

第2の項目として，LFPによる空間情報表現の時間的な安定性を調査した。20分間の単一記録セッションを5つの時間窓に分割し，デコーダーの訓練に用いた時間窓と異なる時間窓

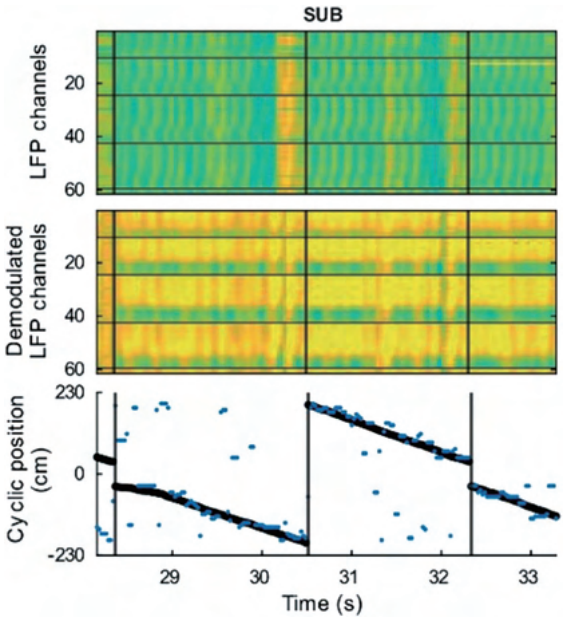


図2　海馬台LFPによるラット位置デコーディング（上）海馬台LFP信号。（中）LFP信号の揺らぎ。（下）LFP信号の揺らぎを用いたラットの現在位置のデコーディング。黒線はラットの実際の位置，青点はLFPから推定したラットの位置をそれぞれ示す。

でデコーディングを行ったところ，時間窓間の距離が広がるにつれてデコーディング性能が次第に低下することが明らかになった（図 3）。訓練に用いる時間窓が記録セッションの最初か最後かは問わず，類似のデコーディング性能を示した。このことから，LFP による情報表現は，（単純に時間経過とともに失われるのではなく）情報量を保ったまま情報表現の内容が変化するものと考えられる。また，時間経過に伴うデコーディング精度の低下は，電極の物理的な位置ずれでは説明できないことを確認した（図 4）。これらの結果は，海馬台 LFP の保持する空間情報が，20 分以内に急速にドリフトすることを示している。

近年，神経細胞の表現する情報が，時間経過とともに次第に移り変わる現象が複数報告されており，表象ドリフト（representational drift）として知られる。これまでの表象ドリフトの報告は，活動電位による情報表現の変化を示したものであった。また，表象ドリフトの多くの研究は，数日以上の長い時間スケールに渡るドリフトを主に報告してきた。一方で，本研究の上記の結果は，海馬体における分単位の急速な LFP の表象ドリフトを初めて見出したものと考えられる。この点に現象の発見としての意義がある。

続いて，第 3 の検討として，LFP と活動電位の表象ドリフトの速度を比較した。デコーダーの時間安定性を示す slope index を比較したところ，LFP に基づく slope index はスパイクより大きく，LFP の保持する空間情報は活動電位による空間情報よりも速い時間スケールでドリフトすることが明らかとなった。同一の神経回路における 2 つの神経活動シグナルが，異なる時間ダイナミクスを示すという結果は予期しないものであった（図 5）。LFP は神経細胞へのシナプス入力を反映し，活動電位は個々の神経細胞の出力である。シナプス入力のレベルで表象ドリフトが生じても，これを統合して活動電位として出力する過程でドリフトを吸収

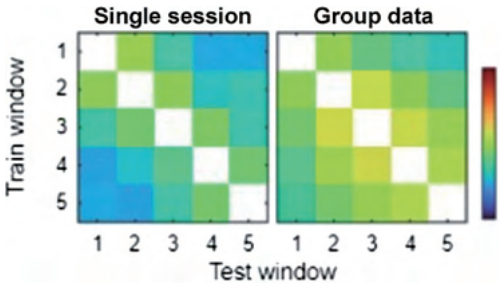


図 3　LFP による位置デコーディングの時間安定性
訓練に用いた時間窓とテストの時間窓が離れるにつれてデコーディング性能が低下した。色はデコーディング性能を示す。

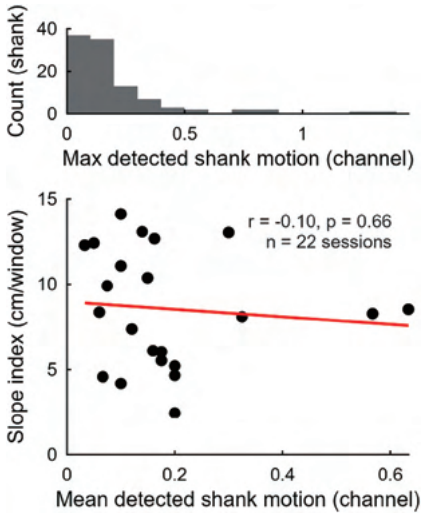


図 4　デコーディング性能の時間変化は記録電極の位置ずれでは説明できない（上）電極の位置ずれはわずか（整列して配置された多点電極の～ 0.3 チャネル分）であった。（下）電極のずれ量とデコーディング性能の時間変化は無相関であった。

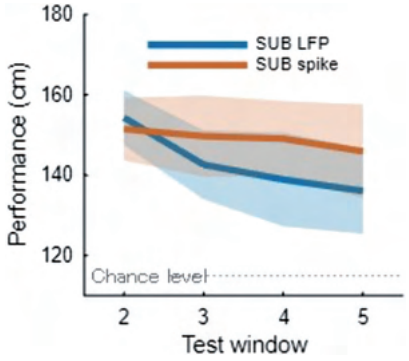


図 5　LFP と活動電位によるデコーディングの時間安定性の比較　活動電位（オレンジ）よりも LFP（青）のほうが時間とともに速く情報表現が変化することが明らかとなった。

して安定化する機構があるのかもしれない。これにより，局所神経回路における情報演算の柔軟性と安定性を両立している可能性が考えられる。

まとめ

本研究は，海馬台 LFP から動物の現在位置をデコーディングできること，その一方で，LFP による情報表現は短時間のうちに変化する（表象ドリフト）ことを明らかにした。この成果は，認知デコーディング技術の開発において，LFP 信号が有用な情報源となりえること，一方でその表象は時間とともに変化することを示す知見であり，高精度かつ時間安定な BMI 実現に向けた基盤的知識を提供するものである。現在，成果を取りまとめた原著論文を準備しているところである。

［成果の発表，論文など］

学会発表：

出水小春，古田成蘭，水関健司，北西卓磨，分単位で生じる海馬体局所場電位の表象ドリフト，NEURO2026（神戸），2026 年 7 月 30 日 -8 月 2 日（予定）

［研究助成（A）］

日常生活の中で植物バイオセンサーを利用して生活習慣病を早期に発見する技術の開発

2251012



研究代表者（助成金受領者）	筑波大学　生命環境系	助教	木　下　奈都子
共同研究者	京都大学　工学研究科	准教授	山　本　俊　介
	Temasek Lifesciences Laboratory	Senior Investigator（Emeritus）	Nam-Hai Chua

［研 究 の 目 的］

本研究では，植物とエレクトロニクスを融合した新規バイオセンシング技術の基盤構築を目的とした。特に，日常生活空間に存在する植物を利用し，人の健康状態に関連する環境情報を非侵襲的に取得する技術の開発を目指した。植物を単なる観賞用途ではなく，生体由来情報を取得可能なインターフェースとして利用することで，人と機械が共存する新しいセンシング技術への展開を見据えた。

生活習慣病は早期発見と継続的なモニタリングが重要である一方で，既存の医療機器やウェアラブル機器には，装着性や継続使用に対する心理的負担，日常生活への制約などの課題が存在する。観葉植物のように生活空間へ自然に配置可能な植物を利用することで，従来型センサーとは異なる低侵襲かつ持続的な健康モニタリング技術の実現を試みた。また，人が機器を強く意識することなく情報取得を行うことで，日常生活へ無理なく導入可能な新しいバイオインターフェースの構築を目指した。さらに，植物を利用することで，機械的な計測機器とは異なる柔軟性や親和性を持つ情報取得技術として発展させることを目指した。

また，植物は周囲の環境変化に対して高感度に応答する特徴を持つことから，生体由来情報を検知する新たな生体インターフェースとして利用できる可能性がある。植物特有の応答性に着目し，植物由来シグナルと電子デバイスを組み合わせた次世代型センシング技術の構築を進めることで，従来型センサーとは異なる情報取得技術の創出を図った。さらに，生活習慣病の早期検知や日常的な健康管理への応用を見据え，生活空間の中で継続的に利用可能なセンシング基盤技術の創出を目的とした。植物と電子デバイスを融合した新しい生体情報取得技術として発展させることで，人と機械が調和した新たな健康モニタリング技術への展開を目指した。

［研究の内容，成果］

内容

本研究では，植物が外部環境の変化に応答して示す生体反応に着目し，植物と電子デバイスを融合した非侵襲的センシング技術の基盤構築を進めた。特に，植物表面から生体信号を取得するための薄膜型電極および周辺計測系を開発し，従来の計測手法よりも植物への負担を抑えながら長時間にわたり安定した情報取得を可能にする技術体系の構築を目的とした。

また，植物表面から取得される生体信号を高感度に解析するため，増幅系を含む計測回路とイメージング技術を組み合わせた解析系の構築を進めた。これにより，植物由来シグナルを多

面的に取得し，外部刺激に対する植物応答を継続的かつ低侵襲的に解析可能な技術基盤として発展させることを目指した。さらに，柔軟性を有する電極材料や小型化した計測系を利用することで，多様な植物種や測定条件へ適用可能なセンシング技術として展開することを目的とした。

さらに，植物が周囲環境の変化に対して高感度に応答する特徴を利用し，植物由来シグナルを環境情報として取得可能な新しいバイオインターフェース技術への応用を進めた。加えて，生活空間や生産環境へ自然に導入可能なセンシング技術として発展させることで，人と機械が共存する次世代型センシング基盤技術への展開を目的とした。

成果

本研究では，植物が外部環境の変化に応答して示す生体反応に着目し，植物と電子デバイスを融合した非侵襲的センシング技術の基盤構築を進めた。特に，植物表面から生体信号を取得するための電極および周辺計測系を開発し，従来の計測手法よりも植物への負担を抑えながら長時間にわたり安定した情報取得を可能にする技術体系の構築を目的とした。

また，植物由来シグナルを高感度に取得するため，柔軟性を有する薄膜型電極や増幅器を組み合わせた計測系の構築を進めた。これにより，植物由来シグナルを継続的かつ低侵襲的に取得し，外部環境変化に対する植物応答を多面的に解析可能な技術基盤として発展させることを目指した。さらに，生体信号計測とイメージング技術を組み合わせることで，植物応答を統合的に解析するための基盤技術の開発を進めた。加えて，植物由来シグナルを利用した新しいバイオインターフェース技術として，生体情報取得や環境応答解析への応用可能性について検討を行った。

まず既存のゲル電極を用いた電位測定結果を示した。従来型のゲル電極を利用し，植物表面から取得される生体信号の継続的な計測を行った。本条件では，既存の計測系を基準として，植物由来シグナルを安定的に取得可能な計測条件について検討を進めた。また，後述する薄膜型電極を利用した新規計測系との比較を行うための基礎データとして利用した。

次に新規の薄膜電極を用いて物理的な補強を施して電位測定を行った。柔軟性を有する薄膜型電極を植物表面へ適用することで，従来型電極よりも植物への負担を抑えながら生体信号を取得する技術の構築を進めた。さらに，薄膜型電極を利用することで，多様な植物種や測定条件へ適用可能な非侵襲的計測技術として展開することを目的とした。

さらに，新規薄膜電極に化学的な補強剤を加え，図２と同様に物理的な安定装置もそのまま設置した状態で電位測定を行った。既存の方法よりも安定し，感度が高い手法であることがわかった。補強剤とサポートを組み合わせることで，植物由来シグナルをより高感度に取得可能な計測系の構築を進めた。また，長時間にわた

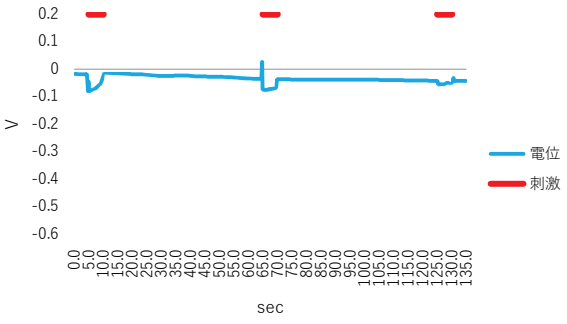


図１

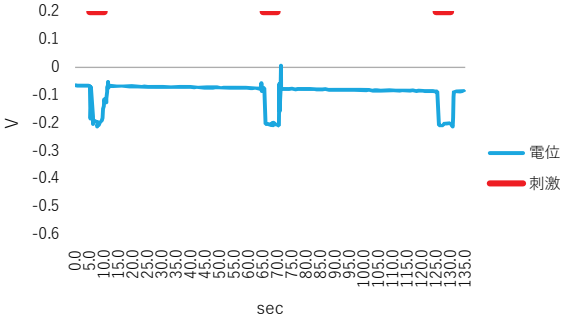


図２

り安定して生体信号を取得するため，周辺回路構成を含めた計測条件の最適化について検討を行った。本手法では，シグナル変化をより明瞭に取得できる傾向が認められ，高感度な計測系として利用可能であることが示唆された。

図 4 には，新規な薄膜電極に補強剤を入れたままでサポート装置を省いた条件を試した。柔軟性を有する薄膜型電極と化学的な補強剤を組み合わせることで，植物への負担を抑えながら高感度に生体信号を取得する非侵襲的計測技術の構築を進めた。また，電極材料や増幅条件を含めた計測系全体の構成について検討を行い，植物由来シグナルを継続的に取得可能なセンシング技術として発展させることを目的とした。特に，組み合わせた条件次第では，微小なシグナル変化も取得可能であり，植物由来情報を高感度に解析可能な計測技術としての応用が期待された。

次に生体関連マーカーに対する応答変化を経時的に解析した結果を示した。バイオマーカーを含まない条件（青線）では，時間経過とともに応答性が低下する傾向が認められた。一方，バイオマーカーを含む条件（オレンジ）では，初期段階において高い応答性が観察され，その後時間経過に伴い徐々に応答変化は減少したものの，バイオマーカーを含まない条件と比較して高い応答性を維持する傾向が認められた。

本結果から，バイオマーカーを含む条件では，生体関連シグナルに対する応答感度が向上している可能性が示唆された。また，時間経過に伴う応答変化の推移にも条件間で差異が認められたことから，周辺材料や計測条件がシグナル取得特性へ影響を与える可能性が考えられた。さらに，植物由来シグナルを利用したセンシング技術において，計測条件や周辺構成の最適化が重要であることが示唆された。

さらに，図 6 には，切断した植物組織に対してバイオマーカー処理を行った際の蛍光シグナル変化を示した。左図はバイオマーカー処理前（0 時間），右図は処理後 4 時間の状態を示して

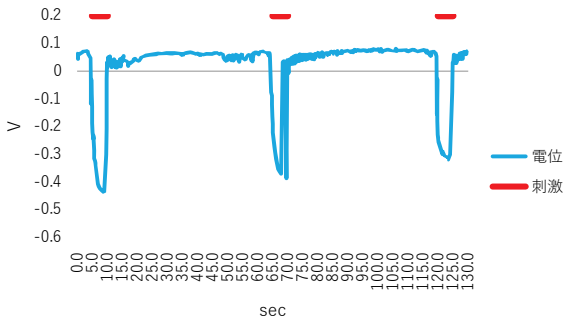


図 3

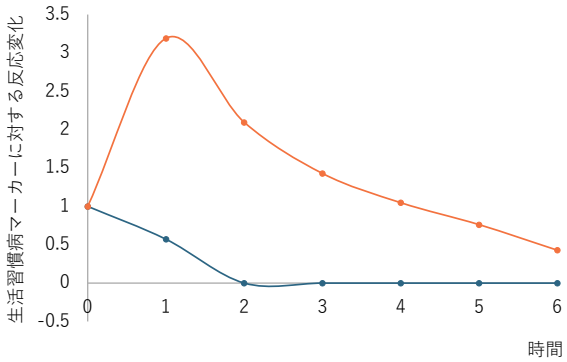


図 5

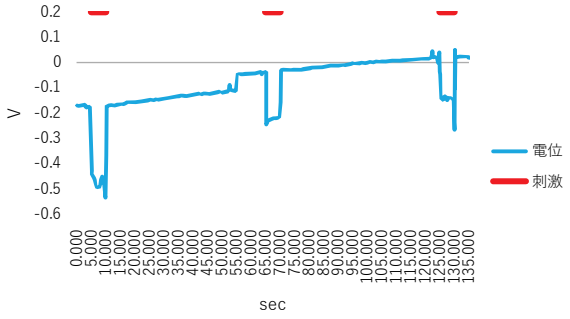


図 4

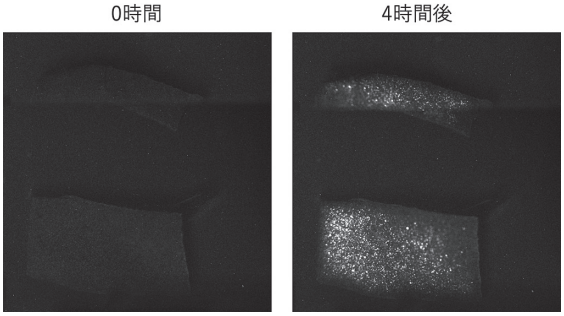


図 6

いる。処理前では明瞭な蛍光シグナルはほとんど観察されなかった一方で，処理後には組織内部において顕著な蛍光シグナルが観察された。

本実験では，切断後の植物組織においても外部刺激や処理条件に対する応答性が維持されているかを確認することを目的とした。その結果，切断組織においても時間経過に伴う蛍光シグナル変化が観察され，植物由来応答を検出可能であることが示唆された。また，シグナルは組織全体へ広がるように観察されており，局所的な変化だけでなく，組織レベルで応答が生じている可能性が考えられた。

さらに，本結果から，切断組織を利用した場合においても，生体関連シグナルを利用した解析が可能である可能性が示された。これにより，従来の個体全体を利用した測定系に加え，切断組織を利用した簡便な評価系として応用できる可能性が期待された。

近年，糖尿病，高血圧，脂質異常症などの生活習慣病患者数は国内外で増加を続けており，現在，健康モニタリング技術としては，血液検査やウェアラブル機器を用いた生体情報取得技術が広く利用されている。しかし，定期的な通院や検査には時間的・経済的負担が存在し，多忙な生活環境の中で継続的な健康管理を実施できないケースも多い。また，ウェアラブル機器に関しても，装着に対する心理的負担や長時間利用時の不快感，継続利用率の低下などが課題として指摘されている。海外においても，日常生活空間に自然に組み込むことが可能な非侵襲的センシング技術や環境調和型バイオセンシング技術への関心が高まりつつある。このような背景の中，本研究では植物が外部環境変化に対して高感度に応答する特徴に着目し，植物と電子デバイスを融合した新しい非侵襲的センシング技術の基盤構築を進めた。特に，柔軟性を有する薄膜型電極，補強材料，増幅器，およびイメージング技術を組み合わせることで，植物への負担を抑えながら長時間にわたり植物由来シグナルを高感度に取得可能な技術体系の構築を目指した。

本研究では，既存のゲル電極，新規薄膜電極，補強条件，および周辺実験系の違いによる植物由来シグナル取得特性を比較した。既存のゲル電極を用いた条件では，生体信号を継続的に取得可能であることが確認され，基準となる計測系として利用した。一方，新規薄膜電極を用いた条件では，柔軟性を有する電極材料を植物表面へ適用することで，従来型電極よりも植物への負担を抑えながらシグナル取得を行うことを試みた。

さらに，物理的サポートや化学的補強剤を組み合わせた条件では，シグナル取得の安定性や感度が向上する傾向が認められた。特に，補強剤とサポートを併用した条件では，既存条件と比較してシグナル変化をより明瞭に取得できる傾向が認められ，高感度な計測系として利用可能であることが示唆された。また，サポート条件や補強条件を変化させた場合にもシグナル取得が可能であったことから，電極材料だけでなく，周辺材料や固定条件を含めた計測系全体の最適化が重要であることが示唆された。

また，生体関連マーカー存在下における応答変化を経時的に解析した。その結果，バイオマーカーを含む条件では，含まない条件と比較して高い応答性を維持する傾向が認められた。本結果は，周辺材料や化学的条件が植物由来シグナル取得特性へ影響を与える可能性を示唆しており，植物応答を利用したセンシング技術において，計測環境全体の設計が重要であることを示している。

さらに，切断した植物組織に対してバイオマーカー処理を行った際の蛍光シグナル変化を解析した。処理後には組織内部において顕著な蛍光シグナルが観察され，切断組織においても植物由来応答を検出可能であることが示唆された。この結果から，個体全体を利用した計測だけでなく，切断組織を利用した簡便な評価系としても応用可能であることが考えられた。

本研究を通じて，植物由来シグナルを利用し

た非侵襲的センシング技術の基盤構築を進めることができた。特に，薄膜型電極，補強材料，増幅系，およびイメージング技術を統合することで，植物への負担を抑えながら高感度かつ継続的に生体情報を取得可能な技術として発展できる可能性が示唆された。今後は，さらなる小型化や長期安定化，実環境下での適用性向上を進めることで，生活空間に自然に導入可能な健康モニタリング技術としての発展が期待される。また，人が機器を強く意識することなく継続的に健康状態を把握できる新しいバイオインターフェース技術として，生活習慣病の早期検知や日常的健康管理への応用可能性が期待される。

最後になりましたが，本研究を進めるにあたって貴重な助成を賜りました立石科学技術振興財団に深くお礼申し上げます。

［成果の発表，論文など］

招待講演

Plant responses to biological stress: wide-field bioimaging and beyond
Zarco Group / Rockefeller University/2026-03-02

Wide-field bioimaging and its usage to interorganismal communication
Freie Universität Berlin / Botanischer Garten Berlin/ 2025-05-05

Chemical Ecology and Wide-Field Bioimaging
James Blande Laboratory / University of East Finland/ 2025-04-28

持続的かつ非侵襲的な方法で貯蔵穀物を害虫から守る
飯島記念財団 学術講演会 /2025-11-14

植物の会話：危険信号はどう伝わるのか？
キヤノン財団第 4 回講演会 「生物たちの驚きのサバイバル戦略」～いのちを守る感覚機能の科学に触れてみよう！～ /2025-09-06

論文

Revisiting Volatile Organic Compounds' Role in Plant Communication Using Real-Time Bioimaging
KINOSHITA Natsuko
Frontiers in Plant Science, 2026-04
Accepted

［研究助成（A）］

AIロボットと迷走神経刺激による デュアル・クローズドループ型手指機能訓練法の開発

2241013



研究代表者（助成金受領者）	広島大学　大学院医系科学研究科	教授	桐　本　　光
共同研究者	立命館大学大学院 先端総合学術研究科	教授	美　馬　達　哉
	広島大学大学院 医系科学研究科脳神経内科学	講師	祢　津　智　久

［研究の目的］

「脳卒中ガイドライン 2021（改訂 2023 年版）」では，脳卒中後の上肢機能障害に対するリハビリテーション（リハビリ）として，ロボットを用いた訓練の推奨度がBからAに引き上げられ，Brain-computer interface（BCI）が新たに推奨度Cとして追加された。ロボットを用いたリハビリは，セラピストの負担を増やすことなく，質・量的に高い訓練の提供を可能にする[1)]。近年国内で開発されたMELTs（FrontAct，日本）は，脳卒中後の片麻痺患者が痙性により手指伸展時に屈筋群も同時に活動させてしまうような場合でも，人工知能（Artificial intelligence: AI）が筋活動量とシナジーパタンを即時にデコーディングし，ロボットの装着者の意図に合わせて手指の伸展をアシストするシステム（Neuromuscular machine interface: NMI）である（図1）[2)]。

一方，迷走神経刺激療法（vagus nerve stimulation: VNS）は，頸部迷走神経に直接電気刺激を行う治療法であり，2021 年に慢性期脳卒中患者の上肢運動障害に対するリハビリテーションを促進するツールとして米国食品医薬品局で承認されている。しかし，電極の植込み手術を必要とし，体内に埋め込んだバッテリの交換が5–7 年で必要となる侵襲性を伴う。近年は，迷走神経耳介枝が分布する耳甲介舟から経皮的に耳介迷走神経を刺激する非侵襲的ニューロモデュレーション療法（transcutaneous auricular vagus nerve stimulation: taVNS）（図2）により，脳卒中後の上肢片麻痺の回復が促通されたという報告が増えている[3)]。

動物実験では，課題動作の成功時にVNSを提示する「タイミング依存型」の介入効果が高いことが示され[4)]，これに準拠した方法が侵襲的なVNSの臨床研究でも選択されている[5)]。



図1　MELTs（FrontAct，日本）

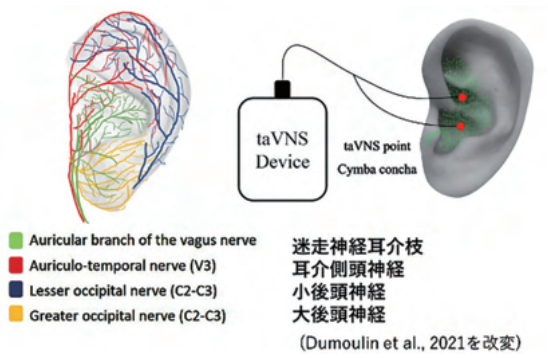


図2　経耳介迷走神経刺激のイメージ図

このように脳卒中後の上肢機能障害のリハビリでは，「ロボット，BCI（NMI も含む），非侵襲的脳刺激」は三種の神器となりつつあり，今後はこれらを有機的に併用し，各々が持つポテンシャルの相乗効果を引き出す研究が必要である。以上のことから，本研究では，AI ロボットと非侵襲的な迷走神経刺激を組み合わせたデュアル･クローズドループ型訓練法（図 3）が，複雑な手指の分離運動の獲得を促通するか否かを検証する事を目的とした。

［研究の内容，成果］

［方法］

研究対象者

神経・筋・骨格系疾患に既往歴がない健常成人ボランティア 52 名（女性 27 名，男性 25 名，平均年齢 22.6 ± 2.3 歳）が，研究に参加した。本研究はヘルシンキ宣言に準拠してデザインされ，広島大学臨床研究倫理審査委員会から実施の許可を得た（C2025-0002）。研究対象者には口頭と書面にて十分な説明を行い，書面への自筆サインにより研究参加への同意を得た。

手順

研究対象者 52 名を，以下の 4 群（各群 13 名）に，無作為に割り付けた。

1）対照（自力訓練）群（ロボットハンドを装着せずに，音声ガイドに従い随意運動を行う）
2）受動型ロボット群（ロボットハンドを装着するが，随意運動は行わない）
3）AI ロボット群（AI 制御ロボットのアシストを受けながら随意運動を行う）
4）AI ロボット + taVNS 群

解剖学的に，ヒトの中指，環指，小指は腱間結合で連結されている（図 4）。また小指には固有の伸筋があるが，環指にはない。このため，図 5 のように，中指と小指が屈曲位にある時に環指を伸展することは極めて困難である。脳神経科学的にも，環指の随意運動性は他指と比較して稚拙である（Lang et al, 2004; Aoki et al, 2005）。この課題を世に広めた漫画作者（楳図かずお氏）に表敬して「グワシ」と称し，本研究で行う複雑な手指分離運動課題とした。

「グワシ」の定義は以下の通りとした。

1）中指と小指の近位・遠位指節間（IP）関節を屈曲し，可能な限り環指を伸展する。
2）中指，環指，小指は互いに接触しない。
3）中指と小指の近位・遠位指節間（IP）関節を屈曲し，可能な限り環指を伸展する。
4）中指，環指，小指は互いに接触しない。
5）中指と小指の指尖は手掌面に接触しない。

すべての群において，運動の周期は屈曲運動

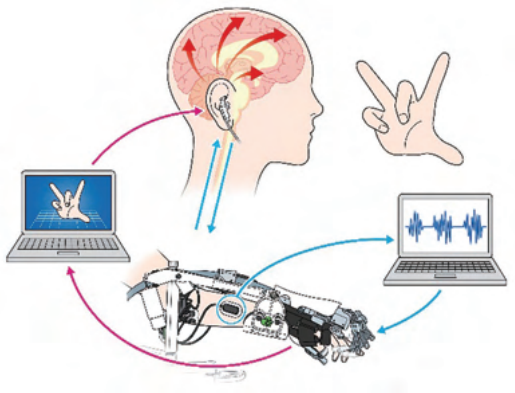


図 3　デュアル・クローズドループ型訓練法のイメージ図



図 4　ヒトの手の背面の解剖図



図 5　本研究の複雑な手指分離運動課題「グワシ」

(「グワシ」)，脱力（ロボットのアシストにより「グワシ」を保持)，伸展運動（じゃんけんの「パー」）を各 5 秒間で行い，1 セット 20 回，1 分間の休憩を挟んで 5 セット，1 日計 100 回の訓練を行った。訓練は隔日 3 日間，全て同一の時間帯に実施した。被験筋は，総指伸筋（中指および環指成分)，尺側手根伸筋，浅指屈筋（中指および環指成分)，尺側手根屈筋の計 6 筋を対象とし，経皮電気刺激により各筋を同定した上で，表面電極を貼付した（図 6)。

非侵襲的迷走神経刺激にはイヤホン型電極（RFLift-Tragus, Soterix Medical, USA）を使用し，左耳珠に装着した（図 7)。刺激装置は Train/Delay Generator（DG2A, Digitimer, UK）と constant current stimulator（DS3, Digitimer, UK）を使用した。刺激強度は触覚閾値と痛覚閾値の中間値，刺激幅は 200 μs，周波数は 25 Hz に設定した。尺側から小指にトリガ装置の赤外線光を小指に照射し，「グワシ」完成時に 500 ms，20 トレインの刺激を提示するように設定した[5]。

データ解析と統計処理

介入効果は，中指－環指間，小指－環指の近位指節間関節（PIP 関節）の屈曲角度の差（ΔPIP）によって評価した。関節角度は主導の指用ゴニオメータで測定し，介入前（初日の訓練開始前）と介入後（3 日目の訓練終了後）に評価を行った。

各群について shapiro-wilk 検定で正規性を検定した。各パラメータの訓練前後おける変化量の平均値の差の検定には，一元配置分散分析を，Post-hoc テストには，Tukey LSD を使用した。

［結果］

中指－環指間 ΔPIP

taVNS 群では，他の 3 群と比較して，有意な増大が認められた（Vs. Active: $p = 0.0327$; Vs. Passive: $p = 0.0002$; Vs. Control: $p = 0.0009$）（図 8）



図 6　実験セットアップ

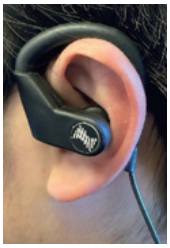


図 7　taVNS 電極

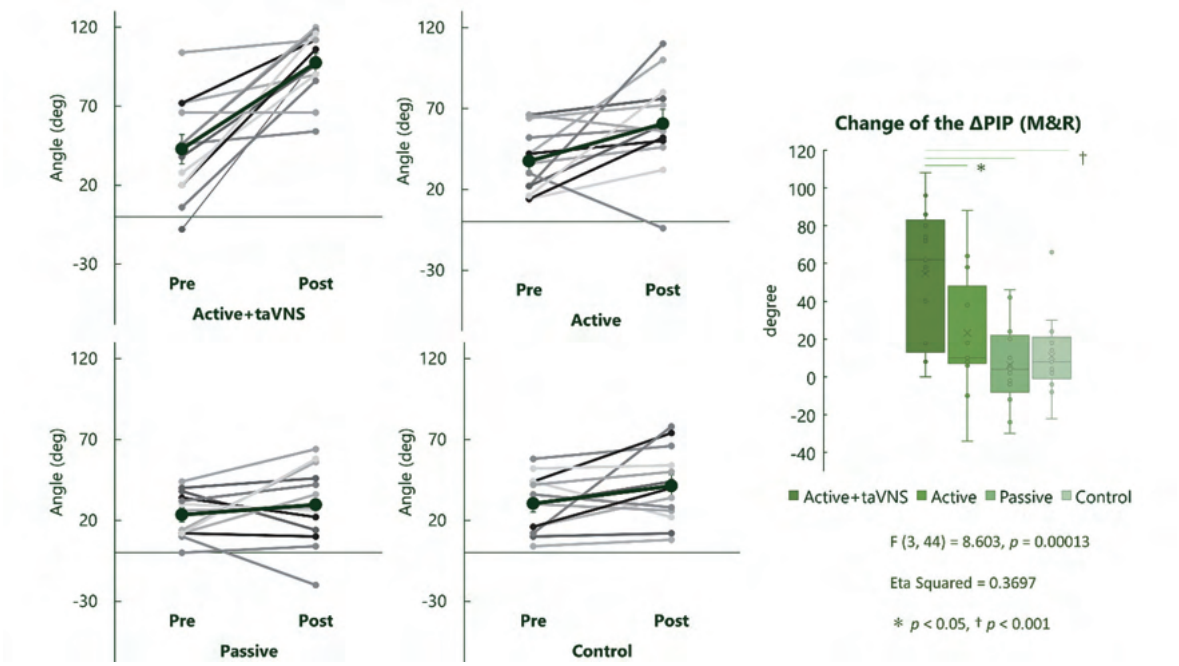


図 8　各群における中指－環指間 ΔPIP の変化量の個別データと平均値の比較

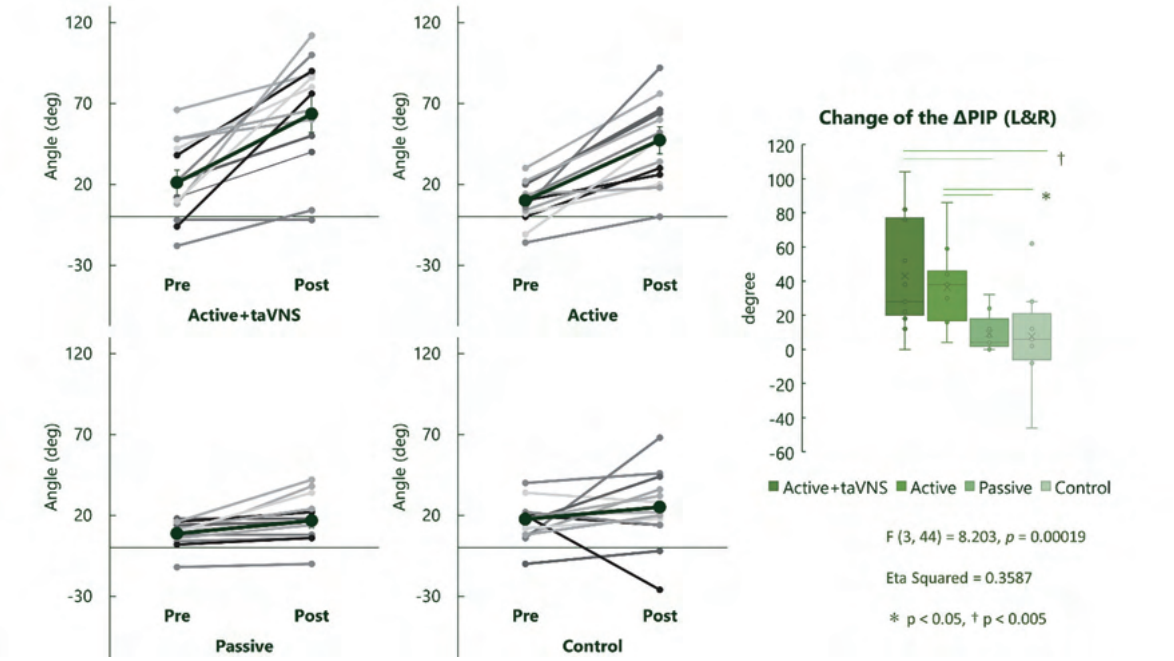


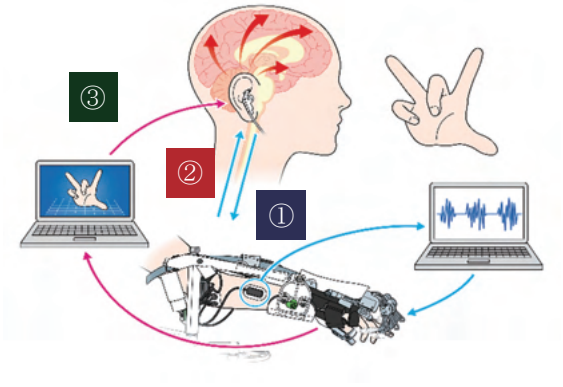
図 9　各群における小指－環指間 ΔPIP の変化量の個別データと平均値の比較

小指－環指間 ΔPIP

taVNS 群，AI ロボット群では，受動型ロボット群，対照群と比較して，有意な増大が認められた（taVNS Vs. Passive: p = 0.0034, Control: p = 0.0018; Active Vs. Passive: p = 0.0019, Control: p = 0.011）（図 9）

［考察］

対照群は，脳卒中後患者の従来型のリハビリと同様に，不完全な運動指令①と感覚フィードバック②の照合により運動学習が進まず，受動ロボット群は運動指令①が存在しないために学習が進まなかったと考えられる。AI 能動ロボット群は，正しい感覚フィードバック②により，運動指令①が適切に修正され，ロボット非装着群と受動ロボット群と比較して有意な介入効果を認め，taVNS ③はコリン作動性神経回路が活性化し[6]，①と②の照合過程をエンハンスメントした結果，AI 能動ロボット群を上回る介入効果を示したと推察される（図 10）。この遠心性の運動指令コピーと求心性の感覚フィードバックの照合は運動学習に不可欠であり，それを促通する taVNS を複合的に加えることによる，中枢神経系の可塑的変化の誘導は，脳卒中後のリハビリテーションにも応用可能である可能性が示唆された。



	①	②	③
Control	△	△	-
Passive	-	○	-
Active	△➡○	○	-
Active + taVNS	△➡○	○	○

図 10　デュアル・クローズドループ型訓練法の推定作用機序

［今後の課題］

AI に入力された筋活動と，出力された発生

トルク量データを，発売元の FrontAct 社より提供を受け，詳細な検証を行う必要がある。AI ロボット群および AI ロボット + taVNS 群では，複雑な手指分離運動の完成度が高く，これに関連して，ロボットがアシストするトルク量が減少し，合目的な筋シナジィパタンと皮質間の機能的結合が出現する頻度が増え，その背景としてコリン作動性神経回路が活性化していることを証明しなくてはならない。

［引用文献］

1) Takebayashi T, Uchiyama Y, Domen K. Automatic setting optimization for robotic upper-extremity rehabilitation in patients with stroke using ReoGo-J: a crosssectional clinical trial. Scientific Reports. 2024; 14: 25710.
2) Murakami Y, Honaga K, Kono H, Haruyama K, Yamaguchi T, Tani M, Isayama R, Takakura T, Tanuma A, Hatori K, Wada F, Fujiwara T. New Artificial Intelligence-Integrated Electromyography-Driven Robot Hand for Upper Extremity Rehabilitation of Patients With Stroke: A Randomized, Controlled Trial. Neurorehabilitation & Neural Repair. 2023: 37(5): 298-306.
3) Förster CY. Transcutaneous Non-Invasive Vagus Nerve Stimulation: Changing the Paradigm for Stroke and Atrial Fibrillation Therapies? Biomolecules. 2024; 14(12): 1511.
4) Bowles S, Hickman J, Peng X, Williamson WR, Huang R, Washington K, Donegan D, Welle CG. Vagus nerve stimulation drives selective circuit modulation through cholinergic reinforcement. Neuron. 2022; 110(17): 2867-85.
5) Dawson J, Liu CY, Francisco GE, Cramer SC, Wolf SL, Dixit A, et al. Vagus nerve stimulation paired with rehabilitation for upper limb motor function after ischaemic stroke (VNS-REHAB): a randomised, blinded, pivotal, device trial. Lancet. 2021; 397(10284): 1545-53.
6) Horinouchi T, Nezu T, Saita K, Date S, Kurumadani H, Maruyama H, Kirimoto H. Transcutaneous auricular vagus nerve stimulation enhances short-latency afferent inhibition via central cholinergic system activation. Sci Rep. 2024; 14(1): 11224.

［成果の発表，論文など］

1) 桐本　光，三好澄，鍋倉颯太．シンポジウム「リハビリテーション分野における最新技術活用の可能性」，「AI ロボットと迷走神経刺激によるデュアル・クローズドループ型手指機能訓練法の開発」，第 33 回日本運動生理学会大会，2025.7.12-13（平塚）．
2) Kirimoto H, Nabekura S, Miyoshi S, Yang K, Mima T, Nezu T. Dual-Closed-Loop Training with an AI Robot and Transcutaneous Auricular Vagus Nerve Stimulation Facilitates Acquisition of the Challenging “Guwashi” Finger Individuation Movement. Asian-Oceanian Congress of Clinical Neurophysiology. 2025 21-23, September, Taipei, Taiwan

［研究助成（A）］

力覚情報に基づく把持加工動作のスキルトランスファ技術の開発

2251013



研究代表者
（助成金受領者）

芝浦工業大学　システム理工学部
機械制御システム学科

准教授　　桑　原　央　明

［研 究 の 目 的］

少子高齢化の進展に伴い，製造業，医療・福祉，保守点検などの現場では，熟練技能者の減少と技能継承の困難化が深刻な課題となっている。特に，ガラス細工，研磨，仕上げ加工，手術支援動作などに代表される精密作業では，作業者が対象物や工具を把持し，対象との接触状態を微細な力覚情報として感じ取りながら，把持姿勢や押し付け方向を連続的に調整している。このような作業では，単に手先の位置や軌道を再現するだけでは十分ではなく，接触時に生じる反作用力，力の作用方向，作用点，振動，加工抵抗などを総合的に判断する必要がある。そのため，熟練者の経験や感覚に依存する部分が大きく，技能を客観的に記述し，学習者や機械システムへ伝達することは容易ではない。

本研究では，このような精密作業における人間の動作を「把持加工動作」と捉え，力覚情報に基づいてそのメカニズムを明らかにするとともに，その知見を応用した動作教示システムを開発することを目的とする。ここでいう把持加工動作とは，人間が対象物またはエンドエフェクタを把持し，加工対象に接触させながら，手先に伝わる力覚情報をもとに把持姿勢や接触状態を調整する一連の動作を指す。把持加工動作では，作業者は視覚的に対象物の位置や姿勢を確認するだけでなく，手先に返ってくる微細な反力や振動を感じ取り，それに応じて押し付け力，傾き，送り方向などを瞬時に変化させている。このような動作は，言語化や数式化が難しい暗黙知として熟練者の中に蓄積されており，従来の教育や技能伝承では，経験的な指導や反復練習に頼らざるを得なかった。

具体的には，人間の操作力と加工対象からの反作用力を分離して取得する実験基盤を構築し，取得した力覚情報と把持姿勢の時系列データに基づいて，次の把持姿勢変化を予測する動作生成モデルを構築する。接触を伴う精密作業では，手先軌道だけでなく，押し付け力や接触方向が加工結果に大きく影響する。

そのため，本研究では，把持加工動作を力覚情報との関係から記述し，人間が暗黙的に行っている姿勢調整のメカニズムを数理的に表現することを目指す。これにより，熟練者がどのような力を感じ，どのように姿勢を修正しているかをデータに基づいて表現し，従来は経験的に伝えられてきた技能を，機械システムが利用可能な形式知へ変換する。

さらに，得られた動作生成モデルを動作教示システムへ応用する。モデルにより算出された理想的な把持姿勢を，画像処理や拡張現実インターフェースを用いて操作者に提示することで，操作者は現在の動作と理想的な動作との差異を視覚的に理解しながら，把持加工動作を習得できる。

以上より，本研究は，力覚情報に基づく把持加工動作のメカニズムを解明し，熟練技能の形式知化とスキルトランスファを実現するための基盤技術を構築するものである。最終的には，

人間の巧みな感覚と機械の再現性・拡張性を結びつけ，人間と機械が相互に補完しながら精密作業を行う新たな協調システムの実現を目指す。

［研究の内容，成果］

本研究では，「実験基盤の構築」，「動作生成モデルの構築」および「動作教示システムの開発」を行った。まず，人間の操作力と加工対象からの反作用力を分離して取得するための実験基盤を構築し，次に取得した力覚情報と把持姿勢の時系列データを用いて，人間の姿勢調整を予測する動作生成モデルを構築した。さらに，このモデルの出力を用いて操作者に理想的な把持姿勢を提示する動作教示システムを開発した。

1. 実験基盤の構築

把持加工動作のメカニズムを明らかにするためには，作業中に人間が受ける力覚情報を高精度に取得する必要がある。

しかし，人間が対象物を把持しながら加工を行う場合，人間が対象に加える作用力と，加工対象から返ってくる反作用力が同時に発生する。そのため，通常の力計測では，操作者の操作力と対象物からの反作用力を分離して取得することが難しい。

そこで本研究では，人間の手と加工対象の間に遠隔操作ロボット型インターフェースを挿入し，バイラテラル制御を用いて作用力と反作用力を分離して取得する実験基盤を構築した。構築した実験基盤を図１に示す。人間が操作する外向型ロボットをリーダ，加工対象と接触する内向型ロボットをフォロワとして配置し，両者をバイラテラル制御器により接続した。操作者がリーダロボットを操作すると，その動作がフォロワロボットへ伝達される。一方で，フォロワロボットが加工対象から受ける反作用力は，リーダロボットを介して操作者へ提示される。

外向型ロボットをリーダ，内向型ロボットをフォロワとして接続し，操作者の操作力と加工対象からの反作用力を分離して取得する実験基盤を示す。

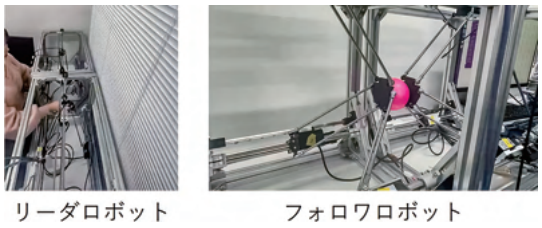


図１　実験基盤

本実験基盤の特徴は，エンドエフェクタに作用する反作用力について，その大きさだけでなく，作用点および方向性を推定可能な構成とした点である。把持加工動作では，力の大きさに加えて，力がどの位置に，どの方向から作用しているかが，把持姿勢の調整に大きく関与する。そこで，ロボットの位置・姿勢情報，エンドエフェクタの幾何学的関係，および推定された力覚情報を組み合わせることで，反作用力の作用点と反作用力ベクトルを導出できる構成とした。

この実験基盤により，把持加工動作中に生じる力覚情報を取得し，後述する動作生成モデルの構築に用いるためのデータ取得環境を整備した。

2. 制御系設計と力覚情報取得の安定化

実験基盤を用いて信頼性の高い力覚データを取得するためには，制御系の安定性と応答性を両立させる必要がある。把持加工動作では，操作者，ロボット，加工対象が接触を介して相互作用するため，制御系が不安定である場合には，振動や共振が発生し，取得される力覚情報の信頼性が低下する。

そこで，外乱オブザーバおよび反力推定オブザーバを用いた位置・力ハイブリッド制御系の設計指針を整理した。

特に，各オブザーバのゲイン設定が制御系の安定性および応答特性に与える影響を解析し，把持加工動作のような面接触を伴う作業においても，共振を抑制しながら力覚情報を取得でき

る条件を検討した。この検討により，実験基盤において安定した位置応答と力応答を得るための制御条件を整理した。特に，オブザーバゲインを高く設定すると応答性は向上する一方で，ノイズ増幅や共振励起の可能性が高まるため，応答性と安定性のバランスを考慮した設計が重要であることを確認した。これにより，後続の把持加工動作実験において，安定した力覚情報を取得するための基盤を整えた。

3. 把持加工動作実験と時系列データの取得

構築した実験基盤を用いて，研磨作業を模擬した把持加工動作実験を実施した。実験では，操作者がリーダロボットのエンドエフェクタを把持し，フォロワロボットを介して加工対象に接触する動作を行った。これにより，実際の把持加工に近い状況を再現し，作業中に発生する反作用力と把持姿勢の関係を取得した。

図２に把持加工動作実験の様子を示す。実験では，リーダロボットおよびフォロワロボットの位置応答，力応答，把持姿勢，反作用力情報を時系列データとして取得した。図３には，リーダ･フォロワ間の位置応答および力応答を示す。

実験結果より，リーダとフォロワの位置応答が対応し，力応答においても作用・反作用の関係が確認された。これにより，構築した実験基盤が，把持加工動作中の力覚情報を取得するために有効であることを確認した。また，操作者が加工対象からの反作用力や加振を感じながら操作できることを確認し，力覚情報を伴う把持加工動作を再現できる実験環境を構築できた。



図２　把持加工動作実験の様子

4. 反作用力の作用点および反作用力ベクトルの導出

把持加工動作を力覚情報に基づいてモデル化するためには，操作者が受ける力覚情報を，動作生成モデルに入力可能な形で定量化する必要がある。そこで，実験により取得したロボットの位置・姿勢情報および力覚情報を用いて，反作用力の作用点と反作用力ベクトルを導出するアルゴリズムを開発した。

図４に反作用力の作用点および反作用力ベクトルを示す。図４では，エンドエフェクタの位置・姿勢に対して，加工対象から作用する反作用力の作用点と方向を矢印で示している。これにより，把持加工中に操作者が受ける力覚情報を，単なる力の大きさではなく，空間的な方向性を持つ情報として表現した。また，把持加工動作実験結果を用いて推定した反作用力の作用点および反作用力ベクトルを図５に示す。

図５は，ロボットの位置・姿勢情報および力覚情報から，加工対象からエンドエフェクタへ作用する反作用力の作用点と方向を推定した結果を示す。

把持加工動作では，手先位置や姿勢の変化は，

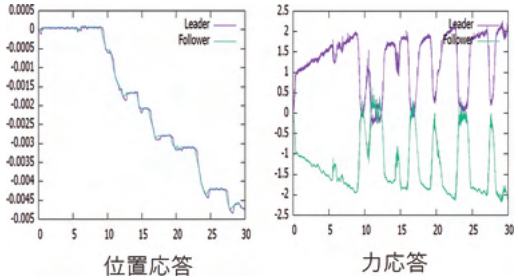


図３　把持加工動作実験結果

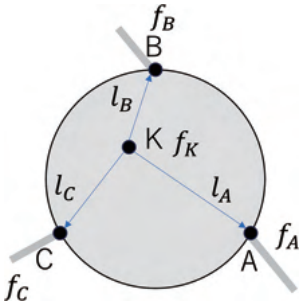


図４　反作用力の作用点および反作用力ベクトル

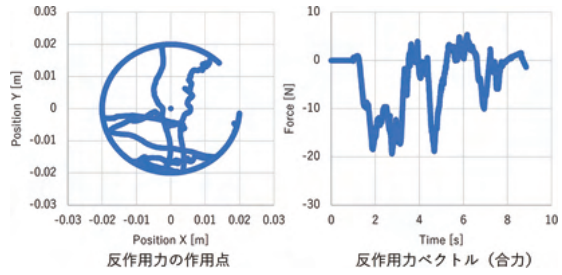


図５　把持加工動作時の反作用力の作用点および反作用力ベクトル

反作用力を受けた結果として生じる場合が多い。したがって，動作そのものを記述するだけでなく，その動作を生じさせる力覚情報を定量化することが重要である。また，反作用力の作用点を推定することで，対象物に対してどのような回転効果が生じるかを考慮できる。これにより，力の大きさだけでは説明できない把持姿勢変化を，反作用力ベクトルと作用点の関係から記述できるようになった。

本アルゴリズムにより，把持加工中に人間が受ける力覚情報を，動作生成モデルの入力として利用可能な形に変換した。これは，熟練者が感覚的に行っている姿勢調整をデータとして扱うための重要な処理であり，力覚情報に基づくスキルトランスファ技術の基盤となる成果である。

5. 動作生成モデルの構築

取得した反作用力ベクトルと把持姿勢の時系列データを用いて，次時刻における把持姿勢の変化を予測する動作生成モデルを構築した。モデルの入力には，人間が受ける力覚情報としての反作用力ベクトルと，リーダロボットの先端座標を用いた。出力には，次のステップにおけるフォロワロボットの位置または把持姿勢の変化量を設定した。これにより，現在の力覚状態と把持姿勢から，操作者が次にどのような姿勢調整を行うかを予測する構成とした。

図６に動作生成モデルの構成を示す。

図６では，反作用力ベクトルおよび現在の把持姿勢を入力し，次時刻の把持姿勢変化または

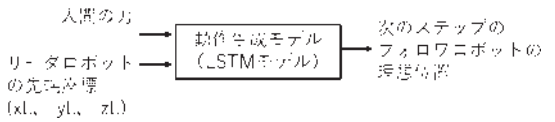


図６　動作生成モデルの構成

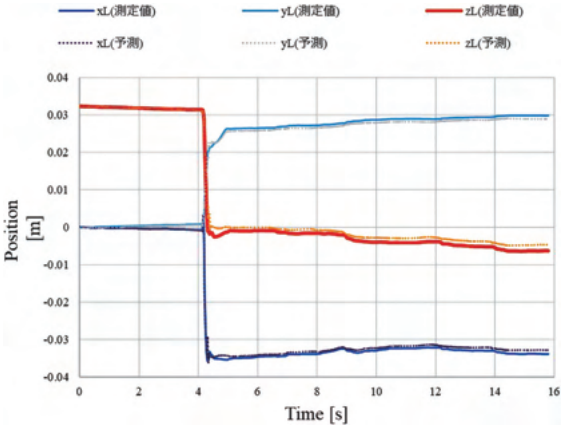


図７　動作生成モデルによる予測結果

フォロワロボットの位置を出力するモデル構成を示す。

また，動作生成モデルによる予測結果を図７に示す。

学習に用いていない評価用データに対して，モデルが予測した結果と実測値を比較した結果を示す。

評価用データに対する予測結果より，構築したモデルは，把持加工動作中に生じる姿勢変化の傾向を一定程度再現できることを確認した。これにより，人間が把持加工中に暗黙的に行っている，力覚情報に基づく姿勢調整の傾向を数理モデルとして表現できる可能性を示した。

この成果は，技能伝承の観点から重要である。熟練者は，接触時に生じるわずかな反力の変化を感じ取り，それに応じて把持対象の姿勢を調整している。しかし，その判断は経験的・感覚的であり，言語化が難しい。本研究で構築した動作生成モデルは，反作用力ベクトルと把持姿勢の関係をデータに基づいて学習することで，熟練者の暗黙的な姿勢調整を機械システムが利用可能な形で表現するものである。

また，本モデルは，単に過去の手先軌道を再

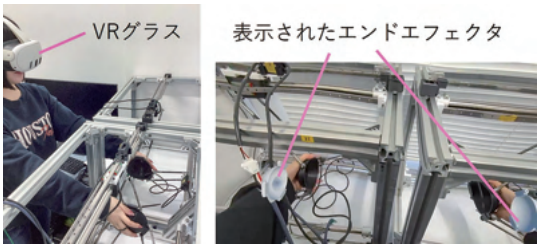


図８　動作教示システムの構成と理想把持姿勢の提示例

現するものではなく，現在の力覚情報を入力として次の動作を予測する点に特徴がある。このため，加工抵抗や接触点が変化した場合にも，力覚情報に応じた姿勢調整を提示できる動作教示システムへ発展させることができる。

6. 動作教示システムの開発

構築した動作生成モデルを用いて，操作者に理想的な把持姿勢を提示する動作教示システムを開発した。本システムでは，実験基盤から取得した力覚情報と把持姿勢を動作生成モデルに入力し，モデルが出力した次の望ましい把持姿勢を画像処理アルゴリズムにより可視化する。さらに，拡張現実インターフェースと統合することで，操作者が現在の姿勢と理想姿勢との差異を視覚的に確認できる構成とした。

動作教示システムの構成および画像処理アルゴリズムによる提示例を図８に示す。図８では，実験基盤で取得した力覚情報と把持姿勢を動作生成モデルへ入力し，算出された理想的な把持姿勢を画像処理アルゴリズムおよび拡張現実インターフェースを介して操作者へ提示する流れを示す。また，現在の把持姿勢と，動作生成モデルが出力した理想的な把持姿勢を重畳表示する例をあわせて示す。

この提示により，操作者は現在の動作と目標とする動作の差異を視覚的に理解し，把持姿勢を修正しながら動作を習得できる。

このように，力覚情報の取得，動作生成モデルによる姿勢予測，画像処理および拡張現実インターフェースによる提示を統合することで，力覚情報に基づく把持加工動作の教示システムを開発した。これにより，熟練者の暗黙的な姿勢調整をデータに基づいて表現し，操作者に提示するための基盤を構築した。

［成果の発表，論文など］

1. 2025 年度精密工学会秋季大会学術講演会，「根軌跡法に基づくパラレルリンク型ロボットの位置・力ハイブリッド制御の設計法」，楠鈴香，桑原央明，2025 年 9 月 18 日
2. 令和 7 年電気学会全国大会，「面接触動作情報を推定・伝達するパラレルリンク型遠隔操作ロボット」，楠鈴香，桑原央明，2025 年 3 月 19 日
3. The 32nd IEEE International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice（2026 年 11 月中国開催）に投稿予定

最後に，本研究のご支援を頂きました公益財団法人立石科学技術振興財団に深く感謝の意を申し上げます。

［研究助成（A）］

経皮的脊髄刺激による下肢筋協調パターンの変調：動作向上のニューロモジュレーション

2241016



研究代表者（助成金受領者）	東京工科大学　医療保健学部	講師	斎藤寛樹
共同研究者	東京大学	助教	金子直嗣
	東京大学	助教	佐々木睦

［研究の目的］

本研究の目的は下肢筋協調パターンを誘発する脊髄の局在を解明し，運動障害の患者やアスリートのパフォーマンスを劇的に向上させる脊髄電気刺激の介入方法を確立することである。対象者の動作能力を向上するためには反復練習による運動学習や筋力トレーニングによって筋力向上を行うのが主流である。しかし効果を得るためには長期間に及ぶ介入が必要となるため，ドロップアウトやトレーニング効果が停滞する事例も珍しくない。近年，神経科学の発達によって，運動制御を司る中枢神経系へ直接変調を起こし動作の遂行能力を短期間で向上させる介入が盛んに行われている。中でも脊髄電気刺激は神経活動の変調（ニューロモジュレーション）を起こすため，脊髄損傷者などにおいて下肢の筋機能を高める有用な介入であるとされている。一方で，既存の電気刺激ではヒトの複雑な動きに関わる複数の筋群への介入は行われていない。今回，ヒトの複雑な動作の筋協調パターンを経皮的脊髄刺激で変調することで，動作を劇的に向上させる電気刺激法を開発する。これにより，病気や怪我で動くことに困る人々の支援を目指し，より快適な社会の実現を追求する。

この目的に向け，本研究は３つの研究を段階的に積み上げる構成とした。まず，ジャンプ動作を支える筋協調パターンと，それを効果的に鍛えるトレーニングを同定し（研究 1），次に，そのトレーニングで強化される協調パターンを経皮的脊髄刺激（tSCS）で再現するために標的とすべき脊髄節レベルを特定し（研究 2），最後に，同定した脊髄節レベルへの tSCS が脊髄および皮質脊髄路の興奮性を実際に変調し得るかを生理学的に検証した（研究 3）。すなわち「動作を支える筋協調の同定→それを誘発する刺激部位の特定→その刺激が神経興奮性に及ぼす効果の検証」という一連の流れである。

［研究の内容，成果］

研究 1：ジャンプ動作の筋シナジーと効果的トレーニングの同定

本研究シリーズの出発点として，研究 1 ではまず，向上の標的となる「ジャンプ動作を支える筋協調パターン」そのものと，それを効果的に鍛え得るトレーニング種目を明らかにした。研究 1 ではジャンプ動作に必要な筋協調パターンの抽出とそれを効果的に高めるトレーニングの検討を行った。健康な成人男性 14 名を対象に，垂直跳び（Vertical Jump: VJ）および 8 種類の選択的機能的運動（Select Functional Movement: SFM）を実施させ，筋活動の解析を行った。VJ の平均跳躍高は 49.0 ± 8.6 cm であり，SFM にはアクティブ・ストレートレッグレイズ，膝の伸展／屈曲，股関節の伸展／外転，足関節の底屈，体幹の伸展／屈曲が含まれた。筋

電図（EMG）は，下肢および体幹の 16 筋（広背筋，脊柱起立筋，外腹斜筋，腹直筋，大腿筋膜張筋，中臀筋，大臀筋，外側広筋，大腿直筋，長内転筋，半腱様筋，大腿二頭筋長頭，前脛骨筋，内側腓腹筋，ヒラメ筋，長腓骨筋）から無線で収集された。得られた筋活動データから，非負値行列因子分解（NMF）を用いて筋シナジーを抽出し，k-means 法によりクラスタリングを行った。VJ におけるシナジーと SFM におけるシナジーとの関連性を評価するために，以下の 2 つの方法を採用した。(1) VJ シナジークラスタ重心と SFM シナジークラスタ重心との類似性（Similarity Profile: SP）を算出し，SP が 0.70 以上の場合は「直接一致」と判定した。(2) VJ シナジーを複数の SFM シナジーの線形結合として非負最小二乗法により再構成し，2 つ以上の SFM シナジーがスケーリング係数 0.2 以上かつ全体の SP が 0.70 以上である場合を「統合的再構成」と判断した。結果として，VJ の動作中には 5 つのシナジークラスタが同定された。1 つ目は「プッシュオフモジュール」であり，足関節底屈筋，膝伸展筋，股関節伸展筋の共収縮を特徴とした。2 つ目と 3 つ目は体幹の安定化に関与する「腹筋系モジュール」と「背筋系モジュール」であった。

4 つ目の「スラストモジュール」は，大腿二頭筋（BF），内転筋（ADD），中臀筋（Gmed），大腿筋膜張筋（TFL）の活動を反映していた。5 つ目の「着地制御モジュール」では，前脛骨筋（TA）および背筋の活動が主であった。SFM との比較において，スラストモジュールおよび体幹安定化モジュール（腹筋･背筋）は，SFM で得られた股関節伸展，体幹屈曲，体幹伸展の各シナジーと高い類似性（SP ＞ 0.7）を示し，直接一致が確認された（図 1）。一方，プッシュオフモジュールと体幹安定化モジュール（背筋）は，SFM における複数のシナジー（股関節伸展，膝伸展，足関節底屈）を統合することで良好に再構成された。なお，着地制御モジュールについては，いずれの SFM シナジーとも一致せず，独自の筋活動パターンであることが示唆された。今回の結果から，ジャンプ能力を向上させるための効果的なトレーニング戦略が明らかとなり，そのトレーニング中に脊髄刺激を併用することが有効である可能性が示された。そこで次の研究 2 では，このトレーニングで強化される協調パターン（トレーニングシナジー）を，脊髄刺激の側から再現できるか，また再現するにはどの脊髄節を狙えばよいかを検討した。

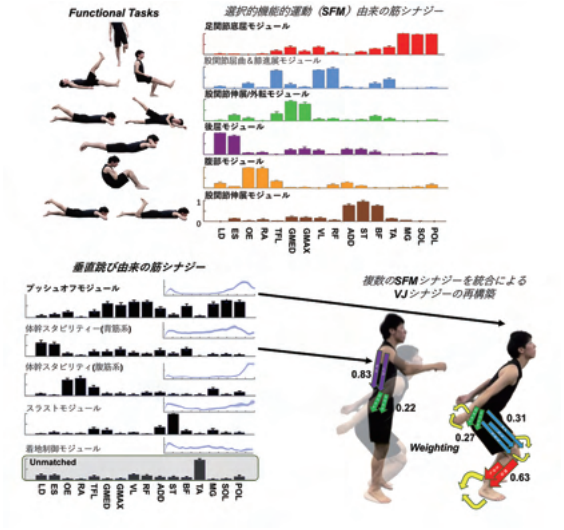


図 1　垂直跳び（VJ）から抽出した筋シナジーと選択的機能的運動（SFM）由来シナジーとの類似性。VJ で同定された 5 つのシナジークラスタ（プッシュオフ･腹筋系・背筋系・スラスト・）と各 SFM シナジーとの SP を示す。スラスト・体幹安定化モジュールは SFM シナジーと高い類似性（SP ＞ 0.7）を示して直接一致し，プッシュオフ・背筋系モジュールは複数の SFM シナジーの統合的再構成で説明された。

研究 2：トレーニングシナジーを誘発する脊髄節レベルの同定

研究 1 では，ジャンプを支える筋協調パターン（トレーニングシナジー）と，それを鍛える SFM が同定された。これを受けて研究 2 では，研究シリーズの第 2 段階として，同定したトレーニングシナジーを「行動（トレーニング）側」だけでなく「刺激側」からも再現できるか，すなわち tSCS によってどの脊髄節レベルがこれらの協調パターンを誘発するかを検討し，刺

激の標的部位を定めることを目的とした。これにより，トレーニング効果を増強するために刺激すべき最適な脊髄節レベルを特定する。

【方法】健常者 8 名を対象とした。各被験者に対し，研究 1 と同一の 8 種類の SFM を実施させて運動由来のシナジーを取得するとともに，安静状態で 5 つの脊髄節レベル（L2-3，L1-2，Th12-L1，Th11-10，Th10-9）に対して経皮的脊髄刺激を順次行い，誘発された筋応答を記録した。研究 1 との比較を厳密にするため，研究 1 と同一の下肢・体幹筋群から筋電図（EMG）を導出し，非負値行列因子分解（NMF）により各刺激レベルで誘発される筋シナジーを抽出した。抽出した刺激由来シナジーと，トレーニング（SFM）由来シナジーとの対応関係を，研究 1 と共通の指標である SP で評価し，SP > 0.7 を一致の基準とした。これにより，各脊髄節レベルの刺激が，ジャンプに必要な股関節・膝関節・足関節の伸展に関わる協調パターンをどの程度再現するかを定量的に照合した。

【結果】脊髄刺激によって誘発された筋応答から，ジャンプに関与する下肢の筋協調パターンを抽出できることが確認された（SP > 0.7）（図 2）。これは，研究 1 で同定した，トレーニングで強化される協調パターンが，脊髄分節レベルへの刺激によっても賦活され得ることを示している。一方で，これらの伸展協調パターンを特異

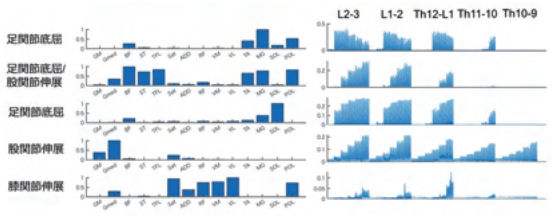


図 2　各脊髄節レベルへの経皮的脊髄刺激（tSCS）で誘発された筋シナジーと，トレーニング（SFM）由来シナジーとの類似性。5 つの脊髄節レベル（L2-3，L1-2，Th12-L1，Th11-10，Th10-9）の刺激で誘発されたシナジーと，ジャンプに必要な股関節・膝関節・足関節の伸展に関わるトレーニングシナジーとの SP を示す。伸展協調パターンは複数の節レベルにまたがって誘発され（SP > 0.7），効率的な賦活には Th12-L1 より下位レベルの刺激が適することを示す。

的に引き起こす単一の脊髄節レベルは存在せず，各パターンは複数の節レベルにまたがって誘発された（協調パターンと脊髄節レベルが 1 対 1 で対応するわけではない）。ただし誘発効率の観点では，ジャンプに必要な下肢伸展パターンを効率よく賦活するためには，Th12-L1 レベルより下位（尾側）の刺激が最適であることが示された。

研究 3：tSCS による脊髄および皮質脊髄路の興奮性の変調

研究シリーズの最終段階である研究 3 では，研究 2 で同定した脊髄節レベルへの tSCS が，脊髄および皮質脊髄路（corticospinal tract）の興奮性に与える生理学的効果を，刺激介入の前後で検証した（代表例 1 名）。大腿直筋から表面筋電図を記録し，tSCS による脊髄誘発反射（後根筋反射；脊髄分節の興奮性の指標）と，経頭蓋磁気刺激（TMS）による運動誘発電位（MEP；皮質脊髄路の興奮性の指標）を，tSCS 介入（約 21 分）の前（PRE）・直後（POST0）・10 分後（POST10）に各約 15 回計測した。

その結果，tSCS 誘発脊髄反射の振幅は介入後に明瞭に増大した。効果は介入直後よりむしろ 10 分後に大きく（PRE 比 +30%，Kruskal-Wallis 検定 $p < 10^{-6}$），一過性ではなく持続的に脊髄の興奮性が高まっていた（図 3-1，図 3-2 左）。一方，皮質脊髄路を反映する MEP は介入前後で不変であった（図 3-2 右）。すなわち，tSCS は脊髄分節レベルの興奮性を選択的かつ持続的に増大させ，皮質脊髄路の興奮性には影響を及ぼさないことが示された。

脊髄の興奮性が増大し皮質脊髄路は不変であった生理学的機序

tSCS は脊髄後根（Ia 群求心性線維）を主に興奮させ，後根－運動ニューロン間のシナプス伝達効率，シナプス前抑制，介在ニューロン回路といった脊髄分節レベルの興奮性を調整する。tSCS 誘発反射はこの脊髄反射弓の興奮性

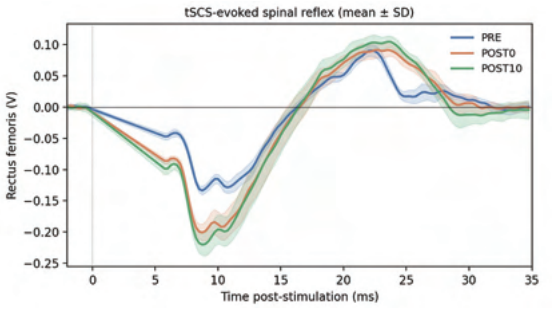


図 3-1　tSCS 誘発脊髄反射の誘発波形（全試行の平均±標準偏差）。介入後（POST0・POST10）に反射応答が増大しており，脊髄分節の興奮性増大を示す。

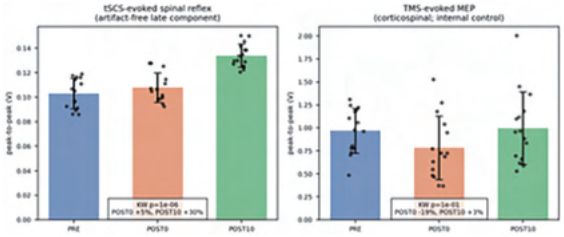


図 3-2　誘発応答の振幅（peak-to-peak, 各点＝1 試行）。左：tSCS 誘発脊髄反射は介入後に増大し，10 分後に最大となった。右：皮質脊髄路を反映する MEP は介入前後で不変であった。

を反映するため，その増大は脊髄分節レベルの興奮性が高まったことを示す。効果が介入直後よりも 10 分後に大きかったことは，刺激中・刺激後にシナプス可塑性的な持続的変化（脊髄レベルでの神経変調）が生じたことを示唆する。

一方，MEP は大脳皮質運動野→皮質脊髄路→脊髄運動ニューロン→筋という経路全体の興奮性を反映する。tSCS は皮質や皮質脊髄路を直接賦活しないため，これら上位中枢の興奮性は変化せず，MEP は不変であった。さらに，もし tSCS が脊髄運動ニューロンプール全体の興奮性を一様に高めていたのであれば，共通の出力段である運動ニューロンを介して MEP も増大するはずである。MEP が不変であった事実は，tSCS の作用が運動ニューロンプール全体に対する一様な賦活ではなく，求心性入力から脊髄反射回路に至る分節性の経路に選択的に働いたことを示している。以上より，本介入による神経変調は脊髄分節レベルに局在することが生理学的に裏づけられた。

以上，3 つの研究を通じて，ジャンプを支える筋協調パターンの同定（研究 1），その協調を誘発する脊髄節レベルの特定（研究 2），そして当該レベルへの tSCS が脊髄分節の興奮性を選択的・持続的に高めるという生理学的効果の実証（研究 3）が一貫して示された。これは，トレーニングと tSCS を組み合わせて動作能力を高める介入法の確立に向けた，行動から神経生理に至る一連の基盤を提供するものである。

［成果の発表，論文など］

斎藤寛樹：スポーツ動作を支えるファンクショナルムーブメントと筋協調パターン―効率的な障害予防エクササイズ構築に向けて―，体育の科学，76，2，2026.

斎藤寛樹：運動障害に関連する筋協調パターンの変化とそのリハビリテーションへの応用，シンポジウム「Neuroplasticity and Neuromodulation ― Maximizing Human Movement Potential（神経可塑性とニューロモジュレーション―ヒトの運動能力を最大化する）」，2025.

Saito H, Endo N, Sugawara R, Tashiro Y, Miura R, Wada N, Matsushita K, Oonishi-Ito S, Otsudo T, Nakayama T: Neuromechanical Contributions of Single-Joint Focused Movement Synergies to Vertical Jump Performance: Implications for Targeted Exercise Selection, 30th Annual Congress of the European College of Sport Science, 2025.

Oonishi-Ito S, Matsushita K, Kakehata G, Nakayama T, Otsudo T, Saito H: A Pilot Study on Knee and Ankle Muscle Co-Contraction Index During Single Leg Drop Jump After People Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction, 30th Annual Congress of the European College of Sport Science, 2025.

Saito H, Yamano A, Suzuki N, Matsushita K, Yokoyama H, Van Cant J, Nakazawa K: Muscle Synergies in Single-Leg Hops: Neuromuscular Adaptations for Increased Hop Distance, J Appl Biomech, 41, 5, 418–426, 2025.

Saito H, Yamano A, Suzuki N, Matsushita K, Yokoyama H, Van Cant J, Nakazawa K: Neuromechanical strategies for longer forward jumps: A muscle synergy analysis of single-leg hops, 29th Annual Congress of the European College of Sport Science, 2024.

［研究助成（A）］

やわらかい予期の臨界的不安定性が導く人間と機械のリズム同調システムの開発

2251014



研究代表者（助成金受領者）　茨城大学　応用理工学野　教授　笹井一人
共同研究者　香川大学　創造理工学部　准教授　松井哲也
茨城大学　大学院理工学研究科　博士前期課程２年　永井友貴

［研究の目的］

幼い子供でも誰かと合わせて音楽を奏でることはできるのに，メトロノームに合わせ続けることは熟練を要する。これは，機械が固く安定な構造を基盤とするのに対して，人間が柔らかく不安定な構造を基盤としていることに起因する，人間と機械の調和を阻むギャップである。近年のリアルタイム伴奏システム等では機械学習による予測と人為的ノイズの付加によりこの柔らかさを近似的に実現しているにすぎず，人間の不安定性を「ノイズ」ではなく「予測不可能性を受け入れて可能性を拡張する」原理として正面から表現する制御則は未だ確立されていない。申請者らはこれまで，不完全情報ゲームにおいて，郡司らの提唱したベイズ・逆ベイズ（BIB）推論を適用する研究を行ってきた。BIB推論は，事前分布の構造そのものを観測データに応じて書き換える「逆ベイズステップ」を通常のベイズ推論に組み合わせた推論モデルであり，ジャンケンゲームを用いた申請者の先行研究では，BIB推論と対戦する人間の手の出し方にベキ分布（臨界性の指標）が現れることが確認されている。ベキ分布は安定と不安定のいずれでもない臨界状態に固有の統計的性質であり，BIBが人間との協調を臨界性経由で実現している可能性を示唆していた。

本研究の目的は，このBIB推論を時間的協調課題に拡張した「やわらかい予期モデル」を機械側アルゴリズムとして実装し，人間と機械のリアルタイムなリズム同調系（協調タッピング系）におけるその挙動を，人間同士の協調と直接比較することで定量的に明らかにすることである。具体的には，(i) 十分なサンプル数を確保した本実験プロトコルの確立，(ii) 3種の予期メカニズム（決定論的Kuramoto型，硬い予期のベイズ型，やわらかい予期のBIB型）の協調挙動の比較，(iii) やわらかい予期が生み出す動的状態を，臨界性の観点を含む多面的指標で評価すること，を本助成期間内のサブ目標とした。これらを通じて，現代から将来にかけてより高度化する機械と人間との調和的関係を構築する基盤的知見を得ることを目指した。

［研究の内容，成果］

1. 関連研究と本研究の位置づけ

本研究は感覚運動同期（SMS：Sensorimotor Synchronization）研究，Kuramoto型結合振動子モデル，ベイズ／逆ベイズ／BIB推論，Fristonの能動的推論および自由エネルギー原理，ならびに中島・三宅らの協調タッピングモデルを理論的基盤とする。Reppら（2005）の長い系譜が示すように，同期タッピング・交互タッピング・協調タッピングは音楽演奏や対話など対人的時間協調の基盤現象であり，Kuramoto

型結合振動子は相手位相への引込みを記述する代表的決定論的モデルとして広く用いられてきた。

中島・三宅らは協調タッピングにおいて，SE-δITI 相関と δSE-δITI 相関に基づく二種類のタイミング制御機構を発見した点で重要である。しかし彼らのモデルは定常過程を前提としており，人間 - 人間協調に内在する非定常性や個人差を十分には説明できない。本研究はその枠組みを継承しつつ，信念自体が観測に応じて書き換わる「やわらかい予期」を導入することで非定常適応過程を取り込む点に独自性がある。また Matsui & Sasai（2026, Discover AI）は人間 - エージェント相互作用を Gunji の知能三類型（AI 型／NI 型／NBI 型）に基づき体系化し，予測不可能な「外部」を積極的に取り込む NBI（Natural-Born Intelligence）型 HAI の理論的枠組みを提示した。

本研究はその NBI 型 HAI の工学的具体実装に位置づけられる。検証する 4 つの仮説は次のとおりである：(1) 確率的推論は Kuramoto 型を上回る，(2) BIB はベイズより非定常適応能力に優れる，(3) モデルの予期特性は実際の行動指標に反映される，(4) 音楽・ダンス経験が協調性能に影響する。

2. やわらかい予期モデル（第 3 章）

本研究では 3 種の機械側アルゴリズムを「予期の硬さ」軸上に整列して比較する。第一の Kuramoto モデルは決定論的法則 ITI_next = ITI_0 – K·SE（ITI_0 = 600 ms, 結合定数 K = 0.5）に従い，確率分布や信念を一切もたない最も「硬い」予期である。

第二のベイズモデルは，対数正規事前分布とガウス尤度，学習率 α = 0.3 によるベイズ更新で事後分布から次 ITI をサンプリングする。確率的推論を行う一方，事前分布の構造（仮説空間の枠）は終始固定されており「硬い予期」に分類される。第三の BIB（Bayesian-Inverse Bayesian）モデルは，ベイズモデルと完全に同

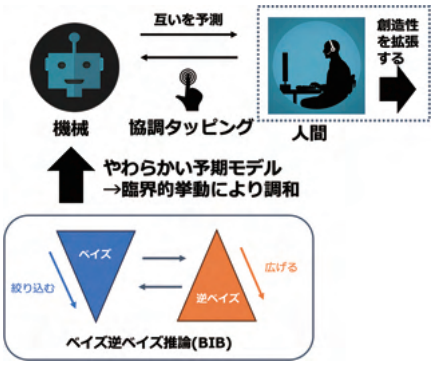


図 1　やわらかい予期モデル（BIB 推論）の概念図。ベイズ更新（絞り込む）と逆ベイズ更新（広げる）の二段階で，信念自体が観測に応じて書き換わる。

一の構造の上に，確率 β = 0.2 で事後確率が最低の仮説 h_min を直近 L = 7 サイクルの経験的カーネルで置換する逆ベイズステップを追加する。これにより仮説空間自体が観測データに応じて動的に再構成される「やわらかい予期」が実現される。記憶長 L = 7 は H-H 実験から推定された SE 自己相関の有効長と H-C 実験のリアルタイム応答性の両方を考慮して決定した。

3. 実験方法

茨城大学倫理委員会の承認（プロトコル 25T1600，2025 年 11 月 20 日承認）のもと，Mac Studio（M4 Max）ワークステーション，低レイテンシ音響インタフェース Focusrite Scarlett 4i4（測定出力レイテンシ 6.8 ms，エンドツーエンド往復遅延 10 ms 未満），密閉型ヘッドフォン audio-technica ATH-SX1a，サンワサプライ 400-SKB075 USB テンキーによるサブミリ秒精度入力環境を MATLAB R2025b + Psychtoolbox-3 上に構築した。両プレイヤーは目隠しを着用し，互いのタップ音のみがクロスフィードバックされる構成とすることで，視覚情報を排した純粋な聴覚的時間協調を実現した。

実験課題は Stage 1（同期フェーズ：60 サイクル・ISI = 600 ms メトロノームによる内的拍形成）と Stage 2（交互タッピング協調フェーズ：280 サイクル）の二段階構成とした。被験者は H-H 7 組 14 名（男性 5 名・女性 9 名，平均年



図 2　H-H 実験の実験風景。二人の実験参加者がアイマスクを着用し，ヘッドフォンを通じて相手のタッピング音を聴きながら交互タッピングを行う。実験システムの全体構成：Mac Studio ＋低レイテンシ音響インタフェース＋密閉型ヘッドホンによりクロスフィードバック構成を実現。

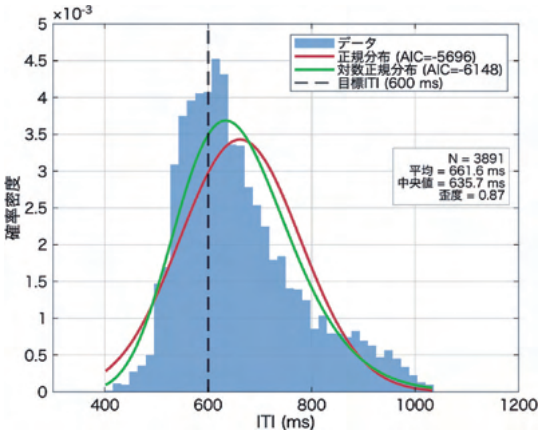


図 3　H-H 実験における ITI 分布と理論分布のフィッティング。実測ヒストグラム（青）に対し対数正規（緑）が正規（赤）より良好に適合（ΔAIC = 452.7）。

齢21.9 ± 1.4歳），H-C 18名×3モデル＝54セッション。各セッションの開始30サイクルを過渡応答として除外し，250サイクル×2プレイヤー＝500データ点／ペアを解析対象とした。

特徴量はタップ周期ITI（Inter-Tap Interval）と同期誤差SE（Synchronization Error）。解析は外れ値処理（3σ法），記述統計，対数正規／ガンマ／正規分布のフィッティング比較（AIC基準），自己相関関数と積分相関時間 τ_ICT，KS（Kolmogorov–Smirnov）距離，ADF（Augmented Dickey–Fuller）定常性検定，Granger因果性検定，AR（1）プレイヤー対称モデルによるリーダー・フォロワー分析，DFA，Allan分散，Goh–Barabasiバースト性，打ち切りべき分布の最尤適合を実施した。

4. 結果

■人間 - 人間（H-H 条件）

H-H実験では7組×280サイクルから合計3,920タップを取得した。ペア間ITI平均は568 ～ 838 msと幅広く，プールITI平均は664.6 ± 125.0 ms（変動係数CV = 0.188）とStage 1のISI = 600 msより約10%遅いテンポに収束した。ITI分布は対数正規が正規よりΔAIC = 452.7，ガンマよりΔAIC = 109.2で圧倒的に優越し，Weber–Fechner型の比率符号化と整合する重要な統計的性質を示した。この結果は本研究のベイズ／BIBモデルが対数正規事前分布を用いる経験的根拠を提供する。

SE平均は–0.06 msと実質ゼロで，正／負SEは49.9/50.1%とほぼ完全に均等に分布した（対称性の高い相互補償）。全7組で双方向のGranger因果が有意（$p < 0.001$）に検出され，相互適応の存在を強く支持した。AR（1）プレイヤー対称モデルによる役割分析では，14名中14名で自己係数 α_Self が相手係数 α_Pair を上回り，全7ペアが「リーダー – リーダー（相互自己優位）」型と分類された（二項検定 $p = 1.2 \times 10^{-4}$）。これはKonvalinka et al.（2010）が報告した「ハイパーフォロワー仮説」を本プロトコルにおいて反証する結果である。

ADF検定ではSE時系列は7/7ペアで非定常，ITI時系列は4/7で定常という顕著な非対称性が観察され，申請時に想定したシステムの「やわらかさ」を反映する興味深い性質が確認された。

■ H-C 主実験：BIB が H-H を最良再現

H-C実験では18名の参加者がKuramoto／ベイズ／BIBの3種計算パートナーと280サイクルずつ協調タッピングを行い，ラテン方格配置（6順序パターン×3名）により54セッショ

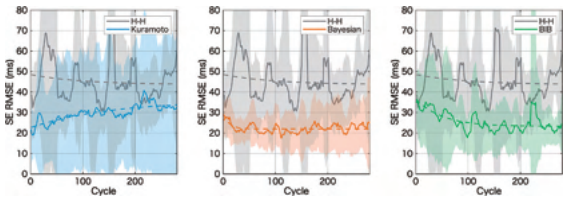


図4　H-H（グレー）と3モデル（Kuramoto／Bayes／BIB）の学習曲線比較。BIBが最も人間 - 人間に近い適応プロファイルを示す。

ン・約30,240タップを取得した。従来の同期精度指標であるSE RMSEに対するFriedman検定では3モデル間に統計的有意差は検出されなかった（χ^2 = 1.33, p = 0.51, Kendall's W = 0.04）。すなわち古典指標の枠組みではモデルの差を区別できない。

一方，H-Hを参照基底とする以下の3つの独立指標すべてにおいて，BIBが他二モデルを上回りH-Hに最も近接した：SE平均バイアスはKuramoto −9.95 / Bayes −4.04 / BIB −1.39 ms（H-H −0.06），SE分布のKS距離DはKuramoto 0.147 / Bayes 0.176 / BIB 0.142，積分相関時間τ_ICTはKuramoto 3.30 / Bayes 5.63 / BIB 8.92（H-H 14.46，BIBはH-Hの62%の時間相関長を保持）。注目すべきことに，この優位性の順序「BIB > Bayes > Kuramoto」は3モデルを「予期構造をデータが書き換えうる度合い」で並べた順序と完全に一致しており，やわらかい予期の度合いが直接H-H再現性に対応することを示した。

5. 考察

申請時に最有力候補として位置づけていた「1/f臨界協調」仮説は，本研究の系統的検証により否定された。全68セッション（H-H 14名＋3モデル各18セッション）に対し，5つの独立な長距離記憶・ヘビーテール・間欠性指標—（i）Welch法によるPSDスロープβ，（ii）DFA指数α_DFA，（iii）Allan分散の対数勾配μ，（iv）Goh–Barabasiバースト性指数B，（v）打ち切りべき分布の最尤適合率—を適用したところ，いずれの指標も臨界目標値に到達せず，

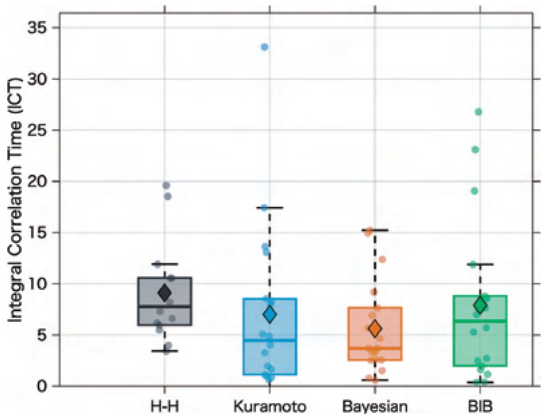


図5　SE自己相関関数の積分相関時間（ICT）の比較。H-H（14.46）に対しBIB（8.92）が最も近く，Bayes（5.63）・Kuramoto（3.30）を上回る

4条件間のKruskal–Wallis omnibus検定はいずれも有意ではなかった（β: p = 0.45, α_DFA: p = 0.54, μ: p = 0.63, B: p = 0.49）。先行のジャンケンゲーム研究で観察されたベキ分布的臨界性は，本タッピング課題の時間スケールでは現れないことが明らかになった。

代わりに浮上した本質は「分布形状・時間相関・対称性の多面的再現」である。BIBモデルの優位性は，逆ベイズ更新による（i）低確率仮説の経験的カーネル置換，（ii）H-H由来の記憶長パラメータL = 7，（iii）対数正規事前分布，の三要素に帰属する。これらの組合せにより，機械側が固定された予測則に拘束されることなく，人間と同じぐらい不安定に揺らぎながらも破綻せずに協調する「臨界的協調」を実現したと解釈できる。さらに「人間らしさ」は単一指標では評価できず，Sample EntropyではKuramotoがH-Hに近いなど，指標ごとに最良モデルが異なる多面的な特性であることが示された。RMSE単独では捉えられない「分布・相関・バイアス」のパターンこそが，人間 - 機械協調の本質的な評価軸であることを本研究は示唆する。

6. 結論と今後の展望

本研究の貢献は次の3点に集約される：（1）長期（280サイクル）データによる協調適応過

程の定量化と，ITI 対数正規性・SE 対称性・双方向 Granger 因果という再現性ある H-H 参照基底の確立，(2)「予期の硬さ」軸上での 3 モデル比較による BIB モデルの H-H 再現性能の統計的実証（SE バイアス・KS 距離・τ_ICT の 3 指標すべてで BIB が最良），(3)「人間らしさ」を多面的に評価する分析フレームワーク（分布形状×相関構造×時間複雑性）の構築。

学術的意義としては，人間 - 機械協調研究に「予期の柔らかさ」という新たな設計軸を導入し，Gunji の自然生まれ知能（NBI）理論の最初の工学的具体実装として NBI 型 HAI への展開可能性を示した点が挙げられる。技術的には，ノイズ付加ではなく信念構造の動的書き換えによって人間的不安定性を表現する制御則を提示した。

今後の展望として，(a) β（逆ベイズ確率）と L（記憶長）のオンライン適応化，(b) 楽器演奏・対話・運転支援・遠隔協調操作等の実応用への展開，(c) Friston の能動的推論および自由エネルギー原理との理論的統合，(d) より長期・大規模なサンプルでの 1/f 臨界性の再検証，(e) 視覚モダリティを含むマルチモーダル協調への拡張，を計画している。

［成果の発表，論文など］

Matsui, T., Sasai, K.: Trilemma of human-agent interaction. Discover Artificial Intelligence, 6, 4 (2026). DOI: 10.1007/s44163-025-00706-x.

永井友貴：BIB 推論に基づくやわらかい予期モデルの協調タッピング課題への適用，令和 7 年度 茨城大学大学院理工学研究科 修士論文（2026 年 2 月）.

笹井一人：天然社会と新世代のヒューマン・エージェントインタラクション, 第 4 回「新世代のネットワーキング・エージェント構想」研究会（2025）.

笹井一人：協力ゲームにおける時間の非同期性，第 18 回内部観測研究会・第 39 回 SICE-SI 共創システム部会研究会（2025）.

永井友貴，笹井一人：拡張ベイズ推論アルゴリズムを用いた協調タッピング課題の分析，第 25 回システムインテグレーション部門講演会（SI2024），pp. 620-624.

［研究助成（A）］

言語指示による群ロボット協調輸送のための深層強化学習技術の開発

2251015



研究代表者
（助成金受領者）

奈良先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科

准教授　　柴　田　一　騎

［研 究 の 目 的］

群ロボット協調輸送は複数の荷物を同時に運べることや，重いものも協調して運べるため，システムとして実現できれば効率が良いと考えられる。現行技術は，荷物やゴールの位置を与えて群ロボットを制御する。しかし，実運用を考えると，この方法は現実的ではない。例として，人が複数台のロボットに指示を与え，荷物をゴールへ移動することを考える。この場合，人は荷物やゴールの正確な位置を知ることはできないため，現行技術を適用できない。人の使いやすさを考えると，「荷物をゴールへ運んで」のような言語指示に基づくシステムが望ましい。

本研究の目的は，言語指示に基づく群ロボット協調輸送のための学習技術の確立である。この技術を確立できれば，物流，建設，農業などの多岐にわたって人が直感的に群ロボットを操作可能となり，人と調和した群ロボットシステムの創出につながることが期待される。

［研究の内容］

本研究では，図１のように各ロボットが搭載カメラの観測に基づいて言語指示を解釈する，視覚・言語誘導型の群ロボット協調輸送に取り組んだ。この分散的な設定における主要な課題は，ロボット間の知覚の不整合である。すなわち，異なるロボットが同一の指示や環境に対して，異なる荷物やゴールを対応付けてしまう問題である。このような不整合はロボット間の協調行動を損ない，輸送性能を低下させる。特に，この問題は，各ロボットが自身の知覚および意思決定モジュールを持つ群ロボットシステムにおいて顕著となる。

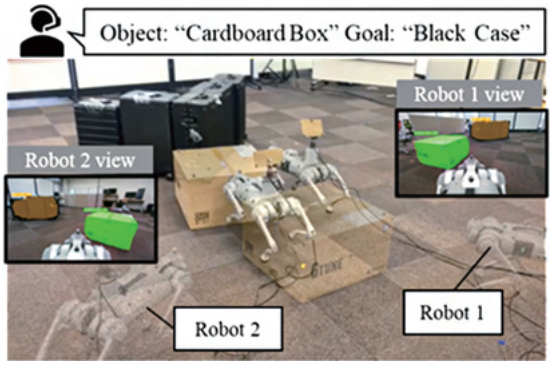


図１　言語指示による群ロボット協調輸送

この問題を緩和するために，本研究ではリーダー・フォロワー構造を採用する。この構造では，一方のロボットがリーダー，もう一方がフォロワーとして動作する。タスクに関連する指示の解釈をリーダーに集約することで，ロボット間の知覚不整合を軽減するとともに，タスクの解釈を単一のロボットにのみ要求すればよいため，実装コストの削減にもつながる。

本研究では，リーダー・フォロワー構造を獲得するため，群ロボットの学習 AI であるマルチエージェント強化学習（MARL）を採用する。MARL は，群ロボットが試行錯誤で経験データを収集し，学習によって他者との協調行動ルールを自動獲得できる。

しかしながら，リーダー・フォロワー構造は

試行錯誤による学習から自発的に獲得されることは稀である。独立かつ対称な方策構造を前提とする従来の MARL は不安定な振る舞いに収束しやすく，一貫したリーダー・フォロワー構造を形成できない。

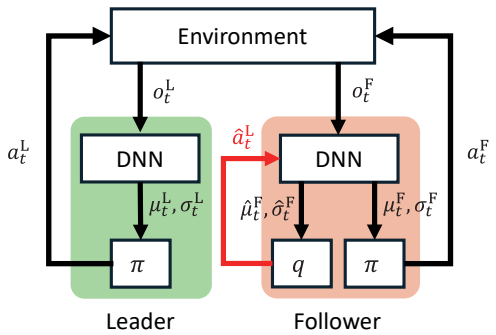
本研究では，一貫したリーダー・フォロワー構造を学習により獲得するための方法論の検討を進めた。具体的な実現方法として，以下の 3 つの要素によって構成される方法論を導出した。

(1) 非対称な方策モデル：リーダーにはタスクの情報を与える一方で，フォロワーには局所観測のみを与える非対称な方策モデルを導入する。

(2) 相互情報量に基づく目的関数：フォロワーが自身の局所観測からリーダーの行動を予測するように相互情報量に基づく目的関数を導入する。

(3) 視覚・言語誘導型の群ロボット学習の枠組み：画像言語モデル（VLM）の推論時間に起因する訓練時間の増大を回避するため，訓練時には VLM を用いず，実行時のみ VLM を用いる学習の枠組みを導入する。

まず，一貫したリーダー・フォロワー構造を促進するために，図 2 に示す非対称な方策モデルを設計した。具体的には，リーダーとフォロワーの観測入力に非対称性を導入し，役割分担を誘導する。リーダーは，ゴールおよび自身の局所観測（荷物や他のロボットを含む）を入力とし，方策 π に基づいて行動を決定する。これにより，リーダーはタスクに関する情報を利用して意思決定を行う。



π: 方策(正規分布), q: 行動予測器(正規分布)
$\hat{a}^{\mathrm{L}}$:リーダの予測行動, μ: 平均, σ: 分散

図 2　非対称な方策モデル

フォロワーはゴール情報を用いず，自身の局所観測のみを入力として方策 π に基づいて行動を決定する。さらにフォロワーは，リーダーの行動を予測する補助関数 q を内部に持つ。この設計により，フォロワーは局所観測からリーダーの行動を予測しつつ行動し，一貫したリーダー・フォロワー構造が形成される。

次に，フォロワーが自身の局所観測からリーダーの行動を予測するように相互情報量に基づく目的関数を導入した。非対称な方策モデルでは，フォロワーは目標位置の情報にアクセスできないため，一貫した協調行動を学習できない可能性がある。

そこで，フォロワーの観測 o_t^{F} とリーダーの行動 a_t^{L} との間の相互情報量 $I(a_t^{\mathrm{L}}; o_t^{\mathrm{F}}) = H(a_t^{\mathrm{L}}) - H(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}})$ を最大化することで，フォロワーがリーダーの行動を予測するように学習を促す。リーダーとフォロワーの方策は同時に学習されるため，リーダーの行動エントロピー $H(a_t^{\mathrm{L}})$ は学習中に変化する。そのため，相互情報量を厳密に最適化する代わりに，CE 損失の更新時には $H(a_t^{\mathrm{L}})$ を一定とみなし，条件付きエントロピー $H(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}})$ に基づく近似目的関数を最適化する。しかし，この項には未知の条件付き分布 $p(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}})$ が含まれるため，解析的に解くことは困難である。

そこで，変分推論を用いてリーダーの行動分布を近似する。任意の近似分布 $q(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}})$ に対して，KL ダイバージェンスの非負性

$$D_{\mathrm{KL}}(p(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}}) \parallel q(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}})) \geq 0 \qquad (1)$$

が成立する。ここで，近似分布 $q(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}})$ は，フォロワーのディープニューラルネットワーク（DNN）の出力によりガウス分布としてパラメータ化される。式（1）を展開すると，条件付きエントロピーは

$$H(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}}) \leq -\mathbb{E}[\log q(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}})] \qquad (2)$$

となる。したがって，式（2）の上界を最小化することは，対数尤度を最大化することに対応する。最終的に，目的関数は以下となる：

$$\mathcal{J} = \mathcal{J}_{\mathrm{RL}} + \lambda\, \mathbb{E}\left[\log q(a_t^{\mathrm{L}} \mid o_t^{\mathrm{F}})\right] \qquad (3)$$

ここで，$\mathcal{J}_{\mathrm{RL}}$ は元の MARL の目的関数，$\lambda > 0$ は重み係数である。式（3）の目的関数により，タスク性能の向上と，フォロワーによるリーダーの行動予測を両立するように学習される。

最後に，視覚・言語誘導型の群ロボット学習の枠組みを導入した。VLM を用いた MARL では，多様な荷物およびゴールに対して方策を学習すると，訓練時間が大幅に増大する。また，訓練ループに VLM 推論を含めると，計算コストも増加する。

この問題に対処するため，本研究では VLM-free training and VLM-based execution の枠組みを採用した。具体的には，訓練時には物体およびゴールの位置から構成される状態ベクトルを入力とし，VLM を用いずに方策を学習する。一方で，実行時には VLM により推定された物体およびゴールの位置を入力としてロボットの方策を実行する。

各ロボットは図 3 のように搭載カメラの RGB 画像とテキスト情報から VLM を用いて，物体およびゴールの位置を推定する。具体的には，CLIPSeg によるテキストと画像領域の対応付けにより物体の 2 次元位置を推定し，推定位置，深度情報およびカメラの内部・外部パラメータを用いて 3 次元座標へ変換する。同様の処理をゴールにも適用し，得られた 3 次元座標をリーダー・フォロワー方策の入力として用いる。

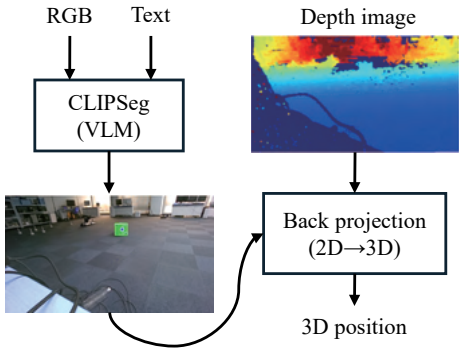


図 3　VLM による推論

[研究の成果]

提案手法の有効性を，シミュレーションおよび実機実験により評価した。ベースラインとして，MARL の手法の一つである MAPPO と比較した。

まず，フォロワーにゴール情報を与えない条件における協調行動の成立性を確認するため，単一ゴール環境において評価を行った。単一ゴール環境では MAPPO でも安定してタスクが達成可能であるため，本実験ではフォロワーがゴール情報を持たない場合の協調行動の成立性を確認することを目的とする。

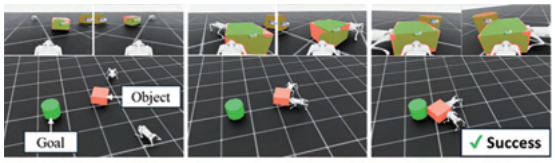
定量評価の結果を表 1 に示す。提案手法は，両ロボットにゴール情報を与えた MAPPO と同程度の成功率を達成した。また，タスク終了時の物体とゴール間距離においても同程度の性能を示した。これにより，フォロワーがゴール情報を持たない場合でも，ゴール情報を有する場合と同程度の性能で協調輸送が可能であることを確認した。さらに，フォロワーによるリーダー行動の予測の効果を確認するため，相互情報量に基づく目的関数を除いたアブレーション（Ours w/o MI）と比較した。その結果，提案手法は Ours w/o MI を上回り，目的関数の有効性を確認した。

ロボットの初期位置とゴールが同一の条件下でのシミュレーションの一例を図 4 に示す。図 4 より，MAPPO と提案手法はいずれも荷物をゴールまで輸送できていることが確認できる。

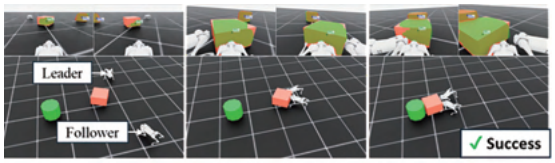
以上より，提案手法はフォロワーにゴール情

表 1　単一ゴール環境での性能比較

Method	Success rate	Distance [m]
MAPPO	0.71 ± 0.21	1.02 ± 0.26
Ours w/o MI	0.55 ± 0.31	0.99 ± 0.28
Ours	**0.76 ± 0.17**	**0.80 ± 0.17**

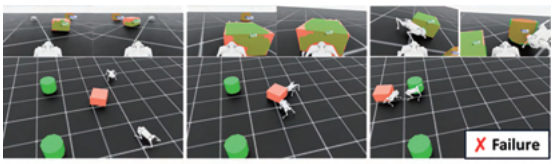


(a) MAPPO



(b) Ours

図 4　単一ゴール環境でのシミュレーションの一例



(a) MAPPO



(b) Ours

図 5　複数ゴール環境でのシミュレーションの一例

表 2　複数ゴール環境での性能比較

Method	Success rate	Distance [m]
MAPPO	0.29 ± 0.08	1.31 ± 0.12
Ours w/o MI	0.34 ± 0.14	1.19 ± 0.32
Ours	**0.76 ± 0.10**	**0.82 ± 0.09**

報を与えない条件においても，一貫した協調行動を維持できることを確認した。

次に，知覚の不整合が生じる条件下での提案手法の有効性を確認するため，同一のゴールランドマークが 2 個存在する環境で評価を行った。

定量評価の結果を表 2 に示す。提案手法は，MAPPO や Ours w/o MI と比較して高い成功率および低い目標位置誤差を達成した。これは，同一のゴールランドマークが複数存在する場合でも，ロボット間で一貫した協調行動が可能であることを示している。

ロボットの初期位置とゴールが同一の条件下でのシミュレーションの一例を図 5 に示す。図 5 より，MAPPO では 2 台のロボットが異なるゴールランドマークを推定し，荷物をゴールへ輸送できなかった。一方で，提案手法では一貫した協調行動により，荷物をゴールへ輸送できていることが確認できる。

以上より，複数ゴール環境において知覚の不整合が生じる条件下でも，一貫した協調行動が可能であることを確認した。

最後に，提案手法の実環境における有効性および汎化性を検証するため，2 台の四脚ロボット Unitree Go1 を用いた実験を行った。各ロボットは Intel RealSense D455 を搭載し，ロボット間の相対位置をモーションキャプチャにより計測した。ロボット間の相対位置は視覚情報から推定できるが，荷物を輸送しつつ他ロボットを視野内に保つための視点制御が必要となる。本実験ではこの問題を切り分けるために，他のロボットの位置をモーションキャプチャにより取得した。荷物は形状・質量・摩擦係数が固定された単一の物体を用いた。



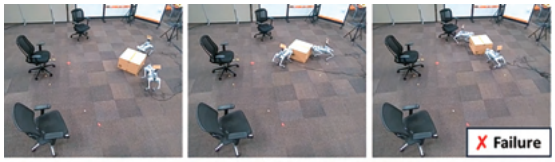
図 6　5 つの実環境シナリオ

実験では，異なるゴールランドマークを設定した 5 つのシナリオを用意し，各シナリオにつき初期条件を変えて 5 試行ずつ評価を行った。

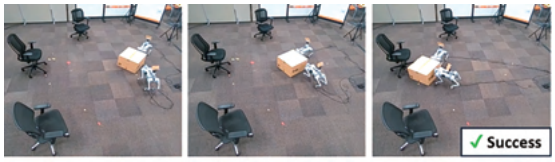
定量評価の結果を表 3 に示す。知覚の不整合が生じにくい Different-Height-Boxes および Single-Fridge では，MAPPO と提案手法のいず

表３　実環境における成功率

Task Scenario	MAPPO	Ours
Multi-Identical-Chairs	2/5	**5/5**
Multi-Colored-Chairs	1/5	**5/5**
Different-Height-Boxes	3/5	**5/5**
Single-Fridge	3/5	**4/5**
Clustered-Cases	2/5	**5/5**



(a)　MAPPO



(b)　Ours

図７　Multi-Identical-Chairs での実機実験の一例

れも高い成功率を示した。一方で，複数の類似物体が存在し知覚の不整合が生じやすいシナリオでは，提案手法のみが高い成功率を達成した。

同一の初期条件下における Multi-Identical-Chairs の実機実験の一例を図７に示す。図７より，MAPPO では荷物をゴールへ輸送できないのに対し，提案手法では荷物をゴールへ輸送できた。なお，他のシナリオの実験については，成果の URL を参照されたい。

以上より，提案手法は実環境においても有効であり，異なるゴールに対する汎化性を確認した。

［まとめ］

本研究では，分散知覚下における視覚・言語情報に基づくマルチロボット協調輸送のための学習手法を提案した。提案手法では，非対称な方策設計および相互情報量に基づく学習により，リーダー・フォロワーの役割分担を安定的に獲得することを可能とした。シミュレーションの結果，提案手法は知覚の不整合が生じる条件下においても高い輸送性能を達成した。また，実機実験においても複数シナリオで安定した協調輸送を実現し，異なるゴールランドマークに対する汎化性を有することを確認した。

一方で，本研究には以下のような制約がある。

(1) 単一の物体条件で評価しており，形状や物性の変化に対する性能低下の可能性がある。

(2) 他のロボットの位置をモーションキャプチャにより取得しており，完全分散化には至っていない。

(3) ロボット数の増加に対するスケーラビリティが未検証である。

今後は，多様な物体条件に対する汎化性の向上，視覚に基づく推定と視点制御の統合，およびロボット数に依存しない分散型強化学習手法との統合によるスケーラビリティの検証を進める予定である。

［成果の発表，論文など］

J. Y. Despature, K. Shibata, T. Matsubara, CoLF: Learning Consistent Leader-Follower Policies for Vision-Language-Guided Multi-Robot Cooperative Transport, arXiv preprint arXiv:2602.07776, 2026（国際論文誌に投稿中）

実験動画：https://www.youtube.com/watch?v=CrP99ikjCHo

［謝辞］

本研究のご支援を頂きました公益財団法人立石科学技術振興財団に厚く御礼申し上げます。

［研究助成（A）］

隠消現実感技術に基づく運転者支援システムの開発

2251016



研究代表者
（助成金受領者）　立命館大学　情報理工学部　教授　柴　田　史　久

［研 究 の 目 的］

現実世界と仮想世界の実時間での融合・表示をする拡張現実感（Augmented Reality; AR）や複合現実感（Mixed Reality; MR）の更なる発展形として，目の前の現実世界に実在する物体を視覚的に消し去る隠消現実感（Diminished Reality; DR）技術がある。DR 技術の要諦は，体験者の視点位置において除去対象物体によって隠された背景領域（隠背景）の画像を，その物体に重畳描画することによって，対象物体を映像的に隠蔽・消去・透過するというものである。本研究ではその応用事例として，DR 技術を活用して自動車の運転者に周辺の不可視領域を可視化するシステムを開発する。

［研究の内容，成果］

DR 技術を活用した運転者支援システムとして，他車両によって生じる不可視領域の可視化，および自車両によって生じる不可視領域の可視化，の研究に取り組んだ（研究成果 A）～ C））。

1. 見通しの悪い交通状況での評価 [A)]

他車両によって生じる不可視領域を可視化するシステムでは，ユーザが乗車している車両（自車両）と不可視領域を観測している車両（他車両）との間で不可視領域の情報を共有し，運転を妨げる要因を視覚的に除去する（図 1）。先行研究では，視認性と安全性を考慮した可視化表現である半隠消表示法が除去対象の視認性向上につながることが確認された［1］。「路肩に存在する駐車車両の背後から歩行者が飛び出す」という危険事象に対し，運転シミュレータを用いた実験により，半隠消表示法が事故回避行動を促進する有効性が示された［2］。しかしながら，他の危険な交通状況への有効性の評価が不十分であったため，本研究では「片側 2 車線道路において右側に大型車両が路肩駐車している状況での右左折」（以下，交通状況（I）（図 2））および「片側 2 車線道路において交差点で対向車が右折しようとしている状況下の右折」（以下，交通状況（II）（図 3））という 2 つの交通状況に対し，運転シミュレータを用いて評価実験を行った。具体的には，右左折する際に運転の妨げとなる車両を透過することで運転

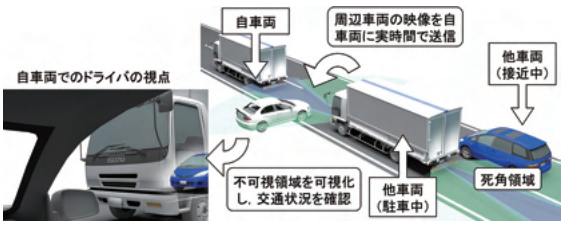


図 1　車車間における DR 技術の利用イメージ



(a) 右折



(b) 左折

図 2　交通状況（I）の様子


(a) 対向車が大型車


(b) 対向車が普通車

図3　交通状況（II）の様子


(a) 半隠消表示法
（方式①）


(b) システムなし
（方式②）

図4　比較する2つの方式

者の負担軽減につながるのかを運転操作に基づいて分析した。

実験は，運転シミュレータ CARLA［3］を用いて3枚のモニタによる画面固定式の環境で実施し，次の2つの方式を参加者間で比較した（図4）。

・方式①：半隠消表示法（提案手法）

・方式②：システムなし（通常運転）

方式①は先行研究［1］の結果から，除去対象を完全に透過するのではなく，半隠消表示法を適用した。方式②は通常の運転状態である。

十分な説明の上で同意を得た男性16名（平均22.5歳）を2群に分け，各群に2方式のいずれかを割り当て，交通状況（I）（II）で運転させた。評価項目は「経過時間」「アクセルオン回数」「ブレーキオン回数」とし，右左折の判断時間および交通状況の確認行動を分析した。

交通状況（I）では，経過時間とブレーキオン回数に有意差は認められなかったが，平均経過時間は方式①のほうが短かった。一方，アクセルオン回数は右折・左折ともに有意差が認められた。交通状況（II）でも右折時間とブレーキオン回数に有意差はなかったが，平均右折時間は方式①のほうが短かった。さらに，アクセルオン回数は対向車が大型車と普通車のいずれの場合でも有意差が認められた。全体として，半隠消表示法により平均時間は短縮され，アクセルオン回数も減少した。これは不可視領域の確認が容易になり，判断が早まったためであり，運転者の負担軽減につながったと考えられる。

2. 動的カメラ選択に基づく不可視領域の可視化 [B)]

周辺車両に複数のカメラが搭載される状況を想定した場合，すべてのカメラ画像を常時処理することによる計算負荷の増大やリアルタイム性の低下が課題となる。そこで本研究では，先行研究のシステムを基盤に，周辺車両との位置関係に基づいて使用するカメラを動的に選択する手法を導入する。実車環境で動作確認を実施するとともに，AWSIM［4］によるシミュレータ環境にヘッドマウントディスプレイ（HMD）を導入し，提案手法の没入型提示の可能性についても検討した。

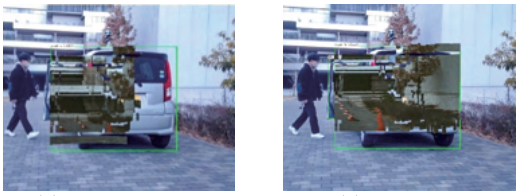
動的カメラ選択処理の概要は次の通りである。まず，自車両のカメラ画像から物体検出により周辺車両を抽出し，LiDAR 点群を画像に投影して位置を推定する。バウンディングボックス中心付近の点群から最も近い点を車両位置とみなして，その絶対方位角に基づいて使用するカメラを選択する。さらに，画角の重複領域では複数カメラ画像を合成し，それ以外では単一画像を用いることで，処理負荷を抑えつつ安定した可視化を実現する。

提案手法の有効性を確認するため，実車を用いた実環境およびシミュレータ環境において動作確認を行った。

実環境では，台車上に機材を搭載した簡易的な実験車両（自車両）と，LiDAR および2台の RGB カメラを搭載した周辺車両（ムーヴ）を用いて実験した（図5）。可視化結果の比較（図6）では，従来手法では対象領域の欠落が見られたのに対し，提案手法では車両位置に応



図 5　実車動作確認時の全体風景



(a) 左カメラのみ　(b) 提案手法

図 6　実車環境における可視化結果の比較

じたカメラ選択により安定した可視化が確認された。

シミュレータ環境では，実環境と同様の処理をシミュレータ上で行い提案手法の動的カメラ選択の動作を確認した。さらに HMD を導入し，視点移動に追従した可視化提示が可能であることを確認した（図 7）。以上より，本手法が実車およびシミュレータ環境の両方で有効に機能することを確認した。

3. 自車体透過システムの評価 [c)]

本研究では，自車体によって生じる不可視領域の可視化を目的とした「自車体透過システム」が，運転に不慣れなドライバーの運転感覚に与える影響を評価した。運転時には車体による遮蔽によって周囲の状況把握が困難となり，特に初心者にとって安全運転の妨げとなる。従来は



(a) 後方正面視点　(b) 右斜め後方視点

図 7　シミュレータにおける可視化結果の比較

車載モニタを用いた間接提示が一般的であったが，視線移動や認知負荷の増大が課題であった。そこで本研究では，DR 技術を用い，車体を透過して見せることで不可視領域を直接表示するシステムを開発した。

提案システムは，車両に搭載したカメラで取得した周辺画像を射影変換し，光学シースルー型 HMD 上に重畳表示することで車体を透明化する。これにより，ドライバーは自車体越しに路面や障害物を直接視認できる。実装では複数カメラを用いて広視野の情報を取得し，透過度の調整も可能とした。実車による動作確認では，ボンネットやピラーに隠れる領域が可視化され，不可視領域の解消が可能であることが示された。

評価では，運転シミュレータ（CARLA［3］および DReyeVR［5］）を用い，運転頻度の低い 20 名を対象に実験を実施した。透過条件は無透過，完全透過，半透過の 3 種類（図 8），走行環境は狭路直線，丁字路，曲線路の 3 種類（図 9）とし，計 9 条件で走行させた。走行後には，「運転のしやすさ」「車幅感覚」「自信」などに関する主観評価を収集した。

実験結果より，完全透過および半透過条件は，多くの項目で無透過条件よりも有意に高い評価を示した。特に狭路やカーブにおいては，透過



(a) 無透過条件　(b) 半透過条件　(c) 完全透過条件

図 8　自車体透過の透過条件


(a) 狭路直線


(b) 丁字路


(c) 曲線路

図 9　走行シーン条件

表示により障害物や道路形状を直接把握できるため，操作の見通しが向上し，心理的負担が軽減されたと考えられる。車幅感覚についても，透過映像により道路端や障害物との距離が明確になり，位置把握が容易となった。また，自信の評価も同様に向上し，運転操作に対する安心感の増加が示唆された。

一方，丁字路では透過効果が限定的であり，射影変換に伴う画像歪みが影響した可能性が指摘された。また，透過映像に注意が集中することで周囲への注意が低下する「注意のトンネリング」や，映像遅延，車内インタフェースの視認性低下などの課題も明らかとなった。

以上より，自車体透過システムは，特に精密な操作が求められる状況において，運転のしやすさ，車幅感覚，自信といった運転感覚の向上に寄与する有効な手法であることが示された。今後は，動的障害物を含む環境での評価や歪み・遅延の低減，提示方法の改善などを進め，実用化に向けた開発を進める。

［成果の発表，論文など］

A）小林良偉，中村文彦，木村朝子，柴田史久：安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法（6）―右左折を伴う見通しの悪い交通状況での評価―，情報処理学会第 87 回全国大会発表論文集，7Y-04, pp. 3-115 - 3-116（2025 年）

B）今井蒼，中村文彦，木村朝子，柴田史久：安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法（7）―動的カメラ選択に基づく死角領域の可視化―，情報処理学会第 88 回全国大会発表論文集，5U-09, pp. 4-43 - 4-44（2026 年）

C）長尾拓実，中村文彦，森田磨里絵，木村朝子，柴田史久：自車体透過システムが運転に不慣れなドライバーの運転感覚に与える影響，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol. 31, No. 2, pp. 161 - 171（2026 年）

［参考文献］

［1］藤重秀斗，若林優，松室美紀，木村朝子，柴田史久：安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法（4）―半隠消表示法の拡張と評価―，信学技法，Vol. 121, No. 436, ITS2021-63, pp. 1 - 6, 2022.

［2］藤重秀斗，松室美紀，木村朝子，柴田史久：歩行者飛び出し予測のための周辺車両の半隠消表示法，日本 VR 学会論文誌，Vol. 28, No. 3, pp. 141 - 151, 2023.

［3］A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and V. Koltun: CARLA: An open urban driving simulator, Proc. 1st Annual Conference on Robot Learning, PMLR 78, pp. 1 - 16 2017.

［4］TIER IV: AWSIM: Autonomous Driving Simulator, https://github.com/tier4/AWSIM (2025-12-28)

［5］G. Silvera, A. Biswas, and H. Admoni: DReyeVR: Democratizing virtual reality driving simulation for behavioural & interaction research, Proc. ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI '22), pp. 639 - 643, 2022.

［研究助成（A）］

静電容量の全支配因子を活用する人の皮膚感覚を模擬した液晶触覚素子の創製

2251017



研究代表者 （助成金受領者）	長岡技術科学大学 技学研究院　電気電子情報系	助教	柴　田　陽　生
共同研究者	長岡技術科学大学 技学研究院　電気電子情報系	教授	木　村　宗　弘

［研 究 の 目 的］

人間の皮膚は感覚器官としての役割を有し，皮膚に加えられている力（力覚）や，冷温感覚，怪我や出血による痛み（痛覚）などの情報は，電気信号に変換され，脳に伝達されることで認知している。言い換えれば，皮膚は外界の物理情報を電気信号として出力するセンサーとしての機能を有すると言える。一方で，義手・義足の利用者に視点を移すと，装着物から感覚をフィードバックする機能が欠如しているために，身体の一部としての一体感が不足し，長時間使用時の負担が大きいことが課題となっている[1]。また，近年開発が進むヒューマノイドロボットでは，人間の機能を忠実に再現できることで，人手不足の問題を抱える業界や危険を伴う作業現場への導入が期待されている。しかし，人間の特性である「器用さ」をどう再現するのかが技術的課題として立ちはだかっている。従って，人間の皮膚感覚を模擬した触覚センサー素子の実現は，障害者の感覚補助やソフトロボティクス技術の向上につながり，人間社会をより豊かなものに変貌させることが期待されている。

このような背景の下で，我々は圧力と日常生活で感じる温度を検知できるハイブリッドな触覚センサーの実現を目指した。柔軟な圧力センシングでは，感圧層のヤング率（硬さ）を下げることで感度を上げる研究が先行し，比較的大きな圧力は検出できるものの，風圧のような微小圧力（数 Pa ～ 5 kPa 程度の領域）の満足な検出には至っていない。本研究では電子ディスプレイ材料として広く用いられている液晶材料と，シリコンエラストマー（ゴム弾性を有する高分子）の物理的性質の併用に焦点を当てた。既に著者らは，液晶を電極付きのパネルで挟み込んだコンデンサ構造の印加圧力－静電容量の関係を調査し，液晶の分子配向（特定の方向に分子が規則的に並ぶこと）の戻り応答によって，継続して印加された定圧力の検知が困難であることを報告している[2]。そこで，配向戻りの応答を改善し，静電容量の変化量を稼ぐ素子構造を本研究で提案する（図 1）。詳細は後述す

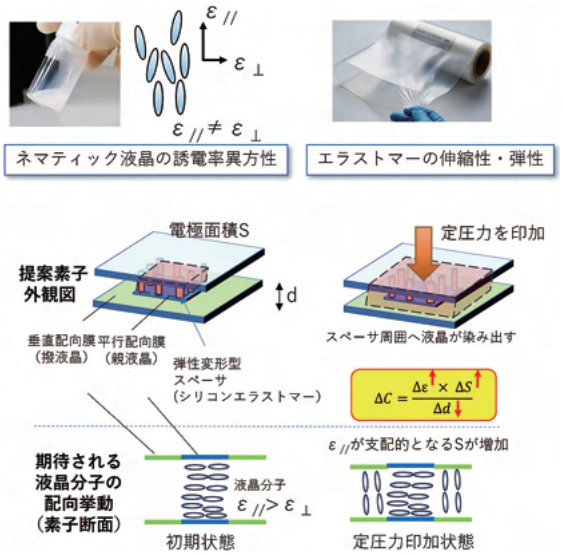


図 1　本研究で提案する触覚センサーの概略図

るが，圧力印加によって静電容量値を支配する因子を全て活用した構造により，高感度化を狙いとする。本研究では，液晶分子の配向戻り応答を抑制した定圧力検出技術を確立するとともに，触覚素子に資する液晶デバイスの設計指針の提示を目的とした。

［研究の内容，成果］

1. 液晶の流動を活用する力覚・感温素子の概要

液晶は，液体の流動性と結晶固体の有する分子秩序を併せ持つ物質の状態である。この液晶には，誘電率異方性（$\varepsilon_{//}$ と $\varepsilon_{\perp}$が異なる）があり，流れの方向に分子長軸を向けるように流動するため，圧力の印加によって液晶の染み出しが生ずると，分子配向（誘電率）の変化が起きる。この変化した配向を固定することと，圧力をリリースした後に液晶が初期位置に戻る機構を設ける意図で，基板面内には，親液晶・疎液晶性の表面エネルギーの異なるパターニングを施す。この液晶層の厚さに復元性を持たせる目的で，ゴム弾性のあるシリコンエラストマー（Polydimethylsiloxane: PDMS）の柱構造を形成する。このようにすると，静電容量を支配する３つの因子（電極間距離 d，感圧層の誘電率 ε，液晶の誘電率が実効的に効く電極面積 S）を活用したセンサーが構築できると考えた。また，液晶の粘弾性には温度依存性もあるため，温度の違いを検出できることも期待される。

2. シリコンエラストマー界面の液晶配向評価

図１に示した提案構造の設計において，PDMS の柱スペーサ界面における液晶分子の配向状態を理解し，柱スペーサの位置を検討する必要がある。そこで２枚のシリコンエラストマー薄膜で種々の液晶材料をセル厚 10 μm で挟み込んだセル構造を作製し，直交ニコルの偏光顕微鏡像を取得し，液晶分子配向について評価した（図 2）。

セルに用いた基板は，ガラス基板上に熱硬化性の PDMS（SYLGARD™ 184, Toray Dow Corning）をスピンコートし，約１ μm の厚さの薄膜を形成している。この PDMS 薄膜を対向させ，液晶材料をセル厚 10 μm の厚さで挟むことで作製した。使用した液晶材料には，分子末端の極性基が異なる液晶材料を検討した。その結果，極性基がシアノ基では PDMS 表面に対して垂直配向，フルオロ基ではランダム水平配向を示すシュリーレン組織構造が発現した。液晶の配向を決定する因子として，固体基板の表面エネルギーが液晶よりも低い場合は垂直配向し，高い場合には水平配向する経験則（FCK 則 [3]）が知られている。このことから，基板の表面エネルギーの変化を試みた。

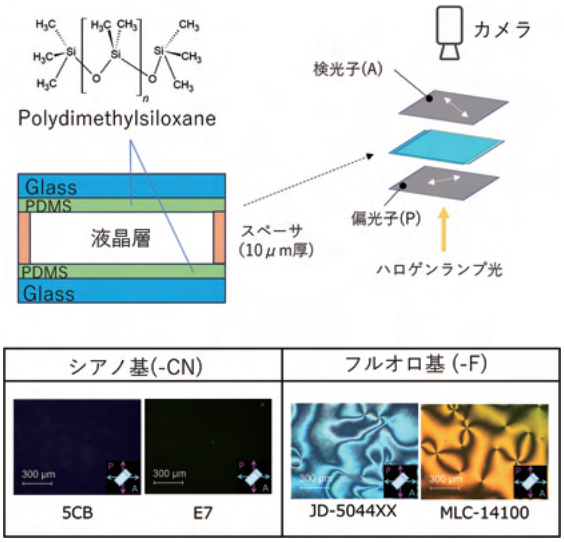


図２　PDMS 薄膜で挟んだ液晶セルの配向評価

PDMS の表面エネルギーに変化を与えるため，酸素プラズマ照射を試みた結果を図３に示す。液晶 5CB の PDMS セルでは，未処理では垂直配向を示す暗状態が得られていたが，酸素プラズマ処理を施すと配向秩序度の高い液晶相に特有のファンテクスチャが観測された。これを 150℃ まで温め，室温に戻すアニール処理を施すと，フルオロ基の液晶を用いた場合と同様にランダム水平配向を示すパターンが得られた。

これらの現象を考察するために，Owens-Wendt's equation [4] に基づき，純水，ジヨードメタン，グリセリンの３種類の液滴の接触角を

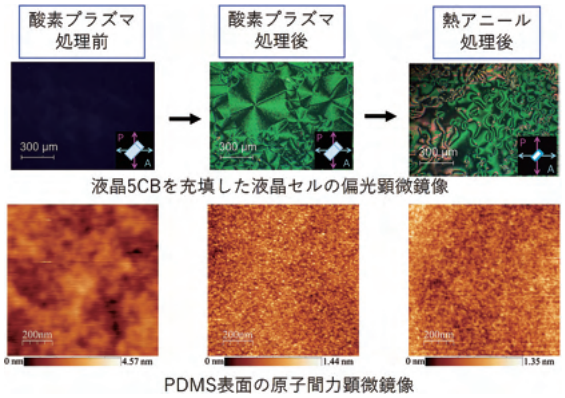


図 3　PDMS 薄膜の表面処理による液晶の配向変化

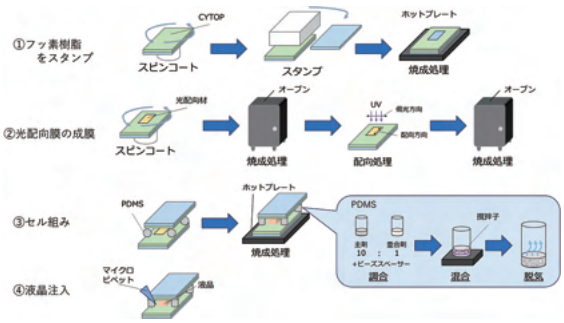


図 4　提案素子の作製手順

表 1　PDMS 薄膜の表面エネルギーの評価結果

PDMS 薄膜の表面処理	表面自由エネルギー［mJ/m^2］	極性項［mJ/m^2］	分散項［mJ/m^2］
未処理	20.88	0.07	20.82
酸素プラズマ処理後	70.91	49.36	21.55
酸素プラズマ処理＋熱アニール処理	47.22	27.76	19.45

測定することで，各処理過程における PDMS 固体膜の表面エネルギー測定を行った。この結果を表 1 にまとめた。未処理の PDMS の表面エネルギーは 20.88 mJ/m^2 と低く，液晶が垂直配向を示すことが予想されるが，フッ素系液晶では水平配向を示したことから，FCK 則の単純な適用だけでは配向予測ができないことが分かった。また，PDMS 表面に酸素プラズマ処理を施すと，本来は垂直配向を好むシアノ系液晶（5CB や E7）を含め，すべての液晶分子がランダム水平配向へと転移した。表面エネルギーの極性成分の増加がみられることから，プラズマ処理が PDMS 表面に分極を生じさせるプロセスとして働き，誘起された界面極性相互作用が液晶分子の水平配向を促したと考えられる。PDMS 表面の微細形状を原子間力顕微鏡で観察したところ，未処理の PDMS ではナノスケールで見ると約 4 nm の高低差があり粗い起伏（短ピッチのうねり）が存在している。プラズマ処理後は，表面の凹凸が平滑化され，うねりが消失して水平配向の促進に寄与していることが窺える。アニール（熱）処理後：プラズマ処理後に 150℃ で加熱すると，高分子鎖の熱運動によって誘起された分極が解消され，表面エネルギーが緩やかに低下したと考えられる。しかし，AFM 観察ではアニール後もプラズマ処理による平滑形状が維持され，表面エネルギーが低下しても液晶は水平配向を維持し続けた。結果として表面形状が配向に与える影響は比較的小さく，極性成分を中心とした表面エネルギーが配向転移の原因であると考えられる。

3.　提案素子の作製および定圧力検知の検討

前項 2. において，PDMS 表面ではシアノ系の液晶は垂直，フッ素系液晶では PDMS 表面に対してランダム水平であることが分かり，表面処理により配向状態を変えることが可能であることを見出した。この結果を踏まえ，提案素子（図 1）の作製を検討した。

図 1 に示すコンセプトが，ネマティック液晶の圧力検知で課題となっていた配向戻り現象を解消し，定圧力検知を可能とするか否かを検証するため，図 4 のように，ガラス基板で作製を行っている。撥液晶性領域にはフッ素樹脂 CYTOP（旭硝子社）を用い，親液晶性領域には偏光紫外線の照射で配向処理ができる光配向

膜を用いている。PDMSの版でスタンプしたCYTOP膜上では，光配向膜が弾かれるために，基板中央部に配向膜が塗布形成できる。なお，セル厚を安定的に作製する都合上，PDMSの柱に所定の直径を有するガラスビーズを混合させている。

キャパシタンスの経時変化は，LCRメータ（岩崎通信，PSM3750）により取得し，印加した交流電圧の周波数は1 kHzとした。印加する圧力荷重は，フォースゲージ（アイコーエンジニアリング社）で制御した。

図5は，作製した素子に対しセル上面から微小圧力域の力を印加・リリースした際のキャパシタンス応答である。これより，圧力印加中は上昇した静電容量値がほぼ一定値に保たれており，圧力をリリースすると元のキャパシタンス値C_0に戻ることが確認できる。圧力印加中は，液晶が親液晶性領域から撥液晶性領域へ流動していることは別途，偏光顕微鏡像で確認をしている。従って，本提案コンセプトにより，液晶を感圧層とするセンシング素子で定圧力の検知に成功した。次に，様々な圧力を加えた際のキャパシタンスの感度（最大到達キャパシタンスをCとすると，$(C-C_0)/C_0$）を図6に示す。

セル厚25 μmを除く条件では，セル構造に用いる上下のガラスの厚みが1.1 mmと厚く，PDMSの柱に硬度のある粒子スペーサを混合していることから，圧力に対してセル厚の変化が乏しいことから，感度も最大で0.12 kPa^{-1}となっている。セル厚が5 μmと薄い場合は，上下基板の配向膜による液晶の配向規制力が強まっているためで，15 μmのセル厚となると，バルク液晶の流動を発生することが困難なため，セル厚10 μmの感度が最も良くなったと考えられる。一方で，セル用のガラス基板の厚みを0.2 mmまで薄くした素子（セル厚25 μm）では，感度が2倍に向上した。さらに印加圧力とキャパシタンスの変化量が1:1に対応しているダイナミックレンジが拡張できていることが分かる。つまり素子の変形自由度が高まると，幅広い圧力レンジの検知に対応可能な素子を形成できることが分かった。試作が容易ではないが，今後，電極付きのプラスチックフィルム基板で本提案構造の作製ができれば，さらなる感度と検出レンジの向上が見込まれる。また，今回使用した液晶は，親液晶性/撥液晶性の領域で所望の配向をする5CB（誘電率異方性の最大値Δε = 11.0）をモデルケースとして取り上げたが，誘電率異方性の大きい材料を導入することでキャパシタンスの変化量をより大きく与えることが可能と考えられる。

4. 温度検知能の検討

最後に，環境温度の違いを電気信号として検出することを検討した。最初にキャパシタンスのみで圧力と温度の検知を検討したが，異なる温度条件であってもキャパシタンス値が重複することが避けられないことが分かる（図7 (a)）。そこで，配向変化に対して変化の鈍い抵抗Rで温度の検知が可能ではないかと考え，提案素

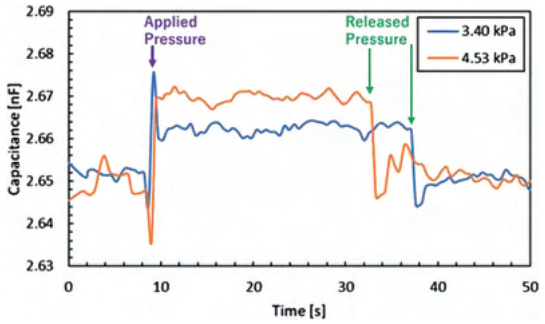


図5　微小圧力を印加したキャパシタンス応答

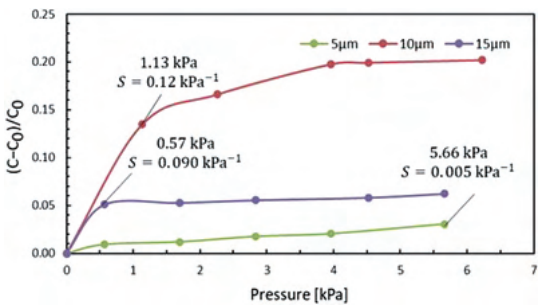
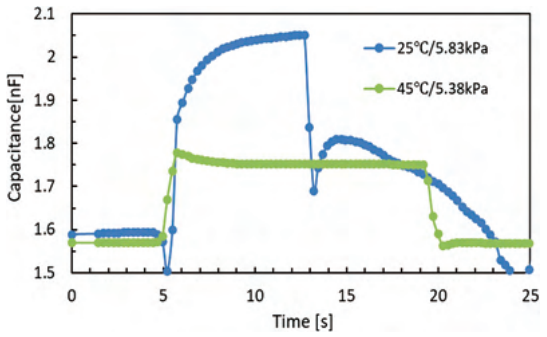
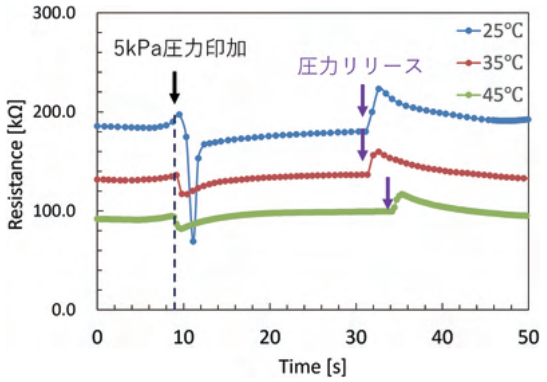


図6　提案素子の感度評価（セル厚の依存性）



(a)



(b)

図 7　RC 成分分離による温度検知能の検討（a）キャパシタンス変化（b）抵抗変化

子構造に抵抗 R とキャパシタンス C からなる並列回路を仮定し，測定したインピーダンスから抽出された R の値で温度情報を読み取ることを検討した（図 7（b））。冒頭でも述べたように人間の皮膚が検知できる温度帯を想定しているため，ここでは 25℃，35℃ と，少し熱めのお湯を想定した 45℃ で保った素子に圧力を加える試験を行った。圧力を印加した直後は不安定な抵抗の変動が見られる場合もあるが，抵抗値の重複が少ない経時変化が得られたと考えている。

5. まとめ

本研究では，人間の皮膚感覚に近い特性を持った触覚センサーデバイスを検討するため，流動性と誘電率異方性を有する液晶と，柔らかさとゴム弾性を有するシリコンエラストマーの併用による力・温度のハイブリッド検出を目指した。その中で，これまで瞬間圧力の検知に制約されていた液晶のセンサー機能を，低圧力検知に拡張させ，かつ微小圧力域のセンシング（数 kPa 台の圧力の検出能を見出すこと）に成功した。しかし，圧力と温度の検出を世界最高レベルの圧力検出感度（例えば圧力の場合，0.5 kPa^{-1} 以上）を持ったセンシング特性を得るには至らなかった。この理由として，シリコンエラストマー単体の柱構造の高さを安定して作製できる技術や，現状の面内パターニング構造に対して感度を上げるための液晶の選定に制約が加わり，単純に誘電率異方性（Δε）が大きな液晶材料を現状の素子構造に適用できないといった種々の課題が挙げられる。今後，作製工程の見直しも含め，圧力検出と温度検出の機能をデバイス面内で分離した素子設計によってこれらの課題を解決してゆきたいと考えている。

［参考文献］

［1］L. Jabban et al. IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng. Vol.30, pp.738–747 (2022).

［2］Y. Shibata et al. IEICE Trans. Electron. E104C, No.2, pp.81–84 (2021).

［3］Creagh LT et al. Mol Cryst Liq Cryst. Vol.24(1–2), pp.59–68 (1973).

［4］Owens DK et al. J. Appl. Polym Sci.Vol.13, No.8, pp.1741–1747 (1969).

［成果の発表，論文など］

1. 那須若菜，柴田陽生，木村宗弘，“液晶を感圧層とする定圧力センシングに対する面内配向パターン制御の効果”，2025 年日本液晶討論会，PA-05，京都国際会館，2025 年 9 月
2. 那須若菜，柴田陽生，木村宗弘，“柱状シリコンエラストマーと液晶の複合セル構造による圧力センシング感度の評価”，第 73 回春季応用物理学会，18a-PB1-3，東京科学大学，2026 年 3 月
3. Yuki Imamura, Haruto Nakai, Nasu Wakana, Yosei Shibata, Munehiro Kimura: Surface topology and intermolecular interactions determining the liquid crystal molecular alignment at the silicone elastomer surface, Liquid Crystals (accepted, March 23, 2026)

［謝辞］

本研究の実施にあたり，ご支援をいただきました（公財）立石科学振興財団の関係者の皆様に厚く御礼を申し上げます。

［研究助成（A）］

柔軟性立体可変抵抗型力センサによる血管モデル機能解析システムの構築

2251018



研究代表者
（助成金受領者）

東京大学
大学院情報理工学系研究科

助教　趙　炳郁

［研究の背景と目的］

血管疾患は世界中で年間 1800 万人以上の死亡者をもたらしており［1］，特に平滑筋組織の役割を理解することは血管機能の解明において重要である。これまで，lab on a chip，バイオプリンティングや組織工学分野において様々な平滑筋組織を含む血管モデルが提案されてきた［2-4］。しかし，従来の研究では収縮可能な血管モデルが欠如していたため，体内血管との環境となるという問題があった。また，従来の血管モデル評価では，形態観察や蛍光観察に基づく解析が中心であり，平滑筋組織が発生する収縮力そのものを連続的に読み出すことは困難であった。

この問題を解決するためには，まず動的に収縮が可能な血管モデルを体外で構築し，収縮力などを定量的に計測可能なシステムが必要である。本研究では，血管断面を模したリング状平滑筋組織と，3D プリントした柔軟デバイス上に形成した可変抵抗型力センサを組み合わせ，平滑筋組織の収縮力を定量評価できる計測システムを構築することを目的とする（図 1）。

［研究の内容］

まず，COMSOL シミュレーションにより柔軟性ピラーに加えられる力と変位との関係性を計算した。ピラーが厚すぎると平滑筋組織の収縮による変位量が小さくなるため，可変抵抗を構築しても有意味な電気信号として変換することが困難である。逆に，ピラーが薄い場合は平滑筋組織の収縮に耐えられず，デバイス全体の破損につながる可能性があるので，ピラーの厚みの検討を行った。

続いて，柔軟性の高い樹脂である BioMed Elastic50A（Formlabs 社）と LCD 型 3D プリンターを用いることで円形状にピラーが配置されているマイクロデバイスを造形した。造形後は，可変抵抗層を形成するため，スパッター装置を用いることで Cr/Au 膜を蒸着し，ピラー表面に可変抵抗層を形成することで力センサを構築した。各ピラーにはブリッジアンプ回路が接続されており，ピラーが変形する時に生じる電圧差を増幅することで電気的な信号を取得した。また，培養液中で通電によるショートや電気分解そして柔軟性樹脂からの細胞毒性物質の

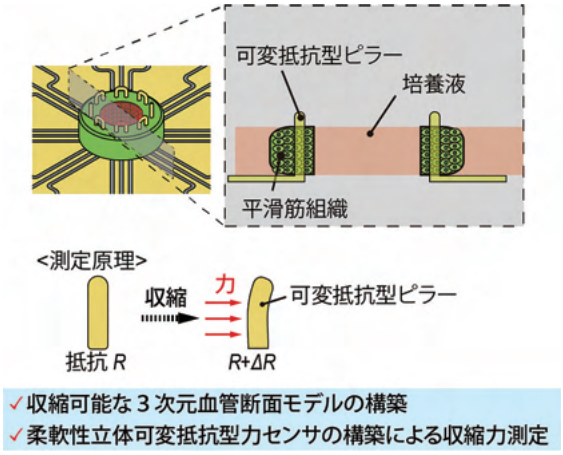


図１　本研究のコンセプト図

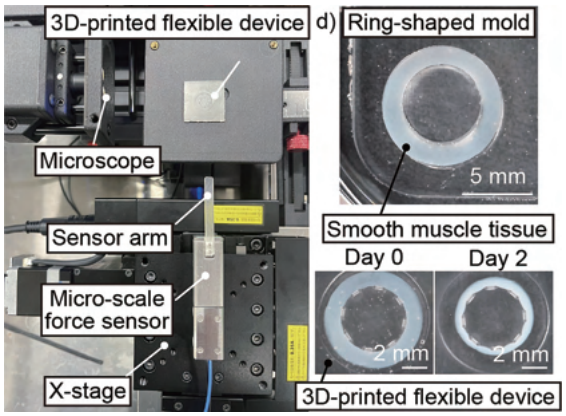


図２　可変抵抗型力センサのキャリブレーション

浸出を防ぐため，構築した力センサの表面に生体適合性が高いパリレン C を厚さ 4 μm で蒸着した。そして，構築した可変抵抗型力センサと力のキャリブレーションを行うため，ロードセルと高精度 x ステージを用いてピラーの変形量，力および電圧差との相関を求めた（図 2）。

体外で収縮可能な血管モデルを構築するため，本研究ではまずリング状の平滑筋組織の構築を試みた。ヒト動脈平滑筋細胞を 3 × 10^7 cells/mL の濃度で I 型コラーゲンに懸濁し，リング状のモールド内で 30 分間架橋することでリング状の組織を構築した。架橋の後，培養液内で 2 ～ 3 日培養することで平滑筋組織の成熟を促した。構築した平滑筋組織の細胞配向および成熟状態を確認するため染色を行い，蛍光顕微鏡により観察した。

最後に，構築した可変抵抗型力センサによる収縮力を評価するため，平滑筋組織を構築後，ピラーに接するように，日ごとに収縮力を定量的に評価した。

[研究の成果]

図 3 は直径 300 μm のピラーに力を加えた際の COMSOL シミュレーションとロードセルによる力と変形量の関係を示している。ピラーの変形量が 200 μm までは力と線形関係であることが確認され，シミュレーションの値と実測値

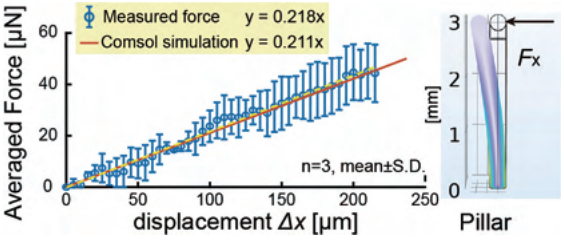


図３　COMSOL シミュレーションおよびロードセルによるピラーに印加される力と変形量関係

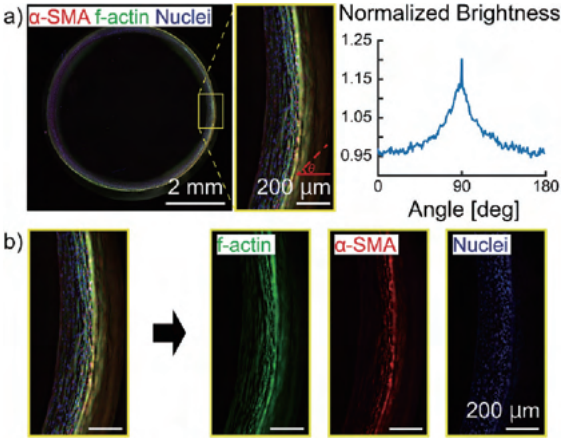


図４　平滑筋組織の蛍光顕微鏡画像。a）配向度評価，b）染色画像

もほぼ一致していることが分かった（図 3）。ピラーの直径を 300 μm より小さく設計すると，3D プリンターによる造形が困難であり，大きくするとセンサの感度が落ちることから本研究で使用するピラーの直径を 300 μm とした。

続いて，リング状に構築した血管断面モデル（平滑筋組織）の評価について述べる。まず，図 2 に示すようにコラーゲン内の平滑筋細胞は張力を発生させるため，培養するとともにコンパクション（Compaction）を行う。培養中にコンパクションを引き起こす際に，モールドの柱に沿って円周方向に収縮が生じるため細胞は同心円状に配向する。その配向性を評価するため細胞の骨格を F-actin により染め，FFT 解析により配向度の評価を行った（図 4a）。その結果，細胞配向が 90 度の方向において最大のピークが観察され，これは細胞が同心円状に配向していることを示す。

また，構築した平滑筋組織が単なる細胞の凝

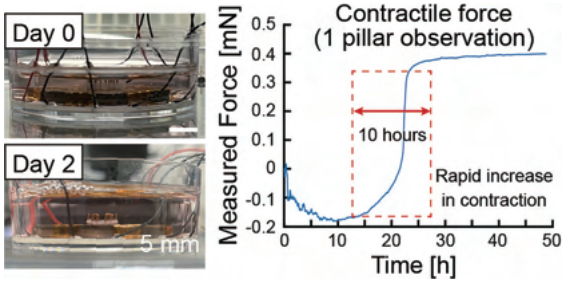


図５　血管断面モデルの収縮力の計測

集体ではなく平滑筋組織としての特徴を確認するため平滑筋組織に特異的に発現するタンパク質であるα-SMA（Smooth muscle actin）による染色を行った。蛍光顕微鏡により観察した結果，組織全体にわたりα-SMAが発現が確認され，２日間の培養においても十分平滑筋組織としての特徴を有する組織の構築が可能であることを確認した（図4b)。これらの結果により，本研究で提案するリング状の血管断面モデルは体内の動脈に観察されるような同心円状の平滑筋の配向を示すだけではなく，平滑筋特有のタンパク質の発現をすることがわかった。

最後に，構築した可変抵抗型力センサに血管断面モデルを装着し，平滑筋組織の収縮力の経時変化を測定した。図５は血管断面モデルを装着した後の50時間におけるピラー１本あたりに印加される力を測定した結果である。最初の10時間はピラーと組織の密着およびコラーゲン内部での安定化に要する時間だと考えられ，そのため基準値より低い値や不安定な挙動が観察された。10時間以降は組織のコンパクションが進行し，急激にピラーに印加される力が増加することが観察された。25時間以降は収縮力に変化がほとんど見られず，これは組織のコンパクションによる収縮力が収束したためであると考えられる。

[今後の展望]

本研究の成果は，三次元組織工学と柔軟力学センサを統合し，血管モデル研究に新たな評価軸を導入した点にある。従来の血管モデル研究では，形態，タンパク質発現，透過性などが主要な評価対象であったが，本研究では収縮力という物理的・機能的パラメータを取得できるようになった。血管疾患においては平滑筋の異常収縮，硬化，および炎症応答との相互作用が重要であるため，本研究で提案するシステムは病態解析や薬剤効果判定に応用が可能であると考えられる。また，電気信号として連続的に取得できる点は，自動解析や高スループット評価への展開にも可能である。さらに，本研究で用いた柔軟材料と3Dプリンティングに基づくデバイスは，平滑筋組織に限らず，他の収縮性組織モデル（骨格筋や心筋）へ応用も期待される。

＜参考論文＞

[1] Bhotla, *et al.*, Prevalence of Cardiovascular Diseases in South Asians: Scrutinizing Traditional Risk Factors and Newly Recognized Risk Factors Sarcopenia and Osteopenia/Osteoporosis, *Curr. Probl. Cardiol.* 49, 102071 (2024).

[2] Günther, A. *et al.*, A microfluidic platform for probing small artery structure and function. *Lab Chip* 10, 2341-2349 (2010).

[3] Gao, G. *et al.*, Tissue-engineering of vascular grafts containing endothelium and smooth-muscle using triple-coaxial cell printing, *Appl. Phys. Rev.* 6, 041402 (2019).

[4] Park, *et al.*, 3D bioprinted multilayered cerebrovascular conduits to study cancer extravasation mechanism related with vascular geometry, *Nat. Commun.*, 14, 7696 (2023).

【成果の発表，論文など】

＜国際学会発表＞

1) D. Lee, ○**B. Jo**, M. Nie, and S. Takeuchi, A 3d-printed flexible device sensor for detecting concentric contractile force in *in vitro* vascular smooth muscle tissue model, ***Transducers2025***, Orland, USA, Jun. 29- Jul. 3, 2025. (Oral)

2) D. Lee, ○**B. Jo**, M. Nie, and S. Takeuchi, Real-time electrical readout of concentric contractile force ring-shaped smooth muscle tissue using a 3D flexible variable resistor, ***μTAS2025***, Adelaide, Nov. 2-6, 2025. (Oral)

＜特許＞

○**B. Jo**, D. Lee, M. Nie, and S. Takeuchi,“収縮力測定装

置，収縮力測定システム，及び環状の組織の収縮力測定方法，”特願 2025-167668

＜その他＞

2025 年度（秋学期）東京大学情報理工学系研究科　卒業生修士総代表：Lee DongWoo

（写真 1：本研究テーマ遂行）



写真 1　情報理工学研究科修士卒業総代表 Lee DongWoo（本研究テーマ遂行）

［研究助成（A）］

病理医が信頼を寄せる人協調型 AI 診断システムの開発

2241017



研究代表者 （助成金受領者）	香川大学 医学部歯科口腔外科学講座	准教授	助　川　信太郎
共同研究者	岐阜大学 工学部電気電子・情報工学科情報コース	教授	原　　武　史

［研 究 の 目 的］

病理診断は，病理医が顕微鏡下で組織構造や細胞の形態を詳細に観察し，所見を総合的に判断する形態学的診断であり，極めて高度な専門的技術と経験を要する分野である。中でも，口腔内は常に外界からの物理的・化学的刺激を受ける環境下にあり，炎症や再生，変性といった組織反応が多彩に起こるため，得られる病理組織像も複雑かつ多様であることが知られている。したがって，これらの病理組織像に対して正確な診断を行うには，長年にわたる豊富な臨床経験と体系的な教育を通じた熟練した診断能力が不可欠である。

しかしながら，本邦においては病理医の人材不足が長年にわたって深刻な問題となっており，特に高度な専門性が求められる診断分野においては，限られた病理医に過度な負担が集中しているのが現状である。こうした背景のもと，近年では人工知能（AI）技術の応用によって，病理医の業務を支援しようとする試みが進められてきたが，実用化には未だ至っていない。その主な要因として，病理診断が単なる画像認識を超え，医師の経験則や臨床文脈を踏まえた複合的な判断によってなされる点が挙げられる。すなわち，AI が提示する診断に対して，病理医がどの程度信頼を寄せ，どのような条件下で AI の出力を参考にするのかといった，人と AI の協働関係の構築が十分に検討されてこなかったことが，実装の障壁となっている。

さらに，AI による診断支援の有効性は客観的な性能評価だけでなく，医療現場での受容性や実際の意思決定に与える影響の理解が不可欠である。本研究では，病理診断支援に資する AI システムの開発を行うとともに，病理医が AI とどのように協調し，適切に信頼を置くかという「人と AI の協働における信頼形成のプロセス」を明らかにすることを目的としている。これにより，単なる診断精度の向上にとどまらず，病理医が AI を道具として使いこなしながら，自らの専門性を維持・強化できる診断体制の構築に寄与することが期待される。また，AI に対する過信や不信といった極端な依存の回避を促し，医療現場における持続可能かつ実践的な協働モデルの確立に貢献する。

また，医師による AI 診断への過信や不信の両極端な依存傾向を避け，バランスの取れた判断を導くための枠組みを提示することで，医療分野における人協調型 AI の新たな実装モデルとして広く応用可能な診断支援システムの確立を目指す。

［研究の内容，成果］

本研究における人協調型 AI 病理診断システム開発の技術的課題は，①病理専門医と同等の安定した診断パフォーマンスを発揮できる深層学習モデルの構築，②病理医が AI 診断結果に

対して過信や不信に陥ることなく適切な距離感をもって協調的に判断を行うための信頼較正手法の構築である。具体的には，専門医による正確な診断ラベリングを用いた高品質な病理画像データセットの整備とモデル訓練を実施するとともに，AI 補助診断に対する病理医の信頼度を動的に推定し，過剰または過小な依存を検出・調整する信頼較正 AI の設計・実装を進める。これにより，人と AI の協働による診断支援の質的向上に資する診断インターフェースの開発に向けて，評価と検証を実施した。

1）データセットの作成

本研究では，香川大学医学部附属病院歯・顎・口腔外科において治療された口腔癌症例を対象とし，両施設の倫理委員会の承認を得た上で取得したデータを用いた。症例ごとの病理標本は，ガラススライドからバーチャルスライド（Whole Slide Image: WSI）に変換して使用した。スライドのスキャンには，Ventana DP 200 スライドスキャナー（ロシュ社，スイス・バーゼル）を用い，WSI を作成した。得られた WSI は，QuPath ソフトウェア（https://qupath.github.io バージョン 0.4.1）を用いてタイリング処理を行い，病理診断に最適とされる設定で画像を切り出した。切り出し画像は倍率 1.0 とし，1 辺あたり 768 ピクセルの正方形領域を 192 ピクセルずつ重複させてセグメント化し，最終的に 256 × 256 ピクセルの PNG（Portable Network Graphics）形式の画像データを作成した。

また，WSI の評価およびアノテーションは，日本口腔病理学会認定の専門資格を有し，15 年以上の実務経験を有する口腔病理専門医によって実施された。これにより，高精度かつ信頼性の高いラベリングデータセットの構築をおこなった（図 1）。

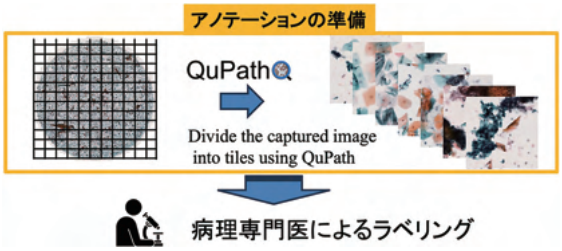


図 1　専門家によるラベリング

2）病理診断 AI における深層学習モデルの構築

本研究では，病理診断支援を目的とした AI モデルとして，深層学習（Deep Learning）を用いた構築を行った。モデルアーキテクチャとしては，画像認識において高い性能を示す畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network: CNN）を VGG16 ならびに ResNet50 採用し，各種パフォーマンス指標に基づき検証を行った。最適化アルゴリズムについては，一般的な SGD（確率的勾配降下法）に加えて，より効率的な学習が可能なモメンタム付き SGD（SGDM）および，近年提唱され精度改善が期待されるシャープネス認識最小化（Sharpness-Aware Minimization: SAM）を比較対象として選定した。SGDM のモメンタム係数は 0.9 に設定した。SAM においては，近傍サイズ（ρ）の最適化を目的として，グリッドサーチにより {0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5} の各値について性能を検証した。さらに，学習率の調整に関しては，学習率スケジューラの有無による影響を評価した。学習率スケジューラでは学習率減衰を使用し初期学習率は 0.01 に設定し，学習過程における性能変化を詳細に解析した。

これらの検証を通じて，病理画像に対する診断支援 AI として最適な学習条件およびモデルを検証した。

これらの検証を行い，深層学習のベストモデルは ResNet50，最適化アルゴリズム：SAM（近傍サイズ 0.025），学習率スケジューラありが最も高いパフォーマンスを示した（表 1）。

3）AI 診断が病理診断に与える影響の検証

本研究では，病理医と AI による協調的意思決定が，より高い診断満足度とパフォーマンス

表 1

Optimizer	Learning rate	Accuracy	Precision	Recall	F1 score	AUC
		SD	SD	SD	SD	SD
		95%CI	95%CI	95%CI	95%CI	95%CI
SGD	w/o Scheduler	0.8879	0.8518	0.6501	0.6937	0.9020
		0.0016	0.0099	0.0089	0.0095	0.0075
		0.8873–0.8885	0.8482–0.8553	0.6469–0.6533	0.6903–0.6971	0.8993–0.9047
	with Scheduler	0.8970	0.8049	0.7581	0.7780	0.9098
		0.0026	0.0066	0.0064	0.0057	0.0030
		0.8961–0.8979	0.8026–0.8073	0.7558–0.7604	0.7759–0.7800	0.9087–0.9108
SAM	w/o Scheduler	0.8870	0.8529	0.6438	0.6872	0.8766
		0.0004	0.0024	0.0017	0.0019	0.0069
		0.8868–0.8871	0.8521–0.8538	0.6432–0.6444	0.6875–0.6879	0.8741–0.8791
	with Scheduler	0.9016	0.8534	0.7139	0.7578	0.9328
		0.0018	0.0072	0.0124	0.0098	0.0016
		0.9010–0.9023	0.8509–0.8560	0.7094–0.7183	0.7543–0.7614	0.9322–0.9334

SD: standard deviation, 95% CI: 95% confidence interval, AUC: Area under the ROC curve

を達成するためには，単に AI の診断精度を向上させるだけでは不十分であると考える。医療人が AI の出力をどのように受け取り，どの程度信頼し，最終的な診断にどのような影響を受けるのかを明らかにすることが，本研究の重要なテーマである。そのため本研究では，AI 診断結果が病理医の診断意思決定に与える影響度の定量的検証を行った。検証には，前段で開発・選定された最適深層学習モデル（ベストモデル）による診断出力を使用した。

検証プロセスは以下の手順で実施した。

病理医に対し，AI の出力を提示する前に対象画像の事前診断を独立に実施。次に，同一画像に対する AI の診断結果および診断確信度（信頼度スコア）を提示した上で，改めて診断施行し，AI 出力が診断に与える影響を評価した（図 2）。

影響度の定量化には，連続信頼法（Continuous Confidence Rating）を採用した。これは，各病理医が画像ごとにそれぞれの診断ラベルについて，0 ～ 100 の視覚アナログスケールを用いて信頼度スコアを付与する方法である。得られたスコアは SoftMax 関数を用いて正規化し，3 分類の出力合計が 1.0（100%）になるよう変換を行った。

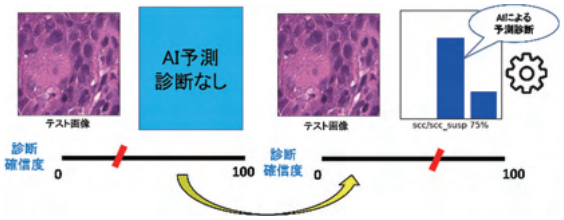


図 2　AI 補助診断に対する確信度の変化の分析
AI を参考にしたどの画像でより効果的かを解析

AI の支援によって診断がどのように変化したか，また信頼度にどのような変容が生じたかについては，ROC 曲線（Receiver Operating Characteristic Curve）および AUC（Area Under the Curve）を用いて定量評価を実施した。また AI 診断の有無の影響度を効果量にて評価をした。効果量は Cohen によって提案された指標を Sawilloski によって提案された基準に基づいて判断した。

結果を図 3 に示す。AI 診断の有無によるマクロ AUC およびミクロ AUC の平均値の間には，いずれも統計的に有意な差が認められた（$p = 0.031$）。このことから，AI の提示が病理医の診断性能に影響を及ぼしていることが明らかとなった。さらに，AI 診断の導入による効果量はマクロ AUC においては 1.46，ミクロ AUC においては 2.04 という結果が得られた。

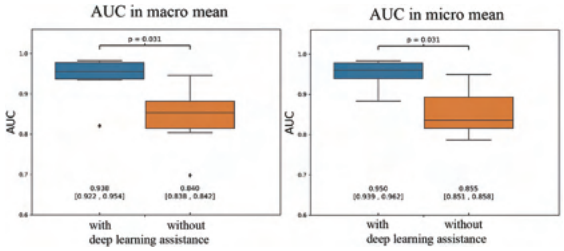


図 3　AI 診断の有無による AUC

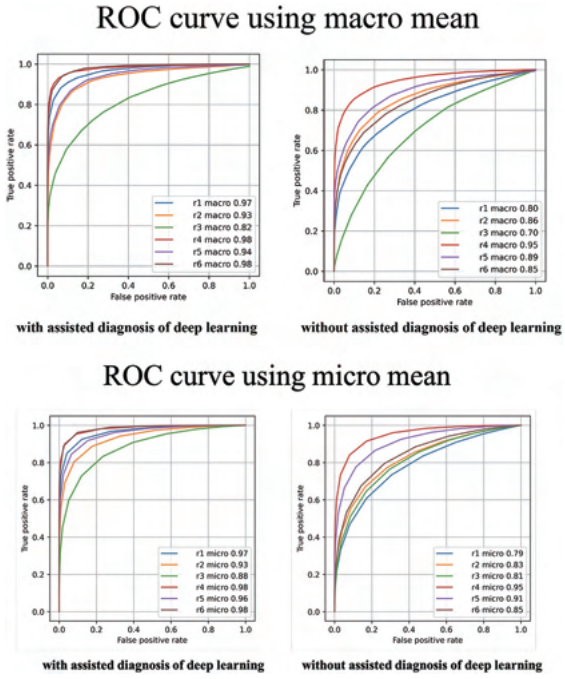


図 4　AI 診断有無による病理医別の診断結果

これらの値は，いずれも一般的な解釈において「非常に大きい」効果（very large effect）に相当し，AI 支援が診断精度の向上に強く寄与していることを示している。以上の結果より，AI 診断を使用することは病理医の診断能力を統計的に有意かつ実質的に向上させることが示された。図 4 では，病理医別の診断結果を AI 診断ありとなしであるものの AUC を示す。口腔病理医 #1 は，AI 診断を使用した場合に最も効果的でした。AI 診断なしの場合，マクロ平均値は 0.80（95%CI：0.795 ～ 0.810），ミクロ平均値は 0.79（95%CI:0.776 ～ 0.791）であった。AI 診断を使用した場合，マクロ平均値は 0.97（95% 信頼区間：0.960 ～ 0.966），ミクロ平均値は 0.97（95% 信頼区間：0.958 ～ 0.965）

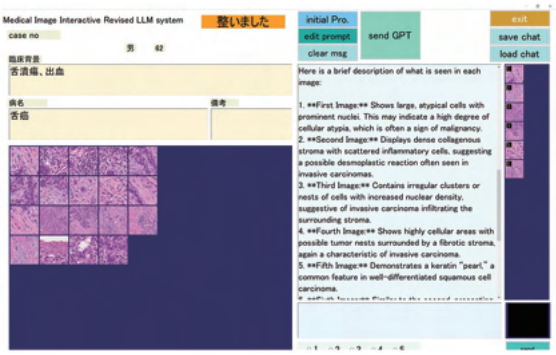


図 5　視覚―言語モデルを用いた所見文自動生成システム

であった。AI 診断効果では，個人差があることが明らかになった。

4）視覚―言語モデルを用いた所見文自動生成と病理医に与える影響

これまでの検討結果から，病理医が診断を行う際には単に正しい診断名が提示されるだけでは不十分であり，AI がどのような根拠に基づいて診断に至ったのかという「診断過程の理解」や「納得感」が診断精度や判断行動に影響を及ぼす可能性が示唆された。病理医は診断において，最終的な結果のみならず，形態学的特徴，所見の位置づけ，鑑別過程といった説明可能性を重視する傾向がある。したがって，AI が生成した結果に対して診断者が理解可能な根拠が提示されることは，AI の臨床導入における受容性や信頼性に寄与すると考えられる。

そこで本研究では，診断理由を視覚的かつ言語的に補完する手法として，視覚―言語モデル（Visual-Language Model: VLM）を用いた所見文自動生成システムを構築し，その有用性を検証した（図 5）。

本システムでは，AI が病理画像から抽出した特徴に基づいて診断名と所見文を生成し，病理医へ提示することで，AI の判断根拠を明示し，診断行動における納得度および判断過程への影響を明らかにすることを目的とした。さらに，本研究では実際の臨床利用を想定し，生成された所見文の内容理解のしやすさや診断支援としての受容性にも着目し，診断行為における

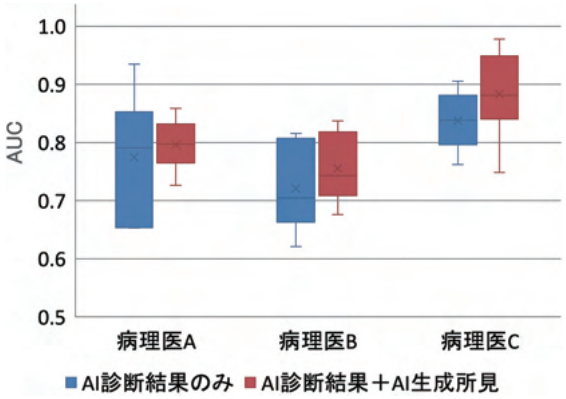


図 6　意思決定影響評価研究

AI 情報提示の効果を検討した。

対象症例は口腔細胞診画像 30 例とし，診断経験を有する口腔病理医 3 名により評価を行った。診断条件は 2 段階で設定し，まず「細胞診画像＋ AI による病理診断名のみ」を提示して診断を行わせ，次に同一症例に対して「細胞診画像＋ AI 診断名＋ AI 生成所見文」を提示し，再度診断を実施した。回答時間は制限せず，自由な判断環境とした。両条件間で診断の変化を比較することで，生成 AI 所見が病理医の診断行動および認知過程に与える影響を評価した。

評価指標として AUC を用い，診断性能を定量的に比較した。さらに，リサンプリング手法としてジャックナイフ法を適用し，条件間の差異について Z 検定により統計解析を行った。

その結果，AI 生成所見文の有無による診断結果の差異は認められず，統計学的にも有意差は示されなかった（$p > 0.05$）（図 6）。

［まとめと今後の研究］

本研究では，病理医と AI が協調して診断を行う「人協調型 AI 病理診断支援システム」の構築を目指し，高精度な病理画像データセットの作成，深層学習による最適モデルの開発，そして AI 診断が病理医の判断に与える影響の検証を実施した。AI の導入により診断精度が有意に向上し，視覚―言語モデルによる所見文提示が病理医の納得感にも寄与する可能性があるが，現時点では被験者の数が少なく統計学的な有意差は示されなかった。AI 診断の活用が，病理診断の質と効率を向上させるためにはより有効な提示方法などを考慮することが必要であると考えられた。

今後の課題としては，まず病理医ごとの診断傾向や経験年数に応じて，AI 出力と診断行動の関係性を最適化する仕組み，すなわち個別化された AI 信頼較正（trust calibration）が必要となる。また，本研究で用いた視覚―言語モデルが生成する所見文については，医学的妥当性や用語選択の正確性，表現の一貫性を含め，医療文書としての品質評価を体系的に行う必要がある。さらに，実臨床において AI 提示情報をどの段階で，どの形式で，どの程度提示すべきかといった運用設計も重要な検討項目である。

加えて，AI 支援診断における診断責任や説明責任の所在を整理する法的・倫理的枠組みの整備も不可欠である。特に，AI の所見が診断者の判断に影響を与えた場合の責任構造，AI による診断根拠説明（explainability）の必然性，トレーサビリティ確保に向けた標準化など，多面的な検討が求められる。

［成果の発表，論文など］

論文

Shintaro Sukegawa, Takeshi Hara, et al. Training high-performance deep learning classifier for diagnosis in oral cytology using diverse annotations. Sci Rep. 2024 Jul 30; 14(1): 17591. doi: 10.1038/s41598-024-67879-w.

国内シンポジウムでの発表

第 63 回日本生体医工学会大会・学術大会　生体医工学における信頼される AI の実現に向けて～口腔外科医に寄り添う AI の姿～（2024 年 5 月 24 日）

［研究助成（A）］

視知覚特性に基づく物体の光沢感の正確な画像再現手法の開発

2251019



研究代表者（助成金受領者）　千葉大学　大学院情報学研究院　准教授　田　中　　緑

［研 究 の 目 的］

■研究の背景と社会的要請

インターネット通販，デジタル美術館，自動車などの工業デザインにおいて，製品の見た目をディスプレイ画面上で正確に再現する技術は，意思決定の迅速化やコスト削減のために不可欠な技術基盤である。これまで画像の再現評価は，主に色を実物と一致させること（測色的再現）がゴールとされてきた。しかし，色をどれだけ物理的に一致させても，画面越しに見ると「どこか質感が違う」「実物のような鋭いハイライトや深みのある光沢がない」と人間が知覚することが長年の課題であった。この見た目のギャップが，高品質なデジタル質感再現を阻む最大の障壁となっている。

■質感知覚における学術的課題

人間が光沢を感じるメカニズムは非常に複雑である。単に光がどう反射するかだけでなく，周囲の景色の映り込み，物体の立体感，見る角度による輝度の変化などを，脳が高度に処理して判断している。近年の質感工学の研究から，人間は画像内の輝度分布からなる統計的特徴を手がかりに光沢を判断している可能性が示唆されてきた。しかし，実物体と全く同じ光沢感をディスプレイ画面上で実現するために，画像のどの成分をどう調整すればよいのか，その定量的かつ汎用的な指針は確立されていなかった。

■本研究の目的

本研究は，人間の知覚メカニズムに焦点を当て，観察評価実験解析に基づいて実物体と画像の間の知覚的ギャップを埋めるための画像補正モデルを構築することを目的とした。具体的には，以下の２つのアプローチを軸とした。

①光沢感の低下に関わる物理要因の特定

②実物体と同じ光沢感をディスプレイ画面で実現する「画像補正モデル」の構築

［研究の内容，成果］

1．実験環境の構築と実物体刺激の選定

本研究では，11 種類の材質（金属，プラスチック，布，木材，ガラス，皮革，石材，陶器等）から，表面の凹凸や反射特性に多様性を持つ 67 種類の実物体刺激（50 mm × 50 mm）を選定した。これらの実物体刺激は，表面の凹凸や反射特性に多様性を持たせるために，日常的な素材からランダムに選出された。実物体刺激と画像刺激は，以下の手順で実験環境を構築した。

●実物体刺激の提示条件

各実物体刺激は，実験時に観察者の視線に対して垂直になるよう観察ボックス内に配置された。照明には，昼光同等の色温度を有する D65 相当の拡散照明と高指向性照明を組み合わせたものを用いた。また，実物体刺激から観察者の目に入る輝度が，ディスプレイの最高輝度（962 cd/m^2）を超えないよう照明光の強さを調整した。

さらに，三次元形状測定機（キーエンス製 VR-5100）を用いて，各刺激の表面粗さを 0.5 μm という高い空間分解能で計測し，形状データを獲得した。

●高精度な測色的再現画像の生成

画像刺激は，実物体を上記の観察ボックス内で撮影し，測色的に再現して作成した。撮影には，二次元分光放射計（テクノオプティス製 SR-5100）を用いた。取得した CIE XYZ 画像データは，事前に実施したディスプレイ較正で作成した CIE XYZ から RGB への変換行列を用いて RGB 画像に変換し，較正済みディスプレイ（EIZO 製 CG3146）に表示した。画像刺激の色再現精度を確認するために，X-Rite カラーチェッカーを使用して実物体と測色的再現画像の各カラーパッチの三刺激値を分光放射計（コニカミノルタ製 CS-2000）で測定したところ，CIE1976 ΔE^*_{ab} の平均色差は 1.2 であった。これは人間が色の違いを識別できる限界の約半分に相当することから，測色的再現画像は実物体と見分けがつかないほどの十分な精度で色再現されていることが確認された。

2. 実験

本研究では，2 種の心理物理実験を実施した。実験 A では，実物体と測色的再現画像から知覚される光沢感を直接比較し，両者の差異と物理的特徴の関係を解析した。実験 B では，測色的再現画像の光沢成分を編集した刺激群を用いて，実物体と知覚的に等しい光沢感をもつ画像を選択する心理物理実験を行い，画像特徴を解析した。以下にその詳細を述べる。

2.1. 実験 A：光沢感知覚の低下要因の実験的解析

●実験方法

実験 A では，実物体と測色的再現画像から知覚される光沢感を直接比較し，両者の差異と物理特徴の関係を解析した。実物の光沢感に対する画像の光沢感を数値化するため，マグニチュード推定法を用いた。基準となる実物体刺激の光沢感評価値を正の定数 100 で基準値として設定し，評価対象の評価値を 0 と基準値の 2 つの指標で線形に評価した。実験では，評価値は非負とし，上限値は設定していない。

実験 A の実験環境を図 1 に示す。実物体刺激と測色的再現画像刺激は，それらに対する観察者の視野角がともに 8 度となるように配置された。提示された観察画像の解像度は約 65 cycle per degree（cpd）であり，これは視力 1.0 の人間が識別できる限界 30 cpd を大きく上回るため，実物体と同等の精細さを担保するほどの十分な画像解像度であった。観察者は，事前に顎台を調整して観察時の視線を固定した。評価環境に 5 分間順応したのち，実験を開始した。実物体刺激と画像刺激を両目で比較観察し，画像の光沢感を評価した。評価後には刺激が変更され，同様の評価を繰り返し，全 67 種類の刺激について各観察者は 2 回ずつ評価を行った。

●実験結果

20 代の観察者 10 名が実験 A に参加した。全員が石原式色覚検査と視力検査を事前に行い，正常な色覚と 1.0 以上の視力を有することが確認された。得られたデータから統計的な外れ値を除外した上で平均値を算出し，実物体と画像の間で光沢感の評価に有意差があるかを検証した。具体的には，Smirnov-Grubbs 検定を行い，それぞれの観察者が 2 回ずつ評価した 10 個の平均値の中で最も平均から外れた値が外れ値かどうかを判定した（$p < 0.05$）。外れ値が検出された場合は，外れ値がなくなるまで繰り返し除外した。その後，評価値の平均値を算出した。次に，対応のある t 検定を行い，測色的再現画

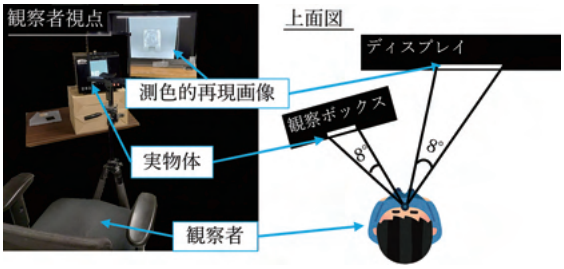


図 1　実験 A の実験環境

像の評価値が実物体の光沢感と比較して，有意に変化しているかを検証した（$p < 0.05$）。さらに，Cohen の効果量 d を算出し，有意性を確認した。以降の議論では，$p < 0.05$ かつ効果量 $d > 0.5$ を満たす刺激を有意差ありとして扱う。

検証の結果，67 種類の刺激のうち，約 93% に相当する 62 種類で測色的再現画像の光沢感評価値が実物体の基準値 100 よりも有意に低下した。特に，ガラス，陶器，樹脂，金属といった高光沢材質ほど，画像化した際の低下が顕著であった。

一方で，測色的再現画像の方が実物体より有意に高い光沢感として評価された刺激は，白色キャンバスの 1 種類のみであった。この刺激は非常に明るい白色（$L^* = 97.3$）であり，布の折り目による微細な表面の凹凸を有する。実物体では，物体表面の光が拡散しているように見えるが，画像化によってその物理的な拡散性が弱まり，画像上の輝度分布の変化が強調された結果，実物体よりも画像で観察した際に，より光沢感が高いと知覚されたと考えられる。

以上の結果から，実物体の光沢感は測色的画像再現によって全体的に低下することが示された。これは，単に色を物理的に一致させるだけの測色的再現画像では，実物体が持つ本来の光沢感をディスプレイ画面上で再現することは困難であることを報告した先行研究と一致している［1］。これは，実物体は見る角度による輝度の変化や両眼視差やハイライトの重なりといった奥行き情報を持つが，平坦なディスプレイ画像ではそれらの情報が失われるため，光の入射や反射特性が異なることに起因すると考えられる。

●光沢感の低下に影響を与える物理的特徴の解析

実験 A において，実物体と画像の光沢感知覚が有意に変化したサンプルの物理特徴を明らかにするために，実物体刺激の色や輝度分布だけではなく，形状情報を含む表面粗さを解析した。形状データから ISO 25178 に基づいて，算術平均高さ（Ra），最大高さ（Ry），十点平均粗さ（Rz），二乗平均平方根高さ（Rq），歪度（Rsk），尖度（Rku）の 6 つの物理量を算出した［2］。

実験 A で得られた実物体と測色的再現画像の間で評価値に有意差がなかった 4 種のサンプル（$d < 0.5$）をグループ 1 とし，有意差があった 63 種のサンプルをグループ 2 と定義した。この 2 群間で，複数の指標を対象に Mann-Whitney の U 検定を行った（$p < 0.05$）。対象の指標は，テクスチャ解析手法を代表する gray-level co-occurrence matrix（GLCM）から算出した 6 種の特徴量（contrast，dissimilarity，homogeneity，angular second moment（ASM），entropy）と色特徴（L^*，彩度），計測した 6 種の表面粗さ指標（Ra，Ry，Rz，Rq，Rsk，Rku）である。

解析の結果，表面凹凸の偏りを示す歪度 Rsk の指標において，2 つのグループ間にグループ 1 ＞グループ 2 という有意差が確認された。具体的には，歪度 Rsk の値が小さく，物体表面の凹凸が凸側に偏っている刺激（表面がなだらかで平滑面が多い材質）ほど，実物体と測色的再現画像の間で光沢感が有意に低下しうると考えられる。グループ 2 のサンプルは，負の Rsk を持ち，表面が平滑で滑らかな領域が多い場合に光沢感の損失が生じやすいことを示している。この結果より，物体表面全体に広がる精細なツヤ（Hunter の光沢の分類［3］では sheen gloss や contrast gloss に該当）が光沢感の評価に影響を与える可能性がある。

2.2. 実験 B：知覚的再現のための画像特徴量解析と補正モデル

●実験方法

実験 B では，測色的再現画像の光沢成分を編集した刺激群を用いて，実物体と知覚的に等しい光沢感をもつ画像を選択する心理物理実験を行い，画像特徴を解析した。

実験 B は，実験 A と同様の環境と手順で実施された。異なる点は，ディスプレイ画面に表示する画像として，色をそのまま再現しただけの画像（測色的再現画像）ではなく，画像の光

沢成分を段階的に変化させた画像（編集画像）を用いた点である。この画像刺激は，Manabe ら［4］によって開発された光沢感編集手法を応用して作成した。図 2 に，光沢感を編集した画像の一例を示す。

観察者は，ディスプレイ画面に提示される編集画像刺激を手元のキーボード操作によって切り替え，観察ボックス内に配置した実物体刺激と，一番光沢感が同じに見える画像（光沢感再現画像）を 1 枚選択した。1 つの刺激に対して，光沢の度合いが異なる 31 枚の画像が用意された。観察者が画像を選択すると，実験者は刺激を切り替え，同様の評価を繰り返した。全 67 種類の刺激に対して，各観察者は 2 回ずつ評価を行った。

●実験結果

実験 B の目的は，観察者が実物体と画像を比較する際に，どのような画像特徴を手掛かりとして光沢感を判断しているのかを明らかにすることである。そのために，画像内の明暗パターンを解析するテクスチャ解析手法である GLCM 特徴量を用いて，観察者が選んだ光沢感再現画像の特徴を分析した。利用した GLCM 特徴量は contrast，dissimilarity，homogeneity，ASM，entropy であり，二次元輝度画像から抽出される。これらの特徴量は，我々の先行研究により，物理的な光沢感のモデル化に有効であり，特に contrast や entropy は光沢感や質感の重要な指標であることが示唆されている［5］。実物体の物理的特徴は撮影を行わないと得ることができないため，実験 A で用いた測色的再現画像の GLCM 特徴量を代わりに用いた。実験 B では，観察者が選択した光沢感再現画像の GLCM 特徴量の平均値を算出し，測色的再現画像と比較した。

測色的再現画像と光沢感再現画像の GLCM 特徴量を比較した結果，複数のテクスチャ指標の中で特に contrast に有意な変化が観察され，それ以外の指標では，測色的再現画像と光沢感再現画像の間で大きな差は見られなかった。図 3 に，測色的再現画像と光沢感再現画像の contrast の比較結果を示す。

図の横軸は測色的再現画像の，縦軸は光沢感再現画像の contrast をそれぞれ示しており，誤差バーは標準誤差を示している。各点（“●”）は，測色的再現画像と光沢感再現画像の間で，有意に変化したサンプル（$d > 0.5$）を示し，白抜き点（“○”）は有意差がなかったサンプルを示している。図 3 に示した contrast の比較結果より，測色的再現画像と光沢感再現画像の関係を表す切片 0 の線形近似式は $y = 1.13x$，この近似式の相関係数は $R^2 = 0.98$ であった。

図 3 から求めた線形近似式より，測色的再現画像の contrast を約 1.13 倍に増加させることで，実物体と知覚的に等しい光沢感が再現可能であると考えられる。しかし，contrast を操作することは，画像の明度や色に影響を与える可能性がある。そこで，測色的再現画像と光沢感再現画像の L^* や a^*b^* 色度図を比較したところ，

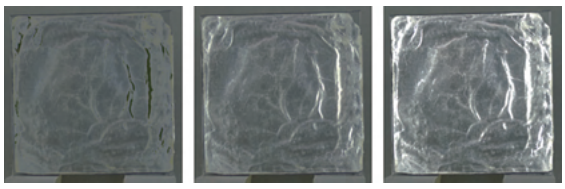


図 2　光沢感を編集した画像の例
（左から，光沢抑制，測色的再現，光沢強調）

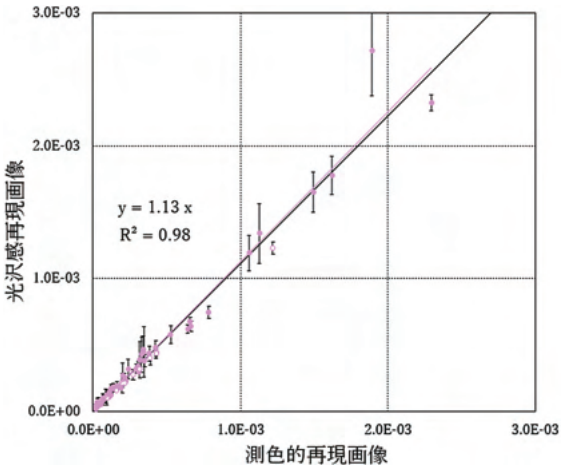


図 3　測色的再現画像と光沢感再現画像の contrast の比較結果

人間が色の違いを見分けられる限界（弁別閾）を超える変化（$\Delta E^*_{ab} > 2.3$）が生じていた。弁別閾を超えて差があったにもかかわらず，光沢感が同じと判断されていたことから，光沢感知覚においては色情報保持の優先度が低いと考えられる。したがって，画像化によって光沢感が大きく低下するサンプルに対しては，GLCM 特徴量の contrast を増加させる処理により，実物体と知覚的に等しい光沢感を再現できることが示唆された。

3. まとめ

本研究では，実物体の光沢感が画像再現によってどのように変化するか，また実物体の光沢感を画像再現するためにはどのような画像補正が必要かを明らかにするため，2 つの心理物理実験を行った。

実験 A では，実物体と物理的に色を合わせた測色的再現画像を比較し，光沢感知覚の変化を検証した。その結果，大半の刺激において，実物体の光沢感は画像化によって低下した。特に表面粗さの物理量である歪度 Rsk が低い，すなわち表面の微細な凹凸がなだらかで滑らかな素材ほど，画像化による光沢感の損失が顕著であることを特定した。

実験 B では，実物体と光沢感編集を行った画像群を比較し，観察者は実物体と等しい光沢感を持つ画像を選択した。選択された光沢感再現画像の画像特徴を解析した結果，画像の contrast を約 1.13 倍に増幅させることで，失われた光沢感を補正し，実物体と等しい光沢感を画面上で再現できる明確な指針を得た。

本成果は，デジタルアーカイブや EC サイト，工業デザインにおける質感再現技術の高度化に大きく寄与するものである。

［成果の発表，論文など］

［1］安喰英幸，田中緑，堀内隆彦：光沢感の画像再現に影響を与える物理特徴と画像特徴の実験的解析，日本色彩学会研究会大会（研究発表会奨励賞受賞），(2025 年 11 月).

［2］明田川航世，田中緑，堀内隆彦：ディスプレイの画素開口率が光沢感知覚に与える影響の実験的検討，日本色彩学会研究会大会（研究発表会奨励賞受賞），(2025 年 11 月).

［3］安喰英幸，田中緑，堀内隆彦：実物と画像の直接比較による光沢感再現のための画像特徴の実験的解析，映像情報メディア学会冬季大会，(2025 年 12 月).

［研究助成（A）］

歩行アシストに滑らかさと柔らかさを吹き込んだロボティック・ハンドフリーステッキ

2251020



研究代表者
（助成金受領者）
長崎大学　大学院総合生産科学研究科（工学系）
准教授　田　中　良　幸

［研 究 の 目 的］

超少子高齢化が進む日本の総人口（約１億2,300万人）の約30%が65歳以上の高齢者であるが，70歳を過ぎた頃から歩行に難を感じる割合が急増することが報告されている。その中で，歩行補助具として「杖」を使用する割合は，健康な高齢者では10%弱，自立して歩行はできるがサポートを要する高齢者では約60%にも達する。

歩行機能を効果的に補う「杖」は手軽で便利なツールであり，少なくとも古代文明が発祥してから現在の科学文明に至る約6000年の長い間，その形状と素材を変えながら幅広く使用されている。しかしながら，「杖」を使用すると同時に少なくとも一方の手が塞がれるため，ちょっとした荷物を両手で持って運ぶシンプルな動作を含めて，上肢を使う日常的な作業は少ながらずの制約を受けることとなる。そして医学的には，「杖」の使用で手首・肘・肩に加わる負荷による上肢関節の疾患や，杖の過剰依存による歩行姿勢や重心の大きな変化による下肢関節の疾患を誘発する可能性も指摘されている。

そこで本研究では，「杖」に現在の科学技術を吹き込んだ新しいロボット装具を考案し，使用者の手を塞ぐことなく使用できる「ロボティック・ハンドフリーステッキ」の実用化を最終的な目的として取り組んでいる。これまでに安価なロボット部品を用いて幾つかの試作機を作成してきたが，部品性能と制御精度の制約などにより，杖の硬さによる装着部への過度な反力負荷や，杖の動作タイミングのズレによる不自然さが入り交じり，安心して使用するには幾つかの大きな問題があった。このような問題を一掃するため，本研究課題では「ロボティック・ハンドフリーステッキ」の動きに滑らかさと柔らかさを持たせることを目的とした。

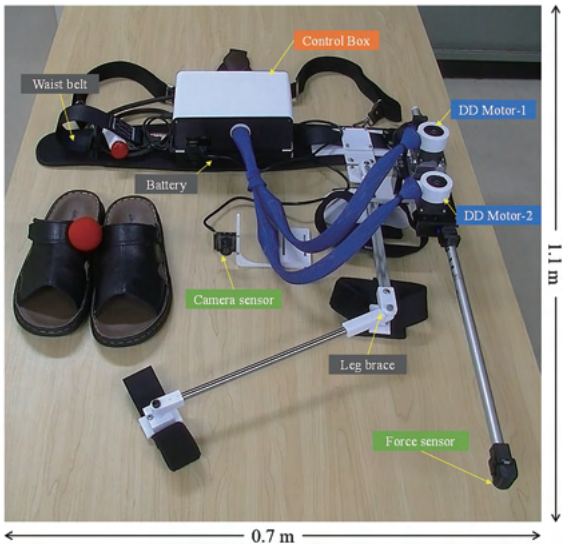
［研究の内容，成果］

本研究課題の目的を達成するため，高性能小型DDモータ（マイクロテック・ラボラトリー社製）を用いて，「ロボティック･ハンドフリーステッキ」の試作機（図1）を構築するとともに，滑らかさと柔らかさを兼ね備えた杖の動作を実現するための制御システム（図2）を実装した。

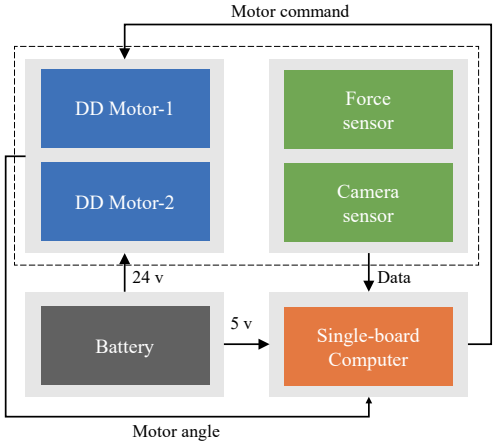
1．試作機の開発

図１に示すように，試作機は本体部と制御BOX部を主として，バッテリー部と装着部で構成している。身体に装着して使用することから，3Dプリンターを活用して可能な限りコンパクトかつ軽量化を意識し，ロボット部品の選定と機構設計の繰返しを経て開発した。表1に，各構成の重量［g］の数値データを記す。

本体部には，杖を回転させるための小型DDモータ１と，杖の長さを伸縮させるための小型DDモータ２をアクチュエータとして配置している。杖先が床を突いて身体を支える際，杖の



(a)



(b)

図 1　試作機の概略図

表 1　試作機各部の重量データ

Parts	Main body	Control box	Battery	Etc
Weight	700	660	1000	800

回転角度を保持するための駆動力が必要となるが，DD モータ 1 だけでは十分ではないため小型軽量のハーモニック減速機（ハーモニック・ドライブ・システムズ社製）を取り付けた。杖の伸縮は，ラックアンドオピニオン機構を用いて実現している。3D プリンターで作成したラック・ケースの中空に杖を挿入して取り付け，オピニオン・ギアを DD モータ 2 で回転させることで，杖の長さを自在に伸縮することができる。

加えて，使用者の大腿部に取り付ける USB カメラセンサと，杖先に組み込んだ感圧センサ（定格：15 kg）を有している。カメラセンサは小型シングルボード・コンピュータに接続し，本体部を装着していない側の足背（足の甲）に取り付ける球状マーカーを撮影・記録する。感圧センサへの印加力に応じて変化する電圧値は，I2C 通信方式で接続した AD コンバータ（分解能：16 bit）を介して小型シングルボード・コンピュータで計測・記録する。

制御 BOX 部は，二つの小型 DD モータを動かすために必要となる超小型モータドライバと，USB カメラセンサと感圧センサで計測したデータに基づいて小型 DD モータを独立制御する小型シングルボード・コンピュータ（Raspberry Pi5）で構成されている。超小型モータドライバと小型シングルボード・コンピュータのデータ送受信を SPI 通信方式にすることで，1 kHz のサンプリング周波数で高精度のモータ制御を可能としている。なお，小型シングルボード・コンピュータに接続するカメラセンサと感圧センサとのデータ送受信は通常のシリアル通信方式であることから，後述のアップサンプリングによる補間処理をして使用する。

バッテリー部には，二つの小型 DD モータに必要となる DC24V と，小型シングルボード・コンピュータに必要となる DC5V を安定して供給できるリチウムイオン電源（日泉社製）を用いた。

2. 制御システムの開発

図 2 は，試作機に対して考案した動作アルゴリズムを実現するために設計した制御システムのブロック線図である。制御システムは Matlab と Simulink（Mathworks 社製）を用いてデスクトップ PC 上で開発し，コンパイルしたプログラミングコードを小型シングルボード・コンピュータに転送して使用する。

2.1　杖の回転動作を滑らかにするアルゴリズム

本体部を装着していない側の足背（足の甲）

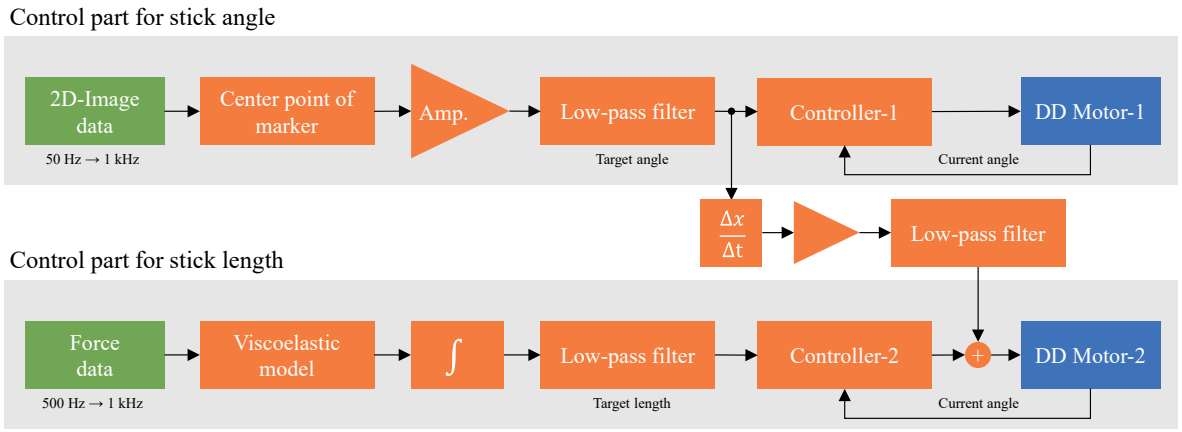


図２　制御システムの概略図

に取り付けた球状マーカーを上方から USB カメラセンサで撮影（撮影速度：50 fps）をして，画像データから抽出したマーカーの中心位置を足背の動きとして用いる。中心位置データは 20 倍にアップサンプリングされた後に，平滑化フィルタ（遮断周波数：3 Hz）を透して滑らかな目標軌道を生成する。そして，杖先端がマーカー中心を追従するように，小型 DD モータ 1 で杖の角度を滑らかに変化させる。この時，杖先が床面と接触して身体を支えている状態では，杖の回転動作が妨げられる。そこで，杖先を前方に移動させる際は，マーカーの移動速度の大きさに比例して杖の長さを小型 DD モータ 2 で短縮させて杖先を離床させることにより，杖の回転動作が妨げられないようにする。

2.2　杖先の動作を柔らかくするアルゴリズム

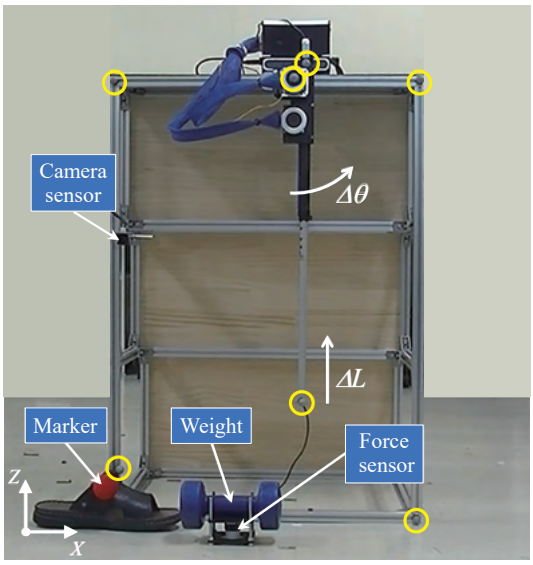
杖先端に内蔵した感圧センサから計測される電圧値は，印加力として計測・記録（サンプリング周波数：500 Hz）される。印加力のデータは 2 倍にアップサンプリングされた後，杖先と床面の間に仮想的に設定した粘弾性モデルに入力する。そして，設定した粘弾性パラメータに応じた変形量を算出する。弾性パラメータを大きくすると変形量は小さくなり，小さくする変形量は大きくなる。また，粘性パラメータを大きくすると変形量の過度な振動が抑制され，小さくすると変形量が振動的となる。適切な粘弾性パラメータを設定した上で，杖の長さを小型 DD モータ 2 で伸縮させることにより，身体を支える際に床を突く杖先の動作に柔らかさを持たせる。

3.　動作検証と歩行実験

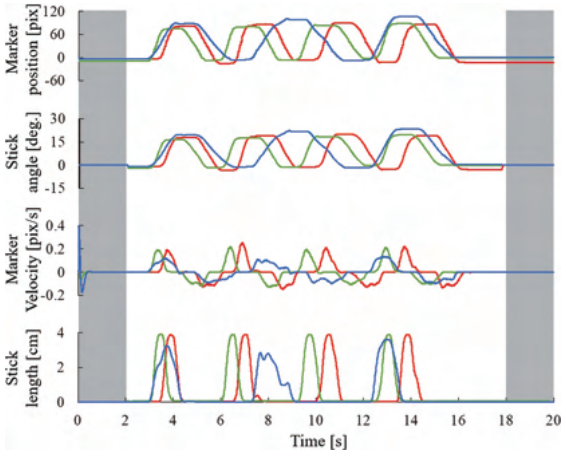
3.1　杖の回転動作の検証

図 3（a）のように感圧センサを内蔵した杖先端パーツを取り外した本体部を固定台に設置し，赤色マーカーを取り付けたサンダルを履いて，床面上で X 軸方向へ周期的に動かした。そして，小型 DD モータに内蔵されているエンコーダを用いて杖の動作を計測した。また，赤外線反射マーカー（図中の黄色〇印）を取り付けて，光学式モーションキャプチャ装置を用いて杖の動作を同時に計測した。なお，感圧センサからの計測データに基づく杖の伸縮機能は，安全の為，無効にして実施した。

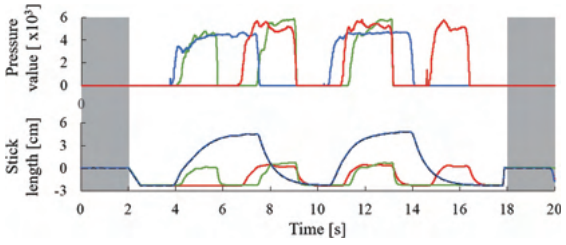
図 3（b）に，連続 3 試行の計測結果を代表例として示す。赤線と緑線の連続 2 試行は，同じ動作となるように足を動かした結果であり，青線は意識的に少しゆっくりと動かした結果である。なお，青線と重なる黒の点線は光学式モーションキャプチャ装置による測定結果，背景が灰色の時間帯ではモータ制御をオフにしている。平滑化フィルタによる反応速度の遅延が若干みられるが，足の移動に応じて杖の角度が滑らかに変化しつつ，足の移動速度に比例して杖が伸縮していることも確認できる。なお，杖の



(a)



(b)



(c)

図 3　動作検証の結果

伸縮は，足の移動方向が前（移動速度が正）の時であることに注意されたい。

3.2　杖先の伸縮動作の検証

図 3（a）の実験環境で杖の回転動作を無効にして，感圧センサを内蔵した杖先端パーツに重さ 1.5 kg のダンベルを載せて，杖の伸縮動作を計測した。

図 3（c）に，3 種類の粘弾性パラメータを設定して得られた計測結果の代表例を示す。設定した粘弾性モデルの設定値は，赤線に対して設定した粘弾性モデルを基準にして，緑線と青線では粘性パラメータと弾性パラメータの値をそれぞれ 1/3 に設定した。なお，青線と重なる黒の点線は光学式モーションキャプチャ装置による測定結果である。今回はダンベルの追加と除去を手作業で実施したため，印加力の波形に若干の違いが生じはしたが，概ね設定した粘弾性パラメータに対応した結果を確認することができた。粘性を小さくすることで杖が伸縮する応答速度が早くなり，弾性を小さくすることで変形量が大きく（杖が柔らかく）なっている。

3.3　試作機による歩行実験

健常な男子被験者 3 名に試作機を右脚に装着させ，左足の足背に赤色のマーカーを取り付けて歩行実験を行った。被験者には指定された始点から 3 m 離れた終点までの直線軌道を，各自の歩幅でややゆっくりとした歩行速度で歩かせた。この時，光学式モーションキャプチャ装置を用いて歩行動作も記録した。被験者には試作機の使用方法を説明した上で，数回の事前練習をした後に本実験を実施した。

図 4 に，歩行実験の計測結果を示す。図（a）は一例であり，上側のスティックピクチャーは歩行中の試作機と右脚をそれぞれ赤線と黒線で描いている。下側のグラフは，小型 DD モータのエンコーダ値から算出した杖の傾き角度と伸縮量の時間波形である。装着者の左足の動きに応じて，杖が回転動作と伸縮動作を同時に行っている様子を確認した。

図 4（b）は，各被験者の歩行実験で計測された杖の回転角度と伸縮量，杖先への印加力の時間変動を表している。今回は各自の歩幅で実験を行ったことで杖先への印加力に個人差が見られたが，杖の滑らかな回転動作と伸縮動作を確認することができた。

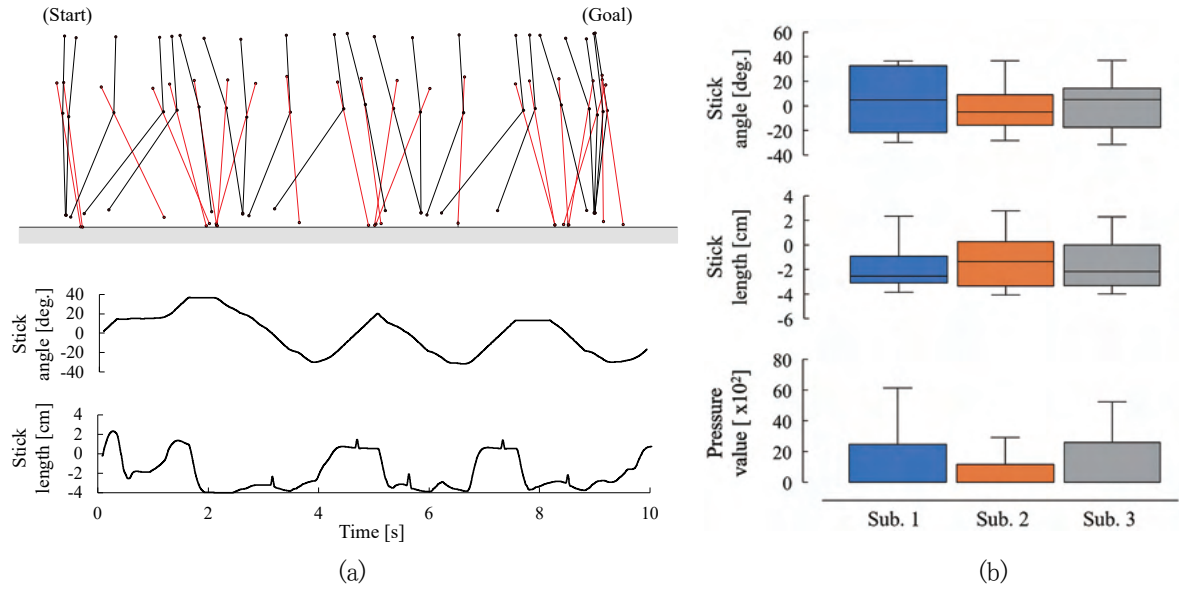


図 4　歩行実験の結果

4. まとめと今後の展望

本研究課題では，小型 DD モータを用いた杖型のロボット装具を開発するとともに，カメラセンサで撮影した使用者の足の動きに応じて，杖の動作に滑らかさと柔らかさを持たせるための制御アルゴリズムを考案した。そして，動作検証と歩行実験を通じて，概ね目標を達成することができた。

今後の展望として，まず試作機の総重量を 1.5 kg にまでの軽量化を目指したい。そして，各使用者の体形と歩行姿勢に合わせて，制御システム内で予め設定する必要のある制御パラメータを学習・自動チューニングをする機能を追加することも必要である。十分な安全性を確保した後，一般の杖使用者のご協力を得ながら本研究の最終目標を目指していきたい。

［成果の発表，論文など］

本研究課題で得られた成果は，第 27 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（2026 年 12 月開催）で発表する予定である。

［研究助成（A）］

イオノエレクトロニクスに基づく生体微粒子の機能解明

2251021



研究代表者
（助成金受領者）　東京農工大学　講師　田畑美幸

［研究の目的］

近年，0.1–1 μm の細胞外小胞（Extracellular Vesicles: EVs）が細胞間情報伝達の重要な担い手であり，がんの進行･転移，神経変性疾患，免疫応答など多様な病態と密接に関連することが明らかになりつつある。EV は血液，尿，唾液などの体液中に安定して存在するため，患者負担の少ない体液診断における新規バイオマーカーとして大きな期待が寄せられている。しかし，従来の FACS や NTA といった光学的 EV 解析手法は，装置の大型化，光学系の複雑性，前処理の煩雑さなどの制約から，急性期医療現場で求められる迅速性・簡便性を備えた POCT（point-of-care testing）機器としての実装が困難である。この制約は，体液診断の臨床応用を加速させる上で大きな障壁となっている。

一方，EV の生物学的意義や発生メカニズム，疾患特異性を示す膜タンパク質や表面電荷の違いなど，基礎的理解が未解明な点も多く，単一 EV レベルでの高精度計測技術の確立が強く求められている。特に，EV のゼータ電位はその起源細胞や病態に依存して変化する可能性が指摘されており，電気的特性に基づく新たな識別指標として有望である。

本研究では，イオンと電子の両方を情報の担体とするイオノエレクトロニクスの概念を基盤とし，シリコンナノワイヤ電界効果トランジスタ（SiNW-FET）を用いたシングル EV 計測デバイスの開発を目的とする。200–300 nm 開口のウェル構造を有する SiNW-FET を作製し，単一 EV の吸着挙動を電気的に捉えることで，EV 間のゼータ電位差を識別可能な計測基盤の構築を目指す。

これにより，将来的には光学系を必要としない小型・低消費電力の EV 計測技術を実現し，POCT 機器としての展開に向けた技術的基盤を確立する。最終的には，EV 表面特性と疾病との関連性を高精度に評価できる新規診断手法を創出し，体液診断科学にイオノエレクトロニクスを融合した新たな学問領域の確立に寄与することを目指す。

［研究の内容，成果］

〈EV の回収とゼータ電位測定〉

ヒト乳腺癌細胞株（MDA-MB231）および，ヒト乳腺上皮細胞株（MCF10A）を 37°C，5% CO_2 雰囲気下で培養したのち，無血清培地に交換した。48 時間のインキュベーション後，上清液を回収し，超遠心にて EV を回収した。ペレット化した EV を pH 7.4 のビストリスプロパン緩衝液（BisTris propane buffer, BTP buffer）で洗浄し，EV 懸濁液を回収した。懸濁液中の EV の含有量および粒度分布は，ナノ粒子トラッキング解析（Nanoparticle tracking analysis, NTA）の NanoSight システムを用いて測定した。また，各細胞由来の EV のゼータ電位は動的光散乱法（Dynamic light scattering, DLS）を用いて測定した。

EV はアポトーシス小体，マイクロベシクル（Microvesicles，MV），エクソソームの 3 つ微小生体分子の総称である。これらはその生成過程に違いがあり，サイズも異なる。アポトーシス小体は 1–5 μm，MV は 100–1000 nm，エクソソームは 40 ～ 160 nm 程度の直径を有するとされる[1, 2]。細胞培養上清から超遠心法で回収した粒子は NTA 法にて解析し，その粒子径は 130 nm 程度であった。この結果からがん細胞および健常細胞由来の EV が回収されていること，また，回収したサンプルはエクソソームと MV を中心として構成されていることが示された。細胞は膜上にタンパク質や糖鎖を有していることから，通常生理環境下で負の電荷を有している。同様に，EV もその膜特性から負電荷を帯びており，SiNW-FET を用いた電気的な検出が見込まれる。さらには，がん細胞と正常細胞では，主にはシアル酸の発現量の差に起因する膜特性の違いにより，がん細胞由来の EV が正常細胞由来の EV と比べて，より負に帯電していることが既に明らかにされている[3-5]。実際に DLS にて回収した EV のゼータ電位を測定したところ，乳がん細胞株である MDM-MB231 由来の EV の方が 4 mV 程度負に帯電している結果が得られた。

〈SiNW-FET の作製と特性評価〉

SiNW-FET の作製は，p 型 SOI 基板を用いて，EB リソグラフィー，Si エッチング等のプロセスを経てアクティブ領域を形成した後，ソース / ドレイン，ゲート絶縁膜，コンタクトホール，アルミ電極を形成した。その後，保護膜として形成した電子線レジストに適当なサイズのホールをあけ，ゲート絶縁膜層が露出した SiNW-FET を得た。

SiNW-FET をバイオセンサとして利用するために，まずは液中動作の安定性を評価した。本実験で利用した実験系を図 1 に示す。参照電極には Ag/AgCl 電極，ゲート絶縁膜は Si_3N_4/SiO_2 スタック構造を用いた。絶縁膜が金属酸化物や窒化シリコンである場合 pH 応答を示すことはよく知られており，これは，金属酸化物表面に存在する水酸基が暴露した溶液に存在する水素イオンと相互作用し，その解離状態が変化することに起因する。まずは各 pH 標準緩衝液に対する Vg-Id 特性を評価した。用いた標準緩衝液は，pH 4（フタル酸塩標準液），pH 7（中性リン酸塩標準液），pH 9（ホウ酸塩標準）とした。一般的に ISFET の出力電位の変化はネルンスト式（式（1））に従う。

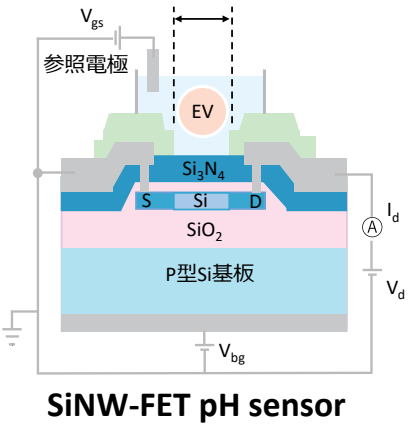
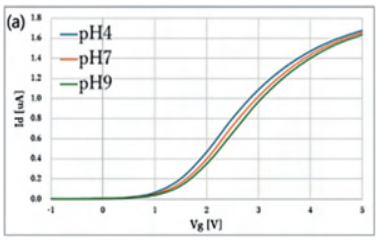


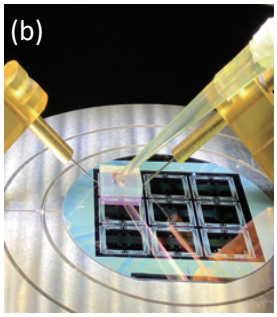
図 1　試作した SiNW-FET の断面図

$$E = E_0 - (RT/zF)\ln\alpha = E_0 - 59.2pH \quad 式(1)$$

E：電極電位，E_0：標準電極電位，R：気体定数
T：絶対温度，z：移動電子数，F：ファラデー定数，α：活量

pH 4，7，9 の各 pH 標準緩衝液に対する Vg-Id 特性を計測（図 2）したところ，閾値電圧が正の方向にシフトしていることがわかる。さらに，ドレイン電流 1 μA を基準とした際の pH に対する電圧値の変化を求めたところ，傾きは 45.8 mV/pH であった。この値は，ネルンスト式より求められる室温での pH 感度の理論値であるネルンストの傾き（室温での理論値：59.2 mV/pH）には一致しないものの，本デバイスが pH 応答を示し，液中 pH 計測を実現していることを示す。このことより，作製した SiNW-FET





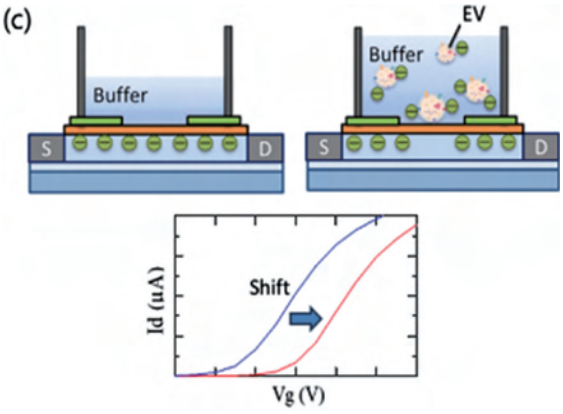


図 2　SiNW-FET の電気特性評価
（a）各 pH 標準液に対する Vg-Id 特性，（b）測定の様子，（c）EV 検出の概念図。緩衝液を基準として負に帯電した EV を添加することによって変化するチャネル内の電荷密度変化を閾値電圧のシフトとして検出する。

の液中動作を確認することで，バイオセンサとして使用可能な性能を備えていることが認められた。SiNW-FET は，絶縁層を介した外部電場との相互作用に対応するチャネル内の電子密度の変化を検出することができる。この液中動作の確認結果から EV の負電荷に着目した電位シフトが観測されることが予測された。

〈EV サンプル溶液の電流－電圧特性評価〉

図 1 に示した実験系を用いて，EV 溶液の電位測定を行った。レジストホールサイズは EV が最大 3 個捕捉可能な設計となっている。BTP 溶液 50 µl の電位を基準として Vg-Id を測定した後，EV を BTP 溶液に分散させたサンプル溶液 50 µl を添加した際の閾値電圧の変化を測定した。ネガティブコントロールとして BTP 溶液 50 µl に BTP 溶液 50 µl を添加した EV なしの場合の閾値電圧変化を測定し，EV ありなしの閾値電圧変化を比較した。

EV を含む懸濁溶液の電位測定を行った結果，EV の添加により，乳がん細胞である MDA-MB231 由来の EV は基準から電位がおよそ +60 mV シフトし，健常細胞である MCF-10A 由来の EV はおよそ +50 mV 正の方向にシフトした。このことより，作製した SiNW-FET は絶縁膜近傍に存在する EV を電気的に測定可能であることが分かった。乳がん細胞である MDA-MB231 由来の EV は健常細胞である MCF-10A 由来の EV と比べて約 +10 mV 正にシフトしていることが確認されたが，ゼータ電位測定の結果において，MDA-MB231 は MCF-10A と比べてより負に帯電していることが分かっており，これらの電位シフトは SiNW-FET のチャネル電荷密度の変化を反映していていると考えられる。以上のことより，SiNW-FET を用いた測定により負に帯電しているがん細胞由来の EV を健常細胞由来の EV と区別して検出できる可能性が見出された。

引き続き，EV の濃度を変えて同様の測定を行った。どちらのサンプルもオリジナルの濃度から 10 倍ずつ希釈し，1 ml あたり 10^5 個まで希釈し，測定を行った。MCF10A 由来の EV を 10^5 ～ 10^9 個の範囲で測定を行った結果では，10^5 個～ 10^8 個までは，ノイズに埋もれ，明確な変化はなく，10^9 個で大きな閾値電位の変化が得られた。次に，MDA-MB231 由来の EV サンプルを 10^5 ～ 10^{11} 個まで変化させて測定を行った結果では，MDA-MB231 の結果でも MCF10A 由来の EV の結果と同じく，10^8 個まで変化はなく，10^9 個から閾値電位の変化を計

測し，それ以降の濃度でも閾値電位の変化が見られた。また，10^9 ～ 10^{11} 個では，濃度の増加に伴ったシフト量の増加はなく，10^9 個の結果で得られた 50 mV の電位変化量と同じだけの横ばいの結果が得られた。以上のように，濃度に対して閾値変化量が増加する濃度依存的な変化が得られたものの，10^8 個から 10^9 個の間に電位シフトのオン/オフがあることが見出された。EV は SiNW 上に 1–3 個ほど収容可能な設計としていることから考えると，濃度変化に対して，現状の計測系においてセンサ上に付着する EV の数に影響を与える濃度が 10^9 個/mL であることが分かった。

〈まとめ〉

本研究では，SiNW-FET を用いた単一 EV レベルの電気的検出手法の確立を目指し，EV 懸濁溶液の電位測定を行った。200–300 nm のレジストホールを備えたデバイスを用いて，基準溶液（BTP）に対する閾値電圧変化を評価した結果，EV の存在に応じて明確な電位シフトが生じることを確認した。特に，乳がん細胞 MDA-MB231 由来 EV では約 +60 mV，健常細胞 MCF-10A 由来 EV では約 +50 mV の正方向シフトが観測され，SiNW-FET が絶縁膜近傍に存在する EV の吸着挙動を電気的に捉えられることが示された。また，MDA-MB231 由来 EV は MCF-10A 由来 EV より約 +10 mV 大きくシフトしたが，ゼータ電位測定では MDA-MB231 の方がより負に帯電していることが分かっており，この差異はチャネル近傍の電荷密度変化を反映した結果であると考えられる。これらの結果から，SiNW-FET により負に帯電したがん細胞由来 EV を健常細胞由来 EV と区別して検出できる可能性が示唆された。

さらに，EV 濃度を 10^5 ～ 10^{11} 個/mL の範囲で変化させて測定したところ，いずれの細胞由来 EV においても 10^8 個/mL までは閾値電圧変化がノイズに埋もれたが，10^9 個/mL で明確な電位シフトが出現し，それ以上の濃度ではシフト量が横ばいとなった。これは，本デバイスの構造上，センサ表面に付着する EV 数が濃度 10^9 個/mL 付近で急激に増加し，1–3 個の EV がホール内に収容される確率が閾値的に変化するためと考えられる。以上より，SiNW-FET を用いた EV 検出は濃度依存的な応答を示しつつ，特に 10^9 個/mL 付近でオン/オフ的な電位シフトが生じることが明らかとなった。

本研究により，SiNW-FET を用いた EV 吸着に基づく電気的識別が可能であること，さらにがん細胞由来 EV と健常細胞由来 EV の電気的特性差を捉えられる可能性が示された。これらの成果は，光学系を必要としない小型・簡便な EV 計測デバイスの実現に向けた重要な基盤となり，将来的な POCT 機器としての応用に大きく寄与するものと期待される。

〈謝辞〉

本研究の一部は，公益財団法人 立石科学技術振興財団，生体医歯工学共同研究拠点，文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ事業（ARIM）の支援を受けて実施された。ナノ粒子トラッキング解析は富士フィルム和光純薬株式会社にて実施された。

〈参考文献〉

(1) David G Meckes Jr and Nancy Raab-Traub: “Microvesicles and Viral Infection”, Journal of Virology, Vol. 85, No.24, 12844-12854 (2011)

(2) Raghu Kalluri and Valerie S. LeBleu: “The biology, function, and biomedical applications of exosomes”, Science, Vol 367, No.6478 (2020)

(3) Ryu Nakabayashi, Rie Koyama, Masafumi Inaba, Michihiko Nakano, and Junya Suehiro: “Quantitative evaluation of dielectrophoretic separation efficiency of cancer exosomes based on fluorescence imaging”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol 63, No.3 (2023)

(4) Sara H. Tamrin, Jolene Phelps, Amir S. Nezhad, and Arindom Sen: “Critical considerations in determining the surface charge of small extracellular vesicles”, Journal of Extracellular Vesicles, Vol 12, No.9 (2023)

(5) Takanori Akagi, Kei Kato, Masashi Kobayashi, Nobuyoshi Kosaka, Takahiro Ochiya, and Takanori Ichiki: “On-Chip Immunoelectrophoresis of Extracellular Vesicles Released from Human Breast Cancer Cells”, PLOS One (2015)

［成果の発表，論文など］

1. Miyuki Tabata, Cell-based field-effect transistors and their medical application, The 22nd International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, May 20-23, 2025, Oral, Invited
2. Kazuya Suzuki, Miyuki Tabata, Yuji Miyahara, Takahiro Arakawa, Development of a Reference Electrode Integrated Ir/IrOx Thin film pH Sensor for microRNA Detection, 18th International Conference on Sensing Technology (ICST2025), December 1-3, 2025, Oral
3. Kazuya Suzuki, Miyuki Tabata, Yuji Miyahara, Takahiro Arakawa, Development of an integrated reference electrode pH sensor chip and investigation of a label-free microRNA detction, International Meeting on Sens ors and Microsystems for Sustainable Development Goals 2026 (IMSM-SDGs 2026), March 27-28, 2026, Oral (MSS-26-025, CHS-26-002, BMS-26-002)

［研究助成（A）］

単眼ビデオによる物体操作を含む人間の 4D 再構成およびアクション編集への応用

2251023



研究代表者（助成金受領者）　東京大学 大学院情報理工学系研究科　教授　鄭　銀強

共同研究者　東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻　博士課程　ZHAN Yifan

［研究の目的］

本研究は，特別なマルチカメラシステムや専用の撮影スタジオといった高コストな設備を必要とせず，スマートフォンなどの単一カメラで撮影された「単眼ビデオ」のみから，道具や小物の操作（Hand-held Objects）およびゆったりとした衣服（Loose-fitting Garments）を着用した人間の複雑な 3 次元ジオメトリと動的なモーション（4D アバター）を高精度かつ高速に再構成・デジタル化する革新的な技術の確立を目的とする（図 1）。

従来の 3D 人間再構成技術（標準的な SMPL モデルなど）は，人間の皮膚表面にのみ適合するように数理的に設計されている。そのため，人間が手に持っている物体（スマートフォン，バッグ，スポーツ用具等）や，身体の運動と完全には同期しない衣服の「はためき・ゆとり」を同一の統一フレームワーク内で表現することが極めて困難であった。これらの要素の運動は，人体の骨格運動から物理的にデカップリング（分離）しているため，従来のトポロジー固定型のモデルでは形状の破綻やテクスチャの深刻な歪み，位置の不整合が生じる原因となっていた。また，これらを解決するための従来のアプローチは，事例ごとに膨大な時間をかけて個別に最適化計算を行う必要があり，実用性の面で大きな課題を残していた。



図 1　本研究が対象とする道具・小物の操作と，ゆったりとした衣服を着用した人物の例

本研究は，当財団の趣意である「人間と機械の調和の促進」に深く根ざしている。コンピュータが人間の外観だけでなく，着用している衣服や操作する道具の物理的・幾何学的特性までシームレスに理解・デジタル化できる基盤を構築することを目指す。これにより，バーチャルリアリティ（VR/AR），映像制作，アスリートの動作解析，高度な作業現場におけるパフォーマンス向上など，人間と機械がサイバー・フィジカル空間で協働する多様な分野において，リアリティに富んだ自由視点合成と直感的なアクション編集の基盤を提供する。

［研究の内容，成果］

1. ToMiE といった技術提案

本研究では，従来の SMPL モデルの表現能力の限界を打破し，時間のかかる事例ごとの最

適化を排除して，複雑な動的シナリオに適応可能な新しい 4D アバター再構成アーキテクチャ ToMiE を開発した。図 2 には，ToMiE のの処理フローを示している。ToMiE の中心的な考え方は，標準的な人体骨格木を固定したまま利用するのではなく，観測データに応じて外部関節を適応的に成長させる点にある。これにより，身体表面から外れた物体や衣服の動きを，単なる非剛体変形としてではなく，明示的な運動構造として扱うことができる。

ToMiE の処理パイプラインは，標準 SMPL 骨格を基盤としながら，手持ち物体やゆったりとした衣服など，SMPL のみでは表現が困難な外部要素を適応的にモデル化する構成となっている。全体の流れは以下の 5 段階にまとめられる。

1.1. Canonical 空間における Gaussian の初期化

まず，標準 SMPL メッシュの頂点を用いて canonical space に 3D Gaussian を初期化する。

これにより，人体本体の幾何構造を SMPL に基づいて安定的に表現し，その後の姿勢変形やレンダリングの基準となる canonical representation を構築する。初期段階では，Gaussian は基本的に人体表面に対応して配置され，従来の SMPL ベースの人体アバター表現と同様に，人体の姿勢変化に追従できるように設計されている。

1.2. LBS による Gaussian の変形と Adaptive LBS

次に，Linear Blend Skinning（LBS）を用いて，canonical space 上の Gaussian の位置を各フレームの観測空間へ変換する。Gaussian の位置は SMPL 骨格の姿勢に従って変形されるが，単純な LBS だけでは回転やスケールのずれを十分に補正できないため，ネットワークを用いて Gaussian の回転およびスケールを補正する。学習初期の warmup phase では，Adaptive LBS は標準 SMPL 骨格のみを利用する。その後，adaptive growth によって外部関節が新たに生成されると，LBS の対象骨格は標準 SMPL 骨格に加えて，成長した外部関節も含む拡張骨格へと更新される。これにより，手持ち物体やゆったりとした衣服のように，人体本体とは異なる運動をする領域も，より柔軟に表現できるようになる。

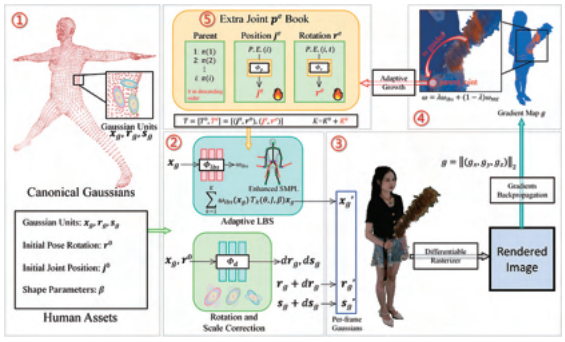


図 2　提案の ToMiE の処理フロー

1.3. Gaussian Rasterization と勾配の逆伝播

変形された Gaussian は Gaussian rasterization によって画像としてレンダリングされ，入力画像との誤差に基づいて学習が行われる。このとき，レンダリング誤差から得られる勾配は各 Gaussian に逆伝播される。ToMiE では，この勾配情報を単なるパラメータ更新だけでなく，「どの関節周辺で表現能力が不足しているか」を判断するための重要な手がかりとして利用する。つまり，ある関節に関連する Gaussian に大きな勾配が集中している場合，その領域では標準 SMPL 骨格だけでは十分に観測を説明できておらず，新たな外部関節を成長させる必要がある可能性が高いと考える。

1.4. 勾配に基づく親関節の局在化と Motion Kernel

外部関節をどこに追加すべきかを決定するため，ToMiE は gradient-based parent joints localization を行う。具体的には，各 Gaussian の勾配を関節ごとに集計し，大きな勾配が蓄積された関節を，新しい外部関節を成長させる候補，すなわち parent joint として選択する。ただし，SMPL の LBS weight のみで Gaussian と関節の対応関係を決めると，手持ち物体や衣服のように人体表面から離れた領域では誤った割り当てが生じやすい。そこで ToMiE では，LBS weight に加えて Motion Kernel を導入する。Motion Kernel は観測空間における運動の

類似性に基づいて Gaussian と関節の対応を補正する仕組みであり，canonical space 上の誤分類に過度に依存せず，より頑健に勾配を適切な関節へ割り当てることを可能にする。

1.5. Extra Joint Book と MLP による外部関節の最適化

親関節が決定されると，その子関節として外部関節を生成し，これらを extra joint book として管理する。extra joint book には，親関節の情報，canonical space における外部関節位置，および親関節座標系における外部関節の回転が保存される。さらに，浅い MLP によって外部関節の位置および回転を最適化し，フレームごとの SE(3) 変換を明示的に推定する。これにより，手持ち物体やゆったりとした衣服を人体本体の SMPL 姿勢から切り離して表現できる。すなわち，身体の姿勢を固定したまま，手持ち物体や衣服のみを独立に動かすといった，部分ごとの明示的なアニメーション編集が可能となる。

このように，ToMiE は標準 SMPL に基づく人体表現を出発点としつつ，Gaussian のレンダリング誤差から得られる勾配情報を用いて，表現能力が不足している部位を自動的に検出する。そして，Motion Kernel によって関節と Gaussian の対応付けを高精度化し，必要な箇所に外部関節を適応的に成長させる。最終的には，extra joint book によって外部関節を明示的に管理・最適化することで，手持ち物体や loose-fitting clothing を人体本体から分離して再構成・アニメーション編集できる点が，本研究の大きな特徴である。

2. 実験セットアップおよび評価

提案手法の有効性を実証するため，日常的な手持ちオブジェクト（バッグ，ガジェット，スポーツ道具など）を操作するシーンや，ルーズな衣服（コート，ゆったりとしたスカート，ドレスなど）をまとった人物を撮影した単眼ビデオデータセットを用いて，新規視点合成（Novel View Synthesis）の品質および未知のポーズに対するアニメーション制御（Animation）の精度を検証した。比較対象（Baseline）には，当時の世界最高水準（State-of-the-Art）である GauHuman，およびレンダリング特化型の 4D 表現手法である Im4D を選定した。

新規視点合成の品質評価として，ピーク信号対雑音比（PSNR），構造的類似性（SSIM），および知覚的類似性（LPIPS）を測定した。具体的な値は，表 1 に示している。

表 1 の示すように，提案手法（ToMiE）は PSNR と SSIM の指標において，衣服や手持ち物体のトポロジー変化を表現できなかった従来のベースライン手法を圧倒した。特に，激しい運動時に物体の周囲に発生がちであったゴーストノイズ（残像）や，衣服の境界部分におけるカラーの歪みが劇的に低減され，極めて高い再現精度を達成した。

図 3 の示すように，ルーズな衣服の細かなシワや，手持ちの小物の細部が，視点を 360 度

表 1　定量実験の結果

Dataset / Method | Metric	Animatable B	Animatable G	DNA-Rendering PSNR(full) ↑	DNA-Rendering SSIM ↑	DNA-Rendering LPIPS ↓	DNA-Rendering PSNR(masked) ↑
3DGS-Avatar	✓	✗	28.93	0.953	0.0459	17.69
GART	✓	✓	29.25	0.958	0.0480	17.12
Im4D	✗	✗	26.28	0.965	0.0308	14.90
GauHuman	✓	✗	30.22	0.962	0.0405	18.26
ToMiE(ours)	✓	✓	31.28	0.966	0.0374	19.75

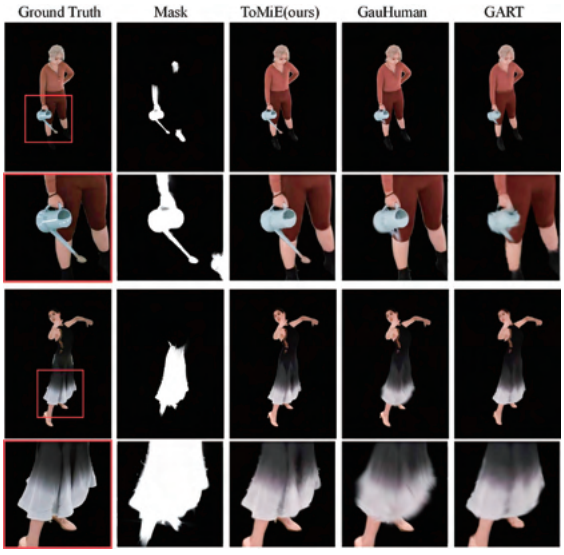


図 3　自由視点レンダリング画像の比較

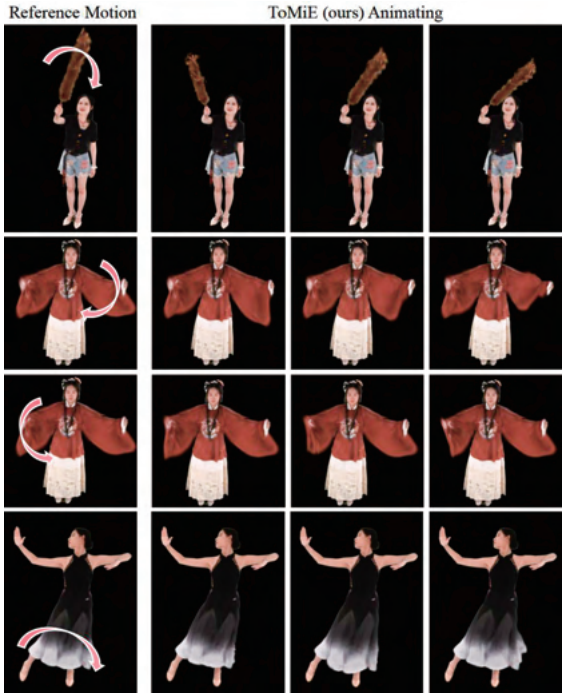


図 4　3D アクション編集・モーション操作の実施例

シームレスに変更した場合でもブレることなく，極めて高い視覚的忠実度を持ってレンダリングできることを確認できた。

図 4 では，標準的な人体骨格のポーズを固定したまま，ToMiE によって自動生成された「拡張関節（Extra Joints）」のみをアニメーション制御することで，「人物の身体を静止させた状態で，手に持っているオブジェクトのみを独立して動かす」，あるいは「衣服のみを風になびかせるように独立してはためかせる」という，従来の SMPL ベースの手法では不可能であった高度な 3D アクション編集・モーション操作を実証した。

以上により，当初の研究目的であった「単眼ビデオによる物体操作を含む人間の 4D 再構成」と「アクション編集への応用」に向けた中核技術を確立した。手作業のリギングを必要とせず，標準 SMPL に含まれない外部要素を適応的にモデル化できる点は，日常環境での 4D 人間理解および応用展開に有用である。

［成果の発表，論文など］

Yifan Zhan, Qingtian Zhu, Muyao Niu, Mingze Ma, Jiancheng Zhao, Zhihang Zhong, Xiao Sun, Yu Qiao, Yinqiang Zheng: ToMiE: Towards Explicit Exoskeleton for the Reconstruction of Complicated 3D Human Avatars, IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), pp.14259-14269, 2025.

［研究助成（A）］

体内深部でも見える色素：多色磁性粒子画像法の開発

2251024



研究代表者
（助成金受領者）

国立研究開発法人
産業技術総合研究所
健康医工学研究部門

研究員　Tay Zhiwei

［研究の目的］

心拍数や血圧など，様々な指標を非侵襲的に測定するための様々なセンサーが既に開発されている。しかし，測定装置は体表面にしか設置できないため，測定可能な生体機能の範囲は限られている。また，広く使用されている多色の蛍光色素を用いた様々な生体標識は，体内組織光散乱や減衰による体深部まで測定することができない。近赤外線（NIR）の蛍光色素は近年に開発され，光学の透過性課題を１センチまでの深さに進展した。しかし，多重多色イメージングや Multidimensional Multiplexing のため，青と緑の波長は色の数への貢献が不可欠と考える。しかし，青と緑波長の透過性が最も悪く（図１），深い部位の多重多色に使用できない[1]。一方，NIR を使用するとほとんど単色に制限される実情である。

そこで，透過性の高い磁気方法に着眼した。本研究は，図２のように，蛍光色素の標識を磁性ナノ粒子に代替する。人と機械のインターフェースにおける測定範囲を広げるために，生体適合性が高く，医療用としても認可されている酸化鉄ナノ粒子の非侵襲磁気測定を開発した。低周波数磁界照射は人体に対して優れた安全性が有し，光散乱や減衰による信号の損失なしに，体内深部の計測に使用できる。また，ヒト体内に置けるナノ粒子センサーは，今までの体表面設置に比べて測定対象・範囲が大幅拡大することが可能と考える。

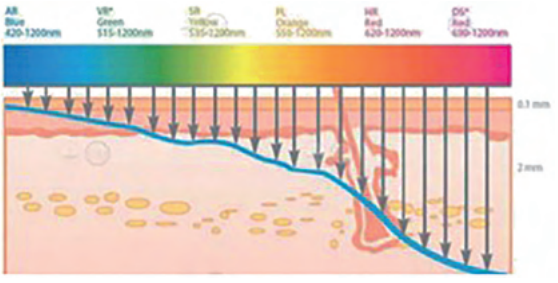


図１　波長ごとの組織深さによる光の減衰。参考文献１より，Creative Commons License に基づき転載したものである。

新規磁気方法の説明・紹介

磁気粒子イメージング（Magnetic Particle Imaging: MPI）は，磁性ナノ粒子（magnetic nanoparticle: MNP）の磁気励起反応に基づく新規医用画像法である。従来の磁気共鳴画像法 MRI と異なり，^{1}H の核スピンが信号源ではなく，磁性粒子自体が直接な信号源のため[2]，周囲組織構成や体内深度に関係なく，MNP 濃

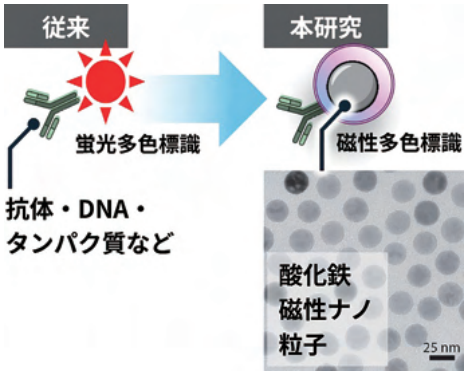


図２　本研究の概念

度に線形な相関を有する定量可能な画像輝度値が得られる[3]。そのため，蛍光のような鮮明な「染色」ができる同時に，蛍光と異なる深い部位でも「見える」。

磁性方法が困難な多重多色化を挑む

光学の蛍光色素の多色化技術は，色素の発光スペクトルの相違かつ各色スペクトルが分別可能な適切な光フィルターによって成り立つと考える。しかし，光学のように磁性粒子を多色化できない。従来の磁気手法 MRI の信号源は圧倒的に体内割合を占める水のプロトン核スピンのため，見えるのは磁性粒子が水の核スピンに対する影響のみです（MRI 造影の原理）。図 3C が示したように，粒子自体を見ることが困難である。粒子から発生する各色スペクトルではないため，MRI の映像は通常一色（greyscale）であり，『大量多色磁性造影剤』の開発が困難である。従来 MRI と対照的に，申請者専門の新規 Magnetic Particle Imaging（MPI）画像法は粒子自体が信号源のため，光学発光体のように画像が得られる。

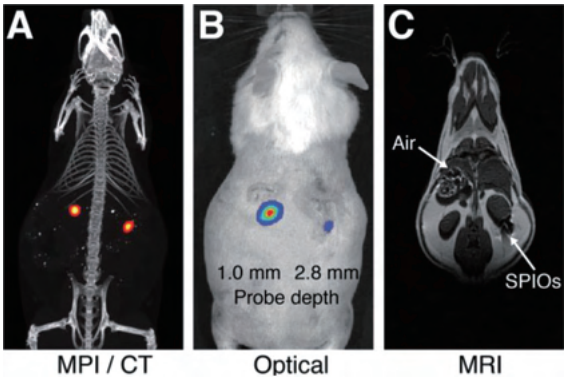


図 3　（A）MPI 磁気画像法では生体組織による信号減衰が無い。（B）一方，蛍光標識 Probe は深さによる信号減衰が見られる。（C）従来の磁気共鳴画像法 MRI は磁性粒子造影剤 SPIOs から得た画像は原則単色であり，粒子を用い多重多色を達成することが困難と考える。参考文献 4 より，Creative Commons License に基づき転載したものである。

［研究の内容，成果］

方法

1.『色素』になる磁性粒子のライブラリー構築（色素候補を集める）

磁性ナノ粒子の磁気特性を計測・分別のために，ハイスループットの磁性特性計測装置を創造した（図 4）。参考文献 5 のような装置構造である，電磁コールなどを用い，磁性粒子サンプルに多様な磁気励起を照射し，粒子から発した磁気反応を計測や分析を行う。粒子は全て生体適合性のある酸化鉄だが，幅広いタイプを使用した。例えば，Superparamagnetic などの磁気特性[6]，コアの数の変更（Single-core Multicore），またはコアの形（Spherical や Nanoflower 構造）のように多様な粒子タイプ[7] を検証した。

2. 各色を分別できる分析アルゴリズムの創成（色フィルターのような機能）

まず，図 4 の装置を用い，各粒子の独自な磁気特性を記録し，校正した Signature Spectra（独自な磁気スペトラムパータン）を特定する。新規分析アルゴリズムにて，光学のような発行ピーク Emission Peak として表示することに成功した（図 6）。各 Emission Peak に独自な「色」を割り当てる。MPI 撮像時，イメージの各画素 Pixel の磁気スペトラムを抽出し，スペトラム分析を行い。そのデータを予め記録した Signature

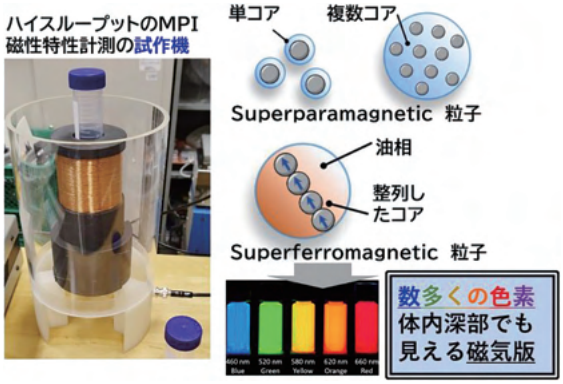


図 4　本研究で使用したハイスループットの磁性特性計測装置。『色素』になる磁性粒子のライブラリー構築のために，多数な粒子タイプを集め，磁気特性を計測した。

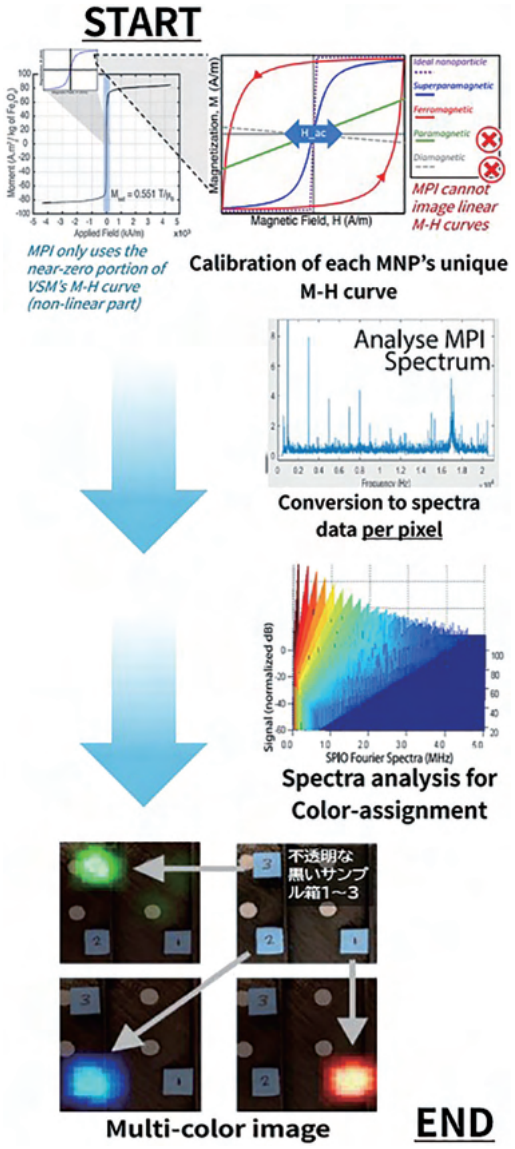


図５　本研究で用いた手法の図解。さまざまなナノ粒子（SPIO）に対して周波数ベースの解析を行い，それぞれの固有のスペクトル特性を記録した後，MPI の生画像データを各色ごとに個別に調整し，指定された色のみが表示されるようにした。

Spectra に比較し，粒子タイプを特定する。最後に，画素ごとに粒子タイプに応じて割り当てた「色」に塗り替える。

結果

1.『色素』になる磁性粒子のライブラリー構築

10 種類の粒子タイプの評価を行い（NP1 ～ NP10），３つの粒子タイプの特性は他粒子と分別できないため最終的に７つの色に絞り込んだ。図６に示したようにスペトラムピークとして表示した。各ピークはほとんど重なっていないため，画素ごとにスペトラムピーク分析をすれば，ピーク位置のみで「色」を正確に特定可能と考える（光の波長フィルターのように）。

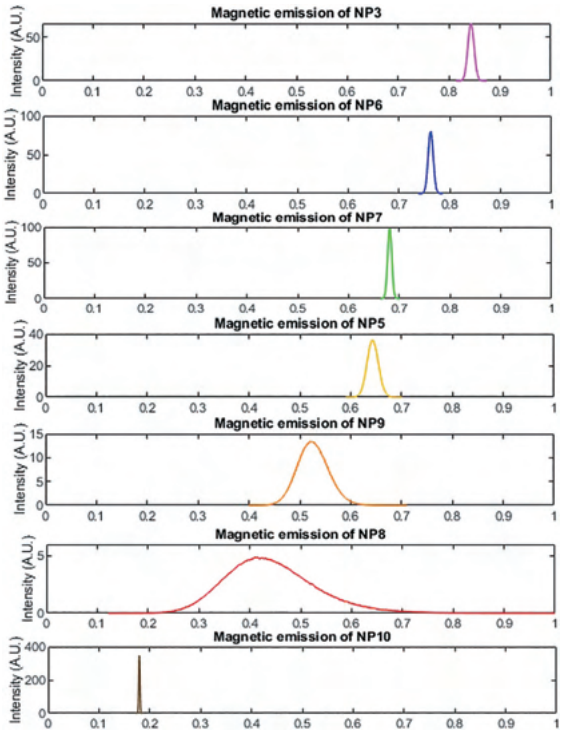


図６　幅広い種類の磁性ナノ粒子の中から最終候補を選定し，発光ピークの重なりが最小限の７種類の磁性ナノ粒子を選び出し，色を割り当てた。

2. 各色の分別と多重多色イメージの再構成

人体模擬ファントムの評価実験を行うために，図４の装置と異なり，生体に外から磁場を照射できる電磁計測装置を創造した（図７左上）。MPI 走査や基礎の画像再構成（単色）は我々の先行研究[8]（X-space 方法）のように行った。

人体模擬ファントムに１ cm の球状容器を埋め込んだ。容器ごとに各タイプの磁性粒子溶液を含有されている。装置はファントムの全体に Raster 走査後，記録した磁気データを分析し，図５が示した方法にて画素ごとに粒子タイプを特定した。粒子タイプに応じ独自な「色」を塗り替えた。最後に，その MPI 画像（粒子の空間分布情報・色情報）をファントムの写真に重なり，多重多色画像再構成に成功した（図７）。



図７　（上）人体模擬ファントムの MPI 走査の流れ。
（下）ファントムの写真に重なった粒子の MPI 分布画像。粒子タイプに応じて画素の「色」を塗り替えた。

［考察・まとめ］

本研究では，酸化鉄磁性ナノ粒子の磁気応答の違いを利用し，光学的な色多重化に相当する磁気的な手法を実現する戦略を提示する。酸化鉄ナノ粒子は生体適合性が高く，造影剤（リゾビスト Resovist など）としてすでに臨床使用が承認されている。これらのナノ粒子は，一般的な量子ドットよりも大きいが，依然として 10 ～ 150 ナノメートルの範囲にあり，ナノサイズのマーカーと見なすことができる。低周波磁気による励起と受信を行うことで，信号は生体組織を全く減衰することなく透過することができ，深部組織においてもカラー多重化が可能となる。これにより，多数の独立した「磁気色」を使用する際の多次元データ解析の基盤が築かれる。

また，粒子の安全性・耐久性を駆使し，iPSC 細胞などの幹細胞・免疫細胞の生体内モニタリング・追跡に有用[9]と考える（複数タイプの細胞の同時 Tracking）。

［参考文献］

［1］Alhallak K et al. (2021) Skin, Light and their Interactions, an In-Depth Review for Modern Light-Based Skin Therapies. J Clin Dermatol Ther 7: 081.
［2］Ross BD, Gambhir SS (2021) Molecular imaging: principles and practice.
［3］Hensley D et al. (2017) A theranostic platform for localized magnetic fluid hyperthermia and magnetic particle imaging. in Energy-based Treatment of Tissue and Assessment IX vol. 10066: 10–17 (SPIE).
［4］Zheng B et al. (2016) Quantitative magnetic particle imaging monitors the transplantation, biodistribution, and clearance of stem cells in vivo. Theranostics 6(3) 291–301.
［5］Bauer LM et al. (2016) Eddy current-shielded x-space relaxometer for sensitive magnetic nanoparticle characterization. Rev. Sci. Instrum. 87: 055109.
［6］Saayujya C et al. (2025) Physicochemical Necessary and Sufficient Conditions for Superferromagnetism in High-Resolution Magnetic Particle Imaging. Small 21: e04794
［7］Rezaei B. et al. (2024) Magnetic nanoparticles for magnetic particle imaging (MPI): design and applications. Nanoscale 16: 11802–11824.
［8］Tay Z et al. (2023) A Magnetic Particle Imaging approach for minimally invasive imaging and sensing with implantable bioelectronic circuits. IEEE Trans. Med. Imaging 43: 1740–1752.
［9］Tay RE et al. (2024) High-efficiency magnetophoretic labelling of adoptively-transferred T cellsfor longitudinal in vivo Magnetic Particle Imaging. Theranostics 14: 6138–6160.

［成果の発表，論文など］

Zhiwei Tay: Development of highly-multiplexed magnetic markers as a foundation for non-optical, deep-tissue Multidimensional Data Analysis，生体医工学，Annual64 巻，Proc 号，2026（アクセプト，学会 Proceedings に記載予定である）

［研究助成（A）］

食品形状設計技術と高精度フード 3D 造形技術の開発による食感デザイン法の確立

2251025



研究代表者（助成金受領者）	東京大学　大学院工学系研究科	准教授	長　井　超　慧
共同研究者	慶応義塾大学	准教授	小　池　　綾

［研 究 の 目 的］

「食」はすべての人の健康を支える重要な因子である。とりわけ食感は食のおいしさの価値を高めるだけでなく，摂食のしやすさにも直結する重要な要素である。所望の食感を有する食品を製造できるようになれば，消費者にとってよりおいしい食品の開発が期待できるだけでなく，老化や障害によって咬合力が低下した人々にとって，食べやすく心地よい食べ応えの食品の実現などが期待できる。これは，人間と深く調和して高い QoL を保証する機械・社会システムの実現であり，すべての人の健康を目指す SDGs の理念にも沿っている。

この実現には，食品に対する形状設計的視点・加工学的視点による「食感の評価・設計手法の確立」およびそれを検証するために，食品ならではの「低融点・低剛性・脆性材料へ対応可能な造形方式の開発」の 2 点の実施が有効である。そのため本研究では，高精度 3 次元形状測定に基づく食品の特性評価モデルの構築と，低融点・脆性材料に対応した高遠心場 3D プリンタの開発による高精度フード 3D プリント技術の開発を実施した（図 1）。これらにより，ソフトウェア・ハードウェアを包括した食品の形状設計とその評価を実現し，所望の食感を有する食品を製造可能な食感設計技術の基盤を確立することを目指した。

［研究の内容，成果］

1. 概要

本研究では，食品内部の微細構造と食感の関係を明らかにするための「高精度 3 次元形状測定に基づく食品の特性評価」と「高遠心場 3D プリンタの開発による高精度フード 3D プリント技術の開発」を実施した。以下にその内容と成果を述べる。

2. 高精度 3 次元形状測定に基づく食品の特性評価

2.1 概要

食感に関する研究としては，官能試験による評価や，感覚と形状の結び付けを図る感性工学的なアプローチがなされているが，計測による実際の食品の内部構造と食感を対応付ける例は少ない。本研究では，複雑で微細な内部形状が食感に影響しうる食品を対象に，高分解能 X 線 CT スキャンによって得られる食品内部の微

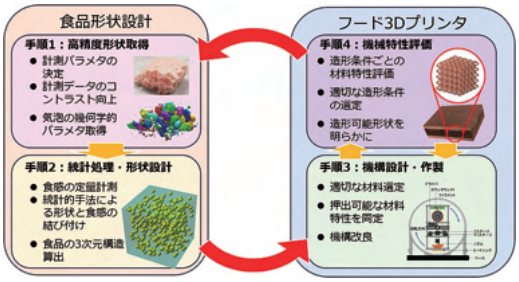


図 1　研究概要

細な三次元構造データを用いることで，より客観的かつ定量的な食感評価手法の確立を目指した。X 線 CT スキャンは非破壊計測の一種であり，物体内部の構造と密度情報をマイクロメートル精度のグレイスケール 3 次元画像として取得することができる計測法であり，医療・製造業で用いられることが多いが，食品への展開も昨今注目を集めている。

今回は，内部の気泡構造が食感に影響を及ぼす食品であるスナック菓子と納豆を対象とし，構造の幾何学的特徴と食感との対応付けを試みた。食品の吸湿や撹拌などによる内部構造の変化を X 線 CT スキャンで明らかにし，構造変化が食感へ与える影響について検討し，以下の成果を得た。

・X 線 CT スキャンが水分量の変化を調べるのに有効であることを明らかにした
・スナック菓子の食感に関し，説明力の高い吸湿指標を特定した
・納豆の気泡の構造とクリーミーさに相関があることを明らかにした

2.2 X 線 CT スキャンによる水分量の変化の検出可能性の調査

吸湿により食感が変化するスナック菓子を対象とし，乾燥状態および吸湿後の状態について X 線 CT スキャンを行い，内部構造および CT 値分布の変化を解析した。食品内部構造の計測には，産業用 X 線 CT 装置 Rigaku CT Lab HX130 を主として用い，より高コントラスト・高分解能な計測を実現するため，X 線顕微鏡 ZEISS Xradia Versa 510 も用いた。

その結果，吸湿後の食品では，気泡構造の微細化や消失が確認されるとともに，食品部分に対応する CT 値分布が高輝度側へ移動する傾向が確認された（図 2）。これは，水分吸収によって食品内部の密度が増加したことを示唆しており，CT 値が，吸湿を考慮した新たな食感評価指標となる可能性が示された。

2.3 食感の説明力の高い吸湿指標の特定

従来研究［Tanaya 2022］で提案されていた気泡形状に基づく食感評価式を吸湿食品に適用したところ，食品種によって傾向が一致せず，形状特徴のみでは吸湿による食感劣化を十分に説明できないことが分かった。

乾燥したスナック菓子サンプルとそれを吸湿させたサンプルについて，X 線 CT スキャンにより内部の気泡の形状や，密度に相関する値である CT 値を取得した。取得した CT ボリュームデータに対し，ノイズ低減処理および閾値処理を行い，食品内部の気泡領域を抽出した。さらに，距離場を用いたラベリング手法を開発し，これにより気泡を従来法に比べ正確に個別に検出することが可能となった（図 3）。気泡数，体積，半径，分散などの幾何学的特徴量を算出し，これらの特徴量を CT 値に関する数値と共に，［Tanaya 2022］による手法を用いて食感と形状特徴の関係式の算出を行った。その結果，従来法よりも高い決定計数が得られた。これは，CT 値に基づく特徴量を説明変数に加えることで，従来手法よりもあてはまりのよい食感評価式を算出することができたことを示している。

2.4 気泡の構造とクリーミーさの相関の解明

納豆を対象とした解析では，撹拌回数による内部気泡構造の変化を評価した。納豆は撹拌回

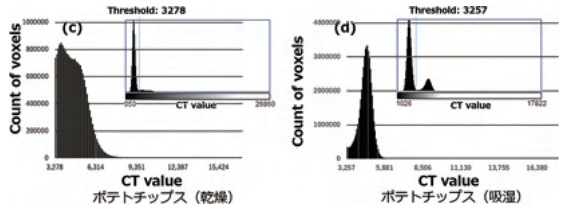


図 2　吸湿前後の食品の CT 値の変化（右上：閾値処理前のヒストグラム）

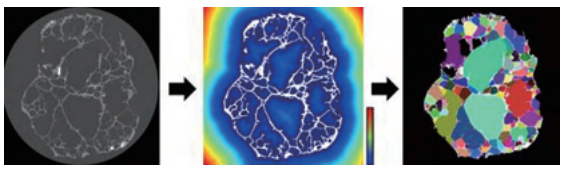


図 3　気泡検出手法の概要。左から，入力 CT 画像の断面図，物体表面（白色部）からの符号付距離場，検出された気泡（色はランダム）

数を増やすことで「クリーミー」な食感になることが経験的に知られている。本研究ではその現象をX線CTスキャンによって可視化・定量化した。

実験では，市販の納豆2品種（納豆A，納豆Bとする）を実験試料として用いた。X線CTスキャンには，Rigaku社製CT Lab HX 130を使用した。また，今回の実験において，撹拌後の経過時間や，資料温度，および撹拌方法については一定であるものとして実験を行った。

気泡の幾何学的性質を解析した結果，撹拌回数の増加に伴い，内部に形成される気泡数が増加し，気泡体積および体積分散が減少する傾向が確認された（図4）。これは，撹拌によって気泡が微細化し，より均一な気泡構造が形成されることを示している。この結果は，「クリーミーさ」の向上が，微細かつ均一な気泡構造に起因する可能性を示唆しており，感覚的に語られてきた食感変化を構造情報から定量的に説明できる可能性を示した。

3. 高遠心場3Dプリンタの開発による高精度フード3Dプリント技術の確立

フード3Dプリンタ：低融点・低剛性・脆性材料へ対応可能な造形方式の開発

3Dプリンタの多くは，溶融・凝固にもとづく造形方式を採用し，樹脂や金属など融点が数百℃を超える材料を対象としている。一方で食品は基本的に数℃の違いで品質が大きく変化してしまうため，品質を維持しながら造形を行うなら，溶融・凝固のみに依らない方法も考慮する必要がある。本研究では，遠心機と3Dプリンタを融合した造形装置を実装し，高い材料流動性を実現して造形困難な食品に対応できるフード3Dプリンタを実現する。

3Dプリンタの造形材料として食品を扱う例は，企業がエンタテインメントを目的として開発する以外，学術的に取り扱われる例がほとんどない。繊細な温度制御が求められる以外にも，混合材料は組成比の違いによる特性のばらつきが大きいなどの難点があるため，適切な造形条件を同定する作業から慎重に評価する必要がある。本研究は「力学的作用により造形特性を変化できる」点を提案の核としているため，材料特性のばらつきによらず学術的な新規性を示せる。

食品用3D造形ノズルの作製・改良を行う上で，チョコレートや飴など，高粘性・高表面張力な材料を用いることを前提とするとフィラメント化が困難であることから，図5に示すとおりFGF方式のノズルが適している。

図6に示すようにFGFタイプのノズルで材料を送る機構を構成し，図7のような3軸ステージを構成して，1G場における実験を試みた。一般的なフィラメント材料を利用する3Dプリンタと異なり，スクリューによる材料の送り出し機構は高精度な温度制御が求められ，ペースト状材料の詰まりが生じやすい。1G場における実験を進めているものの，市販されている粉末チョコレートの溶融・送り出しを安定的に行うこと

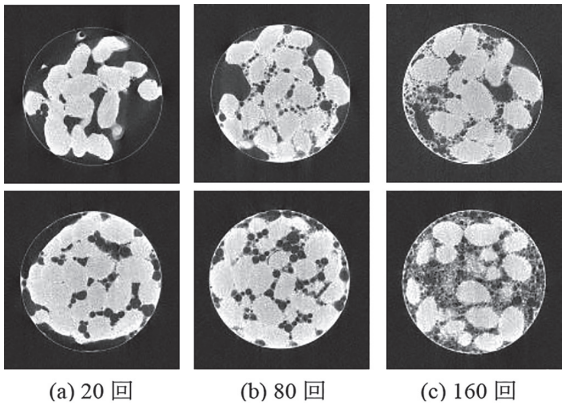


図4　撹拌回数ごとの納豆（上段：納豆A，下段：納豆B）のCTボリュームの断面

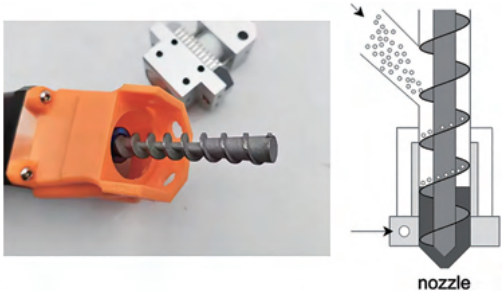


図5　ペレット用FGFノズルのスクリュー機構

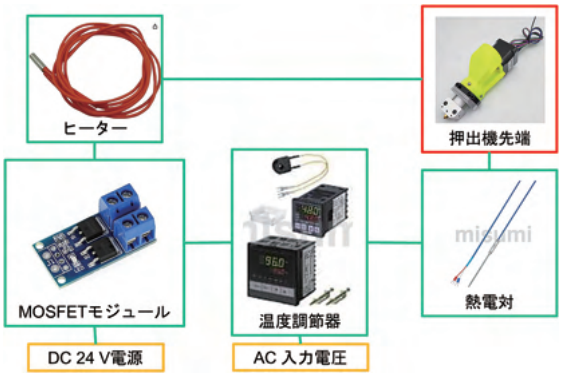


図 6　チョコレート造形用 FGF 装置の構成

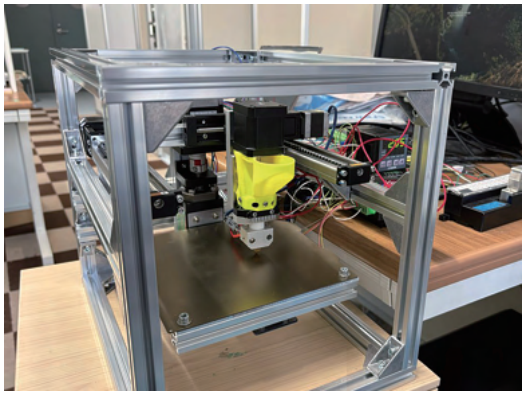


図 7　FGF 形式の 3 軸造形装置

に苦戦している。チョコレートに含まれる油脂の割合によって溶融特性が異なることが明らかとなってきており，市販品で油脂成分の高い材料の実験を進めながら，造形できることを優先して，別途油脂を追加することも検討している。

全体的に当初計画よりも遅れが生じているものの，1G 場において適切な材料の合成と造形ができれば，この装置を既存の遠心機側に搭載することで高重力場におけるプロセス特性の変化を評価できるようになる。低融点かつ高粘性の材料に対して高重力場が有効に作用するか，引き続き実験的に評価することを目指して実験を継続する予定である。

4. まとめと今後の展望

本研究では，食品内部の気泡構造だけでなく，食品材料そのものの密度変化にも着目した。従来の研究では，食品内部の幾何学的特徴量と食感との対応付けが中心であったが，本研究では CT 値分布を解析対象に加えることで，水分量や密度変化を含めた食感の検討ができることを示した。また，異なる性状・食感の食品についても X 線 CT スキャンを用いた解析が有効であることを実証した。

本研究では，食感設計技術の実現に向け，食品内部構造を制御可能なフード 3D プリンタ技術についても検討を行った。特に，チョコレートや飴などの低融点・高粘性材料を対象とし，高遠心場を利用した食品造形技術の検討を進めた。造形中に遠心力による力学的作用を与えることで，材料流動性を向上させ，従来では安定造形が困難であった食品材料についても微細構造造形を可能とすることを目指した。本研究では，ノズル形状や押出条件，温度条件などについて基礎的検討を行い，食品材料の造形特性評価に向けた知見を得た。

現在は，上記の結果を基に，水分量も考慮し，希望の食感を有する食品を設計する手法の開発を進めている。設計結果の形状を実食品で再現し検証することは先行研究において残された課題となっていたが，サブミリメートル精度で形状を制御することが可能なフード 3D プリンタを用い，検証可能な手法の開発も進めている。

［成果の発表，論文など］

1. Kento Imani and Yukie Nagai, Analysis of moisture absorption index of foods by X-ray CT for texture evaluation, 15th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT 2026), e-Journal of Nondestructive Testing Vol. 31(3), https://doi.org/10.58286/32606 2026 年 2 月
2. 今仁健人，長井超慧，小池綾，松本紗陽花，曽根明香里，食感評価のための X 線 CT を用いた食品の吸湿指標の解析，精密工学会春季大会学術講演会，D105，埼玉県 2026 年 3 月
3. 太田昂佑，長井超慧，X 線 CT スキャンを用いた納豆の気泡構造解析と食感設計への考察，精密工学会春季大会学術講演会，B82，埼玉県 2026 年 3 月

［参考文献］

[Tanaya 2022] Tanaya, H and Nagai, Y. Investigating the relationship between geometric features of voids and textures in aerated foods. JAMDSM, 16[6], JAMDSM0062, 2022.

［研究助成（A）］

人体模倣ソフト触覚センサネットワークによるヒトと同様に高度な触知覚能力の実現

2251026



研究代表者
（助成金受領者）
京都工芸繊維大学
大学院工芸科学研究科
准教授　永野　光

［研究の目的］

本研究の目的は，ヒトが柔らかな身体と能動的な接触を用いて素材を識別する仕組みを，ロボットフィンガを用いた構成論的実験により明らかにし，ヒトと同様に高度な触知覚能力を持つ人体模倣ソフト触覚センサネットワークの設計指針を得ることである。

従来の触覚センサ研究では，接触力，圧力分布，振動などを高精度に計測するデバイス開発が進められてきた。一方で，ヒトの触知覚はセンサに相当する受容器だけで成立するのではなく，皮膚，骨格，関節，筋腱系，探索動作が一体となって接触信号を生成する能動的過程である。そのため，ロボットがヒトと同様に素材を識別し，触感や質感を共有するためには，センサ素子の高性能化に加え，身体構造が触覚情報をどのように変調するかを理解する必要がある。

申請時には，多層柔軟皮膚と複数種の機械受容器を模したセンサ群，およびそれらを時空間的に統合する情報処理モデルの構築を掲げた。本年度はその基盤として，皮膚以外の身体的特性である関節自由度に着目し，身体柔軟性がなぞり時の接触振動と素材識別性能に及ぼす影響を調べた。関節条件のみを変えたロボットフィンガを用いることで，ヒト実験では分離が難しい身体構造の効果を，構成論的に検証することを目指した。

具体的には，関節自由度の異なる複数のロボットフィンガを製作し，接触力となぞり速度を統制した条件で素材をなぞらせ，身体各部に分散配置した加速度センサにより接触振動を計測した。得られた信号から周波数特徴量およびセンサ間特徴量を抽出し，機械学習により素材識別性能を評価した。これにより，身体構造，探索動作，センサ配置を一体として設計するための基礎知見を得ることを目標とした。

［研究の内容，成果］

1. 関節自由度を分離して操作できるロボットフィンガの製作

ヒト指は，骨格などの硬組織と，皮膚・筋・腱などの軟部組織が統合された多組織系であり，対象物への能動的接触において柔軟性と安定性を両立している。本研究では，図１に示すように，この身体性のうち関節自由度に着目し，末節，中節，基節の３リンクからなるヒト指模倣ロボットフィンガを製作した。骨格部は 3D

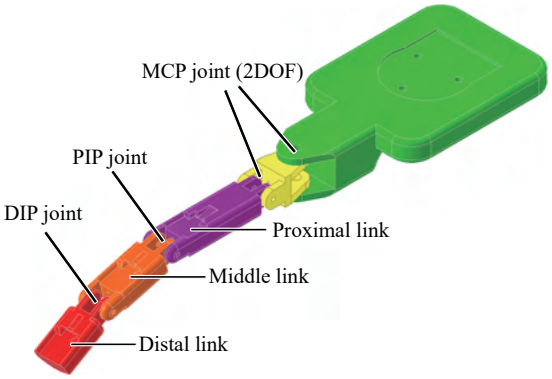


図１　関節自由度を変更可能なロボットフィンガの構造

プリント部材で構成し，各関節には受動回転機構と復元ばねを導入した。

ロボットフィンガには，DIP 関節と PIP 関節に屈曲・伸展方向の 1 自由度，MCP 関節に屈曲・伸展および外転・内転方向の 2 自由度を設定した。なぞり動作中に生じる接触振動を計測するため，図 2 に示すように，末節，中節，基節の各リンクに 3 軸加速度センサを 1 基ずつ搭載し，接触点近傍だけでなく身体各部に伝達される振動を同時計測できる構成とした。

比較条件として，全関節可動の Full-4DoF，全関節固定の Rigid-0DoF，MCP 関節の特定方向のみを拘束または開放した MCP-FE-3DoF および MCP-AA-3DoF の 4 種類を作成した。骨格形状，質量，ばね，センサ構成は共通とし，関節の固定条件のみを変えることで，関節自由度が接触振動の生成・伝達および素材識別性能に与える影響を分離して評価できる実験系とした。

実験では，xArm7 ロボットアームの先端に 6 軸力覚センサを介してロボットフィンガを取り付け，対象素材に対する押付力を計測・制御した。これにより，接触力，なぞり速度，動作軌道を一定に保ちながら，関節条件の違いに由来する接触振動の差を比較できるようにした。この実験系は，人体模倣ソフト触覚センサネットワークの評価基盤として，今後の多層皮膚や多種受容器モデルの導入にも拡張可能である。

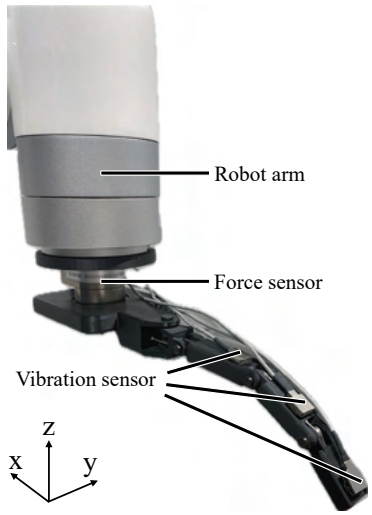


図 2　ロボットフィンガに搭載したセンサ構成

2. 基礎的な素材識別実験による関節条件の評価

素材識別実験は，図 3 に示す実験系を用いて実施した。まず，関節固定条件のみを変えた 4 種のロボットフィンガを用い，cork，metal，silicone，wood の 4 種類の素材を対象として基礎的な素材識別実験を行った。各素材をなぞる際の接触力は 3 N, なぞり速度は 12 mm/s とし，各素材 50 回の試行を実施した。加速度信号は 48 kHz で取得し，ロボットの始動・停止時に生じる過渡応答を除いた定常区間を解析対象とした。

解析では，短時間フーリエ変換により 50-8000 Hz 帯域の時間 - 周波数特徴量を算出し, 0.2 秒セグメントごとに周波数ビンの平均パワーを特徴ベクトルとした。3 つの加速度センサの特徴量を連結したうえで，RBF カーネル SVM に入力し，交差検証により素材識別性能を評価した。同一試行由来のセグメントが学習データと評価データに同時に含まれないようにし，汎化性能を過大評価しない手順を採用した。

その結果, 4 素材を対象とした基礎実験では，いずれのモデルも高い識別精度を示したが，性能には関節条件による差が認められた。Full-4DoF は 98%，Rigid-0DoF は 95%，MCP-FE-3DoF は 98%，MCP-AA-3DoF は 99% の正答率

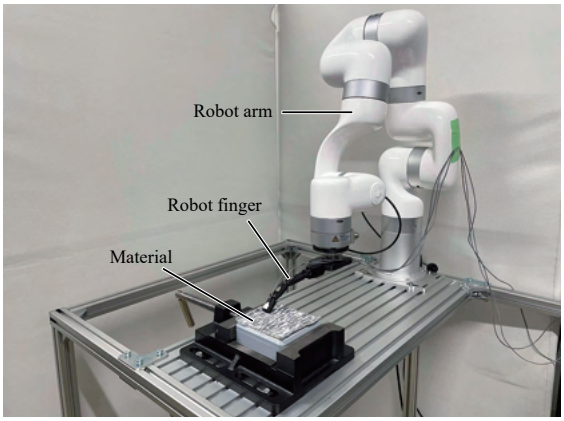


図 3　素材なぞり実験の全体セットアップ

となり，全関節固定モデルでは cork と wood の混同が相対的に増加した。一方，MCP 関節の特定自由度を有するモデルでは誤分類が抑制され，剛性と自由度の配分が素材識別に影響することが示された。

この結果は，単純に関節自由度を増やす，あるいは剛体化するという二分法では，素材識別に適した身体構造を説明できないことを示している。柔軟性は対象物表面への受動的適応を高める一方，姿勢変動や振動減衰を生じさせる可能性がある。したがって，素材識別に有効な触覚情報を得るには，接触状態の安定性と振動伝達特性の両方を考慮した剛性分布が重要である。

3. センサ位置と身体各部の役割の分析

次に，身体各部に分散配置したセンサがどのような役割を担うかを調べるため，末節，中節，基節の各センサを単独で用いた素材識別性能を比較した。末節センサは接触面に近いため，素材表面の微細な凹凸や摩擦変化に由来する振動を直接的に捉えやすい。一方で，接触姿勢や局所的な滑りの変化にも敏感であり，試行間の接触状態のわずかな違いの影響を受けやすい傾向が見られた。

中節および基節センサは接触点から離れているものの，指全体を伝搬する振動を比較的安定に取得でき，ロバストな情報源として機能した。特に，全関節可動モデルでは末節および中節の単独センサでも高い識別性能が得られたが，基節では一部素材間の混同が増加した。全関節固定モデルでは，いずれのセンサ位置でも cork の再現率が低下し，関節の固定により木質系素材の差が振動特徴として分離されにくくなる可能性が示された。

この結果は，触覚センサを接触点近傍に集積するだけでなく，身体各部に分散配置し，身体を介して変調された情報を利用することの有効性を示している。ヒト指の機械受容器は皮膚内に空間的に分布し，接触点から離れた部位にも力学的情報が伝わる。本研究のロボットフィンガでも，複数リンクに分散した加速度センサが相補的な情報を提供し，素材識別を支えることが確認された。

4. 16 種布素材およびなぞり方向への拡張

さらに，対象を 16 種類の布素材へ拡張し，さらに横方向および縦方向の 2 種類のなぞり方向を設定した。各素材に対して同一の押付力 3 N，なぞり速度 12 mm/s を適用し，指モデル，なぞり方向，素材の組合せごとに接触振動データを取得した。各条件で 100 回の試行を行い，取得した 6 秒間の信号のうち始動・停止を除いた 4 秒間を定常区間として解析した。

分類には，0.2 秒ごとの周波数特徴量，Z-score 標準化，RBF カーネル SVM を用い，10 分割の層化グループ交差検証で評価した。横方向なぞりでは，Full-4DoF が 72.1%，Rigid-0DoF が 60.2%，MCP-FE-3DoF が 69.1%，MCP-AA-3DoF が 76.4% の平均正答率を示した。この条件では，MCP-AA-3DoF が最も高く，全関節固定モデルが最も低い結果となった。

一方，縦方向なぞりでは，Full-4DoF が 45.5%，Rigid-0DoF が 64.1%，MCP-FE-3DoF が 57.0%，MCP-AA-3DoF が 63.2% となり，横方向とは異なる順位を示した。全関節可動モデルは縦方向で大きく性能が低下し，全関節固定モデルおよび MCP-AA-3DoF が高い性能を示した。このことから，有効な関節条件は指モデル単体で決まるのではなく，探索方向との組合せによって決まることが明らかになった。

統計解析では，横方向なぞりと縦方向なぞりのいずれにおいても指モデル間に有意な主効果が認められた。横方向ではすべての指モデル間に有意差が見られたのに対し，縦方向では Rigid-0DoF と MCP-AA-3DoF の間には有意差が認められなかった。すなわち，横方向では一部の自由度を残す構造が有効である一方，縦方向では高い構造的剛性が接触振動を安定に取得する上で有利に働く可能性が示された。

5. 接触振動特徴量から見た機構的要因

識別性能の差を力学的に解釈するため，分類用の STFT 特徴量とは別に，接触振動信号から時間領域特徴量，周波数領域特徴量，ケプストラム特徴量，およびセンサ間特徴量を算出した。具体的には，RMS，ピーク振幅，ゼロ交差率, 尖度, 帯域別パワー, スペクトル重心, ピーク周波数，スペクトル平坦度，MFCC，センサ間相関，平均コヒーレンスなどを用いた。

Random Forest による特徴量重要度解析の結果, 横方向および縦方向のいずれにおいても，多くのモデルで 50-100 Hz 帯域の Band Power が上位特徴量として現れた。このことは，布素材をなぞる際に生じる比較的低周波の振動エネルギーが，素材識別に強く関与することを示している。また，100-200 Hz 帯域や 800-2000 Hz 帯域のパワーも一部条件で上位となり，素材表面の繊維構造や摩擦変動が複数の周波数帯域に反映されることが示唆された。

一方で，関節条件によって重要となる特徴量の種類は異なった。MCP-FE-3DoF では，センサ間コヒーレンスが上位に現れ，単一センサで観測される振動強度だけでなく，指節間の周波数的関連性が識別に関与する可能性が示された。また，MCP-AA-3DoF では，Band Power に加えて RMS，MFCC，相関係数などが上位となり，振幅情報，スペクトル包絡，波形類似性を含む複数の情報が利用されていると考えられた。

以上より，関節自由度は単に接触の柔らかさを変えるだけでなく，振動の発生，減衰，伝達経路，およびセンサ間の情報関係を変化させることが分かった。これは，身体構造そのものが触覚信号を時空間的に変換する物理的な情報処理系として働く可能性を示す。申請時に掲げた「皮膚・センサ構成を物理リザバとして活用する」という考え方に対し，本年度の成果は，関節自由度や剛性分布も含めた身体全体を情報処理資源として捉える重要性を示した。

6. まとめ

本研究では，ヒト指模倣ロボットフィンガを用いて，身体柔軟性が素材識別に与える影響を定量的に検証する基盤を構築できた。得られた成果は，人体模倣ソフト触覚センサネットワークにおいて, センサ素子や皮膚材料だけでなく，関節自由度，剛性分布，センサ配置，探索動作を統合的に設計する必要があることを示している。特に，多自由度化や柔軟化が常に識別性能の向上に直結するわけではないという結果は，ロボット触覚設計における重要な知見である。

今後は，関節を固定・可動の二値条件として扱うだけでなく，可変剛性機構を導入して剛性の大きさを連続的に変化させる。これにより，接触面への受動的適応と振動伝達の安定性の間に存在するトレードオフを定量化する。また，関節角度，接触力分布，接触面積，指節間の振動伝達関数を同時に計測し，識別性能差を生じさせる力学的要因をより直接的に明らかにする。

これらの成果は，ロボットが人と同様に素材を識別し，触感や質感を共有するための基盤技術につながる。将来的には, 遠隔操作ロボット，義手，介護・医療支援機器，柔軟物操作ロボットなどにおいて，対象物との接触状態をより豊かに理解する触覚システムの設計に貢献できる。本研究で得た身体構造と探索動作を一体として扱う視点は，「人間と機械の調和」を支える触覚インターフェース設計の基礎となる。

［成果の発表，論文など］

1. 岩村 翔馬，永野 光，野中 哲士：身体性触知覚の構成論的理解：ロボットの関節自由度が素材識別に及ぼす影響，第 26 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（2025 年 12 月）

［研究助成（A）］

慣性センサ搭載耳装着型デバイスを用いた重心動揺計測手法の開発

2251027



研究代表者 （助成金受領者）	東京大学 空間情報科学研究センター	教授	西　山　勇　毅
共同研究者	東京大学　生産技術研究所	助教	田　谷　昭　仁
	東京大学　生産技術研究所・ 空間情報科学研究センター	教授	瀬　崎　　薫

［研 究 の 目 的］

重心動揺（CoP: Center of Pressure）は人間の姿勢制御能力を評価する重要な指標であり，高齢者の転倒予防･リハビリテーション･スポーツ医学など幅広い分野で活用されている。また，転倒リスクの早期発見や脳震盪後の回復管理にも有用とされる。正確な CoP 計測は，フォースプレートのような専門的で高価な固定設備を用いて計測され，計測された重心動揺の軌跡から，重心動揺の平均移動速度（avgV）・最大移動速度（maxV）・垂直/水平方向変位範囲（dispAP/dispML）・信頼楕円面積（area）の 5 項目が主に算出され，評価指標として広く利用されている。CoP は，開眼・閉眼や異なる姿勢（両足や片足，タンデム）などの異なる姿勢や状態で計測されている。本研究ではこれらの評価指標を，CoP 関連指標と定義する。

一方，フォースプレートを用いた伝統的な手法は，計測機器が高価かつ固定型のため，日常中に気軽に利用するのは困難であった。そこで，ウェアラブルデバイスによる代替も提案されている。例えば腰に装着したモーションセンサから重心動揺を計測するなどの検討が行われている。しかし，既存手法では腰にセンサを固定するための専用器具を要し，日常生活へのシームレスな統合に課題があった。

本研究では，近年普及する市販の「耳装着型デバイス（イヤホン等）」に搭載された慣性センサ（IMU）を活用し，専用機器なしに CoP を計測・推定できる手法の開発を目的とする。耳装着型デバイスはシームレスな日常統合・低コスト･継続モニタリングの面で優位性を持つ。頭部位置と重心動揺の強い連動性に着目し，機械学習によって耳装着デバイスのデータから CoP 関連指標を推定するモデルを構築する。

［研究の内容，成果］

本研究では，完全ワイヤレスイヤホン（Apple 社の AirPods シリーズ）等の IMU が搭載された耳装着型デバイスからモーションセンサデータを収集し，そのセンサデータを用いて CoP を推定する機械学習モデルを開発する。本研究の遂行に当たって，① CoP 推定モデル開発のためのデータセットの構築，および② CoP 推定モデルの設計・実装と③その評価を行った。

まず① CoP 推定モデル開発のためのデータセット構築では，計測環境の整備と手順を確立し，20 名の実験参加者から実際に CoP 計測とイヤラブルデバイスからモーションセンサデータの計測を行った。図 1 に CoP とモーションセンサの計測環境を示す。

計測システムは，同期された 3 種類のデータ取得モダリティで構成した。主要なイヤラブルデバイスとして，OpenEarable 1.3 プラット

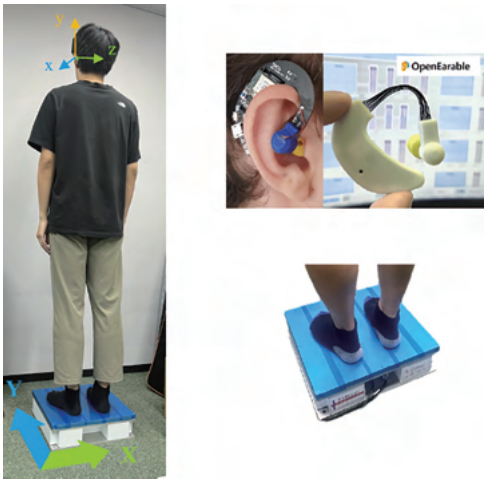


図 1　CoP とモーションセンサデータの環境

フォームを使用した。このデバイスは Bosch BMX160 の 9 軸 IMU（加速度・ジャイロ・地磁気センサ）を搭載し，Web Bluetooth 接続を介して 50 Hz でサンプリングを行った。比較対象として，市販の腰部装着型 IMU システム（Sports Sensing）を用い，弾性ベルトにより第 5 腰椎（L5）付近に装着し，100 Hz でサンプリングした。

正解データとしては，フォースプレート（Sports Sensing TFP-404011B，40 × 40 cm）を使用し，1000 Hz で 3 軸力（Fx, Fy, Fz）およびモーメント（Mx，My，Mz）を計測した。フォースプレート内部のハードウェアにより，力とモーメントから CoP が算出された。センサデータの時刻同期は，NTP（Network Time Protocol）を用いて同期した。また，計測時の映像を Azure Kinect の深度カメラと通常のカメラで撮影し，ラベル付けに活用した。特に Azure Kinect では三次元の頭部位置情報を記録した。

データ計測は，20 名の参加者を対象に行われた。参加者は，学習効果を最小限に抑えるため，固定された順序で 6 条件（図 2）からなる標準化されたバランス評価プロトコルを実施した。条件は，両脚立位･開眼（S2O），両脚立位･閉眼（S2C），タンデム立位・開眼（TO），タンデム立位･閉眼（TC），片脚立位･開眼（S1O），

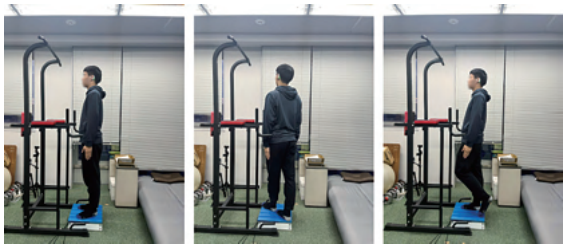


図 2　三種類の計測姿勢：両脚（左）・タンデム（中央）・片脚（右）

片脚立位･閉眼（S1C）である。両脚立位では，参加者は足を肩幅程度に開き，腕を自然に下ろして立った。タンデム立位では，利き足を前にして，かかととつま先を一直線に並べた姿勢をとった。片脚立位では，利き足で立ち，反対側の脚をわずかに持ち上げた。

各試行は 33 秒間とし，疲労を防ぐため試行間に 17 秒間の休憩を設けた。開眼条件では，参加者は首を動かしたり回したりせず，自由に視線を保った。安全確保のため補助者が近くに待機したが，バランスを崩した場合を除き身体的な補助は行わなかった。バランスを崩した場合には，追加の休憩後に試行を再実施した。解析では，姿勢移行の影響を除去するため，各試行の最初の 3 秒間を除外し，条件ごとに 30 秒間の有効データを用いた。これは臨床的なプロトコルと整合するものである。尚，本実験は，東京大学空間情報科学研究センターの実験倫理審査委員会の承認を受けた上で実施し，すべての実験参加者から実験参加前にインフォームドコンセントを取得した。

② CoP 推定モデルの設計・実装

信号処理と座標軸アライメント：各デバイスでは，デフォルトの座標軸の向きが異なる。図 1 左に示すように，フォースプレートにおける左右方向（medio-lateral: ML）および前後方向（anterior-posterior: AP）は，それぞれ X 軸および Y 軸に対応する。一方，OpenEarable の x，y，z 軸は，それぞれ概ね前方，上方，右方向に対応する。腰部 IMU の x，y，z 軸は，それぞれ概ね右方向，上方，後方に対応する。デバ

イス定義の都合上，実際の加速度ベクトルは軸方向と反対向きに定義される一方，角速度は右手系の規則に従う。本実験では，左耳用のOpenEarable を使用しており，左手系の座標系を採用している。

IMU の生信号に対して，アーティファクトの除去および座標系の標準化を目的とした前処理を行った。加速度およびジャイロスコープ信号には，姿勢揺れに関する情報を保持しつつ，高周波ノイズや振戦成分を減衰させるため，カットオフ周波数 10 Hz の 3 次 Butterworth ローパスフィルタを適用した。フォースプレートデータには，電気的・機械的振動を除去するため，25 Hz のローパスフィルタを適用した。

特徴抽出と予測モデル：スライディングウィンドウ解析によるデータ拡張を行うことで，時系列的な関係を保持しつつ，実質的なサンプル数を増加させた。30 秒間の各試行に対して，6 秒間のウィンドウを 1 秒刻みで適用した。これにより，参加者・条件ごとに 25 個のウィンドウが得られ，モデル学習用に合計約 1,500 サンプルを生成した。ウィンドウ長は，典型的な姿勢揺れの周波数である 0.2 ～ 0.5 Hz に基づき，少なくとも 2 周期分の揺れを捉えられるように設定した。

各ウィンドウから，IMU 信号およびフォースプレート信号の双方について包括的な特徴量を抽出した。IMU 特徴量には，補正後の水平加速度（accx, accz）の平均および標準偏差，3 軸周りの角速度（rotx, roty, rotz）の平均および標準偏差，さらに水平面上の加速度軌跡長（accLen）を含めた。平均値の算出では，符号付き値の平均がゼロに近づくことを避けるため，加速度および角速度の絶対値を用いた。accLen は，連続する加速度サンプル間のユークリッド距離を累積することで算出した。

フォースプレート由来の指標には，平均速度（avgV），最大速度（maxV），前後方向および左右方向の変位範囲（dispAP，dispML），ならびに CoP 軌跡に対して当てはめた 95% 信頼楕円の面積（area）を含めた。ウィンドウ長は一定であるため，CoP 軌跡長（CoPLen）は実質的に平均速度（avgV）と等価であり，独立した特徴量としては扱わなかった。

IMU データから CoP 指標を予測するために，4 種類の回帰アルゴリズムを評価した。これらは，異なるモデルの複雑度および解釈可能性を網羅するように選定した。

- **線形回帰モデル**は，倒立振子モデルに基づく理論的な線形関係を表すベースラインとして用いられた。
- **Random Forest 回帰モデル**は，32 本の木，最大深さ 7 の設定により，アンサンブル平均を通じて非線形関係を捉えた。
- **AdaBoost** は，64 個の弱学習器を用い，予測が困難なサンプルに反復的に重み付けすることで性能を向上させた。
- **畳み込みニューラルネットワーク（CNN）**（図 3）は，生の時系列データを直接処理し，3 つの時間畳み込みブロックから構成され，それぞれのフィルタ数は 64, 64, 32 とした。カーネルサイズは順に 7，5，3 とし，最初の層では比較的広い時間範囲の変動を捉え，後続の層ではより局所的な時系列パターンを抽出する構成とした。各層では ReLU 活性化関数を用いた。畳み込み層の後には Global Average Pooling を適用し，時間方向の特徴を集約した。その後，2 層の全結合層を通じて，CoP に関連する各指標を回帰的に推定した。予測対象は，CoP の平均速度，最大速度，前後方向変位，左右方向変位，および 95% 信頼楕円面積である。学習には平均二乗誤差を損失関数として用い，最適化手法には Adam を

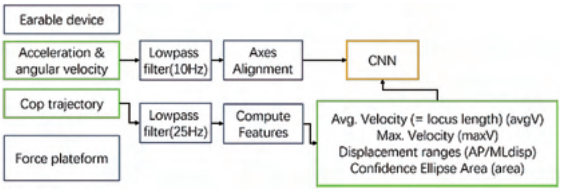


図 3　提案モデル（CNN）のデータフロー

採用した。また，過学習を抑制するためにL2正則化およびドロップアウトを導入した。

各モデル性能は，正解データであるフォースプレート由来のCoP指標に対して，決定係数R^2およびRMSEを用いて評価した

評価実験：表1に，6種類の姿勢条件におけるCNNおよびRandom Forest（RF）の推定性能を示す。評価は5-fold cross-validationの平均値として算出し，正解値であるフォースプレート由来のCoP指標に対して，RMSEおよび決定係数R^2を用いて評価した。CNN以外のモデルでは，RFモデルが最も性能が高かったため，線形回帰モデルおよびAdaBoostの結果は表1からは除かれている。

まず，CoP平均速度（avgV）は，全体として最も安定して高い予測性能を示した。avgVのR^2はすべての姿勢条件で0.714以上であり，特にタンデム立位・閉眼条件（TS-C）では0.869，両脚立位・開眼条件（BS-O）では0.830，片脚立位・開眼条件（SS-O）では0.813を示した。この結果は，イヤラブルIMUから得られる頭部運動の時系列情報が，CoPの平均的な移動速度をよく反映していることを示唆している。また，RFと比較しても，avgVに対するCNNのR^2はすべての条件で高く，特にTS-Oでは0.417から0.714，SS-Oでは0.638から0.813へと大きく向上した。これは，CNNが時間方向の動的パターンを直接学習することで，手作業特徴量に基づくモデルよりも高い推定性能を示したことを示している。

一方で，最大速度（maxV）の予測性能はavgVに比べて低く，R^2は0.479から0.693の範囲にとどまった。maxVは短時間に生じるピーク値の影響を強く受けるため，時間窓全体の傾向を捉えるavgVに比べて，IMU信号から安定して推定することが難しいと考えられる。このことから，本モデルは瞬間的なスパイクよりも，一定時間内の全体的な姿勢揺れの特徴を捉えることに適しているといえる。

変位に関する指標では，前後方向変位（dispAP）と左右方向変位（dispML）のいずれについても，中程度から高い予測性能が得られた。dispAPでは，BS-Cで$R^2 = 0.838$，TS-Cで$R^2 = 0.671$を示し，dispMLではTS-Cで$R^2 = 0.746$，BS-Cで$R^2 = 0.731$を示した。一方で，片脚立位条件では一部の指標で性能が低下し，特にSS-OにおけるdispMLのR^2は0.391であった。これは，片脚立位では身体動揺が大きく不安定になり，頭部IMU信号とCoP変位との対応関係がより複雑になるためと考えられる。

95%信頼楕円面積（area）については，BS-Cで$R^2 = 0.831$，TS-Cで$R^2 = 0.745$と比較的高い値を示した一方，TS-Oでは0.479，SS-Oでは0.542にとどまった。areaは前後・左右方向のCoP変位の共分散に基づく二次的な指標であり，姿勢条件の違いや大きな揺れの影響を受けやすい。そのため，avgVのような単純な時間的指標と比較して，推定が難しくなったと考えられる。

RMSEの観点から見ると，全体として両脚立位条件で誤差が小さく，片脚立位・閉眼条件（SS-C）で誤差が大きくなる傾向が確認された。例えばavgVのRMSEは，BS-Oで0.853 cm/s，BS-Cで1.076 cm/sであったのに対し，SS-Cでは6.184 cm/sまで増加した。同様に，areaのRMSEもBS-Oでは0.788 cm^2であったが，SS-Cでは11.769 cm^2と大きく増加した。これは，片脚立位や閉眼条件では姿勢制御が難しくなり，CoPの変動が大きく複雑になるため，CNNによる推定も難しくなることを示している。

以上より，提案したCNNモデルは，イヤラ

表1　実験結果［1］

		BS-O	BS-C	TS-O	TS-C	SS-O	SS-C
RMSE	avgV(cm/s)	0.853	1.076	2.118	4.078	2.412	6.184
	maxV(cm/s)	1.777	0.861	3.082	11.037	2.939	12.179
	dispAP(cm)	0.327	0.422	0.315	0.624	0.29	1.205
	dispML(cm)	0.303	0.424	0.462	0.567	0.494	0.897
	area(cm^2)	0.788	1.792	0.895	5.163	1.038	11.769
R^2(RF)	avgV(cm/s)	0.735	0.693	0.417	0.694	0.638	0.654
R^2	avgV(cm/s)	0.830	0.747	0.714	0.869	0.813	0.777
	maxV(cm/s)	0.586	0.604	0.479	0.618	0.648	0.693
	dispAP(cm)	0.636	0.838	0.369	0.671	0.586	0.548
	dispML(cm)	0.617	0.731	0.411	0.746	0.391	0.597
	area(cm^2)	0.724	0.831	0.479	0.745	0.542	0.657

ブル IMU 信号から複数の CoP 関連指標を推定可能であり，特に CoP 平均速度の推定において高い性能を示した。一方で，最大速度や楕円面積，片脚立位・閉眼条件のように揺れが大きく不安定な条件では予測誤差が増加する傾向が見られた。これらの結果は，イヤラブル IMU がフォースプレートを用いない姿勢揺れ評価の代替手段となり得る一方で，より困難な姿勢条件に対する推定精度向上には，さらなるデータ拡張やモデル改善が必要であることを示している。

今後の展望：現在の CoP 特徴量推定に加えて，CoP 軌跡そのものを時系列として直接推定する手法へ拡張する。予備的な検討[2]では，頭部位置情報のみから CoP 変位を推定し，複数の姿勢条件で 30 mm 未満の RMSE を達成しており，頭部運動が CoP 変動を反映する可能性が示されている。今後は，イヤラブル IMU から得られる加速度・角速度信号を用いて，ML 方向および AP 方向の連続的な CoP 変位を推定するモデルを構築し，CoP 特徴量推定から CoP 軌跡推定へと発展させる。

［成果の発表，論文など］

［1］ Yanzhi Li, Qize Feng, Xuefu Dong, Akihito Taya, Kaoru Sezaki, Yuuki Nishiyama, “Estimation of the Center of Pressure Using Head Position During Balance Maintenance,” 2026 International Conference on Activity and Behavior Computing (ABC), Hokkaido, Japan, pp. 1-7, 2026.

［2］ Yanzhi Li, Qize Feng, Xuefu Dong, Akihito Taya, Kaoru Sezaki, Yuuki Nishiyama, “Poster Abstract: Toward Earable Device-Based Postural Sway Estimation Using Convolutional Neural Networks,” SenSys ’26: Proceedings of the 2026 ACM/IEEE International Conference on Embedded Artificial Intelligence and Sensing Systems, pp. 1-2, 2026.

［研究助成（A）］

骨格筋電気刺激と人間の適応性を活用した身体動作変容システムの開発

2251028



研究代表者
（助成金受領者）
京都大学
大学院人間・環境学研究科
准教授　萩生翔大

［研究の目的］

本研究の目的は，骨格筋への電気刺激を用いて身体動作を変容させるシステムを開発し，人間と機械の協調によって目的に応じた動作獲得を促進する可能性を検証することである。

リハビリテーションやスポーツの分野では，身体運動を支援するためのさまざまなシステムが用いられてきた。従来の運動支援システムでは，外部機械が人間の身体運動を補助・代替する機械主導型のアプローチが多く採用されてきた（図1）。例えば，外骨格型ロボットや機能的電気刺激は，運動機能の回復，再建，あるいは運動出力の補助を目的として発展してきた。骨格筋電気刺激を用いた動作制御に関する研究も，これまで主にリハビリテーション分野における運動機能回復や再建，またトレーニング分野における筋力向上を目的として進められてきた（Peckham and Knutson, 2005）。さらに，制御工学的アプローチによって運動の転写技術も提案されているが，その多くは装置が動作を直接補助する機械主導型のシステムを基盤としている。

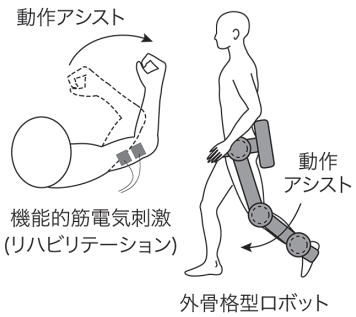


図1　機械主導型の手法

これに対して本研究では，骨格筋電気刺激を単に動作を補助する手段としてではなく，身体に対する外乱として利用する点に特色がある。すなわち，電気刺激によって生じる力に対して，被験者自身が筋出力や関節運動を調整することで，新しい運動環境に適応し，結果として身体動作を変容させることを目指した。この点において，本研究は，外部装置が運動を一方的に補助するシステムではなく，人間が自らの適応能力を用いて機械的外乱に応答し，動作を変化させることを促すシステムの開発を目指すものである。

学術的には，本研究は骨格筋電気刺激を用いた動作制御技術と，人間の運動適応・運動学習に関する基礎研究を接続する位置付けにある。人間の運動制御や運動学習に関する基礎研究では，人間がさまざまな環境変化に対して短時間で適応できる能力を有することが示されてきた（Krakauer et al., 2019）。しかし，これまでの研究は，上肢到達運動や歩行動作などを対象として，運動の適応性そのものを調べるものが中心であり，目的に応じた動作変容を促す実用的なシステムとしての検証は十分ではなかった。本研究は，既存の運動制御・運動学習研究で得られてきた基礎的知見を，身体動作の変容を促す技術として発展させることを目指すものであり，基礎研究と社会応用をつなぐ意義を有している。

本研究では，その基礎的検証として，骨格筋

電気刺激によって生じる外乱に対して，被験者がどのように動作を変化させるかを検証した。対象動作には，比較的単純でありながら，下肢関節間の協調が成績に影響する垂直跳び動作を用いた。垂直跳び中に足関節底屈方向の力発揮と干渉する外乱を与えることで，被験者が下肢関節の力発揮パターンをどのように調整するかを明らかにした。

［研究の内容，成果］

本研究では，まず，骨格筋電気刺激を用いた動作変容システムの基盤を構築した。具体的には，既存の電気刺激装置，動作計測システム，床反力計を統合し，垂直跳び動作中に骨格筋電気刺激を提示できる実験システムを構築した。その後，構築した実験システムを用いて，電気刺激によって生じる外乱に対して被験者がどのように動作を変化させるかを検証した。

動作変容システムの構築

システムでは，パソコン上の制御ソフトウェアで生成したパルス波を，データ収集デバイス（USB-6363, National Instruments, Austin, TX, USA）を介してアナログ出力し，パルス発生装置（ULI-100, Unique Medical Co., Ltd., Japan）から電気刺激パルスとして出力した。制御ソフトウェアは LabVIEW（National Instruments, Austin, TX, USA）を用いて作成し，刺激パルスが動作開始のタイミングを統制するためのビープ音と同期して任意のタイミングで出力されるよう設計した。電気刺激パルスは二相性の矩形波とし，刺激周波数を 20 Hz，パルス幅を 500 μs とした。また，刺激強度は被験者ごとに調整できるようにした。さらに，電気刺激，床反力，動作計測システムのデータを同期して記録できるようシステムを構成した。

本研究では，両脚の前脛骨筋（脛の前の筋）を刺激対象筋とした。前脛骨筋への電気刺激により足関節背屈（つま先が上がる）方向の力を生じさせることで，通常の垂直跳びに必要な足関節底屈（つま先が下がる）方向の力発揮と干渉する外乱環境を作り出した（図 2）。これにより，被験者は通常とは異なる力学的条件下で跳躍動作を行うことになり，その環境に適応する過程で，下肢関節の力発揮パターンを変化させることが期待された。

実証実験

構築したシステムの基礎的な実証実験として，健常成人男性 6 名を対象に，垂直跳び動作中の電気刺激外乱に対する動作変化を検証した。被験者の年齢，身長，体重はそれぞれ 24.7 ± 2.9 歳, 173.2 ± 3.7 cm, 73.1 ± 9.0 kg であった。実験は，京都大学大学院人間・環境学研究科の倫理委員会の承認を得て実施し，被験者には実験内容を説明した上で参加の同意を得た。

被験者には，床反力計（TF-4060; Tech-Gihan, Co., Kyoto, Japan）の上でスクワットジャンプを繰り返し実施するよう指示した。足幅は各被験者が跳びやすい幅とし，手は体の前で交差して組むようにした。初期姿勢は膝関節約 90 度屈曲位とし，臀部の下に設置したバーに軽く触れる高さを基準として，毎試行の初期姿勢を統一した。被験者には，反動を用いず，中腰姿勢からできるだけ高く真上に跳躍すること，また試行中に意図的に跳び方を大きく変えないことを指示した。各試行後には，床反力データから力積法によって算出した重心の跳躍高を画面上

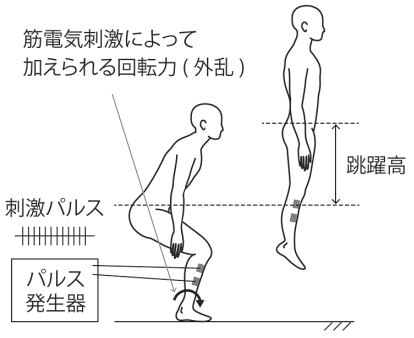


図 2　人間主導の動作変容システムの基盤となる筋電気刺激を用いた外乱印加システム

に提示し，被験者が自身の跳躍成績を確認できるようにした。

各試行では，まず被験者に手を前で組んだ状態で静止するよう指示し，その後，実験者の合図で臀部がバーに軽く触れるまで腰を落とさせた。臀部がバーに触れるとビープ音が 4 回提示され，被験者には 3 回目のビープ音に合わせて跳躍するよう指示した。電気刺激試行では，両脚の前脛骨筋に表面電極パッド（5 × 9 cm, PALS®，Axelgaard Manufacturing Co., Ltd., USA）を貼付し，電極パッドを介して電気刺激を与えた。刺激強度は，被験者がスクワット姿勢を維持できる最大強度に設定した。

実験は，ウォーミングアップを含む練習試行 10 試行を行った後，電気刺激を与えないベースライン試行 10 試行，前脛骨筋への電気刺激を伴う学習試行 20 試行，電気刺激を与えないポスト試行 10 試行の順に実施した。ベースライン試行とポスト試行を比較することで，電気刺激を伴う学習経験によって，刺激がない状態での跳躍動作がどのように変容したかを評価した。

実験中は，床反力および身体各部の関節位置座標を記録した。記録したデータから，跳躍高，関節角速度，関節モーメントおよび関節パワーを算出した。跳躍高は，静止立位時の左右上後腸骨棘中央点の高さを基準とし，跳躍動作中における同点の最大鉛直変位として算出した。関節モーメントは，床反力および関節位置座標に基づく逆動力学計算により算出した。身体部分の質量，質量中心位置および慣性モーメントなどの身体部分慣性特性については，日本人アスリートを対象に推定された先行研究の値を用いた（Ae et al. 1992）。関節パワーは，各関節モーメントと対応する関節角速度との積として算出した。さらに，跳躍の推進局面における各関節の正の仕事を算出し，股関節，膝関節および足関節の正の仕事の総和に対する各関節の割合を，正の仕事の貢献度として定量した。

結果として，電気刺激を伴う学習試行の初期には，ベースライン試行と比較して跳躍高の低下が観察された。しかし，その後は試行を重ねるにつれて跳躍高が徐々に増加した。これらの結果は，前脛骨筋への電気刺激によって一時的に跳躍動作が妨げられた一方で，被験者が電気刺激によって生じる外乱環境に対して，試行を重ねる中で動作を調整した可能性を示している。さらに，ベースライン試行と，電気刺激を取り除いたポスト試行における跳躍高を比較したところ，ポスト試行において跳躍高の増加が観察された（図 3）。この跳躍高の増加は，電気刺激による外乱環境下で生じた運動適応の後効果を反映していると考えられる。

次に，電気刺激を伴う学習試行の前後で生じた跳躍動作の変容，および関節における力発揮パターンの変化を明らかにするため，関節運動，関節モーメントおよび関節パワーを比較した。関節角速度については，ポスト試行において股関節伸展速度および足関節底屈速度のピーク値がやや減少する傾向が観察された（図 4A）。一方，膝関節伸展速度のピーク値には大きな変化は認められなかった。しかし，関節力学的な解析では，特徴的な変化が観察された。まず，関節モーメントについて，股関節伸展モーメントおよび足関節底屈モーメントが減少し，膝関節伸展モーメントが増加した（図 4B）。関節パワーについても同様に，股関節および足関節の貢献が低下し，膝関節の貢献が増加する傾向が観察

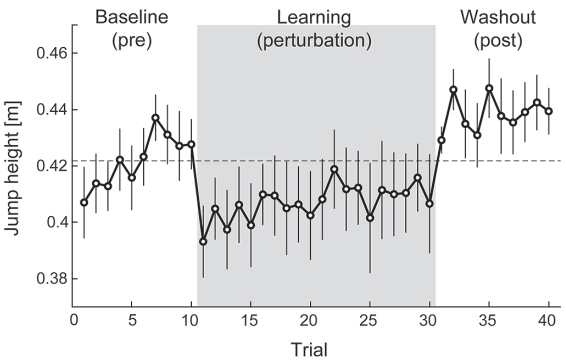


図 3　全試行における跳躍高の推移。丸は全被験者の平均値，エラーバーは標準誤差を表している。灰色の編みかけは，学習試行の区間を示している。

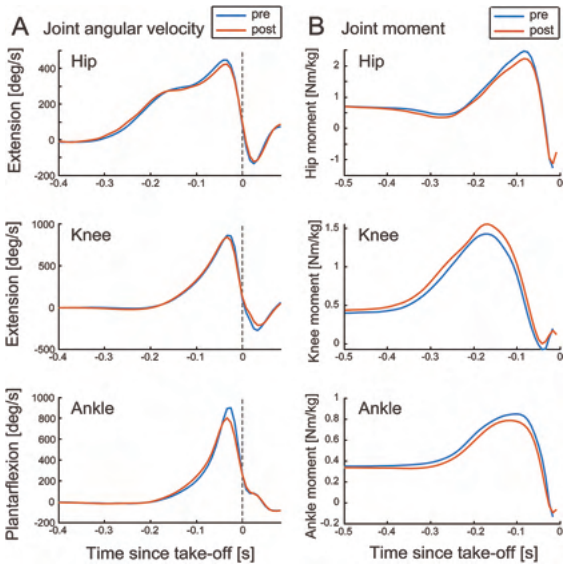


図4　各関節の角速度（A）と関節モーメント（B）
青い線はベースライン（プレ）試行，赤い線はポスト試行における全被験者の平均値を示している。横軸は，離地を基準とした時刻である。

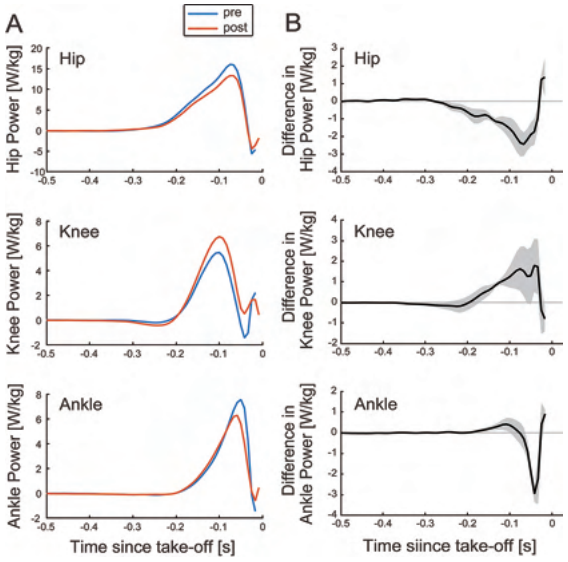


図5　（A）各関節のパワー。青い線はベースライン（プレ）試行，赤い線はポスト試行における全被験者の平均値を示している。横軸は，離地を基準とした時刻である。（B）プレ試行からポスト試行への各関節のパワーの変化。実線は全被験者の平均値，灰色の編みかけは標準誤差を表している。

された（図5）。さらに，正の仕事の貢献度を比較したところ，股関節および足関節における貢献度は減少し，膝関節における貢献度は増加した。

前脛骨筋への電気刺激は足関節背屈方向の力を生じさせるため，スクワットジャンプにおける足関節底屈方向の力発揮を阻害する外乱として作用したと考えられる。そのような条件下で，ポスト試行において膝関節伸展モーメント，膝関節パワー，および膝関節の正の仕事の貢献度が増加したことは，被験者が足関節や股関節に依存した力発揮様式から，膝関節の貢献を相対的に高める力発揮様式へと動作を再調整した可能性を示している。

以上の結果は，前脛骨筋への電気刺激を伴う跳躍練習によって，刺激を伴わない条件下においても跳躍動作および関節間の力発揮パターンが変化したことを示している。すなわち，本研究で構築したシステムは，骨格筋電気刺激を単なる運動補助として用いるのではなく，身体に対する外乱として用いることで，被験者自身の運動適応を誘導し，関節間協調の変化を引き出せる可能性を示した。本研究の成果は，外部装置が動作を直接作り出すのではなく，人間が外乱に応答して自ら動作を変化させることを促す，新しい動作変容支援システムの基盤となるものである。

今後の課題と展望

本研究では，前脛骨筋への電気刺激を伴う跳躍練習の前後で，刺激を伴わない条件下における跳躍高および関節間の力発揮パターンに変化が観察された。一方で，本研究では電気刺激を伴わずに同じ試行数の跳躍練習を行う対照条件を設定していない。そのため，今回観察された動作変容や跳躍高の増加が，電気刺激外乱への適応によって生じたものなのか，あるいは試行の反復，跳躍課題への慣れ，跳躍高フィードバックなどによって生じたものなのかを厳密に分離することはできない。この点は，本研究の重要な課題である。

一方，跳躍動作を反復すると疲労によって跳躍高が低下する可能性も大いに考えられるが，ポスト試行において跳躍高の増加が観察され

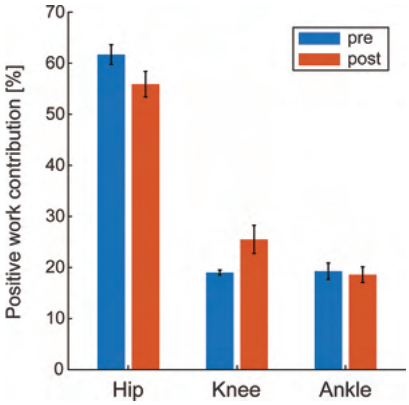


図 6　正の仕事の関節ごとの貢献度の割合。赤いバーがベースライン（プレ）試行，青いバーがポスト試行における平均値，エラーバーは標準誤差を表している。

た。したがって，今回の結果では，前脛骨筋への電気刺激を伴う外乱が，下肢関節間の協調様式を変化させ，刺激を伴わない跳躍動作にも影響を及ぼした可能性が高いと考えている。今後は，電気刺激を与えない対照条件や，刺激タイミング・刺激強度を変化させた条件を設定し，電気刺激外乱そのものが動作変容に及ぼす効果をより厳密に検証する必要がある。

また，本研究では対象動作をスクワットジャンプに限定し，刺激対象筋を前脛骨筋とした。スクワットジャンプは，下肢関節間の協調が跳躍成績に反映されやすい動作であり，本システムの基礎的検証に適した課題であった。一方で，本研究で提案する方法は，表面電極パッドの貼付位置を変更するだけで，対象筋や対象動作を比較的柔軟に変更できるという利点を有する。今後は，歩行やスポーツ動作など，より多様な動作に本手法を適用し，電気刺激外乱によって誘導される運動適応が，動作の種類や刺激対象筋によってどのように異なるかを検証する必要がある。

また，ポスト試行で観察された変化が一過性のものなのか，一定期間保持される学習効果なのかについても検証する必要がある。そのためには，刺激後の保持テストや，別の日に再測定を行う追跡実験を実施することが有効である。

以上の課題は残されているものの，本研究は，骨格筋電気刺激を身体動作の直接的な補助ではなく，運動適応を誘導するための外乱として利用できる可能性を示した。今後，対照条件を含む実験デザインを整備し，対象動作や刺激対象筋を拡張することで，本手法は，リハビリテーション，スポーツトレーニング，技能獲得支援などに応用可能な動作変容システムへと発展する可能性がある。

［参考文献］

Ae M., Tang H.P., & Yokoi T. (1992). Estimation of inertia properties of the body segments in Japanese athletes. *Biomechanisms*, 11, 23–33.

Krakauer J.W., Hadjiosif A.M., Xu J., Wong A.L., & Haith A.M. (2019). Motor learning. *Compr Physiol.*, 9(2), 613–663.

Peckham P.H., & Knutson J.S. (2005). Functional electrical stimulation for neuromuscular applications. *Annu Rev Biomed Eng.*, 7, 327–360.

［研究助成（A）］

ウェアラブル深部体温センサの暑熱対策応用に向けた実用化研究

2251029



研究代表者（助成金受領者）　東京科学大学　工学院機械系　助教　橋本優生

［研究の目的］

温暖化に伴い熱中症リスクが高まる現代において，その対策は喫緊の社会課題である。熱中症は高温多湿環境に長時間曝されることで，体温調節機能のバランスが崩れ，体内に熱がこもった状態である。熱中症は発症過程で身体内部の温度（深部体温）が上昇することから，深部体温は暑熱対策に有効な指標とされており，ウェアラブルセンサにより，活動中に負担のない形でモニタする技術の開発が期待されている。

本研究に関連した熱流変化から深部体温を推定する主な手法として，熱流補償法（Fox et al., *Br. Med. J.*, 1973），熱流束法（Gunga et al., *J. Therm. Biol.*, 2008; Tokizawa et al., *J. Therm. Biol.*, 2022）が報告されている。熱流補償法は，2つの温度センサとヒーターを備えたプローブを皮膚に接触させ，ヒーター加熱により皮膚と皮膚直下の内部を等温に制御し，深部体温を推定する。当該手法は外乱の影響が小さく，測定精度が高い一方，消費電力が大きく，ウェアラブルセンサには不向きである。熱流束法は，貼り付け型センサを用いて皮膚表面の熱流変化から深部体温を推定する手法であり，ウェアラブル計測に適した手法の1つとして注目されているが，環境変化による計測誤差の発生が実用上の課題であった。申請者は，解決手法として，高熱伝導材料をプローブカバーとして用いる手法（Hashimoto et al., *Sens. Actuators A Phys.*, 2024）を開発し，安静時に限定されるが環境変化にロバストな深部体温計測を実現した。本研究課題は，当該手法を，激しい活動が想定される暑熱対策へ応用する上で必要不可欠な，発汗に伴う計測誤差の低減を実現するという位置づけであり，管見の限り，このような研究は見当たらない。

本研究では，①ヒトの発汗機能特性に着目し計測誤差を低減するアプローチと②深部体温センサ周辺の発汗量から計測誤差を補正するアプローチを試みる。

【アプローチ①】一般的にウェアラブルセンサは皮膚が圧迫された状態で使用される。皮膚圧迫は様々な生体情報に影響を与えることが知られている。発汗もその1つであり。脚部や体幹部を局所的に圧迫することで圧迫部の発汗が抑制されることが報告されている（Frei et al., *J. Therm. Biol.*, 2019）。本研究では，この現象に着目し，計測時の皮膚圧迫により局所的な発汗を抑制し，当該誤差を低減することを検討する。

【アプローチ②】深部体温センサの周囲の発汗量が分かれば，図1で示した汗の蒸発熱を見積もることができ，当該計測誤差を低減できるのではないかと考え，発汗量を計測可能な発汗センサを追加で実装し，計測部周辺の発汗量を用いた計測誤差補正技術を検討する。

［研究の内容，成果］

1. 臨床実験用ウェアラブルセンサの試作

当該センサの想定測定部位（胸部，額部，手

首，上腕）での装着に伴う装着圧，発汗量，深部体温の計測誤差との関係を定量化するため，先行研究（Hashimoto et al., *Sens. Actuators A Phys.*, 2024）で開発したウェアラブル深部体温センサ（図 1）に，装着圧モニタ用に市販の感圧センサを追加実装したプロトタイプを試作した。

2. 装着圧範囲把握のための予備実験

臨床実験における，被験者，想定測定部位（胸部，額部，手首，上腕）に応じた装着圧範囲把握のための予備実験を行う。具体的には，健常な被験者 10 名程度を対象に，研究Ⅰの試作機を装着し，バンドを締め装着圧を段階的に変化させた際における，被験者，測定部位ごとの装着圧の上限を決定した。研究Ⅲの臨床実験では，予備実験で得られた被験者，装着部位ごとの装着圧の上限を基準に，バンドの穴の位置をずらし装着圧を下げることで，装着圧の水準を，装着レベル 1：密着性を保つ程度の加圧，装着レベル 2：加圧レベル小，装着レベル 3：加圧レベル中，装着レベル 4：加圧レベル大（装着圧の上限に相当）の 4 段階で装着圧を変化させることとした。また，予備実験結果を元に，全ての被験者の装着圧範囲に対応できるように，バンドの改良試作を実施した。



図 1　プロトタイプ写真

3. 試作センサを用いた臨床実験

2 と同一の，健常な被験者 10 名を対象に，想定測定部位に試作機を装着し運動を行った際の発汗量への装着圧依存性や深部体温計測誤差との関係を調べた。具体的には，夏季シーズンを想定した，環境温度 32° C，相対湿度 50% の人工気象室内において，数分間のベースライン計測後，最大心拍数の 50% に相当する自転車運動を 15 分間 × 4 セット実施した。第 1 セットは，装着レベル 1 で運動を実施し（介入なしに相当），第 2 ～ 4 セットは，ランダムに装着レベル 2 ～ 4 の装着圧を負荷し運動を行った。各被験者，各測定部位における各装着レベルにおける装着圧は研究Ⅱの予備実験により決定した。実験中の被験者の体調管理及び収集データの多角的分析のため，実験中は，プロトタイプによる計測に加え，市販機器による，被験者の直腸温度，食道温度，皮膚温度，心拍数，皮膚血流量の計測及び各セット終了時に自覚的運動強度（RPE）を Borg Scale で収集した。なお，実験の頻度，条件としては，各被験者に対し，約 1 週間間隔で 2 回，測定部位及び圧迫部位をランダムに実施した。

図 2 に，異なる装着圧の場合における，局所

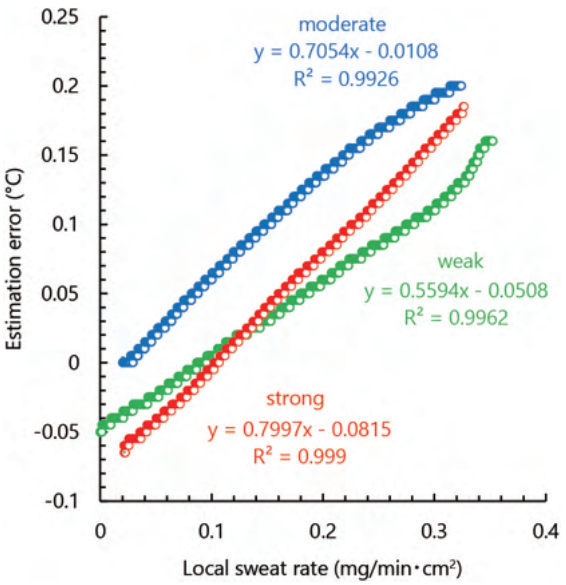


図 2　異なる装着圧の場合における局所発汗量と深部体温計測誤差との関係の一例

発汗量深部体温計測誤差の関係を分析した結果の一例を示す。装着圧を弱（0.83 ± 0.24 kPa），中（2.72 ± 0.62 kPa），強（7.55 ± 2.35 kPa）の場合に関して，共通して，局所発汗量と深部体温計測誤差に線形関係（$R^2 > 0.99$）があることが確認され，装着圧が増加すると，その傾きが増加する傾向にあることが確認された。

4. まとめ

本研究では，深部体温の非侵襲計測法として注目されている手法の１つである熱流束法における実用上の課題の１つである発汗に伴う計測誤差の低減に向け，測定部位周辺の発汗量と深部体温計測誤差との関係を実験的に調べた。

その結果，今回の実験条件の範囲では，局所発汗量と深部体温計測誤差との間に線形関係が確認された。さらに，その傾きは，装着圧と比例関係にあることが確認された。この結果は，装着圧をモニタリングすることで，発汗に伴う深部体温計測誤差を低減できる可能性を示すものである。

一方で，本研究では被験者数が少なく，環境条件や運動条件も限定的であるため，一般化することには注意が必要であり，今後，多様な被験者や実験条件での調査が必要であると考えている。

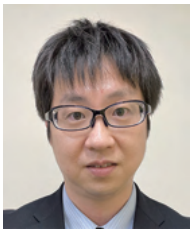
［成果の発表，論文など］

橋本優生，ウェアラブル深部体温計の実用化研究，令和８年度電気学会全国大会，仙台，2026 年３月.

［研究助成（A）］

高効率ストレッチャブル有機太陽電池材料の創成

2251030



研究代表者（助成金受領者）	国立大学法人　山形大学	教授	東　原　知　哉
共同研究者	国立大学法人　山形大学	博士前期課程	三　方　輝　真
	台湾　国立台湾大学	博士課程	Chang-Ruei Lin
	国立大学法人　山形大学	助教	He Sun
	台湾　国立台湾大学	教授	Chu-Chen Chueh

［研究の目的］

有機太陽電池は，軽量性，柔軟性，印刷プロセス適性を有する次世代エネルギーデバイスとして注目されており，近年ではエネルギー変換効率（PCE）が20%を超える系が報告されている[1,2]。一方で，スマートウォッチや生体貼付型センサーなどのウェアラブル電子機器への応用には，伸縮性機能の付与が強く求められる。しかし，高効率半導体高分子は，多環・縮環型の強固なπ共役骨格に由来する高結晶性・高剛直性を有し，伸長変形時に微細クラックが発生しやすく，発電性能が低下するという本質的課題があった。

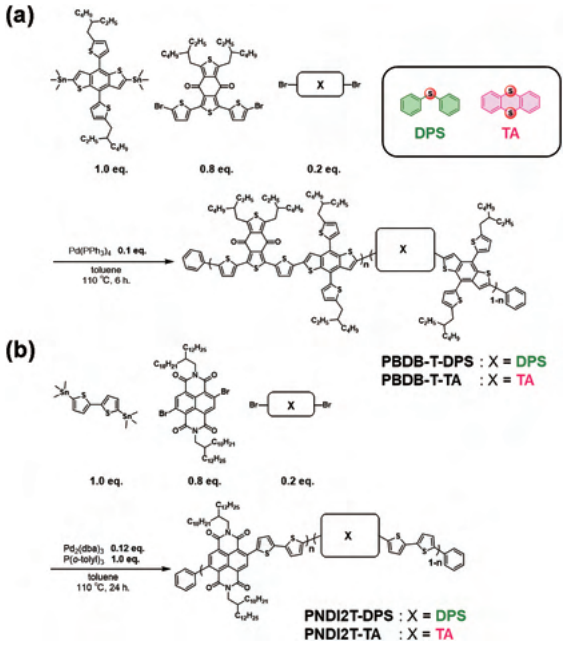
これまで，アルキル鎖などの非共役スペーサーを導入して伸縮性を付与する研究が行われてきたが，π共役系の切断による電荷輸送性や光吸収特性の低下が問題となっていた[3,4]。すなわち，トレードオフの関係にある「高効率」と「高伸縮性」の両立が有機太陽電池材料における重要課題となっている。また，既報の多くは複雑な多段階合成を必要とし，材料設計の汎用性にも課題が残されていた。

本研究では，この課題を解決するため，硫黄原子を介して緩やかにπ共役が連結した芳香族スルフィド骨格に着目した。具体的には，diphenyl sulfide（DPS）およびthianthrene（TA）を共役破断スペーサー（conjugation-break spacer, CBS）として半導体高分子主鎖へ導入し，C–S–C結合の回転自由度による局所的な柔軟性を付与しつつ，π共役系を完全には切断しない分子設計を提案した。本設計では，伸長変形時に分子骨格の平面性向上や有効共役長の維持が期待され，従来の高効率性と高伸縮性のトレードオフを緩和できる可能性がある。

さらに，本研究ではp型およびn型半導体高分子の双方へ本CBS設計を適用し，機械特性と光電変換特性の両立を目指した。本研究成果は，ウェアラブル電子機器向けの安全かつ高耐久なポータブル電源材料への展開が期待される。

［研究の内容，成果］

本研究では，芳香族スルフィド骨格を有するCBSを半導体高分子主鎖へ導入することにより，高い光電変換性能を維持しながら機械的柔軟性を向上させたストレッチャブル有機太陽電池材料の開発を行った。具体的には，diphenyl sulfide（DPS）およびthianthrene（TA）をCBS骨格の基本構造として設計し，有機太陽電池用材料として実績のあるp型およびn型半導体



Scheme 1 （a）DPS または TA ユニットを含有する p 型半導体高分子，（b）DPS または TA ユニットを含有する n 型半導体高分子。Copyright 2026 American Chemical Society.

高分子の双方へ適用した。

まず，p 型半導体高分子として PBDB-T 系，n 型半導体高分子として PNDI2T 系材料をモデルとして選択し，それぞれの主鎖に DPS および TA ユニットを 20 mol% 導入した半導体高分子を設計・合成した。実際に，ジスタニルモノマーを 1 当量，ジブロモノマーを 0.8 当量，DPS または TA 含有 CBS モノマーを 0.2 当量の割合で混合し，Pd 触媒存在下，右田 - 小杉 -Stille カップリング反応に基づく統計的 3 元共重合を進行させた。

重合反応後にはフェニル基による末端封止処理を行い，さらに Soxhlet 抽出による精製を経て目的ポリマー（PBDB-T-DPS および PBDB-T-TA）を得た。

得られたポリマーについて，高温 SEC 測定により分子量評価を行った結果，比較的高い数平均モル質量（14,600–26,600 g/mol）を示し，いずれもサンプルも十分な高分子量体として得られたことが分かった。また，高温 ^{1}H NMR 測定により化学構造の確認を行い，目的とする CBS ユニットがほぼ設計通り主鎖中へ導入されていることを確認した。さらに，熱重量分析（TGA）では，CBS 導入後も高い熱安定性（$T_d^{5\%}$ = 408–443° C）を維持していることが明らかとなり，有機電子材料として十分な耐熱性を有することが示された。

次に，光学特性評価として UV-Vis 吸収測定を行った。クロロホルム溶液中および薄膜状態において吸収スペクトルを測定した結果，CBS 含有ポリマーは CBS 不含ポリマーと比較して大きなバンドギャップ変化を示さず，可視光領域における広い吸収特性を保持していた。一方で，吸収ピーク形状にはわずかな変化が観測され，CBS 導入により分子間相互作用が若干緩和されていることが示唆された。特に TA ユニットは V 字型構造を有するため，分子鎖間相互作用を弱める効果が確認された。一方，DPS ユニットは比較的自由回転可能な構造を有しており，薄膜状態では分子間相互作用により有効共役長が回復する傾向が観測された。

続いて，機械特性評価としてクラック発生歪み（Crack Onset Strain: COS）測定を行った（図 1）。PSS 犠牲層上へ半導体高分子薄膜を形成後，水中で剥離し，PDMS 基板へ転写した。その後，0 ～ 40% の範囲で一軸伸長し，光学顕微鏡観察によりクラック発生挙動を評価した。その結果，PBDB-T 参照薄膜では COS が 10% 程度であったのに対し，PBDB-T-DPS および PBDB-T-TA では 20% まで向上した。また，PNDI2T 参照薄膜では COS が 10% であったのに対し，PNDI2T-DPS および PNDI2T-TA では 30% まで向上した。特に n 型半導体高分子系において顕著な改善が確認され，CBS 導入による分子間相互作用緩和効果が大きく寄与していることが示唆された。

図 2（a）および 2（b）に，本研究で用いた光活性材料の化学構造を示す。PBDB-T:BTP-eC9 系および PM6:PNDI2T 系に本研究で開発した p 型および n 型 CBS 含有半導体高分子をそれぞれ第 3 成分として少量添加した。ブレン

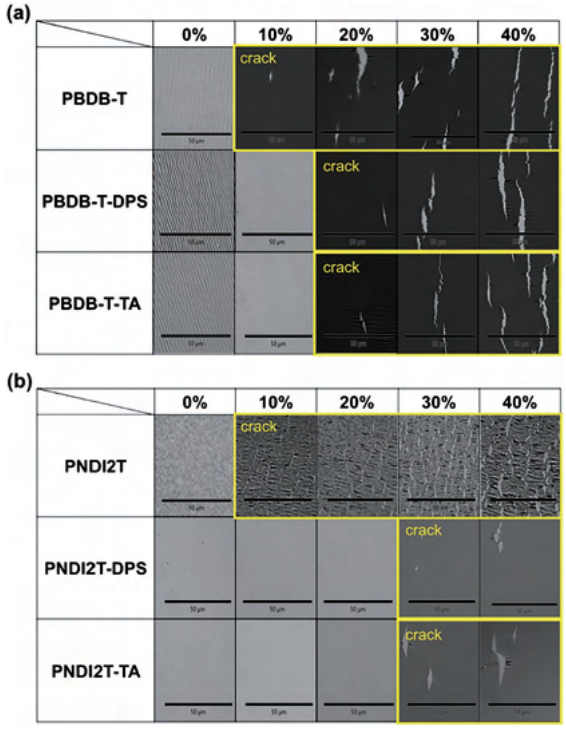


図 1　（a）p 型および（b）n 型半導体高分子薄膜を異なる歪み条件（0–40%）で伸長した後の光学顕微鏡（OM）像。スケールバーは 50 μm を示す。Copyright 2026 American Chemical Society.

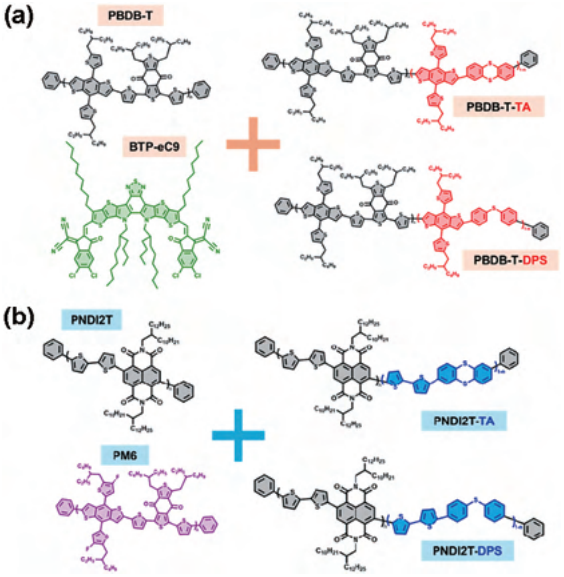


図 2　（a）PBDB-T，BTP-eC9，PBDB-T-TA，および PBDB-T-DPS の化学構造；（b）PM6，PNDI2T，PNDI2T-TA，および PNDI2T-DPS の化学構造。Copyright 2026 American Chemical Society.

表 1　有機薄膜太陽電池の特性。

Photoactive layer	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA cm^{-2})	FF (%)	PCE (%)
PBDBT:BTP-eC9	0.7063 (0.7053)	24.59 (25.09)	55.27 (54.05)	9.61 (9.58)
PBDBT:PBDBT-TA:BTP-eC9	0.7081 (0.7081)	24.72 (23.85)	50.97 (51.62)	8.93 (8.73)
PBDBT:PBDBT-DPS:BTP-eC9	0.7057 (0.7052)	24.17 (24.06)	54.64 (53.79)	9.35 (9.14)
PM6:PNDI2T	0.9609 (0.9502)	5.03 (4.78)	60.26 (57.17)	2.91 (2.60)
PM6:PNDI2T:PNDI2T-TA	0.9528 (0.9457)	5.24 (4.93)	52.97 (52.54)	2.64 (2.48)
PM6:PNDI2T:PNDI2T-DPS	0.9578 (0.9423)	4.97 (4.85)	54.53 (51.18)	2.59 (2.34)

ドの重量比は，PBDB-T:BTP-eC9 系は D:A:CBS = 1:1.2:0.2（w:w:w），PM6:PNDI2T 系は D:A:CBS = 1:1:0.2（w:w:w）とした。（D = p 型材料，A = n 型材料，CBS = CBS 含有半導体高分子）

UV-Vis スペクトル測定において，PBDB-T 薄膜は 628 nm に特徴的な吸収ピークを示し，一方 BTP-eC9 薄膜は 840 nm に吸収ピークを示した。また，PM6 薄膜が PBDB-T 薄膜と類似した強い吸収特性を示し，611 nm に吸収ピークを示した。これに対して，PNDI2T 薄膜は 697 nm に特徴的な吸収ピークを示した。

各材料の最高被占軌道（HOMO）エネルギー準位はサイクリックボルタンメトリーにより評価した。また，最低空軌道（LUMO）エネルギー準位は，薄膜の UV-Vis スペクトルから求めたバンドギャップと HOMO エネルギー準位を用いて算出した。その結果，本研究で開発した CBS 含有半導体高分子がマトリックスの p 型/n 型半導体材料に対してカスケード型のエネルギー準位配列を形成可能であり，電荷移動効率の向上に寄与することが示唆された。

総じて，両系列の高分子は相補的な光捕集特性を有しており，光活性層の吸収波長域を拡張することが明らかとなった。

次に，光活性層として PBDB-T:BTP-eC9 系または PM6:PNDI2T 系ブレンドを用いたバルクヘテロジャンクション（BHJ）型有機薄膜太陽電池デバイス（ITO/ZnO/光活性層/MoO_3/Ag）を作製した。CBS ユニットを含有する高分子を BHJ へ第三成分として添加し，CBS 含有高分子を含まない二元系デバイスを対照サンプルとした。作製したデバイスの光起電力特性を表 1 にまとめた。

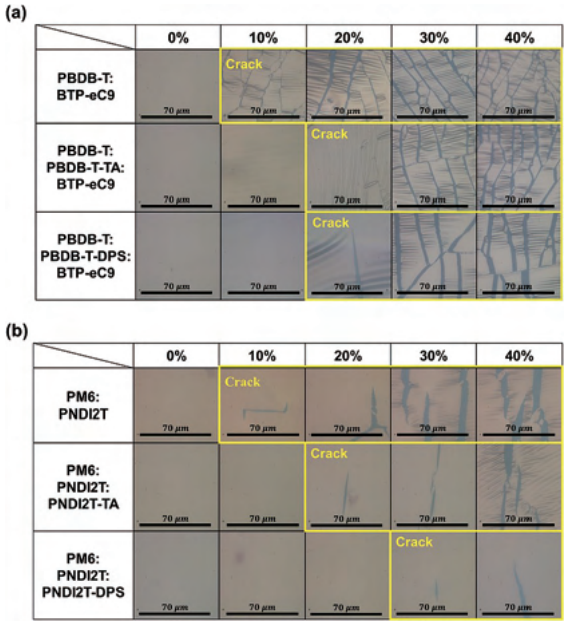


図3 （a）p型および（b）n型半導体高分子BHJ薄膜を異なる歪みレベル（0–40%）で伸長した後のOM像。Copyright 2026 American Chemical Society.

光活性層へCBS誘導体を導入した三元系デバイスの短絡電流密度（J_{SC}）は，対照デバイスのそれとほぼ同等であった。外部量子効率（EQE）スペクトルもこの傾向を裏付けた。特に重要な点は，CBS誘導体を第三成分として戦略的に導入することで，D:Aブレンドの光活性層と効果的に混合できたことである。この手法は，後述するようにOPVデバイスの機械的伸縮性を向上させながら，高いPCE値を維持できる可能性も示した。実際に，PBDB-T-TAおよびPBDB-T-DPSを用いた場合のPCE保持率は89%以上と求まり，最大97%を達成した。

最後に，OPVにおける二成分系および三成分系から構成されるBHJ層の力学特性に焦点を当てた。まず，PEDOT:PSS膜を未処理のシリコンウェハ上にスピンコートし，その後クロロホルム溶液からBHJ層を成膜した。続いて，PDMS基板をBHJ層上にラミネートし，脱イオン水に浸漬することでBHJ層をPDMS基板へ転写した。得られた試料を0～40%の歪みで伸長し，ガラス基板上に固定した後，光学顕微鏡（OM）を用いて評価した。

図3（a）に示すように，PBDB-T:PBDB-T-TA:BTP-eC9およびPBDB-T:PBDB-T-DPS:BTP-eC9の三元系では，COS値はPBDB-T:BTP-eC9膜（対照サンプル）の10%から20%へ向上した。同様に，図3（b）に示すように，PM6:PNDI2T:PNDI2T-TAおよびPM6:PNDI2T:PNDI2T-DPS膜のCOS値は，それぞれ20%および30%へと大幅に増加し，PM6:PNDI2T膜（対照サンプル）の10%を大きく上回った。

これらの結果は，単一成分材料で観測されたCOS効果の向上が，BHJベースの三元系OPVにも有効に拡張されることを示している。以上より，CBS含有半導体高分子を三元系デバイスの第三成分として導入することで，元のPCEの約90%を維持したまま，伸縮性が大幅に向上することが明らかとなった。

［参考文献］

1）L. Zhu, et al. *Joule*, **8**, 3153 (2024).
2）J. Zhu, et al. *J. Am. Chem. Soc.*, **147**, 24491 (2025).
3）M. Matsuda, et al. *Polym. J.*, **55**, 365–373 (2023).
4）T. Higashihara, et al. *Polym. J.*, **53**, 1061–1071 (2021).

［論文発表］

1）Mikata T., Lin C.-R., Sun H., Chueh C.-C., Higashihara, T*. “Aromatic Sulfides as Conjugation-Break Spacers for Designing Stretchable Donor-Acceptor Semiconducting Polymers in Photovoltaic Applications”, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **8**, 6511–6522 (2026).
2）Higashihara T*., Mikata T., Sun H., Chueh C.-C. “Recent Progress in Semiconducting Block Copolymers Suited for Organic Photovoltaics”, *Chem. Lett.*, in press (2026).

［学会発表］

1）三方 輝真，東原 知哉*．“主鎖にチオフェンスルフィドスペーサ骨格を有する半導体高分子材料の開発”，第34回ポリマー材料フォーラム，ウインクあいち，愛知県名古屋市，ポスター，1PB02（2025年12月4–5日）．
2）三方 輝真，Chu-Chen Chueh，東原 知哉*．“アリーレンスルフィドスペーサーを有する半導体高分子の合成”，第74回高分子討論会，関西大学千里山キャンパス，大阪府大阪市，口頭，Polym. Prepr. Japan, 74(2), 2K18（2025年9月16–18日）．

［研究助成（A）］

全身体 BMI

2241020



研究代表者
（助成金受領者）

東京科学大学
大学院医歯学総合研究科

准教授　平　理一郎

［研究の目的］

BMI は，脳活動を機械やコンピュータへ接続することで，失われた運動機能や意思伝達機能を補う技術として発展してきた。これまでの研究では，カーソル移動，文字選択，ロボットアームの到達運動など，比較的少数の自由度を持つ出力の制御に大きな成果が得られている。一方で，私たちが日常的に行う身体運動は，個々の筋や関節を独立に動かすものではなく，四肢，体幹，頭部を含む全身の協調，姿勢の維持，重力方向の推定，地面や外界との相互作用を含む，きわめて高次元で動的な過程である。

このため，BMI をより自然な身体操作へ拡張するうえで，脳活動から単一の運動変数を読み出すだけでは十分ではない。未解決の問題は，脳が身体全体をどのような単位として表現し，身体と環境の関係をどのように統合しているのかである。特に，歩行や姿勢制御では，四肢の位置や速度だけでなく，身体が地面に対してどのように傾き，重力方向に対してどのように配置され，次の運動へどのように準備されているかという情報が重要になる。これらの情報は，将来的に仮想身体や外部機械を自然に操作するための中核となる。本研究では，この未解決問題に対して，全身体 BMI という視点から取り組む。すなわち，脳活動を身体の一部の運動出力に対応づけるだけでなく，身体全体の状態，運動意図，姿勢，環境との関係を含む神経表現として捉え，それを仮想空間上の身体へ接続するための基礎原理を明らかにすることを目指す。これにより，脳，身体，環境，機械を連続した感覚運動システムとして理解し，ALS や脊髄損傷などにより身体運動が制限された人に対して，より自然で高自由度な身体操作を可能にする次世代 BMI の基盤を築く（図 1）。

［研究の内容，成果］

本研究では，全身体 BMI の実現に向けて，神経活動，身体運動，環境情報，仮想身体を連続的に扱う実験系と解析系を構築した。1 光子広視野カルシウムイメージングによるリアルタイム仮想身体制御，全身体骨格モデルと逆運動学によるアバター制御，2 光子カルシウムイメージングと 6 自由度プラットフォームによる身体・環境表現の解析，さらに 2 光子 BMI に向けたリアルタイム画像転送と表現学習を実現した。

【行動解析のリアルタイム処理】

全身体アバターを操作するためには，動物の全身体情報を正確に計測する必要がある。私たちはマシンビジョンカメラ 4 台を頭部固定マウスの周囲に配置し，200-^300 fps で同時に動物身体を記録するシステムを構築した（図 2）。この 2 次元画像からなる時系列データに対し深層学習ツール DeepLabCut を用いて 2 次元画像中の姿勢情報を抽出した。さらに 4 つのカメラで特定できた 4 組の 2 次元情報から各体部位

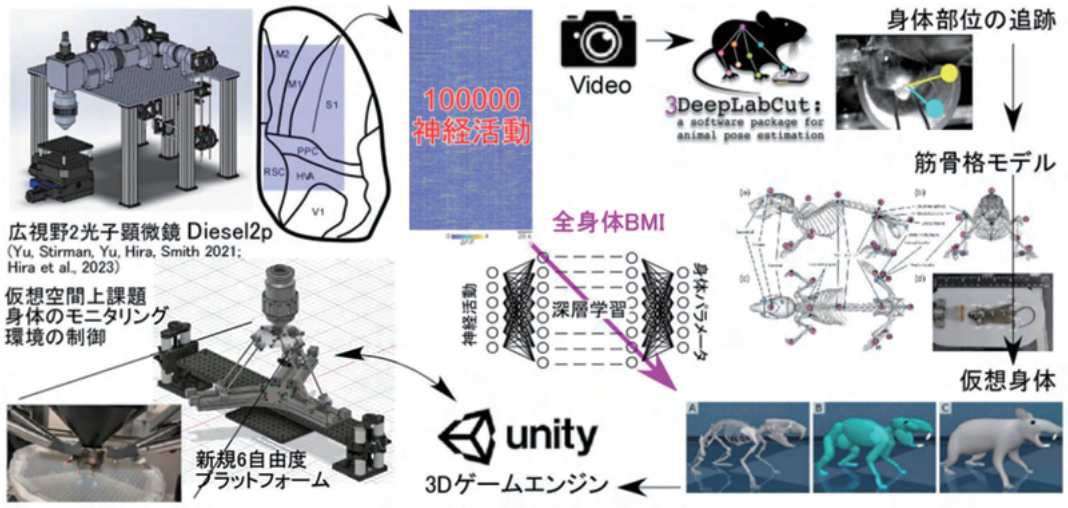


図1　本研究計画の全体構想。広視野2光子顕微鏡 Diesel2p により，大脳皮質の運動野，体性感覚野，頭頂連合野などから大規模に神経活動を記録する。同時に，ビデオ撮影と DeepLabCut により，前肢，後肢，体幹，尾部などの身体部位を追跡する。得られた神経活動と姿勢情報を対応づけ，深層学習により身体状態を推定する。さらに，身体座標を筋骨格モデルへ変換し，Unity 上の仮想身体として再構成する。新規6自由度プラットフォームにより姿勢や地面傾斜を制御し，身体と環境の関係を神経活動から読み出す。最終的に，神経活動に基づく仮想身体制御を実現する。

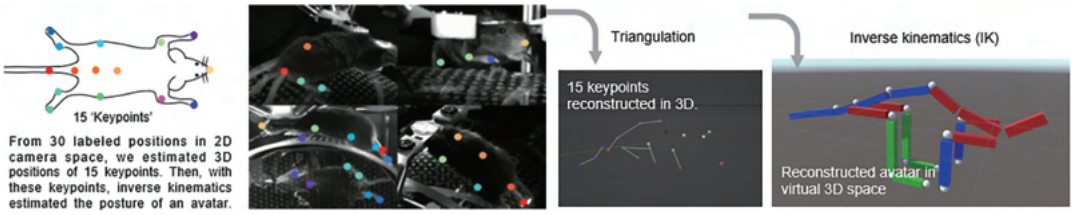


図2　実際のマウス運動を仮想身体へ変換する手順。ホイール上で運動するマウスを複数台のカメラで撮影し，各画像上で前肢，後肢，背部，尾部など15点の身体特徴点を DeepLabCut により検出した。各特徴点は複数視点の2次元座標として得られるため，カメラ間の幾何情報を用いた三角測量により，3次元空間内の keypoint 座標へ再構成した。次に，この3次元座標を入力として逆運動学を適用し，限られた特徴点情報から関節位置と骨格姿勢を推定した。これにより，実際のマウス身体運動を Unity 上の仮想 3D アバターとして再現することが可能になった。本手法は，現実身体の運動を仮想身体へリアルタイムに転送するための基盤となる。

の3次元座標を特定するアルゴリズムをカメラ画像のゆがみを補正する形で新規に作成した。これによって非常に正確な全身体の3次元姿勢トレースが可能となった。

カメラ画像の保存→DeepLabCut による姿勢抽出→3次元再構成→逆キネマティクス→Unity 上で描画，の工程をリアルタイム化した。その結果，このループが1台の PC で完結でき，30 fps のスピードで撮像からアバターの操作までを安定的に実行することができた。

アバター自体をリアリスティックに作るために，骨格モデルを作った。簡易版は四肢や体幹を円柱によって近似するもので，例えば前肢上部や前肢下部などに分けて実際にマウスの身体を解剖し骨格を実測することでこれらの円柱の長さを特定した。これを3次元ソフト Blender で構成し，3次元ゲームエンジン Unity 上で動作させることに成功した（図3）。

【1光子カルシウムイメージングと姿勢の関係】

頭部固定マウスに対して，1光子カルシウムイメージングを行った（図4）。この神経活動と同時に取得した姿勢情報から，神経活動がどの姿勢情報に対応しているのかをリッジ回帰で求めた。その結果，相関係数～0.7 で姿勢情報を再現することができた。

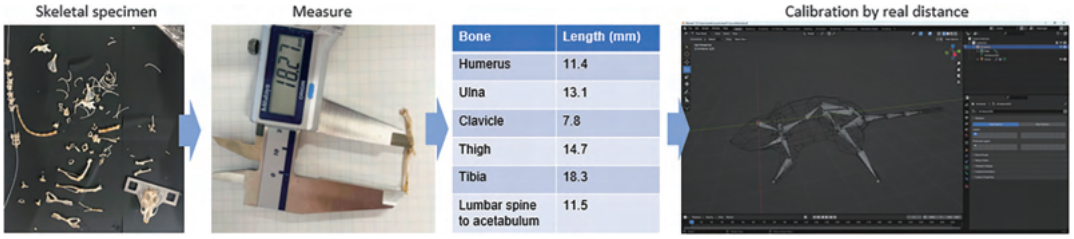


図 3　仮想マウス骨格モデルの作成手順。まず，実際のマウス標本から骨格を取り出し，上腕骨，尺骨，鎖骨，大腿骨，脛骨，腰椎から寛骨臼までの距離など，仮想身体の形状を決める主要な骨長を計測した。得られた実測値をもとに，Blender 上でマウスの骨格モデルを作成し，各骨の長さと関節位置を実際の身体寸法に合わせて調整した。さらに，実空間での距離情報を用いてモデル全体のスケールを較正し，DeepLabCut から得られる身体特徴点や 3 次元再構成座標と対応づけられるようにした。この手順により，実際のマウス身体寸法に基づいた仮想身体を構築し，逆運動学と Unity 制御に利用できるモデルを整備した。

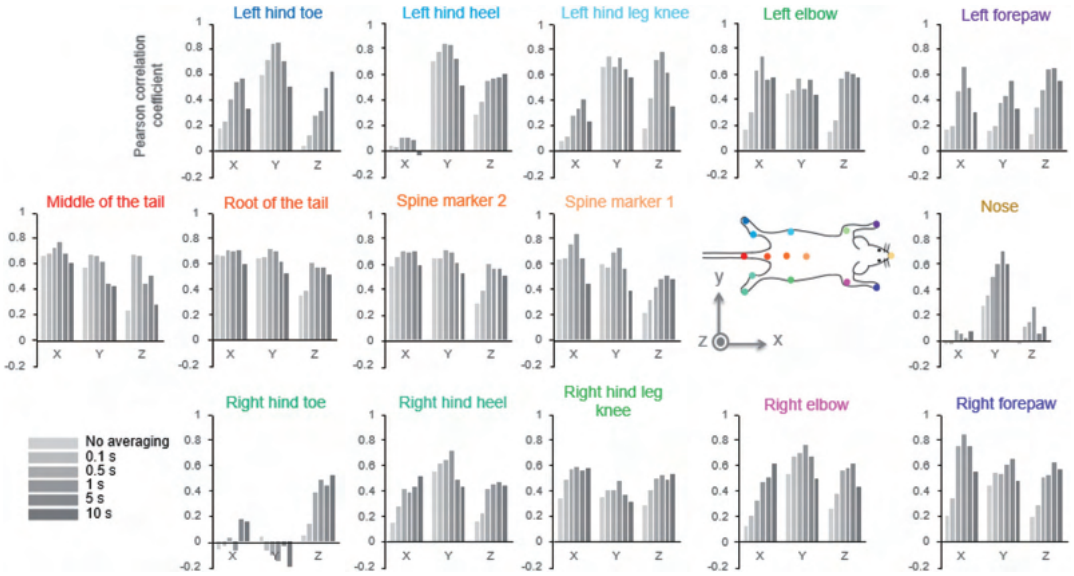


図 4　広視野 1 光子カルシウムイメージング画像から全身体 3 次元姿勢を予測した結果。中央の模式図は解析対象とした 15 個の身体 keypoint を示す。各小パネルは，鼻，前肢，肘，後肢膝，後肢踵，後肢つま先，背部，尾根部，尾中央の各 keypoint について，X，Y，Z 座標ごとの予測精度を示している。縦軸は実測座標と予測座標の Pearson 相関係数である。棒の濃淡は，座標データに適用した移動平均の時間窓を表し，平滑化なし，0.1 秒，0.5 秒，1 秒，5 秒，10 秒を比較した。体幹および尾部に近い keypoint では比較的安定した予測精度が得られ，後肢の一部座標でも高い相関が認められた。全体として，移動平均の時間窓を長くすると予測精度が上昇し，カルシウム画像からは瞬間的な肢位置よりも，遅い時間スケールの姿勢変化や運動状態が読み出しやすいことが示された。

【カルシウムイメージングのリアルタイム処理によるアバター操作】

これをリアルタイム化するために，LabVIEW で取得した画像を python で処理して 3 次元姿勢情報に変換し，それをもとに逆キネマティクスによって骨格情報に変換する流れを高速化した（図 5）。その結果，ダミーデータを使用した実証実験のレベルではビデオレートでのリアルタイム処理に成功した。

【2 光子イメージングと 6 自由度プラットフォームによる身体・環境表現の解析】

全身体 BMI で読み出す神経情報の構造を明らかにするため，広視野 2 光子カルシウムイメージングと 6 自由度プラットフォームを組み合わせた実験を行った。6 自由度プラットフォームにより，頭部固定マウスの支持面を制御し，複数方向の地面傾斜，傾斜保持中の回転，上下動などを与えた。同時に，大脳皮質の広範囲から神経細胞活動を記録し，複数台カメラによる

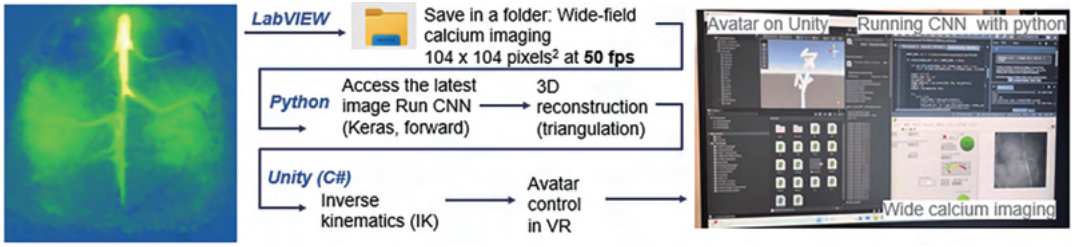


図5　広視野1光子カルシウムイメージングによる神経活動駆動型アバター制御系。左は大脳皮質表面から取得したGCaMP蛍光画像を示す。LabVIEWで取得した広視野カルシウム画像は，104 × 104 pixels，50 fpsの時系列データとして保存される。Pythonプログラムは保存フォルダ内の最新画像にアクセスし，Kerasで実装したCNNモデルを用いて，画像から運動状態または身体座標を推定する。推定された出力は3D再構成処理へ送られ，Unity側に入力される。UnityではC#で実装した逆運動学により，推定された運動情報を仮想身体の関節運動へ変換し，VR空間内のマウスアバターを制御する。右は，Unity上のアバター，Pythonによる CNN推論，広視野カルシウムイメージング画像を同時に動作させている実装画面を示す。本系により，広視野カルシウム画像の取得，CNN推論，運動情報の変換，仮想身体制御を連続的に接続し，神経活動に基づくリアルタイム仮想身体制御を実装した。

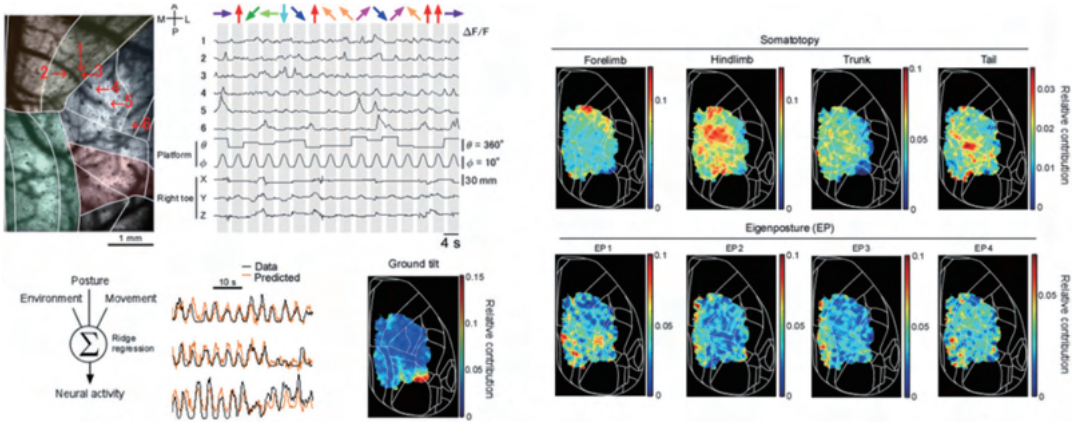


図6　広視野2光子カルシウムイメージングと全身体姿勢解析による大脳皮質の身体表現。左上は，大型頭蓋窓を通して記録した大脳皮質の領域配置と，代表的な神経細胞活動を示す。左下では，神経活動，姿勢，運動，環境情報を説明変数として用い，ridge regressionにより各要素の神経活動への寄与を推定した。実測値と予測値の比較により，身体姿勢や地面傾斜に関連する活動成分を評価した。中央下のマップは，地面傾斜に対する相対的寄与を皮質上に可視化したものである。右は，前肢，後肢，体幹，尾部に対応するsomatotopy，および姿勢変化を低次元成分として表したEigenposturの寄与マップを示す。

全身体姿勢計測も行った。これにより，神経活動，姿勢変化，環境傾斜を同じ時間軸で解析できるデータセットを作成した（図6）。

解析では，地面傾斜方向に選択的な神経細胞を同定し，運動野，体性感覚野，頭頂連合野，後部皮質領域を含む複数領域で応答を比較した。傾斜方向に応じた活動は複数の感覚運動関連領域に分布していた。さらに，傾斜条件，姿勢変化，運動状態を比較することで，地面傾斜に伴う神経活動と身体運動に伴う神経活動の関係を解析した。複数領域間の活動構造も比較し，身体と環境の関係が大脳皮質内でどのように共有されるかを調べた。この解析により，全身体BMIに必要となる神経表現として，四肢座標や走行速度に加えて，姿勢，重力方向，地面傾斜を含む身体・環境情報を扱う必要があることを明確にした。

【2光子BMIに向けたリアルタイム画像転送と表現学習】

本研究の後半では，2光子カルシウムイメージングをBMI制御へ接続するためのリアルタイム基盤を整備した。2光子画像は細胞解像度の神経活動を含むため，広視野1光子イメージ

ングで構築したリアルタイム仮想身体制御を，より高解像度の神経活動へ拡張するうえで中核となる。撮像装置で取得した２光子画像を外部計算機へ低遅延で転送するシステムを構築し，転送された画像を用いて神経活動の特徴抽出と表現学習を行う解析系を整えた。

表現学習では，細胞活動を個別に抽出してからモデルへ入力する方法に加えて，画像全体または画像から得られる低次元特徴量を用いて，運動状態，姿勢，環境傾斜に対応する潜在表現を学習する方法を検討した。これにより，２光子画像に含まれる高次元神経活動を，全身体BMIに必要な身体・環境情報へ結びつける解析基盤が得られた。

［成果の発表，論文など］

Imamura, F., Imamura, H., Hira, R., Isomura, Y†., & **Hira, R**†. (2025). Ground tilt representation in the rodent cerebral cortex. **bioRxiv**, 2025-09. (†co-correspondence)

Ryoya Yamamoto, Hiroki Mori, Satoshi Oota, Yoshikazu Isomura, **Riichiro Hira**, Fumiya Imamura. “Development of real-time control of virtual whole-body model using wide field calcium imaging” 2LBA-006 APPW2025 March. 18 Makuhari Messe ＜ポスター賞＞

［研究助成（A）］

動的プリミティブの運動制御仮説に基づく歩行・走行への介入と訓練効果

2241021



研究代表者（助成金受領者）　大阪大学　大学院基礎工学研究科　准教授　平　井　宏　明

［研 究 の 目 的］

ノーバート・ウィーナーの『サイバネティクス』以来，「人機一体」技術は着実な進化を遂げてきた。現在，支援技術は単なる機能補完の段階を超え「身体拡張」の領域に到達しており，パラアスリートの事例が示す通り，生来の身体能力を凌駕するパフォーマンスが現実のものとなりつつある。しかし，この「拡張された身体」とそれを制御する「脳」との相互適応プロセスに関する科学的理解は，未だ十分ではない。こうした背景から，本研究では運動制御および学習に関し，以下の学術的問い（Q1 ～ Q5）を設定した。

Q1：運動制御の基本構成要素は何か
Q2：脳はどの変数を操作して拡張身体を制御するか
Q3：これらの変数は脳内でどのように符号化されるか
Q4：運動符号はどのように獲得・保持されるのか
Q5：符号獲得を最適化する訓練法は何か

本研究では，Q1 ～ Q3 に関し「運動制御は3種類の動的プリミティブ（機械インピーダンス，サブムーブメント，オシレータ）で構成される」という仮説（H1）を採用した。これを作業仮説とし，「動的プリミティブに基づく介入は，新奇身体と脳の間の運動学習を促進する」という検証仮説（H2）のもと，歩行・走行への介入を通じた運動性能向上効果の解明を目的とした。

［研究の内容，成果］

理論的基盤と解析方法

仮説に基づけば，脳は動的プリミティブを組み合わせ，身体の機械インピーダンスや平衡点に関わる変数を操作することで所望の動作を生成している。これらの変数は，筋群の協調的な活動パターンである筋シナジーとして脳内に符号化される。本研究では，H1 の妥当性を検証しつつ，特に Q4（符号の獲得・保持）および Q5（最適な訓練法）の解明を目指した。

評価にあたっては，大阪大学で開発された介入支援機器および筋シナジー解析技術を用い，7つの工学的指標（①運動学，②共活性シナジー，③機械インピーダンス，④平衡点，⑤平衡点可操作性，⑥踏力，⑦エネルギー代謝量）に基づいて多角的に分析した。②～⑤は筋骨格系の数理モデルより算出される物理的指標であり，ロボット工学からスポーツ，医学分野へ提案する新たな評価軸である。推定される運動特徴量は中枢神経系の運動指令を反映している。特に，効果器（足先）の平衡点操作能力を可視化する「平衡点可操作性」は，本課題によって考案された新しい概念[6]であり，動的プリミティブ解析において核心的役割を果たす。本特徴量は機械インピーダンス，サブムーブメント，オシレータ，筋シナジーを統合的に関連付ける。

検証は，(1) 健常児童を対象とする陸上教室，(2) 健常成人を対象とする運動部活動，(3) 歩行困難者を対象とするリハビリテーション病院

の３つの現場で行い，提案手法の科学的根拠の獲得と社会実装を目指した。

各現場における研究成果

(1) 健常児童を対象とした陸上指導者による全力疾走訓練

10～11歳の健常児童９名を対象とした５か月間の陸上指導を通じ，運動性能の向上を動的プリミティブの観点から評価した（図1A）。その結果，「平衡点可操作性」の特徴量により習熟過程の峻別に成功した。訓練初期から中期には「質的改善（平衡点可操作性楕円の最適化）」，中期から後期には出力増大を伴う「量的改善」が進行することが判明した（図5）。これは，技能習得が単純な筋力向上ではなく，動的プリミティブと筋シナジーに基づく内部モデルの再構築過程（Q4の回答）であることを示している。

(2) 健常成人を対象とした機能性用具による歩行・走行訓練

身体各所に粘弾性特性を調整可能な受動用具（外腱）をネットワーク配置し，新奇身体環境を提供した（図2C，図6A）。健常成人４名の訓練後のトレッドミル歩行において，外部動力を用いない受動用具として世界トップクラスとなる最大8.0%のエネルギー代謝量の削減を確認した（図6B）。この効率向上は，外腱網が機械インピーダンスと平衡点（サブムーブメント，オシレータ）の調整を介し，脚の弾道的制御を支援した結果である。また，歩行速度増加に伴う効果の減弱から，人工物による身体拡張には脳の制御系が適応可能な速度域の境界が存在することが示唆された。

さらに，脚間に動力伝達の新奇経路を形成する介入を行ったところ，健常成人４名の訓練後の走行において，実験参加者の未活用の身体性が引き出され，エネルギー代謝量はトレッドミル走行で6.7%減，地上走行で10.2%減という極めて高い性能を示した（図1B，図2B）。

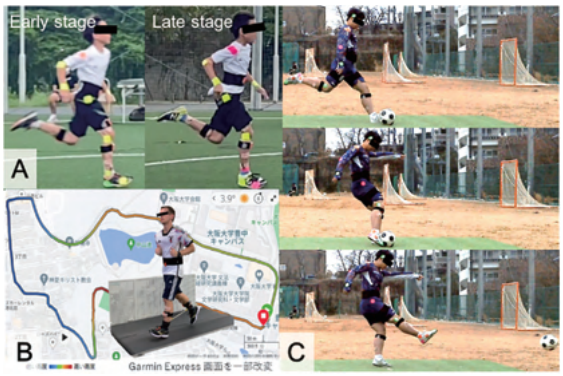


図１　アスリート特有の卓越した動作の計測と解析。（A）陸上教室にて短距離走の訓練を行う健常児童[14]，（B）長距離走の訓練を行う健常運動部生[4,8]，（C）サッカーのシュート動作[5,11,12]を行うスポーツ外傷・障がい後リハビリ過程のプロ選手[15]。訓練時の運動動作は，各種計測機器によって記録される，運動学，運動力学，筋電図学，運動生理学データに基づき多角的に評価・分析される。訓練は長期間に渡ることもある。

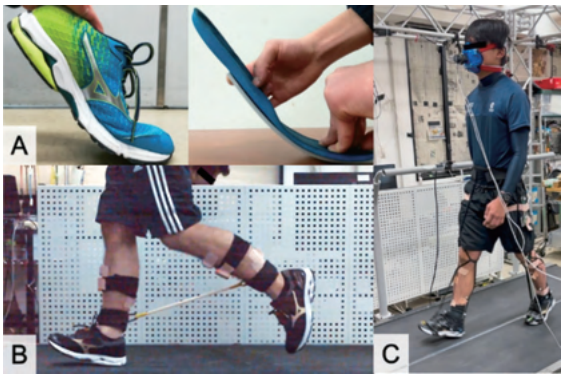


図２　運動機能拡張のための機能性用具。（A）走行の経済性を向上させる高弾性シューズ，（B）走行の経済性を向上させる脚間連結外腱[4,8]，（C）歩行の経済性を向上させる外腱網スーツ[16,21]。人工物によって強化された新奇な身体を使いこなすには十分な訓練が必要である。個人差はあるものの，総じて運動パフォーマンスの向上を確認している。

(3) 大腿骨近位部骨折患者を対象とした療法士および機能性用具による歩行訓練

術後患者13名を対象に，歩行自立を分かつ制御戦略を動的プリミティブの観点から比較した（図3B，図7，図8）。自立群は平衡点制御を構成する要素が少なく，効率的に弾道的運動を生成していたのに対し，非自立群は，転倒回避のための多数の修正運動を伴っていた。自立には動的プリミティブに連動した共活性シナジーの再構築が不可欠であり，局所的な筋力改

善以上に，全身的な制御戦略を再構築する介入（Q5 の解法）が重要であると結論付けられた。この知見は，さらなる術後患者 13 名を対象とした機能性用具（受動的外腱網）による歩行支援介入においても裏付けられ，臨床指標においても良好な改善効果が確認された。また，全実験参加者において立脚期での足先剛性増大，遊脚期での減少が認められた。外力への適応に伴う機械インピーダンス調整が歩行戦略の基盤であり，平衡点操作の効率化（サブムーブメント，オシレータの減少）こそが歩行自立の鍵であることが明らかとなった。

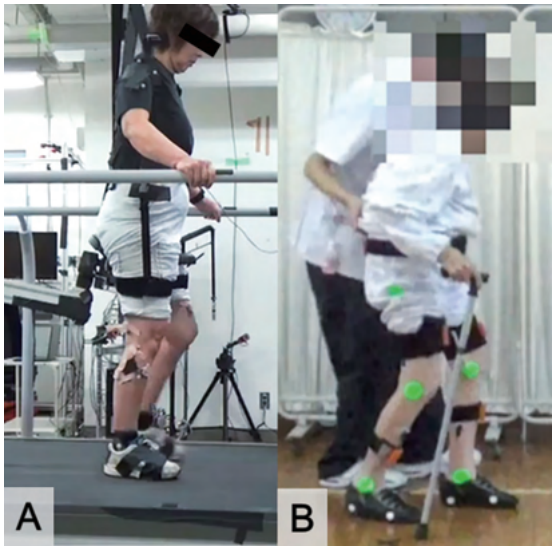


図 3　障がい特有の拙劣な動作の計測と解析。（A）部分体重免荷の下でトレッドミル歩行訓練を行う慢性期脳卒中後遺症者，（B）術後に地上歩行訓練を行う大腿骨近位部骨折患者 [2,9,18,22,23]。運動動作は医学的臨床評価の他，各種計測機器によって記録される，運動学，運動力学，筋電図学，運動生理学データに基づき，多角的に評価・分析される。

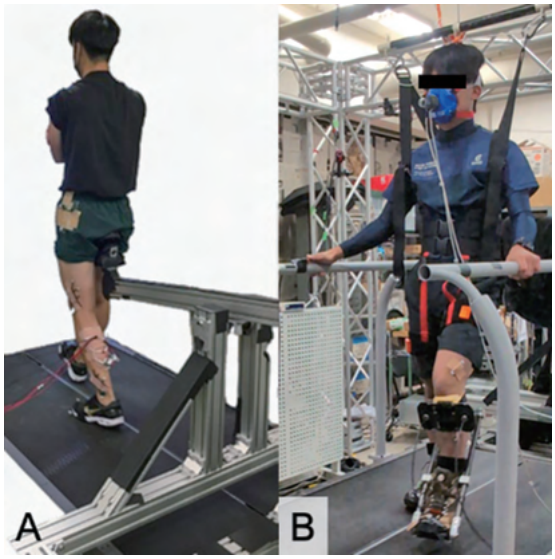


図 4　運動機能回復のための電気機械装置。（A）体重免荷装置，トレッドミルロボット，機能的電気刺激の介入を搭載したワークステーション型歩行訓練装置 [1,3,7,10,13,17]，（B）外骨格型歩行訓練ロボット [20]。障がいの種類や程度によって運動機能に大きな個人差があるため，利用者の特性にパーソナライズした介入が重要となる。

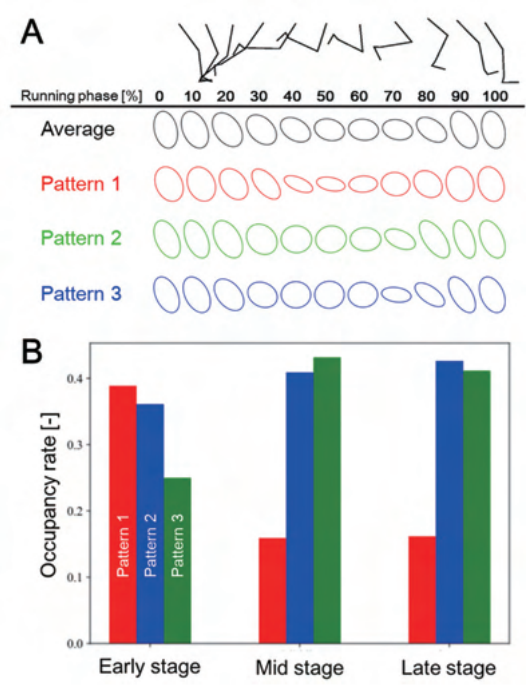


図 5　脚の操作性と疾走能力。（A）走行周期中の平衡点可操作性楕円の時間推移パターン，（B）訓練初期，中期，後期における各パターン占有率。疾走能力の向上とともにパターン 1 は減少し，よりメリハリの利いたパターン 2，3 へと変化する。

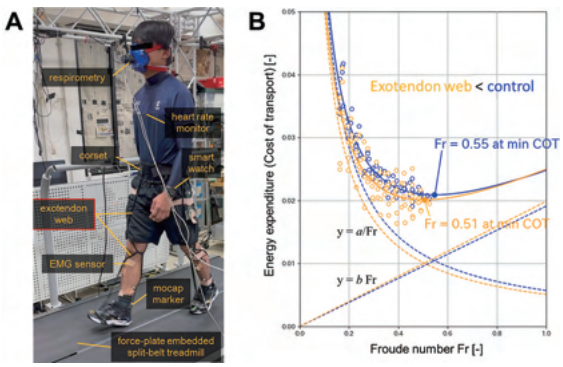


図 6　機能性用具の装着による身体機能の適応と歩行能力の拡張。（A）運動計測環境，（B）エネルギー代謝量。歩行支援ギア（外腱網）を装着し，訓練を積んだ実験参加者は歩行経済性が最大 8.0% 向上した。

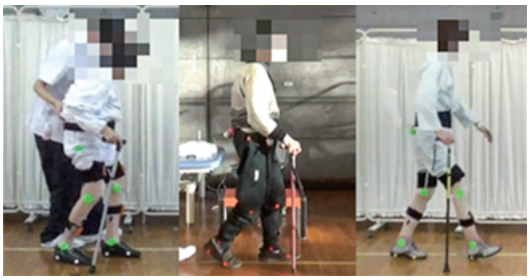


図 7　大腿骨近位部骨折患者の歩行リハビリテーション。左から歩行レベルの低い順（介助度の高い順）に並ぶ。

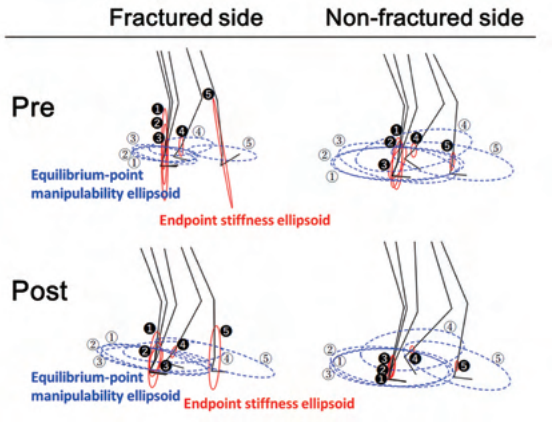


図 8　平衡点可操作性楕円と足先剛性楕円（代表実験参加者のデータ）。歩行自立者は，平衡点の高い操作性とメリハリの効いたインピーダンス調整を獲得している。

総括と今後の展望

本研究を通じ，「運動改善の本質は，肢端の平衡点操作性を向上させるような，肢内の機械インピーダンスの調整にある」ことが強く示唆された。提案した「平衡点可操作性」は，今後のスポーツ科学やリハビリテーションにおける標準的指標となり得る。今後は，介入に対する「応答者・非応答者」を自動識別する機械学習アルゴリズムを構築する。さらに，展開中の民間企業との共同研究を通じて機器の社会実装を加速させ，個人の身体・脳適応特性に最適な介入を提示する「個別化スポーツトレーニングおよびリハビリテーション」（図 2，図 4）を確立し，誰もが身体拡張の恩恵を享受できる社会の実現に向けて研究を推進する。

［成果の発表，論文など］

［1］平井宏明，他：歩行訓練装置，特願 2024-85348（2024 年 5 月 27 日出願）.
［2］古川啓介，他：大腿骨近位部骨折患者の歩行レベルの違いによる運動制御的差異，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024（ROBOMECH2024）講演論文集，2A2-H06(1)-(4), 2024.
［3］寺田怜平，他：サドル支持型免荷装置を用いたトレッドミル歩行訓練における蹴り出し動作のタイミング推定―骨盤／サドルの運動に着目した間接的アプローチ―，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024（ROBOMECH2024）講演論文集，2A2-H07(1)-(4), 2024.
［4］八島侑祐，他：脚間を連結する受動的外腱を付与されたヒトの新奇な身体機能への運動適応と走能力の拡張，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024（ROBOMECH2024）講演論文集，2P1-I08(1)-(3), 2024.
［5］黒木蓮，他：サッカー熟練者のインステップキック動作における支持脚の運動制御戦略，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024（ROBOMECH2024）講演論文集，2P1-I09(1)-(3), 2024.
［6］平井宏明，他：運動解析装置，運動解析方法及びプログラム，特願 2024-147486（2024 年 8 月 29 日出願），PCT/JP2025/030496（2025 年 8 月 29 日国際出願）.
［7］R. Terada et al.: Transverse pelvic/saddle rotation characterizing push-off initiation during saddle-seat-typebody-weight-supported treadmill walking, Proc. 2024 10th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Rob. Biomechatron. (BioRob2024), pp. 876-882, 2024.
［8］E. Christofori et al.: Energy savings without exter-nal energy in augmented running，第 42 回日本ロボット学会学術講演会（RSJ2024）予稿集，1G5-02, 2024.
［9］古川啓介，他：大腿骨近位部骨折患者の歩行時の介助量と共活性シナジー，足先剛性および平衡点可操作性の関係，第 45 回バイオメカニズム学術講演会（SOBIM2024）講演予稿集，pp. 194-197, 2024.
［10］久賀紘和，他：サドル支持型部分体重免荷，左右分離型トレッドミル，および下腿三頭筋への機能的電気刺激を用いた歩行への介入とその効果，第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2024）講演論文集，pp. 1987-1990, 2024.［優秀講演賞］
［11］黒木蓮，他：サッカー熟練者のインステップキック動作における蹴り脚と支持脚の運動制御戦略，第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2024）講演論文集, pp. 2176-2179, 2024.［優秀講演賞］
［12］平井宏明，他：運動計測装置，運動計測方法及びプログラム，特願 2025-20156（2025 年 2 月 10 日出願），PCT/JP2026/004718（2026 年 2 月 10 日国際出願）.
［13］久賀紘和，他：サドル支持型部分体重免荷，左右分離型トレッドミル，および下腿三頭筋への機能的電気刺激を用いた歩行への介入とその効果―バイオメカニクス的分析―，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス

講演会 2025（ROBOMECH2025）講演論文集，2A2-N06(1)-(4), 2025.
［14］武市明日海，他：陸上指導を受ける小学校高学年男子児童の疾走能力のトレーニング効果―平衡点可操作性による新しい尺度からの解釈―，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025（ROBOMECH2025）講演論文集，1P1-J08(1)-(2), 2025.
［15］黒木蓮，他：蹴球動作の熟練技能―インパクト直前150ms の運動制御―，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025（ROBOMECH2025）講演論文集，1P1-J09(1)-(3), 2025.
［16］井出陽，他：受動的外腱網の着用による新奇弾性場へのヒトの歩行適応，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025（ROBOMECH2025）講演論文集，2A1-Q11(1)-(4), 2025.
［17］寺田怜平，他：サドル支持型部分体重免荷装置を用いた トレッドミル歩行における股関節と足関節の相互作用，第 43 回日本ロボット学会学術講演会（RSJ2025）予稿集，2K3-04, 2025.
［18］古川啓介，他：大腿骨近位部骨折患者における杖歩行自立・非自立の運動制御戦略の違い，日本臨床バイオメカニクス学会第 52 回学術集会プログラム集，O19-4, 2025.
［19］古堅功将，他：外野手問題の運動計画に対する一考察：視覚駆動型離散制御，日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス部門講演会（SHD2025）講演論文集，B-5-3, 2025.
［20］寺田怜平，他：サドル支持型部分免荷トレッドミル歩行における股関節運動に連動した足関節介入の効果―機能的電気刺激と外骨格ロボットの比較―，第 26 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2025）講演論文集，pp. 683-687, 2025.
［21］井出陽，他：力場の着用による身体機能拡張―歩行適応の個別動態解析―，第 26 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2025）講演論文集，pp. 1171-1176, 2025.
［22］古川啓介，他：大腿骨近位部骨折患者におけるリハビリテーション介入と歩行制御の変化，日本ロボット学会誌，2026.（印刷中）
［23］古川啓介，他：大腿骨近位部骨折後の歩行再獲得に対する運動制御的視点と臨床リハビリテーションへの示唆，日本ロボット学会誌，2026.（印刷中）

［研究助成（A）］

AI 自動評価技術を用いた内視鏡手術技術の定量化と次世代教育システムの開発

2241022



研究代表者（助成金受領者）　九州大学　大学病院　小児外科　助教　福田篤久

［研究の目的］

狭小空間での正確な操作が求められる内視鏡手術は切開手術に比べより多くの経験を必要とする。一方で，内視鏡手術では開腹手術と比較して，外科医の感覚情報が限られていることから実際の指導では「見て学ぶ」，「慣れて学ぶ」といった主観的かつ経験的指導が主体となっている。この状況を打開すべく，限られた手術数であったとしても，その経験を共有し，技術向上に効率よく繋げるツールの開発が必要であると考え我々は様々な手術シミュレータを開発してきた。更にはシミュレータ訓練による学習効果を立証し得た。本研究では我々が取り組んできた内視鏡手術教育システムをさらに発展させ，これまで主観的かつ経験的に語られていた手術技術，感覚情報を「可視化」かつ「定量化」することで「いつでも」，「どこでも」熟練医による技術指導を再現可能な内視鏡手術シミュレータ開発を目的とした。

具体的には，これまでに開発を進めてきた内視鏡シミュレータにおいて「AI を用いた内視鏡技術自動評価システム」および「アイトラッキングシステム」の実装実験を行った。

［研究の内容，成果］

本研究では，トレーニングキットに鉗子の動きを計測する機能を実装する方法およびアイトラッキングシステムを実装する方法について検証を行った。

① AI を用いた鉗子軌道追跡手法

本研究では，トレーニングキットを上部から撮影した動画から鉗子の動きを計測した。

動画からの鉗子の認識と位置計測には，DeepLabCut（DLC）と呼ばれる AI（深層学習）を用いた姿勢推定手法を使用した。DLC は，マウスや猿など動物各パーツ（例えば指や尻尾など）がどのように移動しているか定量的に計測するために用いられており，特に生物の行動解析や医療領域の研究に幅広く活用されている。DLC は AI による追跡手法であり，学習データセットを必要とする。学習データセットの作成にはラベル付けが必要となる。ラベル付けとは，AI に追跡対象を学ばせるために必要となる手続きであり，動画から複数のフレーム（画像）を抽出し，抽出したフレームに映る対象物の特定の部分を選択することを指す。ラベル付けされたそれぞれの点は keypoint と呼ばれる。

検証

図 1 中の tip1-tip7，stick1-4 に示す keypoint を 300 フレーム分ラベル付けした。図 2 は，DLC が検出した鉗子上の各パーツを丸印（●），人によるラベル付けを十字印（＋）で示したものである。動画全体のフレームのうち，学習に使用

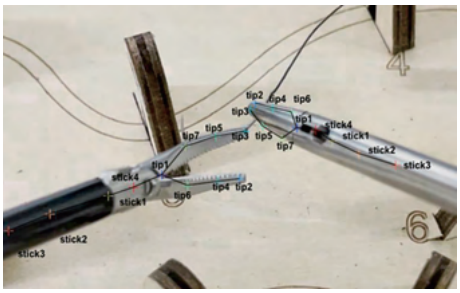


図１　ラベル付けされた鉗子の keypoints

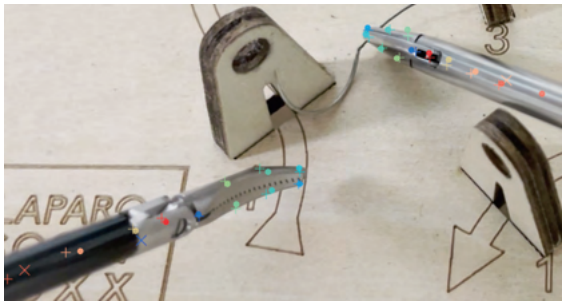


図２　ラベル付けした keypoints と検出された keypoints の比較

されていないフレーム 5% をランダムにピックアップして丸印（検出結果）と十字印（正解データ）の位置の比べた結果，ピクセル距離の差分の平均値は 9.2 ピクセルであった。

なお，図 2 中のクロス印（×）は誤検知であると判断され追跡から取り除かれた点を示す。クロス印も DLC がパーツとして検知した点ではあるが，confidence score と呼ばれる検知の信頼性を示す値が低いため，誤検知であると判断された点を示している。

②アイトラッキングシステム実装検証

本研究では食道閉鎖症モデルを訓練ボックスに設置し，シミュレーション中の眼球運動を測定するため，t トレーニングボックス正面に配置したモニター下段にアイトラッキングシステム（Tobii Pro フュージョン®）を設置し測定を行った。併せて試技中の牽引パラメータを調べるため，上部食道モデルと下部食道モデルにレーザー距離センサーを装着し距離牽引データと眼球追跡データを記録した。

被験者は，上部食道と下部食道の前壁間の

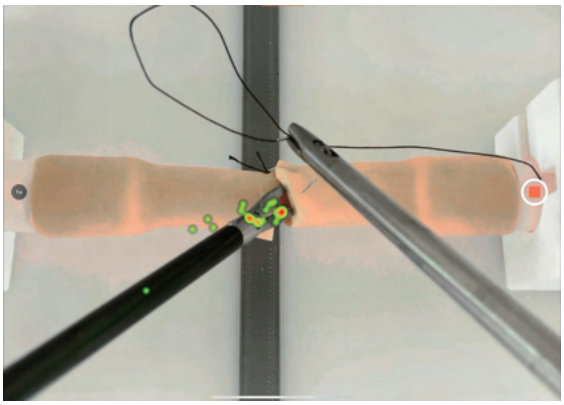


図３　作業中の視線データ

	Total (n=20)	Expert (n=12)	Trainee (n=9)	P value
Task time (sec)	568.04 [312.4 – 1081.55]	558.25 [312.4 – 1023.8]	582.5 [415.51 – 1081.55]	0.381
Traction for upper esophagus (mm)	8.15 [5.03 – 10.68]	7.98 [5.03 – 10.4]	8.64 [5.81 – 10.68]	0.161
Traction for lower esophagus (mm)	7.35 [5.51 – 15.91]	6.77 [5.51 – 8.8]	10.3 [5.74 – 15.91]	0.016
Left eye openess (mm)	10.1 [6.4 – 12.2]	9.9 [6.4 – 12.2]	10.3 [9.0 – 11.7]	0.349
Right eye openess (mm)	10.0 [6.9 – 11.3]	9.8 [6.9 – 11.1]	10.4 [9.5 – 11.3]	0.052

表１　食道吻合モデルにおける距離牽引データと眼球追跡データ

3 箇所を体内縫合により吻合した。

経験レベルの異なる 20 名の被験者が本課題を実施した。牽引測定において，各被験者の牽引量の中央値は，上部食道で 7.4 ± 1.3 mm，下部食道で 8.2 ± 1.4 mm であった。

各参加者の最大牽引力は，上部食道で 21.4 ± 4.0 mm，下部食道で 23.0 ± 4.5 mm であった。視線追跡測定では，開眼度の中央値は右眼で 10.0 ± 1.26 mm，左眼で 10.2 ± 1.29 mm であり最大開眼度は右眼で 15.2 ± 2.47 mm，左眼で 16.1 ± 2.01 mm であった。

リミテーション

AI を用いた鉗子軌道検出において鉗子の検出が不安定になる要因として，大きく分けて 3 つの種類の要因が確認された。

1. Keypoint が観測不可になるケース

トレーニングキット上のオブジェクト等の遮蔽により keypoint が確認できない，鉗子の回転により keypoint が確認できない，高速移動時

の激しいブレにより keypoint が確認できないなどの要因により検出が不安定になることが確認された。

2. Keypoint の見た目上の特徴が少ないケース

図 1 中の tip1，2，3，stick1，4 は比較的安定した追跡が可能であることが確認された。しかし，stick2，3 には検出位置のずれが発生するケースが多く見られた。原因として，stick2，3 の見た目上の特徴が tip1，2，3，stick1，4 に比べて少なく，かつ stick2，3 のそれぞれの見た目の特徴とラベル付けの位置がお互いに近いことが原因であることが想定される。

3. ラベル付けをした際の背景と追跡を行う際の背景に違いがあるケース

アイトラッキングシステムにおいて視線検出が不安定となる要因として以下の点が挙げられる。

1. 作業中にキャリブレーション時から大幅に被験者が移動するケース

トレーニングボックス正面に設置したモニター下部にアイトラッカーを設置したため作業中にモニターと被験者の距離にズレが生じた場合は検出度が極めて低下した。

2. 被験者毎の身長差が大きく異なるケース

モニター高の制限から被験者の身長が 180 cm を超えるケースでは検出度が極めて低かった。

対策

機械学習モデルは，学習をおこなったデータと実際に推論（位置計測）を行うデータが近いほど精度が向上する特徴がある。

比較的安定して計測が可能であった tip1，2，3，stick1，4 のそれぞれの位置の関係（ジョイント）情報を用いて追跡を安定化させる対策が考えられる。例えば，鉗子は剛体であるため，tip1，2，3，stick1，4 それぞれの検出位置の関係が大きき歪むことは考えられない。そのため，検出された keypoints のうち 1 点のみが歪んだ位置に検出された場合には，その点が誤検知であると検知可能となる。

また，1 点がトレーニングキット上のオブジェクトによって遮蔽された場合にも，他の keypoints の位置情報を用いて視認できない keypoint の位置を推測可能となる。トレーニングキットの背景ごとの検出精度のブレに関しては，それぞれの背景を満遍なく学習データとして使用することによって解決されることが予測され，更なる改良開発中である。

今回はスクリーンベース型のアイトラッカーを用いて実装実験を行ったが，ウェアラブル型のアイトラッカーを用いることで検出の精度は向上が期待される。

まとめ

本研究では，内視鏡トレーニングシミュレータにおける鉗子軌道データを定量化する AI モデルの実現可能性および視線データ定量化の実現可能性を検討した。改善点はあるものの AI システムの改良と自己学習により熟練外科医と初心者外科医を正確に識別できるようになることが期待された。効率的で信頼性の高いトレーニング環境を確立させるべく，引き続き客観的技術評価システムの開発を継続していきたい。

［成果の発表，論文など］

Fukuta A, Yamashita S, Maniwa J, Tamaki A, Kondo T, Kawakubo N, Nagata K, Matsuura T, Tajiri T.: Artificial intelligence facilitates the potential of simulator training: An innovative laparoscopic surgical skill validation system using artificial intelligence technology. J Laparoendosc. Int J Comput Assist Radiol Surg. doi: 10.1007/s11548-024-03253-5. 2024

［研究助成（A）］

医療器具への多数センサ集積のための配線レスな信号スイッチング機構

2251031



研究代表者
（助成金受領者）　立命館大学　総合科学技術研究機構　准教授　坊　野　慎　治

［研 究 の 目 的］

細長い医療器具を利用して本来の機能に加えて，生体情報をモニタリングするためには，複数のセンサを配置する必要がある。しかし，センサ数を増やすと，同時に配線数が増え本来の機能を阻害する可能性がある。そのため，配線数を低減するための信号スイッチ機構（SSM）への注目が高まっている。

最近ガリウム合金により構成される液体金属液滴（LMD）を用いたSSMを開発した。ガリウム合金は室温で液体状態であり，低毒性及び高電気伝導性を示す。このため滴状のガリウム合金を容易に形成することができる。一方で，ガリウム合金を用いてLMDを形成すると，LMDの表面に自発的に絶縁性の酸化膜が形成される。このためスイッチに用いる信号として直流電圧を用いることは出来ない。そこで我々は電極対を統合した流路に，導電性を有するLMDが進入すると，実効的な電極間距離が減少し，それに伴い静電容量が上昇することに注目した。信号として交流電圧を利用する場合にはインピーダンスが重要となる。そして，LMDが進入した電極対はインピーダンスが減少するので，その電極に接続したセンサからの信号が選択的に伝達される。これまでに，SSMに接続した複数センサのうちLMDにより選択したセンサ信号を選択的に取得することに成功した。

本研究では，医療器具として尿管ステントを選定し，ステント上の多点圧力計測へ向けた選択的信号取得を目指す。そのためにLMD-SSMを尿管ステントへ集積し圧力モニタリングステントを構築する。そして尿管ステントに圧力センサを配置し，LMDの輸送を利用して取得する信号を選択する。そのために，はじめに柔軟なLMD-SSMを作製し，溝を加工した尿管ステントへ統合した。そして，圧力をセンシングするための圧力ヒューズを開発し，尿管ステントに配置した。LMDの進入を利用して，圧力ヒューズを接続した電極の静電容量を変調し，圧力モニタリングステントによる圧力計測を行う。そして本研究で開発した圧力モニタリングステントの検出精度の評価に取り組む。

［研究の内容，成果］

・実験結果

図1（a）に我々が作製した圧力モニタリングステントを示す。市販の尿管ステントに深さ100 μm，幅1 mmの溝を形成した。圧力検出を行うために自作の圧力ヒューズをSSMの1つの上部電極に接続し，尿管ステントの腎臓側に固定した。そして圧力ヒューズの電気特性を選択的に計測するために，尿管ステントに形成した溝にSSMを統合した。

図1（b）にSSMの模式図を示す。SSMは3つの上部電極をパターニングしたポリイミドフィルムと1つの下部電極をパターニングしたポリイミドフィルム，流路により構成される。

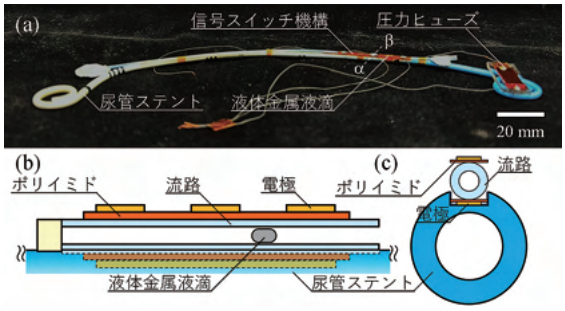


図1　圧力モニタリングステント。(a) 圧力モニタリングステントの写真。(b) ステントに統合したSSMの模式図。(c) 圧力モニタリングステントの断面模式図。

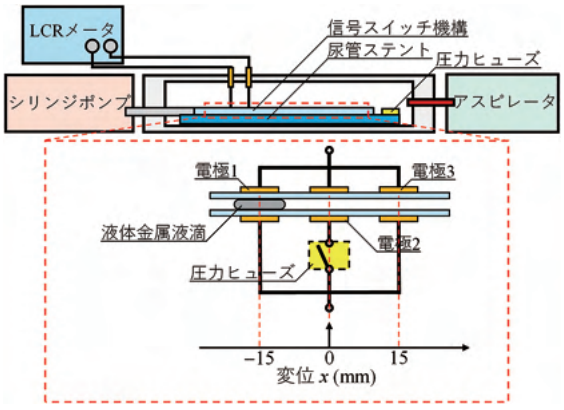


図2　圧力モニタリングステントの静電容量測定系の模式図。インセットに圧力モニタリングステントの等価回路を示した。

個々の上部電極の幅及び長さはそれぞれ600 μm及び5.0 mmとした。下部電極として幅及び長さがそれぞれ600 μm及び40 mmの金属薄膜を用いた。今回用いるLMDの長さは5 mmであり，複数の電極に同時に進入させないために，電極の間隔を10 mmとした。LMDをSSMの流路内に配置した。流路の片側を接着剤により封鎖し，開放端側から圧力を印加した。先行研究において流路への圧力印加により流路内におけるLMDの位置を制御できることが報告されている。上部電極のうち中央の電極に圧力ヒューズを接続した。他の電極にも圧力ヒューズを取り付けることが可能であるが，今回は圧力の変化を取得できることを示すことが目的なので，1つの圧力ヒューズを用いた。

図1（c）に圧力モニタリングステントの図1（a）におけるα–β断面模式図を示す。ステントの溝に下部電極をパターニングしたポリイミドフィルム及び流路の一部が埋め込まれている。SSMの高さ及び尿管ステントの深さはそれぞれ1.1 mm及び0.1 mmである。SSMの流路は，尿管ステントの長軸に沿って配置されている。対象の信号を選択的に取得するために，LMDがSSMの流路内を移動し，尿管ステントに配置されたセンサ付近に移動する。

本研究の圧力ヒューズはダイヤフラム，銅プレート・テープにより構成される。大気圧下において銅プレートと銅テープは接触しており，電気的な導通が担保されている。負圧印加下に圧力ヒューズを置くとダイヤフラムが膨張し，閾圧力を超えると銅プレートと銅テープが空間的に開放される。この電気特性の変化を利用して圧力の変化をセンシングする。

圧力モニタリングステントの信号取得特性を評価する。図2に測定系の模式図を示す。圧力モニタリングステントをチャンバー内に封入し，アスピレータを用いて圧力を計測しながら減圧した。SSMの流路とチャンバー外のシリンジポンプとを接続し，チャンバー内の圧力とは独立に流路内の圧力を制御した。圧力モニタリングステントのインピーダンスを計測するために，SSMの電極をチャンバー外のLCRメータに接続した。

図2のインセットに圧力モニタリングステントの等価回路を示す。上部電極を左から順番に電極1，電極2，そして電極3と定義し，圧力ヒューズを電極2に接続した。流路長軸に沿ってx軸を定義し，電極1，電極2，そして電極3はそれぞれx = –15 mm，0 mm，そして15 mmに位置する。チャンバー内の負圧（$-P$）を一定に保ちながらシリンジポンプにより流路内のLMDを一定速度で輸送しながら，インピーダンスを計測した。そしてインピーダンスの虚部より静電容量（C）を求めた。

図2中の等価回路からわかるように，LMDが電極間に進入していなくとも，圧力ヒューズ

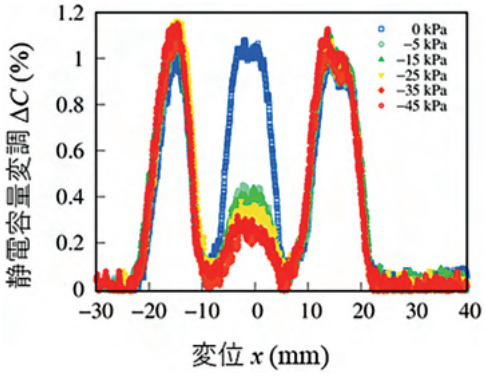


図3　規格化された静電容量（ΔC）の LMD 位置（x）に対する依存性。

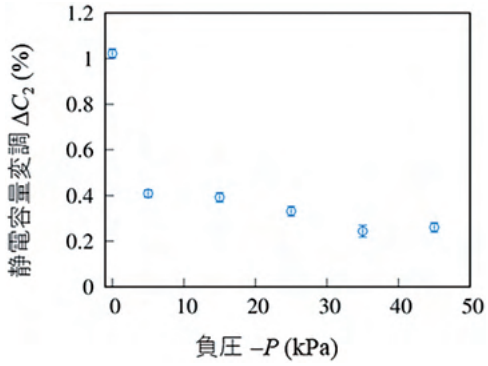


図4　ΔC_2 の印加負圧（$-P$）依存性。

の電気特性が変化すると C が変化する。本研究では LMD を電極間に輸送することにより，信号を取得する電極を選択する。つまり LMD の進入による静電容量の変調量が重要である。そこで，静電容量を $\Delta C = (C\text{-}C_0)/C_0$ のように規格化し，LMD によりアクティベートされた信号と印加負圧の関係を調べる。

図3に ΔC の x 依存性を示す。$P = 0$ kPa，つまり大気圧下において，ΔC は LMD の位置 x に依存し，ΔC には3つのピークが観察された。それぞれのピークは LMD が電極1，電極2そして電極3に進入した際の静電容量の増加を示している。そこで，LMD がいずれの電極にも進入していない場合の静電容量，LMD が電極1，電極2，そして電極3に進入している場合の静電容量をそれぞれ ΔC_0，ΔC_1，ΔC_2，及び ΔC_3 と定義する。

大気圧下においては，3つのピーク（ΔC_1，ΔC_2，ΔC_3）の高さはほとんど一致している（～1%）。これは圧力ヒューズの銅プレートと銅テープが電気的に接触していると，電極2と圧力ヒューズを含む部分回路は，電極1や電極3を含む部分回路と等価な回路とみなせるためであると考えられる。

圧力モニタリングステントを負圧印加下に置くと，ΔC_2 のみが単調に減少する。$P = -45$ kPa において ΔC_2 は 0.2% まで低下する。これは負圧印加によって開放した圧力ステントの電気特性が変化したことに由来すると考えられる。以上の結果から，ΔC_2 から圧力の変化を計測できることがわかった。

LMD が進入した電極に接続された圧力ヒューズの電気特性から圧力を求めるために，静電容量の変調量を定量的に評価する。図4に ΔC_2 の印加負圧（$-P$）依存性を示す。5 kPa 程度の負圧印加により ΔC_2 は，0.4% 以下に減少することがわかった。これは 5 kPa 程度の負圧印加により圧力ヒューズが開放したことを示唆している。さらに負圧を印加すると ΔC_2 は単調に減少し，45 kPa においては，ΔC_2 は 0.2% 程度まで減少することが明らかになった。

圧力ヒューズの顕微鏡観察の結果から，45 kPa の負圧印加下において圧力ヒューズの銅プレートと銅テープが離れていることが明らかになっている。一方で 45 kPa の負圧印加下においても LMD の電極2への進入に伴う ΔC のピークは消失しないことがわかった。これは圧力ヒューズが開放していても，有限のインピーダンスに保たれていることを示唆している。

以上の結果から，約 5 kPa 程度の圧力変化に伴う圧力ヒューズの電気特性評価を SSM によって選択的に取得できることを示している。急性疾患に伴う腎臓内圧の変化は 8 kPa であることが報告されている。我々の圧力モニタリングステントはこの疾患をセンシングするのに十分な検出感度を有する。

・考察

SSM を利用した圧力変化に伴う静電容量変調の選択的取得について等価回路を用いて解析する。図 5（a）に負圧を印加していない場合，つまり P = 0 kPa の場合の等価回路を示す。ここで圧力ヒューズは導通しているので，単純な配線とみなした。等価回路において各電極の静電容量をそれぞれ $\hat{c}_1$，$\hat{c}_2$，及び $\hat{c}_3$ と定義した。LMD が電極 2 に進入している場合を考えるので，$\hat{c} = \hat{c}_1 = \hat{c}_3 \neq \hat{c}_2$ である。大気圧下において LMD が電極 2 に進入している及びいずれの電極にも進入していない場合の合成静電容量 C（0 kPa）及び C_0(0 kPa）はそれぞれ以下のように与えられる。

$$C(0\ \mathrm{kPa}) = \hat{c}_1 + \hat{c}_2 + \hat{c}_3 \quad (1)$$

$$C_0(0\ \mathrm{kPa}) = 3\hat{c} \quad (2)$$

図 5（b）に閾値以上の負圧を印加した場合の等価回路を示す。実験において閾値以上の負圧印加下において銅プレートと銅テープが離れた状態においても，LMD が電極 2 に進入すると静電容量のピークが観察された。これは開放した圧力ヒューズが有限のインピーダンスを保っていることを示唆している。そこで我々は開放した圧力ヒューズをコンデンサとみなし，その静電容量を $\hat{c}_{\mathrm{pf}}$ と定義した。負圧印加下において LMD が電極 2 に進入している場合の全静電容量［$C(-P)$］は以下のように与えられる。

$$C(-P) = \hat{c}_1 + \frac{\hat{c}_{\mathrm{pf}}}{\hat{c}_2 + \hat{c}_{\mathrm{pf}}}\hat{c}_2 + \hat{c}_3 \quad (3)$$

よって (1) 及び (2) 式を (3) 式へ代入すると

$$\hat{c}_{\mathrm{pf}} = \frac{\{C(0\ \mathrm{kPa}) - 2\hat{c}\}\{C(-P) - 2\hat{c}\}}{C(0\ \mathrm{kPa}) - C(-P)} \quad (4)$$

が与えられる。実験で得られた C(0 kPa) = 3.43 pF，C_0(0 kPa) = 3.40 pF，及び C(–P = 45 kPa) = 3.13 pF を (4) 式を代入すると $\hat{c}_{\mathrm{pf}}/\hat{c}$ = 2.9 が得られる。

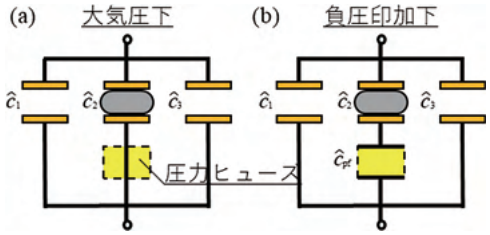


図 5　圧力センシングステントの（a）大気圧下及び（b）負圧印加下における等価回路

一方で，幾何的にも圧力ヒューズの静電容量を求めることができる。SSM の電極面積及び電極間隔はそれぞれ 3 mm^2 及び 1.1 mm である。開放した圧力ヒューズにおいて銅プレートと銅テープがオーバーラップしている面積 S はおおよそ 12 mm^2 であることが顕微鏡観察よりわかった。そして本研究における最大負圧印加下（–45 kPa）において，d = 1.8 mm であった。SSM において電極間は polydimethylsiloxane（PDMS）と空気に占められている。そしてその割合は，おおよそ 59:41 である。PDMS の占有面積及び比誘電率が 2.7 程度であることを考慮すると，SSM における実効的な比誘電率 e は約 2 である。静電容量は $\varepsilon S/d$ で与えられるので，開放した圧力ヒューズと SSM の電極の誘電率比は $\hat{c}_{\mathrm{pf}}/\hat{c}$ = 3.3 が得られる。幾何的に求めた $\hat{c}_{\mathrm{pf}}/\hat{c}$ は，実験値に基づき等価回路から求めた比（～ 2.9）と一致している。この結果より，我々の圧力ヒューズは導通から，開放端ではなくコンデンサにスイッチすることを示唆している。

負圧印加によって圧力ヒューズが断線せず，コンデンサとしてふるまうのは，応用上の利点を有する。先行研究において，流路に印加する圧力から LMD の位置を推定できることが示されている。しかし圧力センシングステントを体内に導入すると，LMD が SSM 流路のどこに位置するか直接観察することが難しい。このため圧力ヒューズが断線し，静電容量ピークが完全に消失すると，圧力ヒューズが断線したのか LMD が電極間を通過していないのか判別できない。しかし我々の考案した圧力ヒューズは負

圧印加下でコンデンサとしてふるまうので，静電容量のピークは消失せず，ピークの高さのみが減少する。このため，我々の圧力ヒューズの動作原理を利用すると，LMD が電極間を通過したことを電気的に確認でき，同時に体内の圧力が変化したことも計測できる。今回我々が用いた圧力ヒューズはプロトタイプである。今後圧力センシングステントとして応用するうえで，小型化や生体適合性などの改良が必要である。しかし負圧印加によって導通状態からコンデンサへ変化するという機構は，LMD の位置を直接観察できない環境下で特に有用な機構であると考えられる。

・結論

我々は圧力ヒューズと SSM を統合した尿管ステントを構築し，ステントの機能を有しつつ腎臓の圧力をモニタリングするための圧力モニタリングステントを開発した。圧力変化を電気特性に変換するためのプロトタイプとして，圧力ヒューズを作製した。LMD が流路をサンドイッチする電極対間に進入すると，静電容量のピークが観察される。この静電容量の変調量は負圧を印加すると減少する。これは負圧印加下において圧力ヒューズが開放し，導通状態から有限の静電容量を有するコンデンサに変化するためであることが分かった。我々の圧力モニタリングステントは少なくとも 5 kPa 程度の圧力検出分解能を有するので，急性疾患に伴う腎臓の内圧変化を検出できると期待される。

今回我々はプロトタイプの圧力ヒューズを用いて，圧力を選択的に取得する原理を示した。この圧力ヒューズは，負圧印加によって静電容量変調のピークが消失するのではなく，ピークが減少する。このため，LMD の位置を直接観察できない体内環境において，複数の圧力センサを接続し，計測している圧力を同定するうえで，有用なセンシング特性である。さらに今後圧力ヒューズの小型化や生体適合性などの改良を行うことによって，我々の圧力モニタリングステントの医療応用が実現すると期待される。

［成果の発表，論文など］

・学術論文

［1］Shinji Bono, Hinata Mori, Ryotaro Nakai, Satoshi Konishi, “Selective power transmission using a shift in resonant frequency due to the transportation of liquid metal droplets”, Scientific Reports, Vol.15, Article number 13907 (2025)

［2］Shinji Bono, Ryotaro Nakai, Satoshi Konishi, “Selective Measurement of Capacitive and Resistive Signals Using Simultaneous Position Control of Multiple Liquid Metal Droplets”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines (E), Vol.145, p.91 (2025)

［3］Shinji Bono, Hinata Mori, Satoshi Konishi, “Switching between Sensor Signal Acquisition and Power Transmission Using Liquid Metal Droplets in Channels”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines (E), Vol.146, p.123 (2026)

［研究助成（A）］

海馬系の脳計測との融合を目指した人工知能技術の開発

2251032



研究代表者（助成金受領者）	株式会社国際電気通信基礎技術研究所	連携研究員	細　谷　晴　夫
共同研究者	国際電気通信基礎技術研究所	室長	Aurelio Cortese

［研 究 の 目 的］

AI-脳融合とは，脳における情報処理の一部をAIに肩代わりさせることにより，脳からの情報（fMRIなどで計測した脳活動）を高精度に解読して可視化したりする技術である。本研究では長期目標として，脳の海馬系の情報処理方式に倣ったAIモデルを利用することにより，脳から自分のいる場所などに関する脳情報を高精度に読み取る技術の確立を目指している（図1）。海馬系は，過去に体験した事象のスナップショットのような記憶（エピソード記憶）を司る脳の部位であり，場所や動作に関する記憶，すなわち「認知マップ」はその典型例である。近年では物理空間だけでなく概念空間でも認知マップが形成されることがわかっている。上記のような長期目標においては，そのような海馬系の情報処理方式を模倣したAIモデルを構築することが，中核的な技術課題となる。しかし，海馬系に倣ったAI研究は未開拓で，強い制約条件下でのみ動作する神経回路モデルがあるに過ぎない。したがって本研究では，AI-脳融合応用での使用にたえうるスケーラブルな海馬系AIモデルを開発することを目的とする。

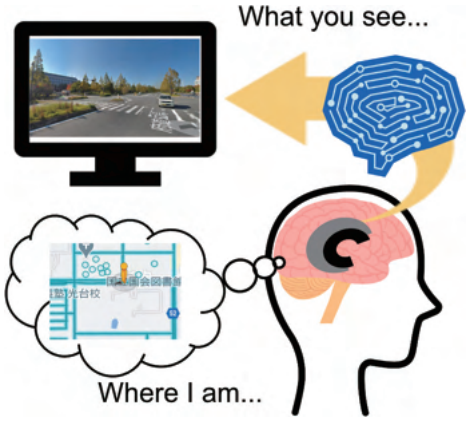


図1　海馬系の脳AI融合技術

［研究の内容，成果］

本研究の主目標は，AI-脳融合応用を見据えた海馬系のAIモデルの構築を行うことである。具体的には，①海馬系の神経反応特性を高い精度で再現できる，②学習効率が高くスケールアップする，③学習方式が高い汎化性を持つものを目指す。特に，モデルでの訓練にはない未知の空間への汎化性は応用上で重要である。そのようなモデルの考案にあたり，大きな方針として，海馬系が回路構造の異なる海馬と嗅内皮質という2つの領野の連関計算をしているという神経科学の知見からヒントを得て，マップの幾何構造を表現する「抽象表現」と，個別のマップを表現する「具象表現」に分離するという考え方をとることにする。これにより学習方式の汎化性を担保するのである。

まず，嗅内皮質のグリッド細胞（Hafting et al. 2005）を模した抽象表現を仮定し，それを具象化する形でタスク背後の認知マップを構成するモデルを考案した（図2A）。具体的には，

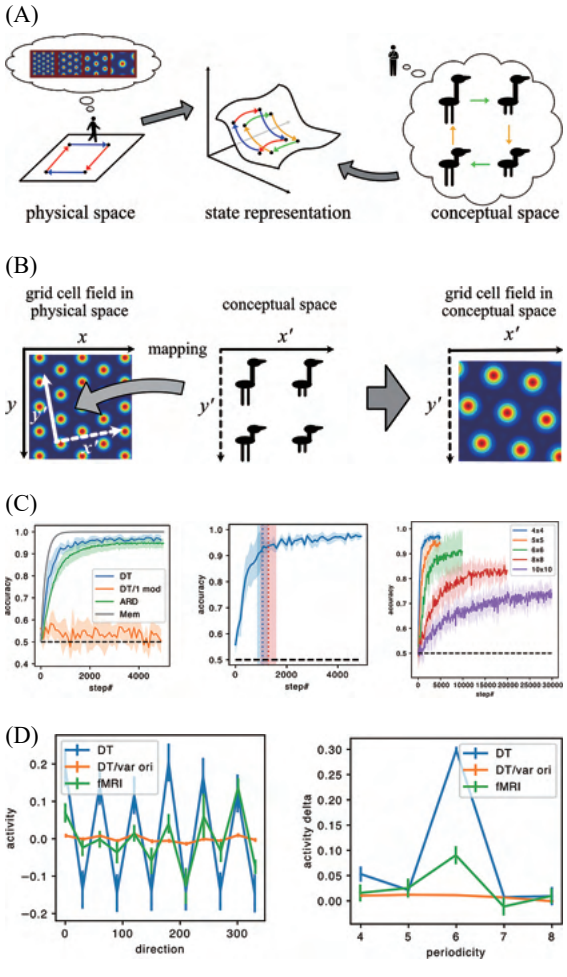


図 2　概念空間マップを学習する海馬系 AI モデル

グリッド細胞集団の活動が形成する低次元マニフォールドに着目し，その幾何学的構造をダイナミクスとして表現して再利用することで，グリッド細胞が表す物理空間から概念空間へのドメイン間転移を実現する（図 2B）。タスクとしては，ある対象（画像など）の集合が 2 次元概念空間に配置されていると仮定し，対象ペアごとの関係を推論する試行を繰り返すものを用いた。それにより，対象集合の配置とマップ構造を推定することが目的である。タスクは離散的（格子状の）空間もしくは連続的空間を仮定する二種類を用いた。

モデルの学習では，各対象をマニフォールド上の状態パラメタとして，また対象間の関係を状態間の変位パラメタとする。そして，試行の平均成功確率を目的関数として最適化する。その際，すべての状態パラメタが常にマニフォールド上にとどまるよう制約付き最適化を行う。最適化手法として，「manifold trekking」と呼ぶ独自技術を開発した。

この手法では遷移関数を用いて状態を更新することで，幾何構造を保ったまま学習を進め，概念空間の構造がグリッド細胞のユークリッド幾何に整合する形で自動的に埋め込まれる。

モデルを実行した結果，いずれの課題でも数千ステップ以内に高精度に到達した（図 2C 左）。また，未学習の組み合わせに対しても推移的推論が可能で，これは過去の実験で示されている人間被験者の速度と同程度だった（図 2C 中）。これは，単なる記憶ではなく，潜在的な幾何構造を学習していることも示している。しかもある程度タスクサイズを大きくしても学習可能だった（図 2C 右）。さらに，概念空間内の移動方向に対する平均活動を解析したところ，60 度周期の明瞭な六角変調が再現された。この結果はヒト fMRI 研究（Park et al. 2021; Constantinescu et al. 2016）で報告された現象と整合している（図 2D）。これは概念空間でのグリッド細胞の出現を計算論的に説明するものである。特に，概念空間と物理空間の間にほぼ直交的な線形写像が形成されたとき，最も安定した六角変調が得られた。また，グリッド細胞のモジュール（周波数の種類が異なるグリッド細胞の集団）の個数を減らすと性能が低下し，単一モジュールでは学習が破綻したことから，複数周波数構造が精密な位置符号化と転移に不可欠であることが示唆された。モジュール間のグリッド方位が揃っていない場合には六角変調が消失し，これは動物実験（Stensola et al. 2012）で観察されるモジュール方位整合性と一致する。さらに，本枠組みを三次元概念空間へ拡張する試みとして，二つの独立したグリッド細胞ネットワークを組み合わせる手法を導入した。その結果，より高次元の構造に対しても安定した学習が可能であることが示された。これは，複数の二次元表現の組み合わせによって高

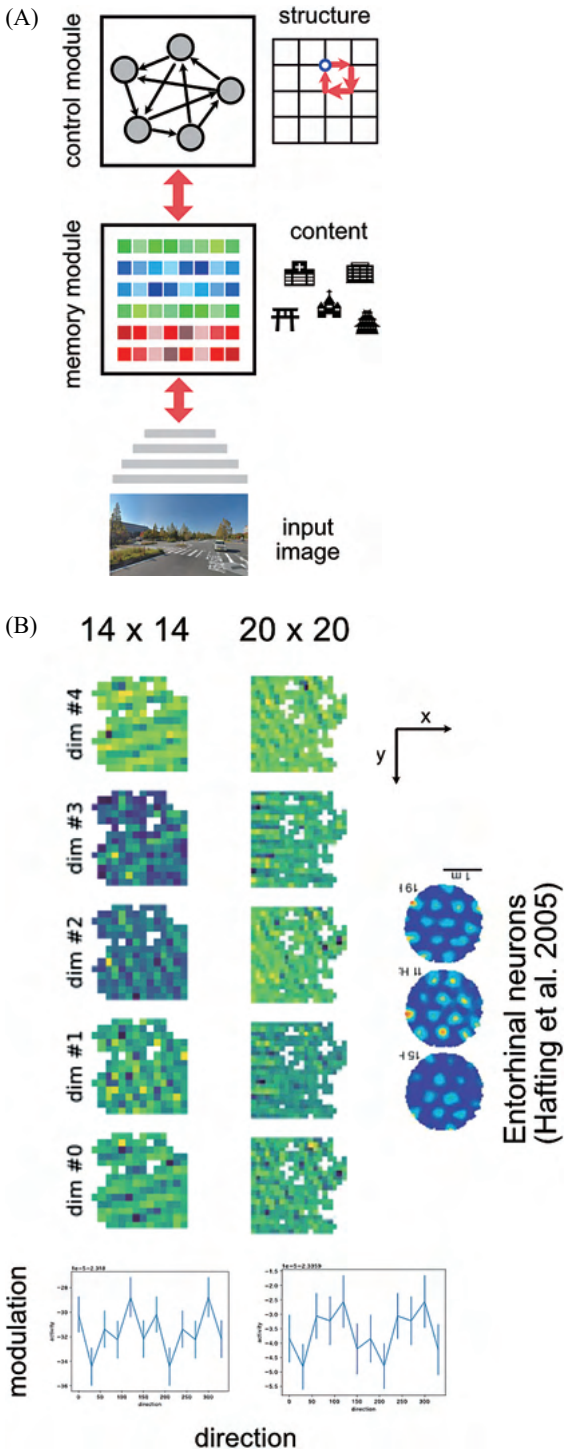


図 3　移動探索型の海馬系 AI モデル

次元空間を表現できる可能性を示唆する。

本研究では上記の成果に加え，物理空間を移動探索しながら認知マップの一般的な構造を学習する AI モデルの構築も試みた（図 3A）。このモデルでは，具象表現（海馬）に加え，抽象表現（嗅内皮質）も学習するような「抽象・具象分離アーキテクチャ」を導入した。このアーキテクチャは，本研究代表者が過去に開発した意思決定モデル（Hosoya, ICLR 2024）を出発点とし，読み書き可能なメモリモジュールと，リカレントネットによる制御モジュールを組み合わせ，全体を end-to-end で学習する。

このようなアーキテクチャにより，具体的タスク環境に依存しない「認知マップの一般構造」を学習でき，これにより新規のシーンを含む未知のタスク環境への汎化性が担保できると考えられる。近年類似する神経回路モデルによって，哺乳類の海馬系の神経反応特性が再現できるという結果が発表された（Whittington+, 2020）が，詳細な作り込みが多数含まれ，学習効率は非常に悪く，小規模で人工的なトイタスクでしか動作しない。特に，入力の記憶創生・想起を行うメモリモジュールの学習効率にボトルネックがあり，メモリサイズの 4 乗の計算量がかかっていた。一方，本研究では，2 乗の計算量で抑えたメカニズムを用いることで解決を図っている。

図 3B に構築したモデルの実行例を示す。タスク環境のサイズ 14 × 14 及び 20 × 20 について実行した。図 3B の上側に，モデルのユニット 5 個について可視化した。それらを見ると，規則的な構造を持つパターンが見られ，それらが哺乳類の海馬系を構成する嗅内皮質の神経細胞の持つ六角格子パターン（図 3B 右側）と類似していた。定量化するために，図 3B 下側に図 2 と同様な方法で方位に関する変調をプロットしてみると，60 度ごとの周期的パターンがあり，特に 14 × 14 の場合には明確にある。しかしながらまだ神経応答パターンの再現性が十分とはいえず，かつこれらのモデル訓練には 1 日以上の時間がかかることから，今後更なるモデルの改良が課題となる。

以上より，本研究では抽象・具象表現の分離という考え方から，海馬系における概念空間マップの獲得のモデルと，抽象表現（グリッド

細胞）自体を学習するモデルの開発を行った。前者のモデルに関しては，本研究の目標であった神経特性の再現性，効率性，汎化性の３つに関してある程度達成しているものの，後者のモデルに関しては目標が予想よりも遥かに難題であることがわかり，将来課題が多く残る格好になった。しかしながら，本研究を通じてニューラルマニフォールド上での制約付き最適化という枠組みが，神経活動の幾何構造と下流計算との関係を明示的に扱う一般性がある可能性があり，将来性を醸し出す研究内容になったとも言える。

［成果の発表，論文など］

細谷　晴夫．グリッド細胞の再利用によって抽象関係表現を学習する構造類推モデル．第 48 回日本神経科学大会，2025. 口頭発表.

Haruo Hosoya. Cross-domain transfer of spatial representations through grid-cell geometry. In preparation.

［研究助成（A）］

ウェアラブル視線推定システムのための眼瞼皮膚歪みセンサ

2251033



研究代表者
（助成金受領者）　東京大学　生産技術研究所　准教授　松　久　直　司

［研 究 の 目 的］

視線は，人間の意図，注意，認知状態，さらには神経学的機能を反映する重要な生体情報であり，ヒューマンコンピュータインターフェース，VR/AR，運転支援，ヘルスケア，リハビリテーション，意思伝達支援など幅広い分野での応用が期待されている。特に，手指や発話による入力が困難な状況において，視線は人間と機械を自然につなぐ有効な情報入力手段となりうる。そのため，日常生活の中で負担なく装着でき，長時間にわたって安定して視線情報を取得できるウェアラブル視線推定技術の実現は，人間と機械の調和を促進する上で重要な課題である。

従来の視線推定技術としては，カメラを用いたビデオ眼球運動計測（VOG），眼電図（EOG），コンタクトレンズ型デバイスなどが提案されてきた。しかし，VOG は高い空間精度を有する一方で，カメラや赤外照明などの光学系を必要とし，周囲の光環境，まつ毛や眼瞼による遮蔽，装着位置のずれの影響を受けやすい。また，装置が大型化しやすく，日常生活中の自然な装着には制約がある。EOG はカメラを必要としない利点を有するが，皮膚電極との接触状態や皮膚湿度の変化により信号がドリフトしやすく，連続的かつ高精度な角度推定には課題が残る。コンタクトレンズ型デバイスは眼球運動を直接計測できる可能性を持つものの，眼表面への直接装着を必要とするため，長時間使用時の違和感や安全性，受容性の面で課題がある。申請時の比較表でも，本研究はこれらの従来法に対して，装着性，環境依存性，長期安定性，低侵襲性を同時に満たす新しい視線推定法として位置づけられていた。

本研究の目的は，眼球運動に伴って眼瞼周辺の皮膚が特徴的に変形すること（図 1）に着目し，その微小な皮膚歪みを超柔軟な伸縮性歪みセンサで計測することにより，カメラを用いない新しいウェアラブル視線推定システムを実現することである。眼瞼皮膚は非常に柔らかく，従来の硬いセンサを貼付すると皮膚本来の変形を妨げてしまう。そのため，本研究では，皮膚の自然な動きを阻害しない薄膜・低剛性の伸縮性歪みセンサを開発し，下眼瞼周辺に貼付することで，眼球運動に伴う局所的な皮膚変形を多点で取得することを目指した。さらに，得られた複数の抵抗信号を用いて，眼球運動角度を連

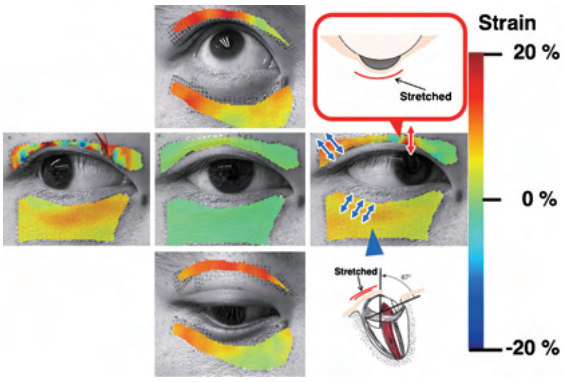


図 1　デジタルイメージ相関法を用いた視線による眼瞼歪のマッピング。異なる視線の方向に応じてユニークな歪パターンを形成していることがわかる。

続的に推定するアルゴリズムを構築することを目標とした。

具体的には，第一に，眼瞼の動きを妨げない超柔軟な金マイクロクラック型歪みセンサを作製し，下眼瞼周辺に安定に貼付できるデバイス構造を確立する。第二に，眼球運動に対してどの部位の皮膚歪みが有効な情報を含むかを明らかにし，センサの貼付位置と感度方向を最適化する。第三に，多点歪みセンサから得られる時系列抵抗信号を解析し，水平・垂直方向の眼球運動角度を推定する機械学習モデルを構築する。これにより，カメラ，眼表面への直接接触，大型光学系に依存しない，軽量・低侵襲・プライバシー保護性の高い視線推定技術の基盤を確立することを目指した。

[研究の内容，成果]

本研究は，以下の 3 ステップに分けて進められた。

（1）超柔軟伸縮性歪みセンサの開発
（2）センサ貼付位置最適化
（3）視線推定アルゴリズムの構築

(1) 超柔軟伸縮性歪みセンサの開発

本研究で用いた歪みセンサは，柔軟なエラストマー基材上に金薄膜を形成し，その金薄膜中に生じるマイクロクラック構造を利用して歪みを抵抗変化として読み出すものである。合計膜厚が僅か数 μm のため，皮膚の皺にまで密着できる（図 2a）。金マイクロクラック型歪みセンサでは，伸長に伴って金薄膜中の微小な亀裂構造が開閉し，導電経路が変化するため，わずかな皮膚変形に対しても大きな抵抗変化を得ることができる。この特徴は，変形量の小さい眼瞼皮膚の歪み検出に適している。また，金は化学的に安定であり，生体表面に貼付するウェアラブルデバイスの電極材料として扱いやすい利点を有する。

具体的には，SEBS 系エラストマー，PMMA 系エラストマー，Au 薄膜を組み合わせた多層構造の柔軟歪みセンサを作製した（図 2b）。センサは，眼瞼周辺の曲面かつ動的に変形する皮膚に追従できるよう，薄膜化と柔軟化を重視して設計した。作製プロセスでは，犠牲層を用いた薄膜形成，レーザー加工によるセンサパターン形成，熱蒸着による Au 薄膜形成を組み合わせることで，皮膚貼付に適した柔軟センサ構造を実現した。論文草稿中では，センサが皮膚表面に密着して貼付され，眼球運動に伴う下眼瞼周辺の皮膚変形を抵抗信号として取得する構成が示されている。

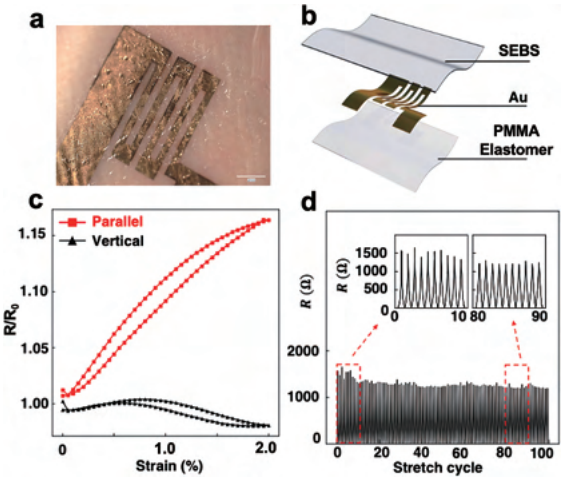


図 2　超柔軟伸縮性歪みセンサ。(a) センサが皮膚の皺にまで密着する様子。(b) センサ構造。(c) センサの抵抗変化－歪み特性。(d) センサの繰り返し歪特性。

作製したセンサについて，まず基礎的な電気機械特性を評価した（図 2c）。センサに一方向の伸長を加えたところ，伸長方向に依存して抵抗変化が大きく異なる異方的な歪み応答を示した。特に，金マイクロクラックの開閉に敏感な方向では，伸長に伴って相対抵抗変化が明確に増加した一方，直交方向では抵抗変化が小さく抑えられた。このような異方的応答は，単に歪みの大きさを検出するだけでなく，皮膚変形の方向性を分離して取得する上で有用である。眼球運動に伴う眼瞼皮膚の変形は，水平視線移動と垂直視線移動で異なる空間分布と方向性を持つため，本センサの異方性は視線推定において重要な特徴となった。

また，繰り返し伸長試験により，センサが反復変形に対して安定した抵抗応答を示すことを確認した（図 2d）。眼瞼周辺に貼付する視線推定デバイスでは，眼球運動，瞬目，表情変化などにより多数回の微小変形が加わるため，繰り返し変形に対する安定性は不可欠である。本研究で開発した金マイクロクラック型センサは，繰り返し伸長時にも抵抗応答を維持し，連続計測に適した機械的耐久性を示した。

(2) センサ貼付位置最適化

次に，開発した柔軟歪みセンサを用いて，眼球運動検出に適したセンサ貼付位置と感度方向の最適化を行った。眼球運動に伴う眼瞼周辺の皮膚変形は一様ではなく，眼の内側，中央，外側で異なる変形パターンを示す。また，水平視線移動と垂直視線移動では，皮膚の伸長方向や変形量が異なると考えられる。そのため，視線推定に有効な情報を取得するためには，単にセンサを眼瞼付近に貼付するだけでなく，どの位置に，どの方向に感度を持つセンサを配置するかを系統的に検討する必要がある。

図 1 に示すように視線移動に伴って眼瞼皮膚に特徴的な歪み分布が生じることを確認していた。特に，下眼瞼周辺は視線移動に伴う歪みを示す一方で，上眼瞼に比べて瞬目や開閉動作による大きな変形の影響を受けにくく，センサを安定に貼付しやすい部位であることが分かっていた。そこで本研究では，下眼瞼周辺を主な計測対象とし，貼付位置とセンサ感度方向を変えながら，眼球運動に対する抵抗応答を評価した。

実験では，下眼瞼周辺を内側，中央，外側の三つの領域に分け，それぞれの位置に 0° 方向および 90° 方向の感度パターンを持つセンサを貼付した（図 3a）。0° 方向と 90° 方向のセンサは，センサパターンの向きにより，互いに直交する方向の皮膚変形に対して異なる感度を持つように設計した。これにより，眼球運動によって生じる皮膚歪みの大きさだけでなく，変形方向に関する情報も取得できるようにした。

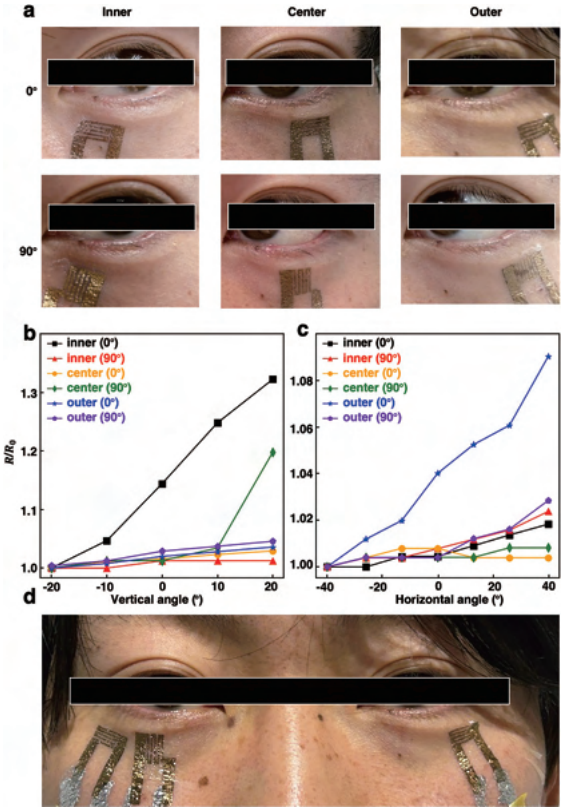


図 3　センサ貼付位置最適化。(a) センサ位置と方向。(b) 眼球を垂直方向に動かした際のそれぞれのセンサの抵抗変化。(c) 眼球を水平方向に動かした際のそれぞれのセンサの抵抗変化。(d) 最終的なセンサの取り付け位置と方向。

垂直方向の眼球運動に対する応答を評価したところ，内側位置に貼付した 0° 方向センサが最も大きな抵抗変化を示した（図 3b）。視線を上下に移動させると，内側下眼瞼付近に比較的大きな皮膚変形が生じ，R/R_0 は約 1.00 から約 1.32 まで増加した。また，中央位置に貼付した 90° 方向センサも垂直方向の眼球運動に対して明確な応答を示し，下眼瞼中央部にも垂直視線移動に関する有効な情報が含まれることが分かった。

一方，水平方向の眼球運動に対しては，外側位置に貼付した 0° 方向センサが最も顕著な応答を示した（図 3c）。視線を左右に移動させると，左右の下眼瞼外側領域に非対称な皮膚変形が生じ，その変化を外側センサが高感度に検出できた。水平方向の視線移動では，片側の皮膚が伸長し，反対側では異なる変形が生じるため，左右両側に外側センサを配置することで，水平

角度に対応した相補的な信号を取得できることが分かった。

ただし，感度だけでなく，実用上の装着安定性も重要である。内側位置は垂直方向の眼球運動に対して高い感度を示したが，鼻に近く顔面形状の影響を受けやすいため，長時間の貼付ではセンサの浮き，ずれ，剥離が生じやすい可能性があった。また，鼻周辺の皮膚変形や表情変化の影響も受けやすく，視線以外の信号が混入する懸念がある。そのため，最終的なセンサ配置では，信号感度と装着安定性の両方を考慮し，内側センサは採用しなかった。

最終的には，左右外側に 0° 方向センサを 1 つずつ，下眼瞼中央に 90° 方向センサを 1 つ配置する三点構成を採用した（図 3d）。左右外側センサは水平視線移動に伴う左右非対称な皮膚変形を検出し，中央センサは垂直視線移動に伴う下眼瞼中央部の変形を検出する。この三点構成により，水平・垂直方向の眼球運動に関する情報を，少数のセンサで効率的に取得できるようになった。以上の結果から，本研究では，眼瞼皮膚歪みを用いた視線推定に適した実用的なセンサ貼付位置と感度方向を明らかにした。

(3) 視線推定アルゴリズムの構築

最後に，最適化した三点配置の柔軟歪みセンサから得られる抵抗信号を用いて，眼球運動角度を連続的に推定するアルゴリズムを構築した（図 4a）。眼瞼皮膚歪みから視線を推定するためには，単一の抵抗値を視線方向に単純に対応させるだけでは不十分である。眼球運動に伴う皮膚変形は非線形であり，センサの貼付状態，皮膚との機械的結合，センサのヒステリシス，瞬目や微小な表情変化などの影響を受ける。そのため，多点センサから得られる時系列信号を統合的に解析し，水平・垂直方向の眼球運動角度へ変換する回帰モデルが必要である。

実験では，左右外側および下眼瞼中央に貼付した三つのセンサから，眼球運動中の抵抗信号を同時に取得した。被験者は画面上に提示された視標を注視し，その際の三チャンネル抵抗信号と，対応する水平・垂直方向の眼球運動角度を記録した。論文草稿では，15 個の視標位置を用い，規則的な視標提示とランダムな視標提示の両方を含む実験を行った。合計 100 回の並列試験により 4500 サンプルを取得し，そのうち 3600 サンプルを学習用，900 サンプルを評価用として用いた。

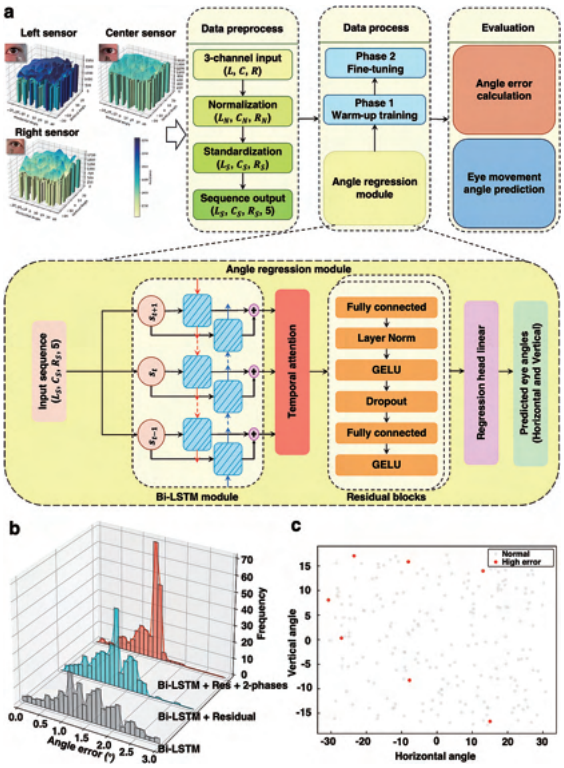


図 4　視線推定アルゴリズムの構築。(a) 機械学習アルゴリズム全体像。(b) 異なるアルゴリズムと視線角度誤差の関係。(c) 大きな誤差を示した点の図示。

取得した三チャンネルの抵抗信号は，まず各センサの初期抵抗値に対する相対変化として正規化した。これは，センサごとの初期抵抗値が，作製ばらつき，貼付時の圧力，皮膚との接触状態によって変化するためである。初期抵抗値で正規化することにより，絶対抵抗値の違いではなく，眼球運動に伴う変形由来の信号変化を抽出できるようにした。さらに，正規化後の信号を標準化し，各チャンネルの数値スケールを揃えることで，機械学習モデルの安定な学習を可能にした。

次に，標準化した信号を短い時系列データとして再構成した。これは，金マイクロクラック型歪みセンサと皮膚との組み合わせでは，現在の視線位置だけでなく，直前の変形履歴が抵抗信号に影響するためである。たとえば，同じ視線位置であっても，その直前に上方向から移動した場合と下方向から移動した場合では，皮膚の緩和挙動やセンサのヒステリシスにより，抵抗信号がわずかに異なる可能性がある。この履歴依存性を考慮するため，本研究では時系列信号を扱える双方向 LSTM，すなわち Bi-LSTM を中核とする回帰モデルを構築した。

さらに，Bi-LSTM で抽出した時系列特徴に対して，Residual MLP ブロックを組み合わせた。Residual MLP ブロックは，非線形な特徴変換を行うことで，眼球運動と抵抗信号の複雑な対応関係を表現する役割を持つ。また，残差接続を用いることで，学習の安定性を保ちながら，皮膚の局所的なずれ，瞬目，微小な顔面運動などに由来する非視線性の揺らぎを抑制することを目指した。加えて，長時間装着時には，センサと皮膚の機械的結合状態が変化し，一部のデータに大きな誤差が生じる可能性がある。そこで, 初期学習後に高誤差サンプルを同定し，その影響を低減して再学習する二段階学習を導入した。

構築したアルゴリズムの有効性は，モデル構成を段階的に比較するアブレーション実験により評価した（図 4b，c）。まず，Bi-LSTM のみを用いたベースラインモデルでは，平均角度誤差は約 1.62° であり，誤差分布は比較的広く，3° 程度までの誤差が見られた。次に，Residual MLP ブロックを加えたモデルでは，平均角度誤差が約 1.18° まで低下し，非線形特徴抽出の有効性が確認された。さらに，Bi-LSTM，Residual MLP ブロック，二段階学習を組み合わせた最終モデルでは，平均角度誤差が約 0.74° まで低減した。これは，ベースラインモデルと比較して約 54.3% の誤差低減に相当する。

以上の結果から，眼瞼皮膚歪みという間接的かつ柔らかい生体信号であっても，適切なセンサ配置と時系列回帰モデルを組み合わせることで，VOG 法に迫る高精度な視線推定を実現できることが示された。本成果は，カメラを用いず，眼表面にも接触せず，皮膚貼付型の柔軟センサのみで視線関連情報を取得できることを示すものであり，申請時に掲げたウェアラブル視線推定システムの実現に向けた重要な進展である。将来的には，被験者数を増やした検証，個人差を補正するキャリブレーション手法，瞬目や表情変化に対するロバスト性向上，長時間装着時の安定性評価を進めることで，日常生活中で利用可能な視線入力インターフェースやヘルスケアモニタリング技術へと展開できると考えられる。

［成果の発表，論文など］

[1] Naoji Matsuhisa “Unperceivable designs of on-skin wearable electronics” The 4th Global Conference of Innovation Materials (June 2026).

[2] Luyangyu Tong, Hinata Mitomo, Djadda Warda, Takashi Jono, Koji Takahashi, Ken Johkura, Naoji Matsuhisa, “A Flexible and Wearable Eye Tracking System Integrated with AI for Long-term and Real-world Monitoring” The 4th Global Conference of Innovation Materials (June 2026).

［研究助成（A）］

生体インプラントを見据えた細胞シート型バイオメモリの開発

2251034



研究代表者
（助成金受領者）　京都府立医科大学　大学院医学研究科　助教　望　月　健太郎

［研 究 の 目 的］

本研究の目的は，細胞・組織学的機構に機械的な役割を委ねることで「人間と機械の新たな調和」を実現することである。本助成研究ではその原理実証として，心筋細胞のカルシウムイオン（Ca^{2+}）動態に着目した細胞シート型バイオメモリの開発に挑み，生体インプラントも見据えた生体内記録や生体内状態の記録への応用性を検証した。

本研究目標の到達により，外部機器や人工素材に依存した従来のデータ管理様式に変革をもたらし，患者の健康状態や既往歴・アレルギー等の個人情報の生体内記録や読み取り，生体内の健康状態を反映する可変的な記録様式への応用に繋げられる。そのデータ記録機構には心筋細胞に備わる興奮収縮運動時の Ca^{2+} の放出と再取り込み作用を利用するため，システムが細胞により自己形成される点において高効率かつ炭素循環性の見込める新たなバイオデジタル技術の創出に期待できる。また，人工多能性幹細胞（iPSC）由来の心筋細胞を利用することができれば生体インプラントにおける免疫学的な適合性などの課題も解決することができる。

本助成研究では，心筋細胞がその興奮収縮過程において収縮が完了する度に細胞質内の Ca^{2+} を筋小胞体に取り込み貯蔵する電気生理学的反応（図 1a）に着目し，筋小胞体に貯蔵される Ca^{2+} 濃度の高低を 0,1 のバイナリ情報として捉えることで組織局所から一細胞単位の空間規模でバイナリデータを記録することが可能であるかどうかを検証した。申請者のこれまでの心臓不整脈に関する研究成果から，Ca^{2+} 濃度蛍光指示薬（Fluo8/AM）を用いた Ca^{2+} 蛍光イメージングやケージド Ca^{2+}（DMNPE4/AM）の局所光分解などの光学技術の組み合わせにより，心筋細胞シート局所の心筋細胞における細胞室内 Ca^{2+} 濃度を変調できること（図 1b），さらには心細胞質内で過剰となった Ca^{2+} が細胞自身による作用によって回収あるいは排出されることはすでに判明している。

以上，心筋細胞の細胞シートを用いたバイオメモリの開発により，人間と機械の新たな調和を目指す。

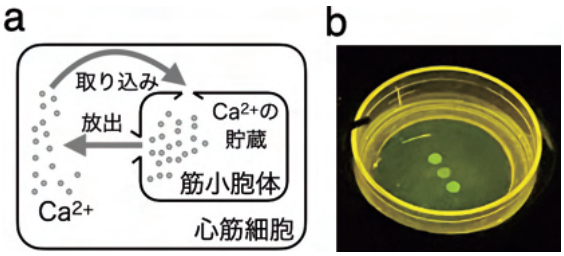


図 1　（a）心筋細胞の興奮時における筋小胞体からのカルシウムイオン（Ca^{2+}）の放出および筋小胞体への再取り込みを示す模式図。（b）35 mm ディッシュ内に作製されたラット単離培養心筋細胞シート（ϕ27 mm）に Ca^{2+} 濃度蛍光指示薬（Fluo8/AM）およびケージド Ca^{2+} を（DMNPE4/AM）を導入し局所的に紫外光照射を行なった後の Fluo8 蛍光強度を捉えた写真。

［研究の内容，成果］

研究内容

本助成期間内では，①既存光学システムの改変構築，②心筋細胞シートおよび単一心筋細胞を用いた原理検証を主な研究内容として行なった。

既存光学システムの改変構築では，高速 Ca^{2+} 蛍光イメージングが可能な蛍光励起・検出光学系およびケージド Ca^{2+} の局所光分解が可能な紫外光照射光学系から構成される既存光学システムに，本助成により購入した高出力光源・高倍撮像用対物レンズおよびカメラ・デジタルミラーマイクロデバイス（DMD）制御用機器などを導入した。

心筋細胞シートおよび単一心筋細胞を用いた原理検証では，ラットから単離培養した心筋細胞と市販のヒト iPS 細胞由来心筋細胞のいずれかを使用して作製した細胞シートもしくは疎に播種した心筋細胞群を対象に，Fluo8/AM（5 μM）と DMNPE4/AM（5–50 μM）を細胞内に導入し，紫外光照射による DMNPE4/AM からの Ca^{2+} の放出前後における紫外光照射範囲内外の心筋細胞内の Fluo8/AM 蛍光強度（すなわち Ca^{2+} 濃度）変化を最大 400 frame/s の高速 Ca^{2+} 蛍光イメージングにより記録した。

その他，本助成による助成金は心筋細胞単離のためのラット購入・管理費，心筋細胞シート作製のための消耗品類や Ca^{2+} 濃度蛍光指示薬などの試薬類の購入費，iPS 細胞由来心筋細胞の購入・管理費，国内学会発表のための参加・旅費，国内学会誌への論文投稿準備のための諸費用に使用した。

研究成果

心筋細胞シートを対象とした検証結果

心筋細胞シートを対象とした検証では，Fluo8/AM と DMNPE4/AM を導入した細胞シートの局所（$\phi < 3$ mm）に紫外光を照射し，DMNPE4/AM の光分解による局所的な細胞内 Ca^{2+} 濃度を増加させた。その際，濃度増加した細胞内 Ca^{2+} の筋小胞体への取り込みを促すため，電極刺激により細胞シートの興奮収縮を制御した。図 2a は，紫外光照射前後の照射範囲内における心筋細胞の Fluo8 の蛍光強度，すなわち細胞内 Ca^{2+} 濃度の時間推移を示す。電極刺激を行わない心筋静止下（w/o stimulation）では，5 秒間の紫外光照射により急上昇した Ca^{2+} 濃度が紫外光照射停止後に比較的緩やかに減衰する様子が捉えられた。種々の検証により，本減衰は筋小胞体への Ca^{2+} 取り込みのみならず心筋細胞の Na^{+}/Ca^{2+} 交換機構の作用による細胞質内 Ca^{2+} の細胞外への排出によって生じていたことがわかった。Ca^{2+} の筋小胞体への取り込みを優先させるため，細胞シートへの電極刺激（周波数 0.5，1，2 Hz）により心筋細胞の興奮収縮の誘発を試みた。その結果，筋小胞体へ取り込まれた Ca^{2+} 濃度と細胞質内に蓄積する Ca^{2+} 濃度の比率を，それぞれ紫外光照射停止後の Ca^{2+} 濃度減衰過程における興奮収縮ごとの Fluo8 蛍光強度の振幅（図中 α）と基底値（図中 β）から見積もることが可能となり，0.5・1・2 Hz それぞれにつき試料数 n = 3 の平均において刺激周波数が 1 Hz の際に蛍光強度の振幅が最大となることがわかった。刺激周波数の増加に比例して筋小胞体への Ca^{2+} 再取り込みの効率が高まる（＝蛍光強度振幅が増加する）と予測されたが，2 Hz の刺激周波数では高頻度な電気的駆動により筋小胞体への取り込み効率が却って低下し，結果として細胞質内に残存する Ca^{2+} 濃度（基底値 β に相当）が増加したものと推測された。

次に，細胞シートへの 1 Hz の電極刺激下で局所紫外光照射により Ca^{2+} 濃度の変調（情報の入力に相当）を施して時間を置いた後，再度電極刺激により Ca^{2+} 蛍光強度分布の撮像を行なったところ（図 2b），細胞シート端（図中左側）からの電極刺激による Ca^{2+} 興奮伝導の際に，局所的に変調した Ca^{2+} 濃度を可視化できることがわかった。すなわち，局所的な紫外光

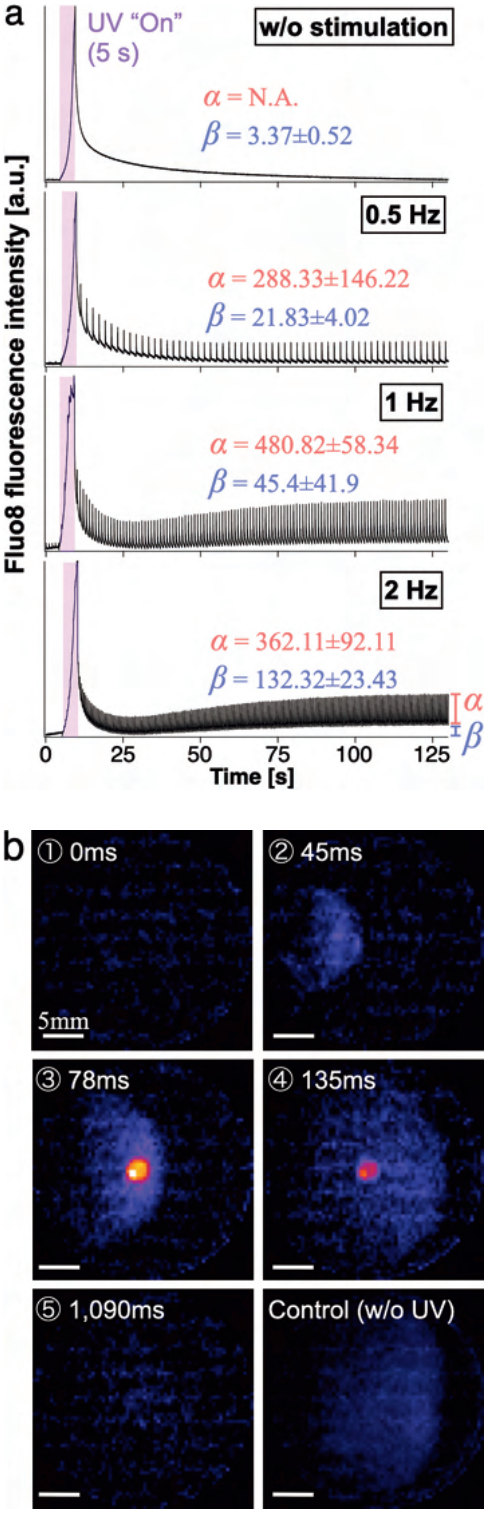


図2　(a) 心筋細胞シートへのUV照射前後における照射領域内のFluo8蛍光強度の時間推移，および電極刺激の有無と周波数の違いによる比較。(b) 1 Hzの電極刺激下でUV照射による局所Ca^{2+}濃度変調（＝情報の入力）を施した細胞シートにおける，電極刺激によるCa^{2+}濃度の可視化（＝情報の読み取り）。

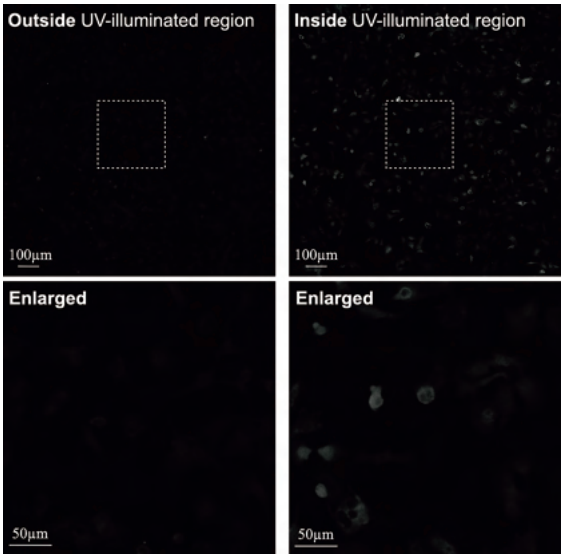


図3　疎に播種された心筋細胞群の紫外光照射領域内外における Fluo8 蛍光強度の比較（電極刺激時）。紫外光照射領域内では個々の心筋細胞における Fluo8 蛍光強度すなわち細胞内 Ca 濃度が高いことを示す。

照射により DMNPE4/AM から放出されCa^{2+}が電極刺激を介して筋小胞体へと蓄積され，その記録を電極刺激により再度可視化（情報の読み出しに相当）できることを実証できた。

その他，本研究期間で変調されたCa^{2+}濃度の持続期間などについても検証を行なった（未発表につき詳細は割愛）。

単一心筋細胞での検証結果

本研究構想では，Ca^{2+}濃度変調における空間分解能がバイオメモリとして保存可能な情報量に直結する。本研究期間内では，単一心筋細胞ごと，さらには心筋細胞内の空間規模でCa^{2+}濃度の変調と読み出しが可能であるかどうかを検証した。基板上に疎に播種することで単一の状態で分布させた心筋細胞群に，先述と同様に Fluo8/AM と DMNPE4/AM を導入した後に局所的な紫外光照射を施し，照射領域内外における電極刺激時の Fluo8 蛍光強度を観察した結果を図3に示す。紫外光照射領域外（Outside UV-illuminated region）と比較し，照射領域内（Inside UV-illuminated region）では疎に分布した心筋細胞がCa^{2+}濃度増加に伴う高い蛍光強度を示している様子を示す。本結

果を踏まえ，基板上における細胞密度を増やしながら蛍光強度差により識別可能な最小の空間規模の精査も行なった（未発表）。

総括と展望

本研究期間では，心筋細胞のカルシウムイオン（Ca^{2+}）動態を利用した細胞シート型バイオメモリの原理検証を行なった。心筋細胞シートを用いた検証から，光学技術により細胞シート局所における筋小胞体の Ca^{2+} 濃度の変調が可能であることを実証し，その保存期間の検証も行なった。また単一心筋細胞を用いた検証から，細胞単位で筋小胞体の Ca^{2+} 濃度の変調と読み出しが可能であることも示され，制御可能な最小の空間規模について精査を行なった。総じて，細胞シート型バイオメモリの基礎的な原理検証が完了したと判断する。一部の研究成果は 2 件の国内学会で発表を行い，現在国内学術誌への投稿も準備中である。

今後は，バイオメモリとして入出力可能な情報量と情報保持期間の改善や最適化を試み，動物実験による生体インプラントへの応用段階に移行する予定である。

謝辞

本研究は，公益財団法人 立石科学技術振興財団 2025 年度研究助成（A）の支援により行われました。昨今の世界的な材料不足や円安により研究資源の価格が高騰する中，多大なご支援を賜りましたことに心より感謝申し上げます。本研究のさらなる発展を目指し，引き続き精進致します。

［成果の発表，論文など］

望月健太郎，田村昌子，森下祐馬，原田義規，田中秀央「培養心筋細胞層における興奮発生・伝導の光学的制御」日本バイオマテリアル学会関西ブロック第 20 回若手研究発表会（2025 年 8 月 2 日）

望月健太郎，田村昌子，森下祐馬，原田義規，田中秀央「心筋細胞層における興奮波発生および伝導の光学的制御」第 66 回日本組織細胞化学会学術集会（2025 年 25–26 日）

［研究助成（A）］

身体的特徴のデータ解析による定量的技術評価・向上システムの開発

2241029



研究代表者
（助成金受領者）

舞鶴工業高等専門学校
電気情報工学科

講師　森　健太郎

［研究の目的］

電子機器の製造において，はんだ付けは重要な工程の一つである。特に少量生産や試作品の製作では手作業によるはんだ付けが広く行われており，作業者には一定以上の技能が求められる。一方で，はんだ付け技能は利き手や利き目などの身体的特徴の影響を受けると考えられるものの，個人の特性を考慮した技能評価や教育手法は十分に確立されていない。本研究では，身体的特徴と作業動作の関係を解析することで，作業者の特性に応じたはんだ付け技能の評価・教育システムを開発し，技能習得の効率向上を目指す。そのために，手のランドマーク検出モデルである MediaPipe Hand Landmarker［1］を用いて，はんだ付け作業時の映像から手指関節情報を抽出する。さらに，高専の学生や教職員を対象に収集した作業データを用いて，「熟練者」と「非熟練者」の動作の違いや，身体的特徴による動作特性の違いを明らかにし，個々の作業者に適した効果的な技能教育の実現を目指す。

［研究の内容，成果］

■データセット

本研究では，はんだ付け作業時の関節情報の特徴を解析するため，舞鶴高専の学生および教職員を対象にはんだ付け実験を行った。被験者は図１（a）に示すサンハヤト製のハンダ付け検定練習基板（CT-VAL3）を用いて部品のはんだ付けを行い，その際の手元映像が記録された。実験では，カーボンフィルム抵抗 10 個，電解コンデンサ 4 個，セラミックコンデンサ 4 個の計 18 部品について，合計 36 箇所のはんだ付けを行った。カーボンフィルム抵抗器，電解コンデンサ，およびセラミックコンデンサは，それぞれ図１（b）の位置１～20，21～28，29～36 にはんだ付けを行った。作業終了後，各はんだ付け箇所を目視で検査し，「良好」または「不良」の２値でラベル付けを行った。本実験は 2024 年度と 2025 年度にそれぞれ１回ずつ実施した。2024 年度は 53 名，2025 年度は 34 名の被験者を対象として実験を行い，延べ 87 名分のデータを収集した。図２は 2025 年度に実施した実験環境を示す。図３は記録された映像のサンプル画像である。

記録した映像から，はんだ付け作業時の手指関節情報を取得するため，姿勢推定ライブラリ MediaPip Hand Landmarker を使用した［1］。はんだ付け実験により収集した手元映像に対し

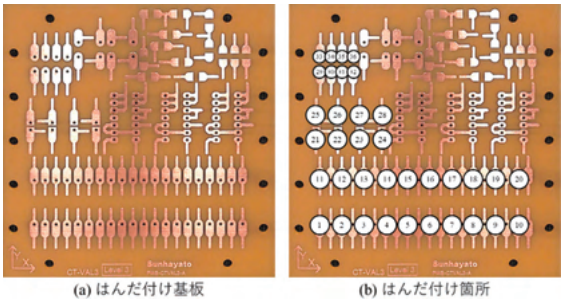


図１　はんだ付け基板

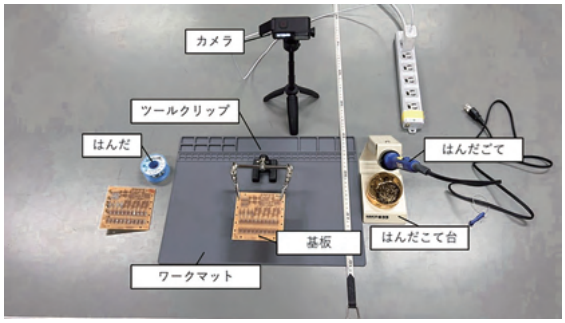


図 2　実験環境



図 3　記録した映像の例

て MediaPipe を適用し，右手（はんだごてを保持している手）の関節ランドマークを抽出した。MediaPipe では各ランドマークの 3 次元座標を画像から推定することができる。本研究では，得られたランドマーク座標に基づいて各関節角度を算出した。求める関節位置のランドマークを b，その両隣に位置するランドマークをそれぞれ a，c とすると，関節角度 θ_b は次の式で求められる。

$$\theta_b = \cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{ba}\cdot\mathbf{bc}}{\|\mathbf{ba}\|\cdot\|\mathbf{bc}\|}\right)$$

ここで，**ba** および **bc** はそれぞれ点 b を基点とするベクトルである。本研究では表 1 に示す 15 種類の関節角度を算出し，各解析における特徴量として使用する。図 4（a）は MediaPipe により取得される 21 箇所のランドマークを示しており，図 4（b）は角度が算出される関節位置を示す。

表 1　角度を算出する関節

No.	指	関節
0	Thumb	carpometacarpal（CMC）
1	Thumb	metacarpophalangeal（MCP）
2	Thumb	interphalangeal（IP）
3	Index	metacarpophalangeal（MCP）
4	Index	proximal interphalangeal（PIP）
5	Index	distal interphalangeal（DIP）
6	Middle	metacarpophalangeal（MCP）
7	Middle	proximal interphalangeal（PIP）
8	Middle	distal interphalangeal（DIP）
9	Ring	metacarpophalangeal（MCP）
10	Ring	proximal interphalangeal（PIP）
11	Ring	distal interphalangeal（DIP）
12	Little	metacarpophalangeal（MCP）
13	Little	proximal interphalangeal（PIP）
14	Little	distal interphalangeal（DIP）

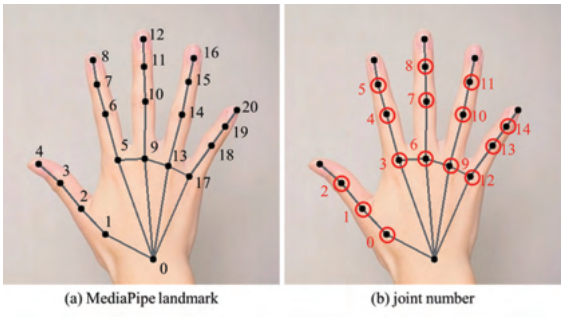


図 4　ランドマークと関節の位置

■はんだ付け技能評価システムの開発

先行研究において，我々は，「良好」と「不良」の間で，はんだ付け作業時の手指の特定関節角度に違いがみられることを確認した［2］。そこで，作業者の作業品質向上を目的として，はんだ付け作業時の手指関節をリアルタイムに推定し，理想的な関節角度で作業を行えるよう作業者へフィードバックを行うシステムを開発した。本システムは Jetson Nano，ミニディスプレイ，Web カメラで構成されるスタンドアロン型のシステムである。作業中の手指を Web カメラで撮影し，Jetson Nano 上でリアルタイム関節角度推定を行い，現在の関節角度と理想的な関節角度との差がミニディスプレイ上で表示される。図 5 に本システムを示す。図 6 は本

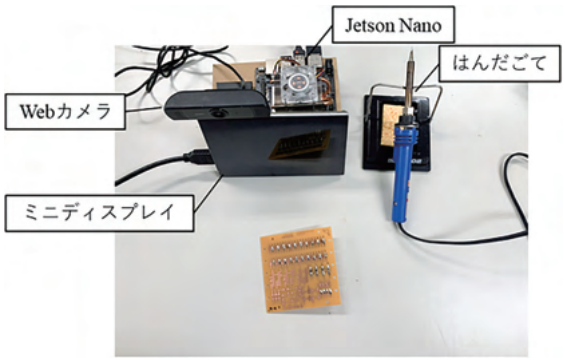


図５　はんだ付け技能評価システム

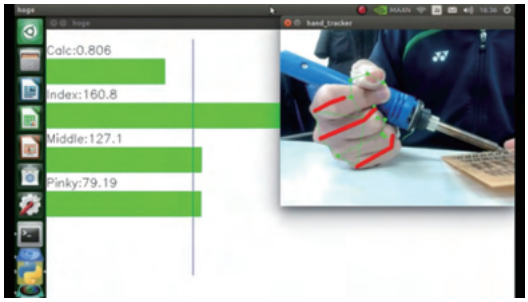


図６　システムによる出力例

システムのミニディスプレイに出力される映像の例である。

本システムの有効性を検証するために，2024年度のはんだ付け実験では52名の被験者を対象として評価実験を実施した。評価実験では，通常通りにはんだ付け作業を行った場合と，本システムを利用してはんだ付け作業を行った場合の２条件で実験を行い，その結果を比較した。なお，システムにおける理想的な関節角度には，先行研究［2］において作業結果が「良好」と判定された被験者の関節角度の平均値を用いた。本実験の結果，52名中33名の被験者において，本システムの利用により「不良」と判定されたはんだ付け箇所数が減少した。さらに，対応のあるｔ検定の結果，本システム利用時と非利用時の間で統計的に有意な差が認められた（$p < 0.05$）。

■身体的特徴にもとづく関節角度解析

2024年度のはんだ付け実験では，作業者の身体的特性として，利き目，作業経験年数，身長および眼鏡使用の有無に関する情報を収集した。これらの身体的特性が作業動作に与える影響を検証するため，収集した情報に基づいてデータセットを複数の群に分類し，各群における関節角度とはんだ付け品質との関連性を調査した。欠損値を含むデータを除外した39名分のデータを対象に分析を行った結果，利き目によって，「良好」と「不良」の間で有意差が認められる関節が異なることが明らかとなった。具体的には，利き目が右目の被験者群では，中指の関節角度において「良好」と「不良」の間に有意差が認められた。一方，利き目が左目の被験者群では，人差し指の関節角度において有意差が認められた。

これらの結果を踏まえ，2025年度には再度はんだ付け実験を実施し，利き目と関節角度との関係について調査を行った。本実験は34名の被験者を対象として実施し，その内訳は利き目が右目の被験者26名，左目の被験者８名であった。また，36箇所のはんだ付け結果に基づき，すべての箇所が「良好」と判定された被験者を「熟練群」，１箇所以上「不良」と判定された被験者を「非熟練群」として分類した。

表１に示した15種類の関節情報をそのまま用いて解析を行うと，関節動作の特徴が高次元となり解釈が困難になるため，主成分分析（PCA）を適用し，特徴量の次元削減および関節構造の特徴抽出を行った。表２に，第１主成分（PC1）および第２主成分（PC2）における各指関節の主成分負荷量を示す。表中の太字は，各主成分において負荷量の絶対値が0.3を超える項目を表している。表２より，PC1では複数の指のmetacarpophalangeal（MCP）が高い負荷量を示しており，手指全体の付け根関節の動作を反映した成分であると考えられる。一方，PC2では各指のproximal interphalangeal（PIP）およびdistal interphalangeal（DIP）が高い負荷量を示しており，指の屈曲・伸展動作を反映した成分であると解釈できる。

次に，各主成分スコアについて，「熟練群」

表2　主成分負荷量

No.	指	関節	PC1	PC2
0	Thumb	CMC	**–0.32**	0.08
1	Thumb	MCP	–0.20	–0.05
2	Thumb	IP	**0.37**	0.05
3	Index	MCP	**0.36**	–0.05
4	Index	PIP	–0.19	0.19
5	Index	DIP	–0.13	**0.30**
6	Middle	MCP	**0.41**	–0.04
7	Middle	PIP	–0.22	0.28
8	Middle	DIP	0.12	**0.40**
9	Ring	MCP	**0.40**	–0.02
10	Ring	PIP	0.00	**0.42**
11	Ring	DIP	0.17	**0.37**
12	Little	MCP	**0.32**	–0.04
13	Little	PIP	0.09	**0.38**
14	Little	DIP	0.11	**0.40**
Variance explained			0.36	0.31

表3「熟練群」と「非熟練群」の比較（全データ）

	熟練群 (Mean ± SD)	非熟練群 (Mean ± SD)	p 値
PC1	–0.04 ± 1.81	0.02 ± 2.49	0.865
PC2	1.45 ± 0.96	–0.60 ± 2.23	**0.005**

と「非熟練群」の間で有意差が存在するかを調査した。表3に，データセット全体における両群の主成分スコアの平均値，標準偏差およびマン・ホイットニー U 検定による p 値を示す。表3より，PC2 の p 値は 0.05 未満であり，「熟練群」と「非熟練群」の間に統計的に有意な差が認められた。

さらに，利き目に基づいて被験者を2群に分類し，各群において「熟練群」と「非熟練群」の比較を行った。表4に，利き目が右目の被験者群における群間比較の結果を示す。データセット全体の結果と同様に，利き目が右目の被験者群においても PC2 で統計的に有意な差が認められた（$p < 0.05$）。また，「熟練群」と「非熟練群」の平均値の差は，データセット全体よりも利き目が右目の被験者群の方が大きかった。最後に，表5に利き目が左目の被験者群における群間比較の結果を示す。利き目が左目の被験者群では，いずれの主成分においても統計的に有意な差は認められなかった。

表4「熟練群」と「非熟練群」の比較（利き目が右目の被験者のみ）

	熟練群 (Mean ± SD)	非熟練群 (Mean ± SD)	p 値
PC1	–0.32 ± 1.28	0.02 ± 2.56	0.935
PC2	1.88 ± 0.44	–0.83 ± 2.41	**0.002**

表5「熟練群」と「非熟練群」の比較（利き目が左目の被験者のみ）

	熟練群 (Mean ± SD)	非熟練群 (Mean ± SD)	p 値
PC1	1.05 ± 2.88	0.02 ± 2.27	1.000
PC2	–0.27 ± 0.32	0.07 ± 1.37	0.643

■考察

関節角度データに PCA を適用した結果，PC1 は主に MCP 関節，PC2 は PIP 関節および DIP 関節を反映する主成分であると解釈された。群間比較の結果，「熟練群」と「非熟練群」の間で PC2 に統計的に有意な差が認められた。PC2 は指先関節（PIP 関節および DIP 関節）の動作を反映する主成分であることから，はんだ付け品質の違いには指先の制御能力が関与している可能性が示唆された。また，PC2 の平均値は良好群で高く，不良群で低かったことから，良好群では指先関節の屈曲がより大きい傾向にあると考えられる。さらに，利き目が右目の被験者群ではこの傾向がより顕著であった一方，左目の被験者群では有意な差は認められなかった。このことから，利き目が作業時の手指動作と作業品質の関係に影響を及ぼす可能性が示唆された。ただし，左目の被験者数は限られていたため，今後さらなる検証が必要である。

■まとめ

本研究では，高専の学生および教職員を対象にはんだ付け実験を実施し，作業映像を収集した。さらに，MediaPipe Hand Landmarker を

用いて作業時の手指関節情報を取得し，これらのデータを活用した技能評価システムの開発と，身体的特徴に基づく作業動作解析に取り組んだ。

技能評価システムでは，先行研究において作業結果が「良好」と判定された被験者の平均関節角度を理想的な関節角度として設定し，作業者の関節角度が理想的な状態に近づくようリアルタイムにフィードバックを行った。評価実験の結果，本システムを利用した被験者の約 6 割において，「不良」と判定されたはんだ付け箇所数の減少が確認された。このことから，本システムははんだ付け技能の評価および教育支援に有効であることが示された。

また，身体的特徴が作業動作に与える影響を調査するため，利き目に着目した解析を行った。その結果，利き目によって作業品質と関節動作の関係が異なる可能性が示された。特に，利き目が右目の被験者群では，指先関節の動作を表す主成分において「熟練群」と「非熟練群」の間に有意な差が認められた。これらの結果は，身体的特徴を考慮した技能評価および教育支援の有効性を示唆している。

今後は，被験者数の拡大や他の身体的特徴を含めた解析を進め，得られた知見を技能評価・教育システムへ導入することで，作業者ごとの特性を考慮した適応的な技能教育の実現を目指す。

■参考文献

[1] F. Zhang, V. Bazarevsky, A. Vakunov, A. Tkachenka, G. Sung, C. L. Chang, and M. Grundmann, “MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking”, arXiv preprint arXiv:2006.10214, 2020.

[2] 北村 偲, 森 健太郎, はんだ付け巧拙原因の推定とフィードバックシステムの作製，電子情報通信学会 総合大会，2023.

［成果の発表，論文など］

[1] Kento Jinkawa, and Kentaro Mori: “Evaluation of Soldering Skill Using Fuzzy Inference”, 13th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 25th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS), 2024.

[2] 平田 爽馬，森 健太郎：身体的特徴を考慮した教師なしクラスタリングによるはんだ付け動作の分類と比較分析，第 41 回ファジィシステムシンポジウム，2025 年.

[3] 森 健太郎，陣川 健斗，東口 富洋，平田 爽馬：作業者特徴に基づいたはんだ付け動作の映像解析，電子情報通信学会 総合大会 2025 年.

[4] Kentaro Mori, Soma Hirata, and Tatsuki Kataoka: “Finger Joint Angle Features of Soldering Iron Handling for Quality Assessment Using Hand Landmark Detection”, International Journal of Biomedical Soft Computing and Human Sciences, 投稿中 .

［研究助成（A）］

RLHF を用いた自閉症児の個性に合わせた LLM の最適化と寄り添う対話ロボットへの実装

2241034



研究代表者（助成金受領者）	金沢大学　人間社会研究域	教授	吉　村　優　子
共同研究者	追手門学院大学　理工学部	准教授	高　橋　英　之
	金沢工業大学　工学部	教授	出　村　公　成

［研 究 の 目 的］

本研究の目的は，自閉スペクトラム症（ASD）児の社会生活の質を高めるため，子どもの自己肯定感を維持・向上させる声かけを持続的に行う対話ロボットを開発・検証することである。ASD はコミュニケーションの困難を主訴とする神経発達症であり，物事の感じ方や情報処理の仕方が定型発達と異なることから，自己肯定感の低下や社会不適応を生じやすい。本研究では，当事者を単なる「被験者」ではなく開発の主体的な参加者と位置づける参加型アクションリサーチ（CBPR）の枠組みを採用し，（1）子どもの特性に合った発話の生成，（2）適切なタイミングでの発話の表出，という二つの技術的課題の解決を目指した。（1）については RLHF（人間のフィードバックによる強化学習）を用いた大規模言語モデル（LLM）の個別最適化を，（2）については対話ロボットを集団共有アバター化し，子どもや養育者による半自律制御を行う枠組みの構築を計画した。これらを通じて，人間と機械の調和した関係構築に資する新しいコミュニケーション支援ツールの可能性を示すことを長期的なビジョンとして設定した。

［研究の内容，成果］

1. ワークショップ・インタビューによる理想発話例の収集

ASD 児を含む発達障害のある子どもを対象に，ロボットによる理想的な応答（声かけ）に関するインタビューおよびワークショップを実施した。本研究は当事者を開発の主体的参加者と位置づける参加型の研究実践を重視しており，その一環として対話的フィードバックを得る形で研究基盤を構築した。実際の教育・療育フィールドとの関係づけを意識し，特異な興味・才能をもつギフテッドの子どもを対象としたワークショップや，多様な特性の子どもが集まる放課後等デイサービスでのロボットイベントを開催し，子ども自身が大規模言語モデルのプロンプトを書き換えて「自分好み」のロボットをつくり，それを評価・分析する“研究員”的な参加の場を設計した。また支援者向けのオンラインサイエンスカフェを通じて成果報告と建設的議論を重ねた。一方で，対象児の特性や保護者の配慮の必要性から研究協力への同意取得が難しい事例も少なくなく，継続的な信頼関係の構築と研究手法の工夫が今後の課題として明確になった。

2. ロボットによる「ほめ」の種類が動機づけとロボット印象に与える影響の調査

発達支援において「ほめ方」は行動的介入の

コアエレメントとして位置づけられており，具体的な行動を観察・記述する「説明的ほめ」と全般的な肯定を行う「一般的ほめ」が代表的手法として知られている。先行研究では ASD 傾向の子どもに対して「説明的ほめ」が学習を促進する可能性が示唆されているが（Polick et al., 2012），ロボットが行う「ほめ」の効果については未検討であった。そこで，本研究では，どちらのほめ方が子どもの動機づけとロボットへの印象に効果的かを検討した。

小学校５年生から高校１年生８名（女児１名・男児７名，うち ASD 診断あり２名，ADHD・不安症１名，社交性不安症１名）を対象に，２体のオリジナルロボット（「太陽ロボット」「北風ロボット」と命名，図 1）による２種類の「ほめ」動画を視聴してもらった。場面は①分数の宿題に取り組んでいるとき，②５キロのマラソンを走っているときの２場面を設定した。一般的ほめ（例：「分数の勉強頑張ってるね，すごいよ。きみなら最後までできる！」）と説明的ほめ（例：「分数の勉強をしているんだね，６ページのうち３ページ，すごく難しかったけど，きみはとけたんだ！」）を比較した。評価は Google フォームを用いた７件法のアンケートにより，活動への動機づけ項目６項目（「自分には能力があると思った」「もっと努力したいと思った」「やればできると思った」等）とロボットへの印象項目２項目（「ロボットの言葉を嬉しいと感じた」「ロボットが好きだと感じた」）の計８項目で測定した。

全体的な傾向として，動機づけは「一般的ほめ」によって高まる傾向がみられた（図 2）。一方，ロボットへの印象については２種類のほめ方による大きな差は認められなかった。場面別にみると，宿題場面では，ASD の診断がない子どもたちにおいて，一般的ほめによる動機づけが高く，診断がある子どもたちでは全体的に得点が低い傾向を示した。②マラソン場面では診断の有無と応答種類による交互作用様のパターンがみられた。参加者からは「さりげなく助けてくれる感じがいい」「自分だけに当てはまることを言われると，ちゃんと自分のことを見て励ましてくれていると感じる」「宿題しているときは何も言わないで見守ってくれるだけでもいい」など，声かけの内容・タイミング・関係性に関する多様な視点が示された。上記の調査からは，ASD 傾向の子どもが「説明的ほめ」を一律に好むわけではなく，特性・場面・年齢によって有効なほめ方が異なる可能性が示唆された。

3. ロボットによる「応援」の種類と個人特性の関係に関するウェブ調査

RLHF の個別最適化に向けた基礎知見として，ロボットによる「応援」の内容とユーザーのパーソナリティ特性との関係を検討した。ウェブアンケート調査（n = 32，平均年齢 36.2 歳，範囲 10 ～ 59 歳）において，ロボットによる４種類の「応援」動画（V1「成功のイメージを頭に鮮明に浮かべたら，必ず成功をおさめ



図１　調査に用いたぬいぐるみロボット

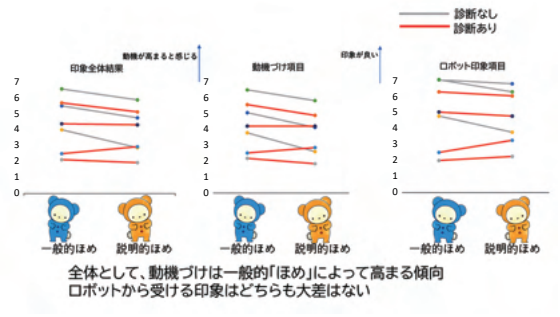


図２　ほめ方の違いと動機付け，ロボットへの印象の関係

るよ！」，V2「頑張れ，きみならできる！」，V3「どんな結果になっても僕は君の味方だよ」，V4「どんな結果になっても君なら大丈夫」）を呈示した。印象の測定には，親密さの評定尺度（小山ら，2017）から 5 項目と独自の追加 5 項目（「励まされた」「愛情を感じた」「受け入れてもらえた」「プレッシャーを感じた」「悪意を感じた」）の計 10 項目を 8 件法リッカート尺度で測定した。パーソナリティ特性は日本語版 Ten Item Personality Inventory（TIPI-J）を用いて評定した。因子分析により低社会的結合項目・高社会的結合項目・負担項目の 3 因子を抽出し，各応答との関係を Spearman の順位相関により検討した。

V4「どんな結果になっても君なら大丈夫」は，友情・励ましの印象（低社会的結合項目）が最も高く，負担感が最も低い応援として評価された（$p < .01$）。V3「どんな結果になっても僕は君の味方だよ」は「家に招きたい」「一緒に生活したい」といった高社会的結合項目で最も高く評価された（$p < .01$）。一方，V1「成功のイメージ…」は親しみを感じにくく負担感が最も大きい応援として評価された（$p < .01$）。パーソナリティとの関連については，V1 に対して外向性の高い人は低社会的結合得点と正の相関（$\rho = 0.357$，$p = .045$）を示した一方，神経症傾向の高い人は低社会的結合得点（$\rho = -0.371$，$p = .036$）および高社会的結合得点（$\rho = -0.419$，$p = .017$）と負の相関を示した。不安傾向を伴いやすい対象者には，「どんな結果でも大丈夫」という結果への寛容を示す声かけ（V4）が，プレッシャーを与えにくく有効である可能性が示唆された。パーソナリティ特性によって同じ「応援」が全く異なる印象をもたらすという本知見は，RLHF による声かけの個別最適化の必要性を裏付けるものである。

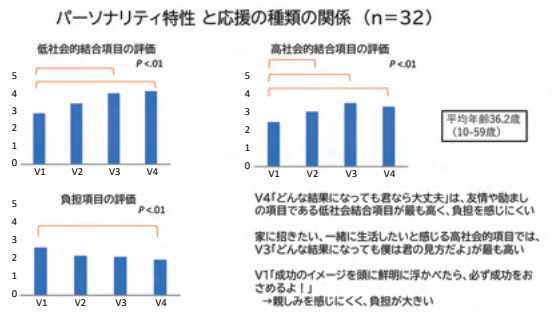


図 3　ほめ方の違いと動機付け，ロボットへの印象の関係

4.「寄り添い」応答に対する印象の発達差に関するウェブ調査

RLHF の教師信号となるフィードバックデータの収集モデルを確立するための基盤的知見を得る目的で，ロボットの「寄り添い方」を心理カウンセリングの代表的手法に基づき五種類（「弱さを共有」「無関係な話」「問題解決」「共感」「称賛」）に分類し，それぞれに対する印象を成人（18 ～ 40 歳）と子ども（10 ～ 15 歳）で比較するオンライン調査を行った。独自に開発したスイッチロボット（大道・高橋ら，2024）が，「連立方程式が解けず試験に失敗した」という人間の発話に対して五種類の応答を行う動画を呈示し，その印象を回答してもらった。各応答文は OpenAI 社の GPT-4o のプロンプト調整により作成した。印象の測定には Technology Acceptance Model 尺度（Heerink et al., 2010）から 8 項目を抽出し，独自の 2 項目（「ずっと一緒にいたい」「ロボットは信頼できる」）を加えた計 10 項目を 5 件法のリッカート尺度で用いた。動画内容の理解を確認するテスト設問に正答した成人 112 名・子ども 110 名を解析対象とした。本調査は金沢大学の研究倫理委員会の審査・承認を得て実施した。

主成分分析により 10 項目をポジティブな印象とネガティブな印象の二因子に圧縮し，参加者属性（成人・子ども）とロボットの応答種類を要因とする二要因分散分析を行った。その結果，ポジティブな印象においてのみ交互作用が有意であった（$F(4, 840) = 4.51$, $p = .005$）。下位検定の結果，「弱さを共有」「問題解決」「共感」の応答において，子どもは成人よりも有意にポジティブな印象を抱く傾向が認められた（図 4）。

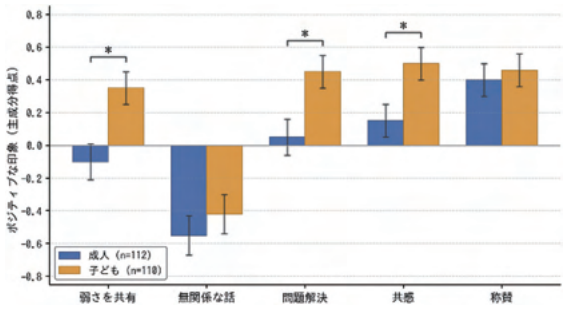


図４　応答に応じたロボットへのポジティブな印象の度合（成人と子どもの比較）。エラーバーは標準誤差，＊は下位検定で成人と子どもの間に有意差があった条件を示す。

成人は「問題解決」的な応答に対して子どもほど高い印象を示さない一方，「称賛」的な応答には子どもと同程度のポジティブな印象を示した。この結果は，成人がロボットに「自らの肯定者」としての役割を期待する傾向を示唆しており，ライフステージに応じた承認欲求の変化を反映している可能性がある。

本調査により，課題（1）子どもの特性に合った発話の生成に向けて，子どもがどのような「寄り添い方」に肯定的な印象を持つかという基礎データを取得し，自己肯定感を支える発話タイプの選定に関する知見を得た。課題（2）適切なタイミングでの発話の表出については，人間のネガティブな発話に対する応答の「内容」を中心に検討し，状況に応じた発話内容とタイミングの関係についてさらなる整理が必要であることを明らかにした。これらの知見をもとに，子どもの特性に応じて「いつ・どのような言葉をかけるか」という応答生成条件とタイミング制御の設計指針を整理し，半自律制御による集団共有アバター型プロトタイプの設計と小規模実装，ならびに教育・療育の現場における予備的なフィールド検証へと展開した。RLHF データの拡充とプロトタイプの個別最適化を進めることで，ASD 児の自己肯定感を継続的に支える対話ロボットの実現可能性を示した。

5. 研究全体の到達点と今後の展開

本研究では，ASD 児の自己肯定感を支える声かけを行う対話ロボットの開発に向けて，当事者参加型のワークショップ・インタビュー，ロボットによる「ほめ」の種類の比較，「応援」の種類と個人特性の関係，「寄り添い」応答の発達差という多角的なアプローチから基礎的知見を積み上げた。

技術的課題（1）「子どもの特性に合った発話の生成」については，以下の知見が得られた。第一に，「弱さを共有」「問題解決」「共感」といった寄り添い応答に対して子どもは成人より有意にポジティブな印象を持つ一方，「称賛」については成人と差がないという発達段階による差異が明らかになった。第二に，ロボットによるほめの効果は特性・場面・年齢によって異なり，ASD 傾向の子どもが「説明的ほめ」を一律に好むわけではないことが示された。第三に，「どんな結果でも大丈夫」という結果への寛容を示す声かけが，不安傾向を伴いやすい対象者に対しては，特に有効である可能性が示唆された。これらを RLHF の教師信号として活用することで，子どもの特性・状況・感情状態に応じた応答生成の個別最適化が可能となる基盤が整った。

技術的課題（2）「適切なタイミングでの発話の表出」については，ロボットがネガティブな発話に対してどのような内容の応答を返すかという「内容」面の検討を中心に進めた。「さりげなく助けてくれる感じがいい」「何も言わないで見守ってくれるだけでもいい」といった子どもからの自由記述は，発話の内容だけでなくタイミングや関係性の質が自己肯定感の維持に深く関わることを示唆しており，「いつ・どのような言葉をかけるか」という応答タイミング制御の設計は次年度以降の重点課題として引き続き取り組む。

研究推進上の課題としては，対象児の特性や保護者の配慮の必要性から研究協力への同意取得が難しい事例が少なくなかった。当事者を「被

験者」ではなく開発の主体的参加者と位置づける CBPR の枠組みのもと，教育・療育現場との継続的な信頼関係の構築と参加しやすい研究手法の工夫が不可欠である。

今後は，上記の知見をもとに，RLHF データの拡充と LLM の個別最適化を進めながら，集団共有アバター型対話ロボットのプロトタイプを教育・療育の現場で本格的にフィールド検証することを目指す。子ども・養育者・支援者が協働してロボットの応答をチューニングしていく半自律制御の枠組みを通じて，ASD 児一人ひとりの個性に寄り添い，自己肯定感を継続的に支える対話ロボットの実現可能性を示していく。

［成果の発表，論文など］

吉村優子・高橋英之：多様な子どもの主体性を引き出すなんもしないロボットの可能性．日本ロボット学会誌，43. 2025 年.

高橋英之・吉村優子：成人と子どもでロボットに期待する「寄り添い」の違い，日本心理学会大会，ポスター発表，2025 年（国内発表）.

吉村優子・高橋英之：多様な特性のある子どもにおける心地よくロボットと共生する空間に関する研究，日本認知行動療法学会　シンポジウム「臨床家がロボット，アバター，及びビッグデータと連携する方法」，2023 年 10 月（国内発表）.

（関連発表）大道・高橋ほか：スイッチロボットを用いた家電連動型コミュニケーションに関する研究，International Conference on Social Robotics（ICSR），2025 年.

［研究助成（A）］

材質同定・全天球透視検査に向けた カーボン・ゴム印刷式のビーチボール型カメラの創出

2251035



研究代表者
（助成金受領者）

中央大学　理工学術院
電気電子情報通信工学科

助教　李　恒

［研 究 の 目 的］

上記の非破壊検査素子を創出するうえで，具体的には全天球視野 MMW–IR 撮像可能なボールカメラの動作実証が目標となる。つまり本研究では死角の無いボールカメラでの全天球視野において，ヒトの眼には不透明な観察物に対し，MMW–IR 撮像に特有な透視による表面・浅部・深部の非破壊な材質同定を実証する。これらに対し，既存の全天球カメラ分野では透視性の欠如が技術的課題に挙げられる。左記は，既存カメラの光学的動作域が可視光（ヒトと同様の視認性）に依存するためである。一方，透視性に富む MMW–IR 帯域では，網羅的な全天球視野を生むボール状のカメラ化が未完成であり，具体的に球状を幾何学的に構成するデバイスが創出されていない。一方では，報告者はこれまでにカーボンナノチューブ（CNT）型の大面積変形 MMW–IR 撮像シートを独自に確立し，本研究でのカメラ実装へ展開する（図 1）。

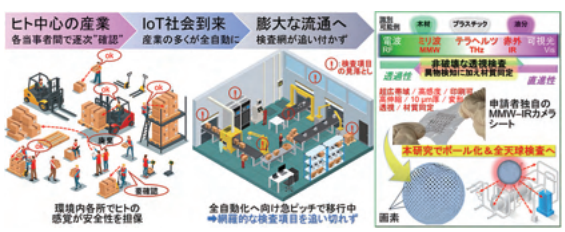


図 1　本研究のコンセプト

［研究の内容，成果］

報告者はまず CNT 型 PTE カメラの全天球化実装に向けて，高曲率機械構造で長期間安定な素子動作を実現させるべく透湿加工という設計に着目することで，レーザ加工処理によってカメラ性能へ無依存な微細透湿孔を形成した。報告者は CNT 型 PTE カメラへの高透湿加工に際し，デバイスの大部分を占めるポリウレタン（PU）薄膜支持基板シートへと着目した。透湿度の単位としては kg/m^2・24 h という単位が用いられており，人肌を一例に高曲率機械構造での長期安定な動作に向けては 5 kg/m^2・24 h という性能が求められている。PU 元来の透湿度には 2 kg/m^2・24 h 弱程度で頭打ちとなっており，報告者は PU へのレーザ加工によって最小 200 μm 径の透湿孔を設けることにより，目標水準である 5 kg/m^2・24 h を超える透湿度へと改良した。またこれらの高透湿な設計においては CNT 型 PTE カメラシート全域の 0.19% のみのレーザ加工により卓越した透湿度が得られており，デバイス元来の超広帯域・超高感度 MMW–IR 光計測性能を害することなく 3D 全天球視野モジュール実装に向けたハードウェア設計基盤へ展開されている（図 2・3）。

報告者は CNT 型 PTE センサを用いた MMW・THz・IR 計測における幾何学情報にも着目しており，特に情報工学分野において勢いを増すコンピュータビジョン（CV）へと展開した。CV は 2D 画像計測における光学的な情報（透

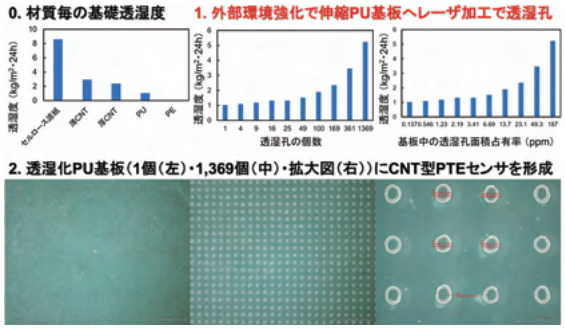


図 2　CNT 型 PTE カメラシートの高透湿化設計

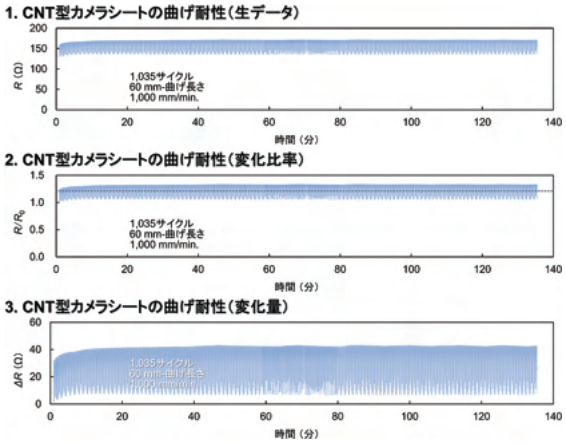


図 3　CNT 型 PTE カメラシートの機械的柔軟性評価

過・吸収・反射・散乱の信号強度等）を時空間情報（座標変化，位相のズレ，時間遅れ等）と紐付けることにより，観察物の 3D 構造を復元することが可能となる。従来の CV では侵襲的な X 線計測やディジタルアート技法としての可視光計測に重用されていた中，報告者は CNT 型 PTE カメラが有する潜在能力から透視性・材質同定性に富む超広帯域かつ超高感度 MMW・THz・IR モニタリングへと拡張した。

具体的に報告者は CNT 型 PTE カメラを活用した THz–IR 帯域でのコンピューテッドトモグラフィ（CT）非破壊検査において，センサ画素を広視野な 2D 平面上へカメラ構造として集積することによって，先行研究（1D アレイ画素計測）と比べて 37% のシステム動作時間短縮を実証している。報告者が確立したエアジェットディスペンサ技術に基づいて，本成果は CNT 型 PTE カメラを 1 mm ピッチ・20 画



図 4　CNT 型 PTE カメラによる基礎 MMW–IR 帯 CV

素アレイ・5 mm ピッチの 3 アレイラインという 2D カメラ構造へ集積している。このデバイス基盤を活かすことによって，直線空間走査が不要な 10 mm 角超の広い視野範囲を 976 nm–10.3 μm 波長域における CT 計測にもたらし，目視で不透明な遮蔽物により隠された複合検査対象（4 種類の異種素材で構成）に対し，11 分という高速システム動作，および 9% 未満の計測誤差という高い信頼性により，非破壊な材質同定・3D 構造復元を実現した（図 4）。

当初からの達成目標である材質同定・3D 構造復元ハイブリッドな非破壊検査計測実証として，報告者は不透明な遮蔽層内に設置された複合材質・複合形状モデルを観察対象物として扱い，広視野 2D 集積 CNT 型 PTE カメラで THz–IR 帯の透視 CT 計測を実施した。

デモンストレーションにおいては 976 nm の短波長 IR，1,310 nm の長波長 IR，また更に 10.3 μm 波長の THz を照射光として扱っており，観察対象物の構成材質はこれら波長に対してそれぞれに異なる基礎光学特性（透過率/吸光率）を示すとともに，CNT 型 PTE カメラは一貫して高感度 CT 計測を可能としている。得られた断層画像においては，同一層内で異種材料が混在する状況（図中の“最下層”：ガラス

と半導体が混在）に対して複数波長間の重ね合わせにより材質情報・空間配置情報までが網羅されており，提案システムを活用した非破壊検査の広い汎用性が示された（図 5）。

これらの基礎実証を踏まえて，報告者は高透視 MMW–IR 帯でのハイブリッド非破壊検査（材質同定・3D 構造復元）を CNT 型 PTE カメラシートにより全天球視野モジュール実装させるにあたり，光学系，つまり透過光学系および反射光学系，それぞれの役割に着目した。報告者のデモンストレーションである CT や視体積交差法（VH）は透過光学系として分類されており，一方で本研究の当初ゴールである全天球視野型 3D モニタリングは反射光学系に分類されている。復元可能な材質という観点では CT/VH および全天球は互いに相補的な役割を担っており，網羅的な非破壊検査を実現するため，報告者は検査システムの最終形態を反射系・CT 融合計測へ上方修正した。

最終的な反射系 3D 全天球・CT 融合による網羅的ハイブリッド MMW–IR 非破壊検査の実現に向けて，報告者は CNT 型の PTE カメラシートによる基礎反射系動作検証にも成功している。反射系計測では CNT 型 PTE センサが同一軸上に多数集積化された一次元画素アレイカメラシートを実装しており，本モジュールは CT および VH 計測に対しても同一のデバイスとして流用可能である。報告者は不透明な遮蔽層内部に設置された金属円柱からサイズ誤差率 1% という精度で 2D 断層画像および 3D 構造のモデル化を実証しており，基礎デモンストレーションが完了した（図 6・7）。

これらの要素技術を踏まえて，報告者は将来的な狭筐体検査対象内での CNT 型 PTE カメラシートによる反射系全天球/CT ハイブリッド計測に向けて，本研究において湾曲マルチビュー視野型の異方向・異波長なリアルタイム非破壊 IR 高透視 CT 計測を実証した。検査対象は異種素材から成る四角筒構造体であり，石英ガラス（SiO_2），シリコン（Si），アルミニウム（Al），またポリアクリル乳酸（PLA）が組み合わさっている。

本成果では，976 nm の短波長 IR および 1.55 μm の長波長 IR を 90° の照射光角度差にて配置させており，CT 計測への基礎分光評価では

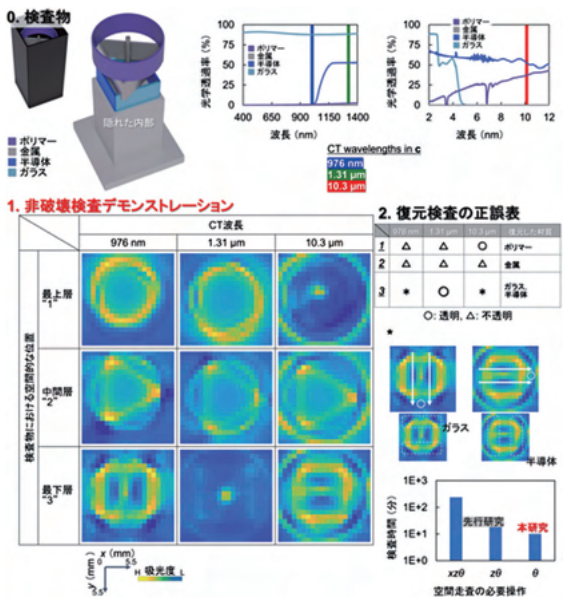


図 5　CNT 型 PTE カメラによる高速 THz–IR 帯 CT 計測

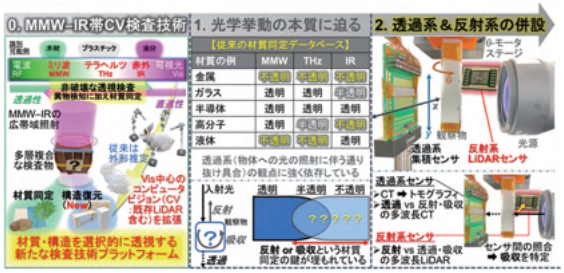


図 6　透過光学系・反射光学系のハイブリッド構想

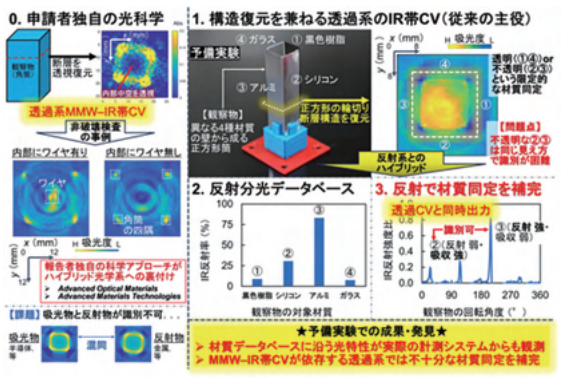


図 7　ハイブリッド光学計測による簡易検査デモ

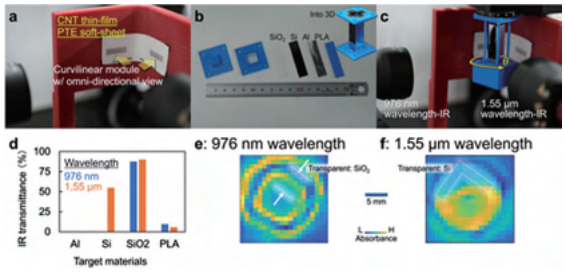


図 8　マルチ CT 非破壊検査の論文投稿準備状況

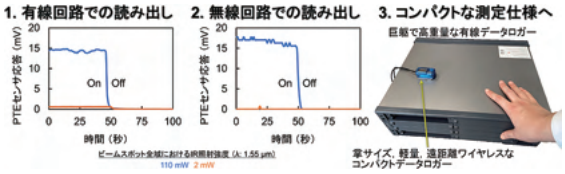


図 9　CNT 型 PTE カメラによる無線回路動作

Si の透過率として IR 波長由来の材質同定が見込まれている。具体的には 1.55 μm-IR 照射にのみ Si は高透明性を有しており，CNT 型 PTE カメラシート型の湾曲 CT において IR 波長由来な非破壊透視断層復元像が適切に抽出されており，今後の全天球視野への実装が期待できる（図 8）。なお本成果は，直近で原著論文へ投稿予定である。

本研究に基づき今後は更なる反射系・CT 融合による網羅的ハイブリッド MMW–IR 非破壊検査を推進していくと同時に，全天球実装に向けたハードウェア設計も重要な展望となる。報告者はこれまでに実験室内の計測を中心に行っており，今後は遠視野での基礎計測実証に向けてメートルスケールでの MMW–IR 帯 CV 計測を実施していく。予備実験としては小型無線回路による CNT 型 PTE センサの遠隔制御を実証しており，2 m 超の遠隔地から機械的・自動的に高精度な IR 検出デモンストレーションに成功した（図 9・10）。

総括として，本研究において報告者は CNT 型 PTE カメラシートに対する機械特性の多機能実証，MMW–IR 帯域 CV における計測精度および操作性の向上，また検査モジュールのリモートコントロール実証等に成功している。今後は，CNT 型 PTE カメラシートへの風雨・砂塵・紫外線・大気温変化という外部環境耐性高強度コーティング処理を施し，社会実装を目指す。最後に，この度の研究におけるご支援に際しまして，立石科学技術振興財団様に心より深く感謝を申し上げます。

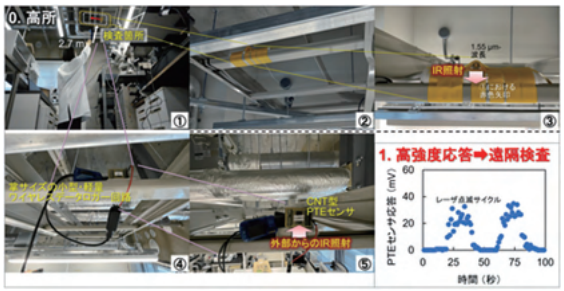


図 10　難所遠隔制御デモンストレーション

［成果の発表，論文など］

【主な論文発表】

1. H. Hamashima, *et al.* **K. Li*** (* 最終責任著者), Structural stability-driven dynamic range analysis of carbon nanotube photo-thermoelectric sensors, *Advanced Sensor Research* **5**, 2, e00133 2026 (IF: 4, selected as Cover Feature).
2. M. Kubota, *et al.* **K. Li*** (* 最終責任著者), Simultaneous multi-layer stacking for longer-wavelength broadband computed tomography with a CNT film photo-thermoelectric camera sheet, *Advanced Sensor Research* **5**, 2, e00132 (IF: 4, selected as Front Cover).
3. Y. Kon, *et al.* **K. Li*** (* 最終責任著者), All-solution-processable robust carbon nanotube pho-to-thermoelectric devices for multi-modal inspection applications, *Materials* **18**, 21, 4980, 2025 (IF: 4).
4. M. Kubota, *et al.* **K. Li*** (* 最終責任著者), Operation speed tuning for infrared computer vision testing with pixel integration structures of carbon nanotube photo-thermoelectric imagers, *Optics Continuum*, **4**, 12, 2834–2844, 2025 (IF: 2).
5. M. Kubota, *et al.* **K. Li*** (* 最終責任著者), In-line multi-wavelength non-destructive pharma quality monitoring with ultrabroadband carbon nanotubes photo-thermoelectric imaging scanners, *Light: Science & Applications* **14**, 306, 2025 (IF: 24).
6. **K. Li*** (* 責任著者), *et al.* A chemically enriched, repeatedly deformable, and self-recoverable broadband wireless imager sheet, *Communications Materials* **6**, 147, 2025 (IF: 10).
7. M. Yamamoto, *et al.* **K. Li*** (* 最終責任著者), Mechanically

alignable and all-dispenser printable device design platform for carbon nanotube-based soft-deformable photo-thermoelectric broadband imager sheets, *npj Flexible Electronics* **9**, 42, 2025 (IF: 15).

8. L. Takai, *et al.* **K. Li*** (*** 最終責任著者**), n-type carbon nanotube inks for high-yield printing of ultrabroadband soft photo-imager thin sheets, *FlexMat* **2**, 115–125, 2025 (selected as Back cover).

［成果の発表，論文など］

【専門書籍の分担執筆】

■小坂充輝，昆裕樹仁，濱島隼人，村上幸平，**李恒**，カーボンナノチューブ撮像アレイによる材質同定・構造復元型の透視トモグラフィ，検査技術，11 月号（2025）

■**李恒**，カーボンナノチューブセンサによる非侵襲ミリ波 – 赤外トモグラフィー　～非金属材料が積層された不透明物体へ透視型の構造復元・材質同定情報を提供～，電子情報通信学会誌，**108 巻**，7 号，ニュース解説，687–688（2025）

■高井怜於，久保田実樹，金峻宇，河野行雄，**李恒**，選択的スクリーン塗工による高耐久なカーボンナノチューブ光学透視センサの印刷実装，炭素材料の研究開発動向 2025，1 章，2 節（2025）

【招待講演】

■**李恒**，カーボンナノチューブを用いた非破壊検査技術，蔵前技術士会・第 213 回　例会 / 講演会（2026 年 2 月，東京）.

■**李恒**，オンサイト非破壊検査の高信頼化に向けた全印刷による人工皮膚型の深部透視カメラの創出，機械システム振興協会・先端共同プロジェクトセミナー（2025 年 11 月，東京）.

■**李恒**，カーボンナノチューブの光熱起電力と長波長光による検査センサ応用，日本物理学会・第 80 回　年次大会（2025 年 9 月，広島）.

【受賞】

■2026 年　田中貴金属記念財団 HIRAMEKI Award　**※上位 10% 以内**

■2026 年　第 32 回 小澤・吉川記念賞
※電気電子分野で年間 3 名選出

■2026 年　第 29 回 瀧野秀雄学術奨励賞
※産業技術への貢献で年間 1 名選出

■2025 年　第 38 回 安藤博記念学術奨励賞
※電気電子分野で最高位賞の一つ

［研究助成（B）］

骨導デバイスを利用した聴覚拡張現実の実現

2241901



研究代表者（助成金受領者）	北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科	教授	鵜木祐史
共同研究者	北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科	特任准教授	木谷俊介
	北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科	特任助教	上江洲安史

［研究の目的］

拡張現実は，現実世界とデジタル情報を融合させることにより，快適で豊かな社会を実現する技術として期待されている。また，人間拡張は，人間の能力を補完・向上させ，あるいは新たに獲得するための技術であり，「人機一体」ともいえるように，技術と人間の能力が自然に融合して一体化することが求められる。そのため，これらの技術はまさに「人間と機械の調和」が求められる重要なものである。

音を利用した聴覚拡張は，我々の聴き取りをサポートし，さらには我々の聴取能力を補完・向上させ，安心安全な生活を快適に送ることができる。その際，音の提示方法を注意深く検討しなければならない。通常はヘッドホン提示が考えられるが，耳を閉塞するため外界の音を遮断してしまうことになる。耳を開放させた状態で音を提示できるものとして骨導デバイスがある。これを使った場合，現実世界の音を気導音で，デジタル情報を骨導音で提供することにより，聴覚で融合させることができ，拡張現実を実現できる。

一方，聴覚拡張では，聴取能力の補償として補聴器のような聴き取りの改善が求められる。骨導提示は，伝音性難聴に対しては大きな聴き取り能力の改善効果を生むことが知られているが，骨導音声の音質や明瞭性・了解性を低下させてしまう。また，気導音と骨導音の併用は，その知覚的融合の効果から音の強調や抑圧を可能とし，さらには聴覚的注意を促すことが期待される。そのため，骨導デバイスを利用した音の提示方法は，拡張現実だけでなく聴覚拡張を実現するための重要な要素技術になる。

本研究では，聴知覚メカニズムに着目し，骨導提示による音の強調と気導・骨導音の融合による音のエンリッチメント（聴覚拡張）を検討した。さらに，骨伝導を触覚知覚ととらえた聴覚代行の実現可能性を検討した。本稿では次の3つの課題について報告する。

1. 骨導提示音の音質・了解度改善法の構築
2. 骨導提示による気導音の強調・抑圧法の構築
3. 触覚による聴覚代行の実現可能性

［研究の内容，成果］

1. 骨導提示音の音質・了解度改善法の構築

本研究では，図1に示すように，骨導提示音声の了解度改善法を提案した。まず，一次高域強調処理（RT-FOE，図1（a））は，気導音声を基準とした側頭部振動の伝達特性から逆特性を用いて，一次近似したFIRフィルタを利用することで，骨導伝達による直線的な高域減衰を補償するものである。

次に，子音強調処理（CE-IMP，図1（b））は，骨導音声において子音の知覚の難易性が高くな

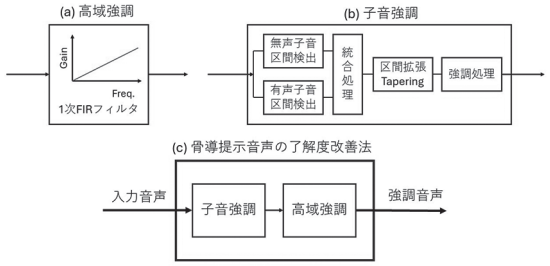


図1　骨導提示音声の了解度改善法

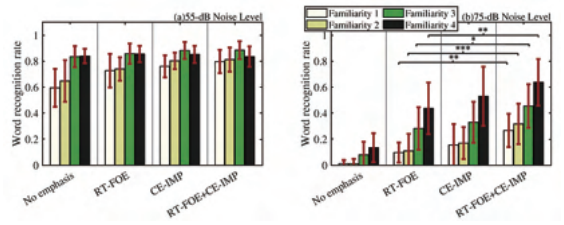


図2　強調タイプ・親密度別の単語了解度

ることから，子音部分を強調することで難易性を下げることを狙いとしたものである。ここでは，無声子音・有声子音のそれぞれで子音区間検出を行い，区間の統合･後処理を施した上で，子音部分を強調することで実現した。

最後に，両処理を組み合わせる方法（RT-FOE+CE-IMP，図1（c））を検討する。子音強調処理における無声子音・有声子音区間検出では閾値処理を採用しており，一次高域強調処理がその閾値処理に影響する可能性がある。そのため，本稿では，子音強調処理，一次高域強調処理の順に実行することにした。

三つの処理の効果を評価するために，骨導提示音声の了解度試験を行った。実験には，正常聴力を有する20代の日本語母語話者20名（男性10名，女性10名）が参加した。骨導提示音声として，親密度別単語了解度試験用音声データセット（FW07）の音声を使用した。各単語は4モーラで構成され，それぞれに4段階の親密度が設定された。本実験ではすべての親密度ランクの単語が含まれるようにした。

音声刺激として，3種類の強調処理（RT-FOE，CE-IMP，RT-FOE+CE-IMP）を適用した音声と，強調処理なし（No emphasis）＝原音声を用いた。雑音環境を模擬するため，2種類の提示音圧レベル（55 dBと75 dB）のピンク雑音を用いた。条件の総数は32（強調タイプ4種類×親密度4ランク×雑音レベル2種類）であった。

実験参加者には，ラウドスピーカからピンク雑音を気導提示すると同時に，骨導デバイスから音声刺激を骨導提示し，聴き取った単語をキーボードでカタカナ入力させた。設問は1条件あたり20単語，計32条件640単語とした。全参加者が同一の単語を聴取することを避けるために，含まれる単語が互いに異なるように設計された単語リストを8セット用意した。ある単語について，4モーラすべてを正しく入力した場合にのみ，その単語を正答とした。親密度ランク，強調タイプごとの単語正答率を算出し，比較評価に用いた。

図2に，雑音レベル（a）55 dB，（b）75 dBの条件下における骨導提示音声の単語正答率の平均および標準誤差を示す。単語正答率に対する三要因分散分析の結果，強調タイプ［F (3, 57) = 200.9，p < .001］の主効果が認められた。さらに，三要因の交互作用が有意［F (9, 171) = 9.72，p < .001］であったことから，雑音レベルごとに結果を分けて検討した。

雑音レベル75 dBでの結果について，多重比較検定を行った。検定結果はHolm法で補正された。RT-FOE+CE-IMPは強調処理なしおよびRT-FOEと比べて，すべての親密度ランクにおいて有意に正答率が高いことを示した。一方で，RT-FOE+CE-IMPはCE-IMPと比べて全体的に高い正答率の傾向を示したが，統計的に有意な差は認められなかった。

RT-FOE+CE-IMPは，雑音レベル75 dB条件下のすべての親密度ランクに対して，RT-FOEよりも有意に高い単語正答率を示した。この結果は，骨導提示で減衰しやすい高周波数成分の補償に加えて，子音部の頑健な検出・強調処理を施すことで，子音の識別手掛かりが増強され，高騒音環境下でも高い了解度をもたら

したことを意味している。

一方，CE-IMP との比較では，いずれの親密度ランクにおいても高い単語正答率を示す傾向があるが，その差は統計的には有意ではなかった。このことから，CE-IMP 単独の処理でも，単語の識別手掛かりがすでに効果的に補償されていた可能性がある。

今後は，異聴分析や音節ごとの評価を実施し，提案法の効果と限界点を詳細に検討する予定である。

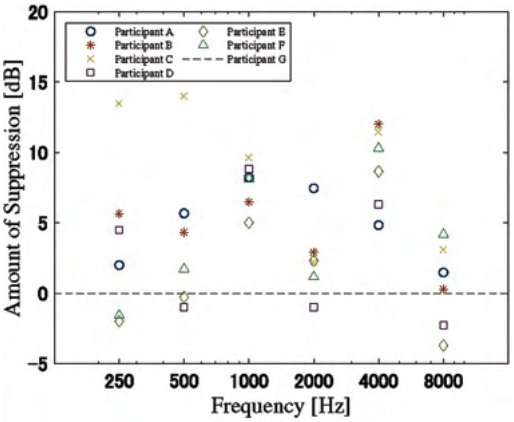


図３　骨導音による気導音の抑圧特性

2. 骨導提示による気導音の強調・抑圧法の構築

騒音抑圧法として，耳栓やイヤーマフといった聴覚保護具があるほか，特定音の騒音の抑圧技術としてアクティブノイズコントロールがある。しかし，これらの方法はいずれも耳を塞ぐことを想定しているため，雑音だけでなく，聞き逃してはいけない音声まで抑圧してしまう。そのため，耳を塞がずに外界の騒音を抑圧する方法の実現が期待されている。

本課題では，骨導提示音の振幅・位相を操作することで気導音を知覚的に抑圧できるか検討した。

この方法の特徴は，耳を開放した情報で，特定の音を抑圧できることである。ここでは，７名の実験参加者に対して A 特性音圧レベル 50 dB，周波数が 250 Hz，500 Hz，1 kHz，2 kHz，4 kHz，8 kHz の純音を利用して，気導・骨導音のラウドネスが等価になるように振幅を決定し，気導・骨導音を同時提示したときに最もラウドネスが小さくなるような位相を決定した。

提案法を利用して，気導音の抑圧効果を調べたところ，図３のようになった。７名中５名で抑圧の効果がみられ，２名の参加者で若干の増幅の効果が見られた。また，4 kHz の純音では全参加者で抑圧の効果が見られた。これらの結果から，骨導音による気導音の抑圧が可能であることがわかった。

今後は，対象を純音から複合音へ拡張して検討する。また，位相を逆相で処理することで増幅効果も期待できるため，その特性も検討する予定である。

3. 触覚による聴覚代行の実現可能性

聴覚障がいは，聴覚系の周波数選択性の低下や時間分解能の低下から音声コミュニケーションの困難さを招き，結果として QoL を低下させてしまう。この課題を解決するためには，聴覚機能を補完する技術や他の感覚器によって聴覚機能を代行する技術の開発が必要である。代表的な聴覚代行として，触覚を用いた聴覚代行がある。これは，触覚の受容器が身体表面全域に分布し，聴覚と同様に，振動から情報を取得可能なためである。例えば，タクタイルボコーダ（音声のフォルマント情報を空間的パターンと振動の強弱として触覚提示するもの）がある。これは言語情報知覚の可能性を示したが，その仕組み上，感情といった非言語情報を知覚させることは困難である。

従来，触覚知覚は，聴覚と比べて非常に低い周波数をもつ振動を知覚するものである。しかし，高周波振動であっても，触覚の変調知覚として，振動強度の時間変動パターンを知覚していることも知られている。一方，我々の研究グループにより，聴覚の変調知覚の検討から，音声の時間振幅包絡線情報に非言語情報が含まれていることが知られている。もし同じアナロジーとして，触覚の変調知覚として音声刺激の

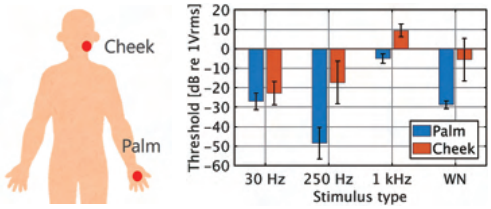


図 4　掌と頬の触覚閾値

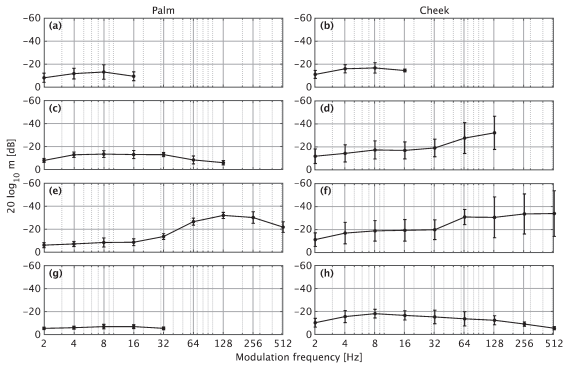


図 5　触覚知覚における時間変調伝達関数。左は掌，右は頬での結果，パネルの上から下に向かって周波数 30 Hz，250 Hz，1 kHz，白色雑音での結果

振幅包絡線情報を検知できているとしたら，触覚の変調知覚として非言語情報を知覚できるかもしれない。

本課題では，このような仮説のもと，音声を触覚刺激として提示した際の非言語情報知覚の実現可能性について検討する。

まず，触覚知覚の検知閾を調査した。実験には正常聴力を有する日本語母語話者 5 名（大学院生 23 ～ 26 歳）が参加した。男性 3 名（右利き 1 名，左利き 2 名），女性 2 名（右利き 2 名）が参加した。

図 4 に，各提示部位および刺激条件における触覚閾値を示す。閾値は，基準電圧 1 Vrms に対する出力電圧を dB 換算した値である。掌での触覚閾値は，250 Hz で最も低く，1 kHz で最も高かった。これに対し，頬での触覚閾値は，30 Hz で最も低く，1 kHz で最も高かった。

次に，同じ実験参加者に対して，触覚の変調知覚として時間変調伝達関数（TMTF）を調査した。図 5 にその結果を示す。TMTF が一種の帯域通過特性のように，ある特定の変調周波数帯域に感度をもつことがわかる。特に図 4 (a-3) は，Lamore らの報告と整合する結果である。これらの結果から，触覚の変調知覚は，概ね信号の変調成分（32 Hz 以下）を検知するような特性であることが予想される。

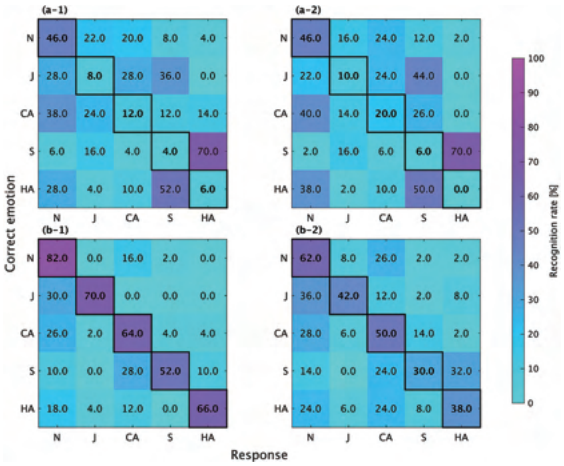


図 6　感情知覚実験の結果：提示部位が（a）掌と（b）頬，刺激が（1）原音声と（2）雑音駆動音声の場合

最後に，同じ実験参加者に対し，触覚刺激提示による音声の感情知覚実験を行った。図 6 に結果を示す。図は回答の混同行列であり，横は提示した触覚刺激の感情ラベル，縦は実験参加者の回答に対応する。図中の N，J，CA，S，HA は Neutral，Joy，Cold anger，Sadness，Hot anger を表す。対角成分は感情認識率，非対角成分は誤認識を表す。頬への刺激提示では，原音声および雑音駆動音声のいずれの場合も，全ての感情で認識率がチャンスレベルを上回った。頬は掌に比べて高い感情認識率を示す傾向があった。同部位において原音声と NVS で類似した回答傾向がみられたことから，触覚による感情知覚の手掛かりは両刺激で共通していた可能性がある。

[成果の発表，論文など]

[1] 鵜木祐史, 進化するヒトと機械の音声コミュニケーション vol.2 AI の活用と感情に寄り添う音声認識・合成の新展開，“骨導デバイスを利用した音声コミュニケーション：人と機械による音声認識”（第 1 編, 第 2 章, 第 2 節），エヌ・ティー・エス，2025.

［2］Imam Nurul Hukmi, Quoc-Huy Nguyen, **Masashi Unoki**, “Quantifying the Contribution of WORLD Vocoder Features to Bone-Conducted Speech Enhancement,” Proc. 2026 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, pp. 53-56, March 2026.
［2］牧野哲平，上江洲安史，木谷俊介，**鵜木祐史**，“触覚刺激提示による音声の非言語情報知覚の検討，”日本音響学会 2026 年春季研究発表会講演論文，1-R-3, pp. 707-710，日大理工，March 2026.
［3］Quoc-Huy Nguyen, **Masashi Unoki**, “Low-Latency, Unwrap-Free, and Differentiable Phase Features for Speech Analysis,” Proc. ASJ 2026 Autumn Meeting, 1-Q-39, pp. 1095-1098, Nihon University, March 2026.
［4］中川怜奈，磯山拓都，上江洲安史，**鵜木祐史**，“一次高域・子音強調処理による骨導提示音声の了解度改善，”日本音響学会 2026 年春季研究発表会講演論文，3-P-15, pp. 669-670，日大理工，March 2026.
［5］牧野哲平，上江洲安史，木谷俊介，**鵜木祐史**，“触覚の知覚特性に基づく非言語情報知覚の検討，”日本音響学会聴覚研究会資料，Vol. 56, No. 2, H-2026-53, pp. 97-102, Feb. 2026.
［6］牧野哲平，上江洲安史，木谷俊介，**鵜木祐史**，“触覚刺激提示による感情音声認識の検討，”日本音響学会聴覚研究会資料，Vol. 55, No. 6, H-2025-77, pp. 415-420, Nov. 2025.
［7］牧野哲平，上江洲安史，木谷俊介，**鵜木祐史**，“触覚刺激提示による感情音声認識の予備的検討，”2025 年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会 H3-1，富山大学，Sept, 2025.【日本音響学会北陸支部優秀学生賞受賞】
［8］幸田怜奈，**鵜木祐史**，小澤賢司，鳥谷輝樹，“骨導提示音による気導提示音抑圧のための振幅・位相条件の検討，”情報処理学会第 87 回全国大会発表資料，7T-08, pp. 2-621-2622，立命館大学，March 2025.
［9］幸田怜奈，**鵜木祐史**，小澤賢司，鳥谷輝樹，“開放耳における気導提示純音の骨導提示音による抑圧効果，”日本音響学会 2024 年秋季研究発表会講演論文，3-P-37, pp. 849-850，関西大学，Sept. 2024.

［研究助成（B）］

生体内デバイスのための超フレキシブル電力伝送装置開発

2221904



研究代表者（助成金受領者）　九州大学　先導物質化学研究所　准教授　藤田克彦
共同研究者　防衛医科大学校　生理学教室　教授　守本祐司

［研究の目的］

今後，医療や身体能力の向上のため人間の体内に埋め込むタイプの機械・装置が広く用いられることになる。体内への導入や内臓への影響を極小化するためには高い柔軟性が必須であり持続的な利用には無線給電が用いられるだろう。柔軟な電子回路を作製でき，有害元素を使用しない有機半導体は，各種センサーへの応用が始まっているが，能動機器の駆動に必要な電力の無線給電のためには高周波数特性や電気抵抗の点で大きな課題を抱えている。本研究では低電気抵抗の高周波数受電装置を有機フレキシブル回路で実現し，内臓のごく近傍で駆動する能動機器の電源問題を解決し，健康維持や能力拡張の機械の発展を促進することを目的とした。

応用デバイスとして医療目的の光線力学療法（PDT）に対する光源装置の開発を行った。体内埋め込み装置では，生体センサーやペースメーカーなどμW レベルの消費電力の装置は埋め込まれた電池の交換で対応できるが，光治療効果に必要な照射強度の装置を体内に埋め込む場合は無線給電が必須となる。内蔵ガン治療器機としてフレキシブル有機 EL 光源とした PDT ガン治療の実証を行った。

［研究の内容，成果］

上記目的を達成するため，本研究では以下の4つの研究を実施した。内容と成果をまとめる。

1. 有機半導体による pn 接合ダイオードの高周波特性と熱耐性の改善

従来，有機半導体ダイオードはフレキシブル性や有毒元素非仕様などの点ですぐれていたが，周波数特性が低く，無線給電での Qi 規格周波数（110 ～ 205 kHz）での動作はできなかった。我々が開発した ESDUS 法の難溶性ドーパントが使用可能であることや，連続成膜による積層構造の構築が可能であるといった利点を活かし，Qi 規格周波数での整流可能な有機半導体回路を作成することに成功した（図 1）。

次の課題はダイオードの耐久性であった。特に連続駆動時のジュール熱による熱劣化の抑制を課題として半導体材料のスクリーニングを行った。様々な材料での熱劣化特性を比較したところ，最も大きな劣化はドーパントの拡散にともなう pn 接合面の導電性低下であることを突き止めた。ドーパントの拡散は半導体材料の

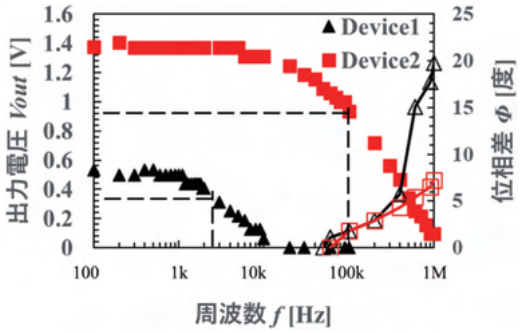


図 1　整流特性の周波数依存性：従来の有機半導体ダイオード（Device1）に比べ，ESDUS 法で作成した有機半導体ダイオード（Device2）は周波数特性が劇的に改善した。

ガラス転移温度（Tg）以上で顕著にみられることから，Tg の高い半導体材料を用いることで熱劣化を抑制したダイオードの開発に成功した（図 2）。

2. 生体内への無線給電技術の開発

実験動物用の小型体内埋込ワイヤレス受信装置を開発し，生理食塩水中およびラット体内への電力伝送実験を行った。電力測定配線による伝送電磁波の擾乱が無視できないことから，有機 EL 発光素子を用いて発光輝度で伝送電力を見積もることにした（図 3）。

受信アンテナを 20 μm の絶縁フィルムで被覆しただけでは電力伝送効率が極めて低く，発光しないため見積もることができなかったが，1 mm 以上のフィルムで被覆することにより電力伝送が可能となった。これは外部誘電率が高い状態では電磁誘導効率が極めて低くなることに対応し，食塩水との間隔を 1 mm 程度保持することで十分な電磁誘導が誘起されることがわかった。送電装置からの距離 2 cm で，生理食塩水中での発光輝度から見積もった伝送電力は大気中でのそれの 90% を保持することがわかった。また，有機 EL 素子の電極による電磁波の擾乱はフェライトの挿入により完全に除去できることもわかった。

生理食塩水中で十分な電力伝送を示した発光デバイスをラット体内に埋設したところ体内でもほぼ同程度の電送効率を示すことがわかった（図 4）。

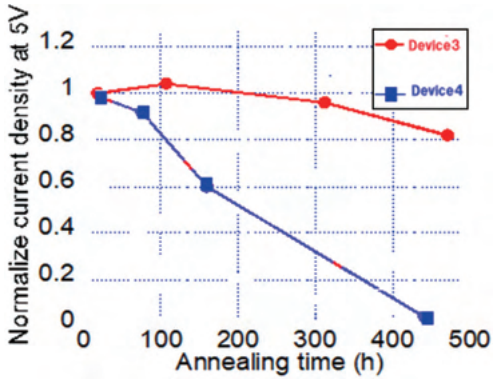


図 2　有機ダイオードの 100° C における熱劣化特性
Device3　P3HT/F8BT(Tg=140)，Device4　P3HT/MEH-PPV(Tg=65)　n 層に Tg の高い F8BT を用いることで熱耐性を向上させることができた。

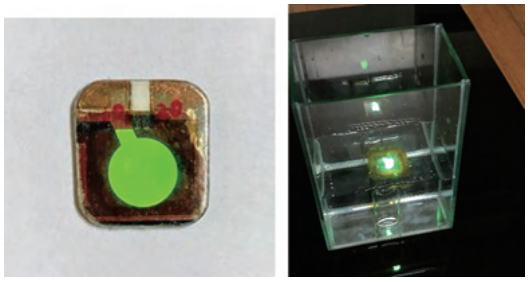


図 3　（左）ラット用体内ワイヤレス有機 EL 受電装置　（右）生理食塩水中での無線給電発光

3. 生体内設置フレキシブル装置の生体適合性表面処理法の確立

フレキシブル基板表面を様々な材料で被覆し，マウス体内で 1 ヶ月間埋設して炎症や拒絶反応が起きないかを試した。未修飾の基板では拒絶反応に基づく白化が見られたが，パリレン CVD 膜，医療シリコーン，MPC ポリマーで被覆した基板では炎症や拒絶反応は見られず，良好な生体適合性を示した。

腹腔内に埋設した場合でも内蔵や腹膜に対して十分な生体適合性を示すことがわかった。今後は最も密閉性の高いパリレン CVD 膜を最表面層に用いることとした（図 5）。



図 4　ラット体内で発光するワイヤレス有機 EL 受電装置
ラット腹腔内に埋設し送電装置上に固定，受電装置－送電装置距離　2 cm

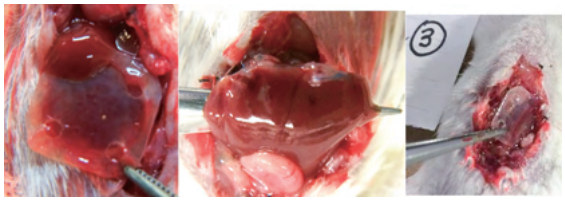


図5　表面被覆したPETフレキシブル基板をマウスに1ヶ月埋設して取り出した様子。左からパリレンCVD，医療シリコーン，MPCポリマーで被覆したもの。いずれも拒絶反応や炎症はみられない。

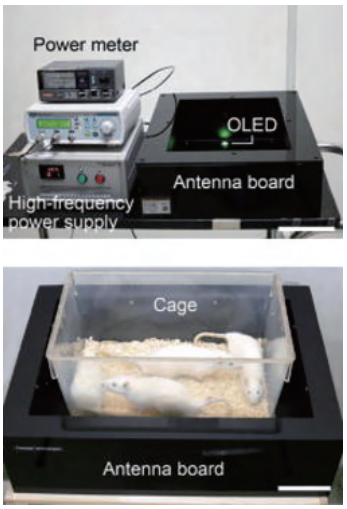


図6　ラットケージ付送電装置

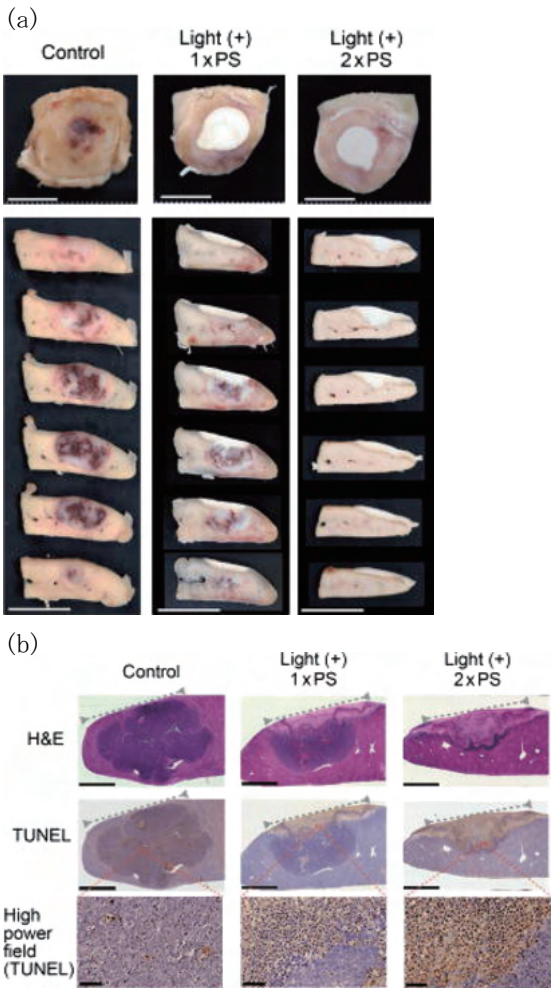


図7　PDT後のラット肝臓の生検結果
（a）肝臓の上面図と2 mm間隔でスライスしたもの
（b）肝臓スライスをH＆E染色したもの，タネル染色したものとその拡大図

4. 無線給電有機ELによるガン治療効果の実証

PDTでは，ガン組織に蓄積されやすい光増感剤を投与し，ガン細胞に蓄積される時間を待って，光照射することで，増感剤から発生する活性酸素がガン細胞のアポトーシスを引き起こす。ラット体内への電力伝送を行うためのラット飼育ケージ付送電装置（図6）を作成した。

ラット用体内ワイヤレス有機ELを肝臓ガン細胞を移植したラットの肝臓に貼り付けた。光増感剤（mTHPC）を静脈注射したのち，光照射を4日間行った群と2日目にもう一度増感剤を投与して，4日間光照射した群とコントロール群として光増感剤を投与せず，光照射のみを行った。ラットを解剖し，肝臓の生検を行った。以下に結果を示す。

図7（a）では，Control：増感剤投与しないものは肝臓全体に赤黒のガン組織が広がっているのに対し，増感剤を投与した群ではいずれもガン組織は顕著に縮小し，2回投与した群ではガン組織はほぼ消失している。光照射を行った部分では組織が白化しており，壊死した細胞が固まっている。（b）について，H ＆ E染色ではガン組織は濃赤紫色となるが，光の到達した部分でガン組織が消失しており，2回投与した群ではガン組織がほぼ消失している。タネル染色ではDNA鎖の断片化を検出できアポトーシスした細胞が黄土色になるが，ガン組織がなくなった領域が染色されていることから，熱変成死ではなく，活性酸素発生によるPDT効果によりガン細胞が死滅していることを示している。

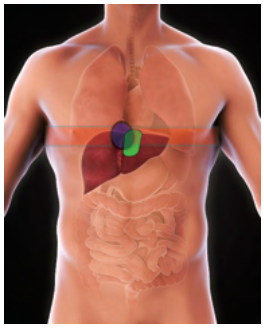


図８　ポータブル外部電源と内蔵に貼付したワイヤレスフレキシブル有機 EL 光源の構想図

本法が内臓ガンに対して有力な治療法となることを明確に示す結果となった。

5. まとめと今後の展望

本研究では人体内で駆動する機械装置のために体外から無線給電を行うシステムの開発とその医療応用の可能性を示した。有機半導体デバイスは薄型フレキシブルで炭素ベースであり，生体との相性がよい。電力伝送に必要な周波数特性や熱安定性を確保できる目処が付いたことから，今後は広い応用が期待される。また，体内設置光源による PDT は今後ガンの在宅医療を可能にし，通信器機を複合したスマート治療に発展していくものと期待される（図８）。

［成果の発表，論文など］

Yujiro Itazaki, Kei Sakanoue, Katsuhiko Fujita, Izumi Kirino, Kazuhiro Eguchi, Yutaka Miyazono, Ryoichi Yamaguchi, Takasumi Tsunenari, Takao Sugihara, Kenji Kuwada, Naoki Kobayashi, Tsuyoshi Goya, Katsuyuki Morii, Hironori Tsujimoto, Yuji Morimoto, “Metronomic photodynamic therapy for deep organ cancer by implantable wireless OLEDs” APL Bioeng. 9, 026113 (2025)

“Wireless OLED metronomic photodynamic device kills deep organ tumor cells in rat model” Scilight 2025, 181105 (2025)

［研究助成（B）］

Investigating the Effect of AI on Meaningful Interpersonal Communication

2241902



研究代表者（助成金受領者）　東京大学　情報学環　助教　楊　期蘭

［研究の目的］

感情的に負荷の高いデジタルコミュニケーションの課題

職場のコミュニケーションでは，ネガティブな感情を引き起こす困難な会話が避けられない場面があります。テキストベースの非同期コミュニケーションでは非言語的な手がかりが欠如しているため，感情的に負荷の高いメッセージ（厳しい批判や困難な職場の指示など）は，意図された以上に攻撃的・不公平・士気低下をもたらすものとして受け取られることがあります。研究によれば，ネガティブなフィードバックは受信者のモチベーション，自己効力感，そして生産的に関与しようとする意欲を低下させる可能性が示されています。

査読においては，建設的でない批評が著者に研究を諦めさせたり，研究コミュニティから離れさせたりする原因となることがあります。職場では，攻撃的または素っ気ないメールがコンフリクトを激化させ，感情的なエネルギーを消耗させ，効果的なコミュニケーションを妨げます。

介入戦略としての認知的再評価

認知的再評価とは，状況を別の視点から解釈し直すことで感情的な影響を変える心理的プロセスであり，感情調整の有効な方略として確立されています。しかし，特にストレス下では認知的負荷が高く，通常は訓練や専門家のサポートが必要です。大規模言語モデル（LLM）は，困難なコミュニケーションに対して，ポジティブに再フレーミングされた代替的視点を自動的に生成することで，認知的再評価をより利用しやすくする有望な可能性を秘めています。

以前の研究ではメンタルヘルスの文脈でこの可能性が探られていましたが，本研究の２編は，AI 駆動の再評価が自然なコミュニケーション場面（具体的には査読と職場コンフリクト）において果たす役割を厳密に検討した最初の試みの一つです。

研究目的

２つの研究は，以下の共通した目的によって結びついています。

- 困難なメッセージに対する AI 支援のポジティブなリフレーミングが，受信者のネガティブな感情を低減し，メッセージおよび送信者に対する認識を改善するかどうかを検討すること。
- AI リフレーミングの効果が，行動的アウトカム（査読における改訂の努力や，職場のコミュニケーションにおけるコンフリクト管理スタイルなど）にまで及ぶかどうかを調査すること。
- AI による再評価の効果を調整する要因（例：総合評価スコア，AI の物語的視点）を理解すること。
- 意図を歪めたり，主体性を損なったり，人間の責任を代替したりすることなく，人間の関

係的な効果を支援する責任ある AI ツールの設計に貢献すること。

［研究の内容，成果］

研究 1 ー査読における AI 再フレーミング済みポジティブ要約（CHI ’25）

Prolific を通じて募集した 137 名の参加者を対象に，2 段階のオンライン統制実験を実施しました。第 1 段階では，参加者はソーシャルメディアマーケティング職への応募用カバーレター（250 語）を作成しました。このタスクは個人的な関与を引き出しつつも統制可能になるよう設計されました。3 〜 7 日後の第 2 段階では，参加者は GPT-4 によって意図的に厳しいトーンで生成された AI フィードバックと，総合評価スコアを受け取りました。

本研究は2 × 2の被験者間デザインを採用し，(1) 批評に付加される AI 再フレーミング済みポジティブ要約の有無（あり vs. なし）と，(2) 総合評価レベル（高：5 点満点中 4 点 vs. 低：5 点満点中 2 点）を操作しました。

ポジティブ要約は GPT-4 と認知的再フレーミングプロンプトを用いて生成され，元のフィードバックを置き換えたり和らげたりするのではなく，批評の中の建設的な機会を強調するよう設計されました。

アウトカム指標には，フィードバックの感情的価値の知覚，文章の自己効力感の変化，自律性・有能感の知覚，フィードバックの公正さ・有用性の知覚，査読者の公正さ･専門性の知覚，改訂の量（TF-IDF コサイン類似度で測定），改訂の質（ルーブリックを用いた 2 名の独立した評定者によるスコア），および自己評価による改訂努力が含まれました。自由記述式の調査回答は，動機づけの帰属理論を用いて主題分析し，改訂行動を促す個人内・対人的要因を特定しました。（表 1：左）

表 1　2 つの研究のデザインの概要

項目	研究 1（CHI ’25）	研究 2（CHI ’26）
状況	カバーレターの学術的な査読	困難な職場のメール会話
参加者数（N）	137 名	132名
デザイン	2×2被験者間デザイン	2×2＋統制群の被験者間デザイン
主な操作変数	AIポジティブ要約（あり/なし）×評価スコア（高/低）	リフレーミングの種類（ポジティブ/ニュートラル）×物語的視点（1人称/3人称）
アウトカムの焦点	感情的受容，改訂行動，動機づけ	感情，コンフリクト行動，言語使用，AIへの信頼

研究 2 ー困難な職場メールにおける社会的緩衝としての AI（CHI ’26）

CloudResearch を通じて募集した 132 名の参加者を対象に，オンライン統制実験を実施しました。参加者は 4 種類の困難な職場メールのうちの 1 つを受け取り，2 × 2 の要因計画によって設定された 5 つの条件のいずれかに割り当てられました。条件は，AI によるポジティブなリフレーミングとニュートラルなリフレーミング，および 1 人称と 3 人称の物語的視点の組み合わせです。AI リフレーミングなしの統制条件（n = 27）も設けられました。すべてのリフレーミングされたメッセージは，実験前に ChatGPT-3.5 を用いて生成され，参加者間で一定に保たれました。

アウトカム指標には，感情反応（Russell 感情円環モデルに基づく，価値と覚醒の 4 象限），コンフリクト管理行動（対人コンフリクト相互作用コーディングシステムを用いて符号化），メール返信と解釈の言語的特徴（LIWC-22 を用いて分析，特に権力関連語と認知プロセス言語に着目），AI リフレーミングメッセージの知覚された有用性，および AI への信頼が含まれました。（表 1：右）

結果

AI 支援のポジティブリフレーミングがもたらす感情的・知覚的恩恵

両研究を通じて，AI 支援のポジティブリフレーミングは一貫して受信者の感情的体験と対

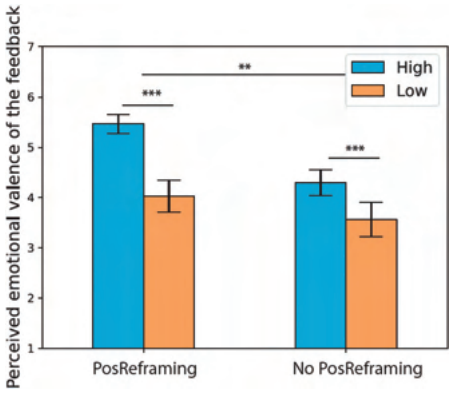


図1　各条件における感情的価値

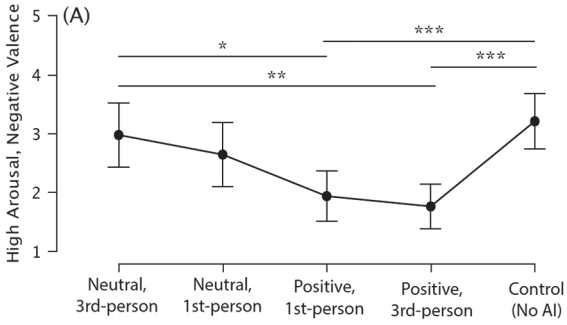


図2　各条件におけるネガティブな感情的価値の水準

人的認知を改善しました。

研究1では，厳しいフィードバックとともにAI再フレーミング済みポジティブ要約を受け取った参加者が，受け取らなかった参加者と比較して，有意にポジティブな感情的価値（$p < .01$）（図1），改訂における自律性と有能感の高い知覚（$p < .01$），フィードバックの公正さへの高い評価（$p < .01$），および査読者の公正さへの高い評価（$p < .05$）を示しました。これらの効果は，総合評価スコアが高いか低いかにかかわらず見られました。

研究2では，ポジティブにリフレーミングされたメールを受け取った参加者が，ニュートラルリフレーミング条件や統制条件と比較して，有意に低い高覚醒ネガティブ感情（例：ストレス，緊張；$p < .001$）を経験しました（図2）。また，ニュートラルリフレーミングと比較して，有意に低い低覚醒ネガティブ感情（$p < .05$）も示されました。

全体として，ポジティブリフレーミングはネガティブな感情を低減しますが，高覚醒のポジティブ感情を有意に高めるわけではありません。これはAIによる再評価が，ポジティブな感情を生成するというよりも，主に感情的緩衝として機能している――つまりネガティブな影響を和らげる――ことを示唆しています。

行動的アウトカム：従来の状態の持続性

感情的・知覚的な改善が明確に見られた一方で，両研究において行動的アウトカムはAIリフレーミングに対して反応しにくいことがわかりました。

研究1では，AIリフレーミング済みポジティブ要約は，参加者の文章改訂の量や質を有意に増加させませんでした。予想外なことに，改訂努力を高めたのはポジティブリフレーミングではなく，低い総合評価スコアでした（$p < .05$）。これは，知覚されたパフォーマンスギャップが自己改善の動機を高めるという研究と一致しています。また，ポジティブリフレーミングを受け取った参加者は，自分の改訂の質をより高く評価しました（$p < .05$）。

同様に，研究2においても，ポジティブなリフレーミングもニュートラルなリフレーミングも，参加者のコンフリクト管理行動やメール返信における送信者の承認に有意な変化をもたらしませんでした。返信の感情的トーンや語数も条件間で影響を受けませんでした。ただし，注目すべき言語的な知見が見られました。ポジティブリフレーミングを受けた参加者は，1人称のニュートラルリフレーミングを受けた参加者と比較して，困難なメールの解釈において権力関連語（例：「命令」「統制」「権威」）を有意に少なく使用しました（$p < .01$，Cohen's $d = 0.91$）（図3）。これは，明示的な行動はすぐには変化しなくても，ポジティブリフレーミングが困難な対人関係における権力動態の認知的な枠組み方を，微妙に変える可能性を示しています。

AIへの信頼と知覚された有用性

研究2における注目すべき知見として，ポジ

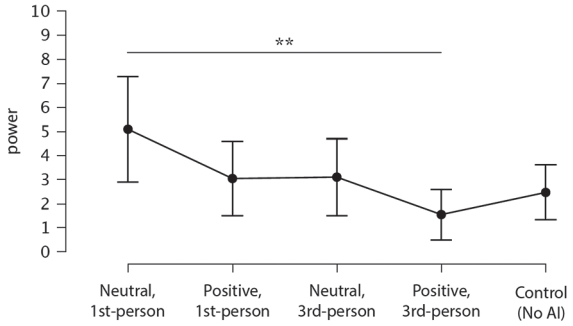


図3　各条件における権力関連語の使用頻度

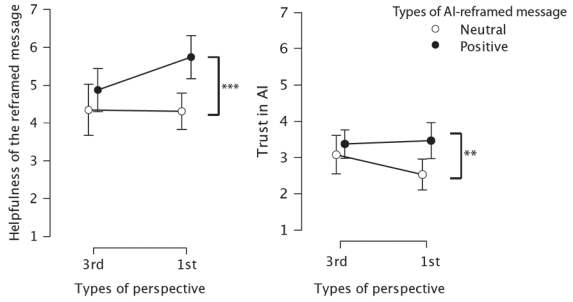


図4　各条件における知覚された有用性と信頼の水準

ティブにリフレーミングされたメッセージは，物語的視点にかかわらず，ニュートラルリフレーミングと比較して，知覚された有用性（$p < .001$，Cohen's $d = 0.69$）と AI への信頼（$p < .01$，Cohen's $d = 0.54$）の両方を有意に高めました（図 4）。このことは，ユーザーが AI を評価する際, 透明性や技術的な能力だけでなく, 出力の質と温かみに基づいていることを示唆しています。この知見は，信頼の高まりが意図せず人間の送信者から AI へと責任を移行させる可能性を示唆しており，これは慎重な設計上の注意を要する課題です。

統合：共通テーマと設計への示唆

2 つの研究を総合すると，一つの共通パターンが浮かび上がります。AI によるポジティブリフレーミングは，感情的・知覚的なレベルでは信頼性高く効果を発揮しますが，外顕的な行動を決定論的に変えるわけではない，というものです。

感情と行動の間にあるこのギャップは，理論的に重要な知見です。AI による再評価を通じた感情調整は，行動変容の必要条件ではあっても十分条件ではない可能性が示唆されます――明示的なコンフリクト解決戦略や具体的な改訂ガイダンスなど，追加的な支援が必要かもしれません。

設計者や研究者にとって，これらの知見は以下のことを示しています。人間のコミュニケーションを改善する AI ツールは，（1）ニュートラルなトーン調整よりもポジティブリフレーミングを優先すること，（2）AI が生成したコンテンツを元のメッセージの代替ではなく補助的なものとして提示すること，（3）AI の役割を全ての関係者に対して透明にすること，（4）感情的サポートを建設的な行動のガイダンスで補完すること，（5）AI によるメッセージの和らげが有害なコミュニケーションを正常化したり送信者の意図を誤って伝えたりするリスクに注意を払い続けること，が求められます。

AI が人間の相互作用を媒介する場面がますます増えていく中で，これらの知見は意義ある対人コミュニケーションを可能にするシステムを設計するための実証的な基盤を提供します。

［成果の発表，論文など］

1. Chi-Lan Yang, Alarith Uhde, Naomi Yamashita, and Hideaki Kuzuoka. Understanding and Supporting Peer Review Using AI-reframed Positive Summary. In Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '25), Yokohama, Japan, Article 171, 16p., doi:10.1145/3706598.3713219, 2025.4
2. Chi-Lan Yang, Jing Li, Xuhui Chang, Jingshu Li, Koji Yatani, Yi-Chieh Lee. Can AI be a Social Buffer? Investigating the Effect of AI-assisted Cognitive Reappraisal and Narrative Perspectives on Managing Difficult Workplace Conversations over Email. Proceedings of the 2026 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '26), Barcelona, Spain, Article 1514, 19p., doi.org/10.1145/3772318.3790331, 2026.4

［研究助成（C）］

高齢者向けの身体接触を伴うカウンセリングロボットの実現

2247002



研究代表者
（助成金受領者）

奈良先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科

博士後期課程

秋　吉　拓　斗

［研 究 の 目 的］

高齢化が進む現代社会では，加齢に伴う健康状態や社会環境の変化といった老年期喪失体験による不安や孤独感が社会問題となっており，高齢者の心の健康支援が喫緊の課題である。高齢者が精神的に豊かな生活を送るには，セルフモニタリングの実践が有効である。セルフモニタリングとは，自身の状況や感情，思考を客観的に観察し振り返るプロセスのことである。これは，認知行動療法（CBT）におけるネガティブな悩みや不安の客観視にとどまらず，今後の目標や生きがいの再確認や自己効力感の醸成といったポジティブな側面も含めて多角的に内面を整理する手法として，精神的健康の維持に重要な役割を果たす。しかし，このような構造化された内省を単独で行うことは，認知的・感情的な負担が大きい。そのため，カウンセリング等の支援的な対話を通じてセルフモニタリングを伴走支援するアプローチが不可欠であるが，日常的にこれを提供する精神科医や心理士，介護士等の専門家は不足している。

近年，対話エージェントやソーシャルロボットによる支援の自動化が注目されている。しかし，既存のシステムの多くは，取得した言語情報や表情などの視覚情報に基づく対話遷移に焦点が当てられている。一方で，心の健康支援における身体接触は，人間同士のケアにおいては安全・倫理的な観点から導入が忌避されやすいものの，ストレス軽減や信頼感構築に有効であることから，ロボットを活用した触れ合いの導入が期待されている。実際，成人を対象とした身体接触を伴うカウンセリングロボットの研究は進展しており，心理的支援への効果が実証されつつある。しかし，加齢に伴って触覚等の感覚特性が変化する高齢者に向けて，ロボットからの能動的な身体接触と対話を統合したシステムの設計や，その有効性の検証は未だ十分に進んでいなかった。

そこで本研究では，高齢者向けの身体接触を伴うカウンセリングロボットの実現を目的とする。その実現に向けて，本研究では大きく２つの課題を設定した。

第一の課題は，加齢に伴う滑舌の低下を考慮した自律対話システムの構築である。これに対し，CBT における思考整理のためのコラム法を応用したセルフモニタリングを促す支援的な対話シナリオを設計するとともに，音声認識の信頼度に応じて柔軟に応答し，対話を破綻させないシステムを構築する。

第二の課題は，高齢者が安心して触れ合えるロボットによる能動的な接触動作の実装である。高齢者が精密機器を壊してしまう不安を抱かず，心理的抵抗なく安全に触れ合える形態が不可欠であると考え，軽量・高耐久なぬいぐるみ素材の「赤ちゃん型ロボット・ひろちゃん-R」を活用する。このロボットの発話に同期して高齢者の手を握る能動的な接触動作をシステムに統合し，その効果を実験的に検証する。

これらの取り組みにより，高齢者が心理的緊

張を緩和して安全にセルフモニタリングできる環境を構築し，健康寿命の延伸と，人間と機械の調和を促進する基盤技術の創出を目指す。

［研究の内容，成果］

本研究では，以下の２つの研究項目を実施した。

1. 高齢者向け音声対話システムの実装と評価

加齢に伴う滑舌や聴力の低下を考慮し，高齢者が容易かつ自然に利用できる自律音声対話システムを実装した（図 1）。

1.1. 自律音声対話システムの実装

本システムは，図 2 に示すように，音声認識機能，対話管理機能，動作管理機能から構成される。音声認識機能には Google Cloud の Speech-to-Text API を活用し，ユーザの発話内容からテキストを取得するとともに，キーワードの検出と音声認識結果の信頼度（confidence 値）を対話管理機能に送信する。対話管理機能では，有限状態遷移モデルを踏襲したアルゴリズムを実装し，受信した単語や認識結果の信頼度に応じて対話シナリオを参照し，発話指令をロボットに送信する。同時に，動作管理機能が対話の流れに同期した接触動作指令を送信する（詳細は研究項目 2 に後述）。ロボットの発話音声は，赤ちゃん型という外見に適した子供らしい音声合成ソフト（VOICEPEAK）を用い，高齢者が聞き取りやすいトーンと速度で作成した。

1.2. 対話シナリオの設計と実装

対話の基盤として，先行研究のカウンセリング対話シナリオ［T. Akiyoshi, et al., 2021］を改良し，状況・感情・思考の整理を促す質問や共感のセリフを，高齢者が理解しやすい短文に再設計した。さらに，高齢者特有の音声入力の不十分さや認識エラーに備えた「認識信頼度に基づく対話戦略」を設計した。具体的には，音声認識結果の信頼度 90% を閾値として分類し，信頼度が 90% 以上（高い）の場合は「○○（例：旅行）に行きたいんだね」と具体的にオウム返しを行い共感を示す。一方，信頼度が 90% 未満（低い）の場合は「そうなんだね」と内容に直接触れずに自然な相槌を打つ。また，感情について質問した際にキーワードが検出されない場合は，「一言で言うと嬉しかったの？ワクワクしたの？」と，ユーザが回答しやすい形式で再質問を行う機能を実装した。これにより，話題や認識状態に応じて対話の破綻を防ぎ，ユーザに違和感を与えない堅牢なシステムを実現した。

1.3. 介護施設での評価実験と改良

開発したプロトタイプを用い，複数の高齢者介護施設や病院にシステムを持ち込み，現場の高齢者や介護スタッフと交流しながら予備的な動作テストとヒアリングを反復的かつ流動的に実施した。ロボットを体験した高齢者からは，「悩み」についての対話以外にも，「これまでの

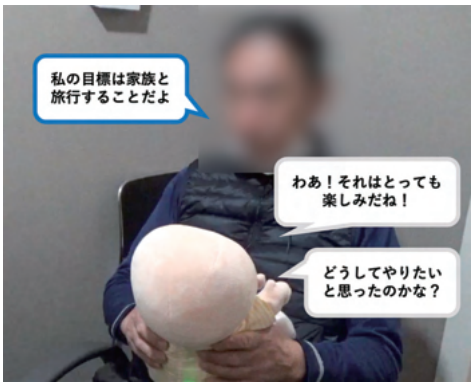


図 1　カウンセリングロボットとの対話例

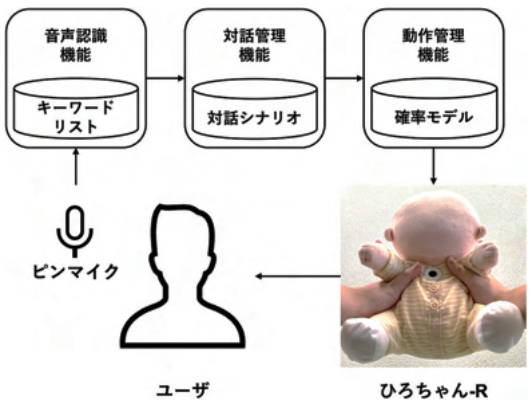


図 2　システム構成図

楽しかった思い出」や「これから取り組みたいこと（今後の目標）」,「今の好きなこと」などを積極的に話したいという意見が多く寄せられた。この現場からのリアルな要求をもとに，コラム法を応用した対話シナリオを再設計した。悩みについての話題に加えて，高齢者自身が好むポジティブな 3 種類の話題を選択して対話可能なシステムへと改良することで，高齢者の内発的な動機付けを高め，より深いセルフモニタリングを促す実用的な基盤を構築した。

2. 能動的接触動作の実装

身体接触を，安全なロボットを介して高齢者に提供するため，対話システムに能動的接触動作を統合し，心理的効果の検証を行った。

2.1. 効果的な接触動作の頻度・タイミングの解明

図 3 に示すように，ロボットの腕の開閉機構を利用し，ロボットを持つ高齢者の手の指を「ぎゅっと握る」ような能動的接触動作を自律的に実行する機能を実装した。開発初期段階では，人間の抱擁に基づく確率モデル（ガンマ分布等）[T. Akiyoshi, et al., 2025] を応用したが，高齢者施設での予備テストにおいて，加齢に伴う感覚特性の変化により「既存モデルでは接触に気づきにくい」という課題が観察された。そこで，接触動作を明確に伝えつつ対話への注目も高めるため，対話フェーズに応じたハイブリッドな動作制御を設計した。具体的には，ロボットが質問や共感を行うフェーズではロボットの発話に完全に同期させて接触を実行し，高齢者の発話を傾聴するフェーズでは既存の確率モデルに従って適宜接触を実行するシステムを実装した。

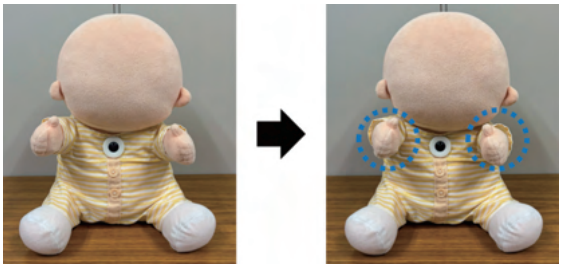


図 3　腕の開閉の様子

2.2. 能動的接触動作の評価

本研究では，ロボットの能動的身体接触が高齢者のセルフモニタリングに与える影響を評価するために実験室実験を実施した。セルフモニタリングは情緒的・認知的に負担の大きいプロセスであるため，有意義な内省を促すには質の高い支援環境の構築が不可欠である。本研究では，ロボットの発話に同期した能動的身体接触が，ロボットを信頼できるパートナーとして認識させる重要な非言語的手がかりになると仮定した。一般に，心理的支援の質は支援者の属性とセッション自体の主観的体験の 2 点から評価される。

本実験では参加者内計画を採用し，ロボットが腕を動かさず静的に保持されるだけの対比条件と，ロボットが対話に同期して能動的にユーザの手を握る動作を実行する提案条件の 2 条件を設定した。

評価にあたり，カウンセリング研究で確立された Counselor Rating Form（CRF-S）を用いて支援者としての特性（好意感，専門性，信頼感）を，Session Evaluation Questionnaire（SEQ）を用いて対話セッションの多角的な質（総合的な良さ，深さ，滑らかさ，肯定感，覚醒度）を測定することとし，以下の仮説を設定した。

- 仮説 1（ロボットへの印象）：提案条件は，対比条件と比較して，CRF-S の全次元において有意に高い評価が得られる。
- 仮説 2（セッション評価）：提案条件は，対比条件と比較して，SEQ の全次元において有意に高い評価が得られる。

実験は倫理委員会の承認を得て実施した。実験の参加者は，人材派遣会社を通じて募集したシルバー人材センター所属の高齢者 30 名（男性 15 名，女性 15 名，平均年齢 72.97 歳，SD 6.21）である。参加者は全員，日本語を母語とする 60 歳以上で，正常な聴力を持ち，言語障害のない健常者とした。提示順序による影響を排除するため，参加者をランダムに 2 群に分け，提

示順序をカウンターバランスした。評価指標として，CRF-S は 7 段階リッカート尺度で，SEQ は 7 段階双極形容詞尺度で測定し，対応のある t 検定（有意水準 $\alpha = 0.05$）により分析を行った。

本システムは本来，4 種類の話題から選択してセルフモニタリングに取り組むことが可能であるが，本実験では変数を制御し，身体接触の効果を純粋に測定するために，対話の主題を「今後の目標」に統一した。また，条件間におけるロボットの発話内容の違いが評価に与える影響を排除するため，発話セリフは両条件で同一のものに制限した。

参加者は事前に日常生活における実際の目標を 2 つ準備し，到着後の説明を経て書面による同意を行った。参加者は椅子に座り，赤ちゃん型ロボット「ひろちゃん-R」を両手で保持した。練習対話の後，約 3 分から 5 分間のメインセッションを 2 回実施した。各セッション終了後には質問紙への回答を行い，セッション間には休憩を挟んだ。また，条件ごとに異なる目標を用いることで，対話内容の重複による影響を排除した。

図 4 に示すように，CRF-S によるロボットへの印象評価の結果，提案条件は対比条件と比較して，支援者としての「信頼感」を有意に向上させることが実証された（$p < 0.05$）。一方で，「好意感」や「専門性」については，両条件間に有意な差は見られなかった。これにより，仮説 1 は部分的に支持された。

また，図 5 に示すように，SEQ を用いたセッション評価の結果，測定した 5 つの次元（総合的な良さ，深さ，滑らかさ，肯定感，覚醒度）のすべてにおいて有意差は確認されず，仮説 2 は棄却された。しかし，「覚醒度」においては，提案条件において低下する有意傾向（$p < 0.1$）が認められた。

本研究の主要な成果は，高齢者が自身の目標を整理する構造化対話において，ロボットによる能動的な身体接触が信頼できるパートナーとしての認識を有意に高めることを裏付けた点にある。好意感や専門性に変化がなかった理由として，赤ちゃん型ロボットが本来持つ高い外見的な愛らしさや幼い外見という特性が，接触行動よりも強く印象を規定していることが推察される。これは，身体接触がロボットの専門知識を補うというよりも，対話相手としての信頼感という心理的な土台を特異的に強める役割を果たしたことを意味している。さらに，対話評価において統計的な有意差は得られなかったものの，覚醒度の低下傾向が見られた点は重要である。これは，対話に合わせた身体接触が高齢者の緊張を解きほぐした可能性を示唆している。セルフモニタリングは思考や感情に負担を伴う作業であるが，能動的な身体接触によって信頼感の向上と緊張緩和の兆候が同時にもたらされることで，他者の評価を恐れることなく，安心して自身の内面を開示できる場の構築に寄与したと言える。

本研究の限界として，単一の機体や短時間の交流に留まった点が挙げられるが，得られた知

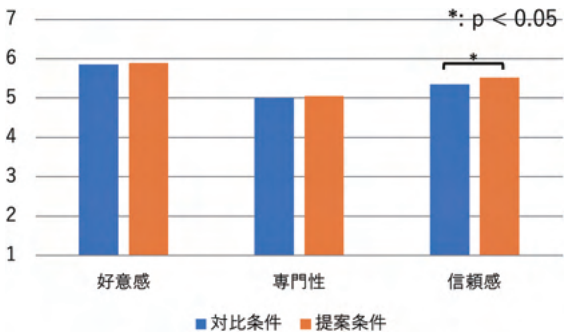


図 4　CRF-S の平均点

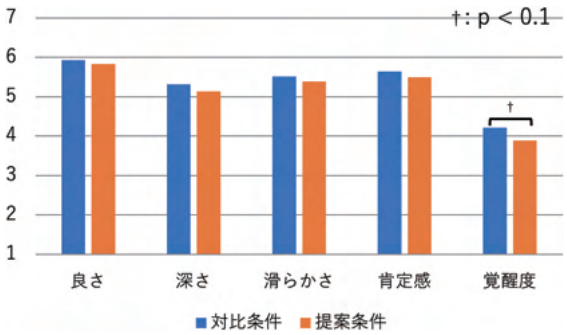


図 5　SEQ の平均点

見は，触覚を通じた非言語的な働きかけが高齢者の心の健康や生きがいを支えるための重要な設計指針となり得ることを示している。

本研究は，ロボットの能動的な身体接触を対話システムに統合することで，高齢者との間に良好な支援関係を築く有効な手法を提示した。身体接触による信頼感の向上とリラックス効果の兆候は，高齢者が自身の生きがいについてより率直かつ安全に内省できる環境を実現する。本成果は，高齢化社会において人間と機械が調和し，テクノロジーが心の豊かさを支える社会の実現に資するものである。

［成果の発表，論文など］

［1］秋吉拓斗，住岡英信，中西惇也，加藤博一，塩見昌裕：“高齢者向けの触れ合い対話を伴う思考整理を支援するロボットの実装”，第 43 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2J1-01，2025 年 9 月.

［研究助成（C）］

エレクトロニクス技術を駆使した脳卒中者へのリハビリテーション介入基盤の確立

2247007



研究代表者（助成金受領者）	埼玉県立大学　大学院保健医療福祉学研究科	博士後期課程	伊　藤　実　央
共同研究者	埼玉県立大学大学院　保健医療福祉学研究科	准教授	国　分　貴　徳

［研 究 の 目 的］

脳卒中は本邦における重大な国民病であり，急性期死亡を免れたとしても，その後遺症により長期間にわたり治療が必要なケースが絶えない。脳卒中後遺症に代表される症状のうち，随意運動障害は約８割の脳卒中患者が経験し，日常生活動作において直接的な影響を受ける。

近年では，随意運動障害による運動麻痺の影響そのものを回復するためのニューロリハビリテーションに関する研究が盛んに行われ，中枢神経系の機能再編を誘導するような治療法が開発されている。一方で，このような治療方法は，企図した随意運動を反映し得る，末梢の筋の状態に問題がないことが前提とされている。すなわち，如何に中枢神経系に適切な随意運動司令を与えたとしても，実際の運動を担う筋が，脳卒中後の筋活動異常により硬く，反応しない状態であると，随意運動回復効果は十分に発揮されない。脳卒中後は中枢神経系の障害による一次的障害と，この状態が継続することによって末梢の筋の硬さなどの変性を引き起こす二次的障害の双方が共存する。したがって，脳卒中後の随意運動機能を回復に導くためには，中枢神経系への介入のみならず，末梢の神経筋システムの状態を適切に評価し，リハビリテーションに結びつけることが重要である。

神経筋システムを評価する方法として，近年では随意運動の最小制御単位である運動単位について電気生理学的手法に基づく活動分析が発展している。脳卒中後の運動単位活動は非麻痺側に対し麻痺側にて運動単位動員閾値が低下する“Recruitment”の異常や，平均発火頻度が低下する“Rate coding”の異常などが報告されている（Hu, et al. J NeuralEng, 2015）。しかし，これらの報告は慢性期脳卒中者を対象とした研究であることから，脳卒中発症後の病期の経過期間や筋の二次的変性の程度などの経時的要因などの二次的影響を包含している。脳卒中者における運動単位活動の経時的変化，また，神経筋の状態によってどのように変化するのかを理解することができれば，脳卒中患者に対する早期リハビリテーションの指針となりうる。

本研究は，脳卒中者における神経筋の経時的特徴を明らかにすることを目的とし，２つの研究を実施した。

［研究の内容，成果］

【研究 1】脳卒中者における神経筋機能特性の経時的変化

対象は亜急性期脳卒中者８名，慢性期脳卒中者８名とした。使用機器は表面筋電図とロードセル，モニターとし，表面筋電図は麻痺側及び非麻痺側の上腕二頭筋に貼付した。対象者は台の上に肘を乗せて肘関節屈曲位で前腕をロード

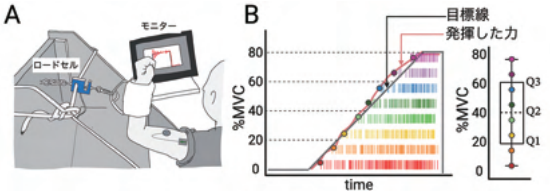


図1　研究1の方法
A）対象者の計測環境を図示した
B）運動単位活動開始タイミングをドットでプロットした

セルに固定し，最大筋力を計測した。その後，モニターに映し出された目標戦を肘関節屈曲等尺性収縮力により調節して発揮する，力追跡課題を実施した（図1-A）。

最大筋力（Maximum voluntary contraction force，以下，MVC）の計測後に実施した力追跡課題は，台形波形に併せて力を漸増的に発揮するRamp taskとした。このRamp taskを実施している最中の上腕二頭筋の筋活動を表面筋電図で記録し，運動単位分解ソフトウェアを介して運動単位活動電位に分解し，各運動単位が活動したタイミングを算出した（図1-B）。

分解された運動単位活動電位の情報を元に，次の3つのパラメータを解析した。動員閾値は，Ramp taskにおいて運動単位が活動したタイミングを算出し，その中央値とした。動員範囲は，Ramp taskにおいて運動単位が活動したタイミングを算出し，その四分位範囲とした。平均発火頻度は，Ramp task中における1秒あたりの運動単位発火数とした。

統計解析は，病期の要因（亜急性期 / 慢性期）と麻痺の要因（麻痺側 / 非麻痺側）の2要因について，二元配置分散分析を実施した。

研究1の結果を表1及び図2に示した。最大筋力は麻痺の要因に有意な主効果が認められた。検出された運動単位数は病期の要因・麻痺の要因ともに有意な主効果を認めなかった。運動単位動員範囲や運動単位動員閾値，運動単位平均発火頻度は病期の要因に有意な主効果を認めた。また，動員範囲は動員閾値など，“Recuritment の異常”を示す運動単位活動は，慢性期において低値であり，経時的に増悪する可能性が示唆された。

研究1より，脳卒中者の運動単位活動は経時的な増悪を予防できない可能性が示唆された。そのため，運動単位活動の異常を予防するため

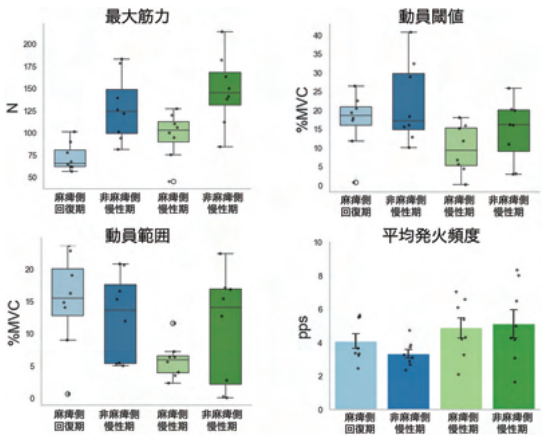


図2　各病期・麻痺の有無による結果
%MVC：最大筋力で正規化した力における運動単位活動開始タイミング
pps: pulse per sec

表1　二元配置分散分析の結果

	病期の要因		麻痺の要因		交互作用	
	F 値	P 値	F 値	P 値	F 値	P 値
最大筋力（N）	4.07	0.05	22.87	0.00*	0.05	0.89
検出運動単位数（個）	1.19	0.28	0.10	0.75	0.98	0.33
運動単位動員範囲（%MVC）	5.07	0.03*	0.30	0.59	2.42	0.13
運動単位動員閾値（%MVC）	6.07	0.02*	2.49	0.13	0.00	0.99
運動単位平均発火頻度（pps）	4.99	0.03*	0.20	0.65	0.76	0.39

%MVC：MVC taskで取得した最大筋力を正規化した力の値
pps: pulse per sec
*: $P < 0.05$

には，亜急性期のような早期段階から筋の変性の経時的変化を抑制するような特異的な介入が必要であることが示唆された。脳卒中後に好発する筋の変性として，痙縮による筋の硬さ変性が挙げられる。

痙縮は上位運動ニューロン損傷に起因する症候であるが，これにより筋の緊張状態が続くと，筋は二次的に変性を引き起こし，次第に硬くなる。この状態が生じると，脳卒中患者は運動単位活動を効率的に調整できなくなり，結果的に非効率な力発揮を惹起することが報告されている（Mottram CJ, et al. J Neurophysiol, 2014）。また，亜急性期脳卒中者は，随意運動機能の回復や，日常生活動作レベルが著しく変化すると同時に，それによる麻痺側肢の使用量の増加により，筋の硬さ変性を引き起こしやすくなる。したがって，リハビリテーションによって麻痺側肢の使用を促すと同時に，筋の硬さ変性を予防するような介入を実施して筋をコンディショニングすることで，運動単位活動の増悪を予防出来る可能性がある。

【研究 2】亜急性期脳卒中者における運動単位活動の増悪予防のための筋の構造的状態に対するコンディショニング効果の検討

対象は亜急性期脳卒中者 16 名とし，8 名は筋コンディショニング介入を実施する群（以下，介入群），もう 8 名は筋コンディショニング介入を実施しない群（以下，非介入群）としてランダムに振分けた。

使用機器は高密度表面筋電図 2 つとし，対象者の上腕二頭筋全体をカバーして活動電位を取得した（図 3-A，B）。また，筋コンディショニング介入による筋の硬さの状態を評価するために，超音波エラストグラフィーを使用した。超音波エラストグラフィーは，超音波プローブに取り付けた音響カプラと対照組織のひずみから比を求め，筋の硬さ，すなわち筋粘弾性の指標として定量化した（図 3-C）。

筋コンディショニング介入には，体外衝撃波

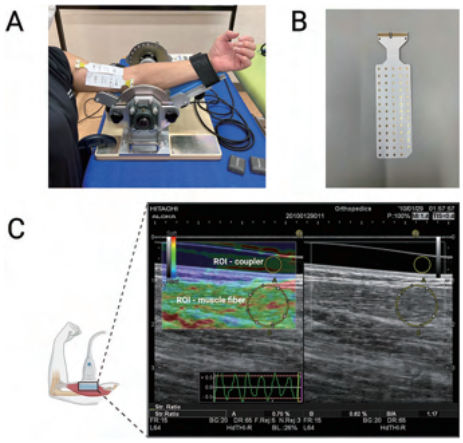


図 3　研究 2 使用機器
A）高密度表面筋電図貼付位置と対象者の肘関節固定ポジションを示した
B）高密度表面筋電図電極
C）超音波エラストグラフィー計測図

を用いた。体外衝撃波は痙縮に起因する二次的変性による筋の硬さを改善させる物理療法として臨床においても一般的に用いられており，筋の硬さと粘性を減少させる物理療法介入の一つである。対象者の上腕二頭筋に，電極貼付した部位をマーキングし，電極除去後にその範囲全体に対して体外衝撃波を照射した。刺激強度や頻度は先行研究に基づき，2000 shots，1.5–2.5 bar，8 Hz と設定した。

実験スケジュールと各回のプロトコルは図 4 のように設定した。計測タイムポイントは pre，post，week1，week3 の 4 時点とした。介入群に対しては週 2 回体外衝撃波を実施し，即時変化の有無を確認するために，初回訪問時のみ pre と post の間に 1 回介入を実施した（図 4-A）。

各回では，臨床評価として痙縮機能を評価する Modified Ashworth Scale（以下，MAS）と，運動機能を評価する Fugl Mayer Assessment（以下，FMA）を評価したのち，超音波エラストグラフィーで筋の粘弾性を計測した。その後，最大筋力の計測に基づき，力追跡課題を実施した。力追跡課題は研究 1 と同様に，提示した目標戦を肘関節屈曲等尺性収縮で追跡する課題で，台形波形の上底は 35%MVC と 50%MVC

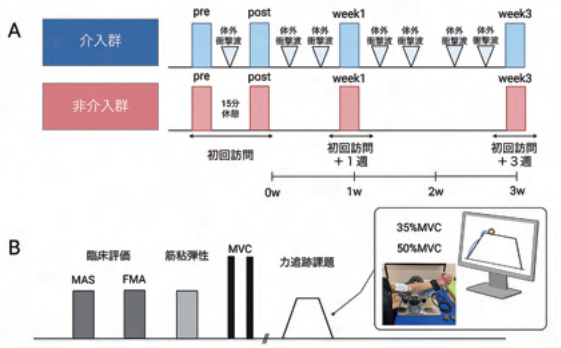


図４　実験スケジュールと各回のプロトコル
A）実験スケジュールを図示した
B）各１回のセッションにおける計測プロトコルを図示した

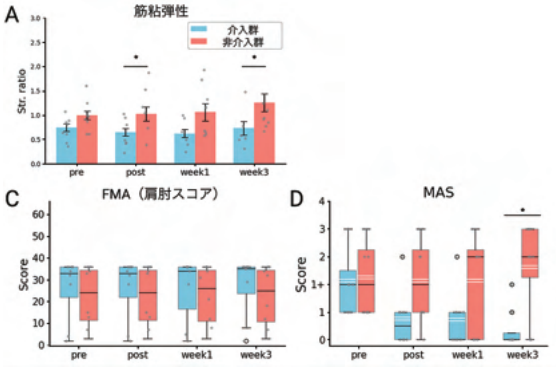


図５　臨床スコア・筋粘弾性の結果
Str. ratio: Strain ratio

表２　介入群と非介入群の基本特性

	介入群	非介入群	p 値
年齢	64.8 ± 11.7	63.9 ± 10.9	$p = 0.88$
脳卒中発症後月数	2.5 ± 0.7	2.4 ± 0.9	$p = 0.82$
BMI	24.1 ± 3.0	24.1 ± 2.2	$p = 1.00$
皮下組織厚（mm）	5.0 ± 1.8	4.1 ± 0.8	$p = 0.24$
FIM_pre	69.6 ± 15.9	61.6 ± 17.9	$p = 0.39$
FIM_week3	76.0 ± 13.4	72.3 ± 10.0	$p = 0.95$
MVC_first visit（N）	34.5 ± 30.4	23.4 ± 12.9	$p = 0.39$
MVC_week1（N）	36.3 ± 35.2	23.3 ± 12.1	$p = 0.38$
MVC_week3（N）	40.4 ± 33.4	19.6 ± 10.0	$p = 0.13$

BMI: Body Mass Index
FIM: Functional Independent Measure
MVC: Maximum voluntary contraction force

の２種類に設定した（図 4-B）。運動単位データは，動員閾値及び平均発火頻度を研究１に準じて分析した。

介入群と非介入群の基本特性の結果を表２に示した。運動単位活動に影響を及ぼす可能性のある要因として，年齢，脳卒中発症後月数，BMI，皮下組織厚，日常生活機能レベルを示す Functional Independent Measure（以下，FIM），最大筋力を示す MVC について確認した。これらはいずれも各群間において有意な差を認めなかった。

このことから，各群において筋コンディション以外に運動単位活動に影響を及ぼし得る可能性は低いと考えられた。

次に，臨床評価スコアと，超音波エラストグラフィーで計測した筋粘弾性の結果を図５に示した。いずれも青バーを介入群，赤バーを非介入群の結果として示した。運動機能を評価する FMA は介入有無の要因にもタイムポイントの要因にも有意な差を認めなかった。一方，MAS は week3 において各群に有意な差を認め，介入群は非介入群よりも低値であり，介入群の痙縮の程度は，week3 において非介入群よりも小さくなったことが示唆された。筋粘弾性の結果は，post 及び week3 に有意な差を認め，介入群は非介入群よりも筋粘弾性が小さいことが示唆された。

運動単位データの結果を図６に示した。平均発火頻度は 50%MVC において，非介入群の pre，post，week1 に対して week3 が有意に低く，week3 では介入群と比較して非介入群が低値であるという結果であった。また，35%MVC の平均発火頻度及び動員閾値は介入有無及びタイムポイントの両要因にて有意な主効果を認めなかった。これらの結果から，介入群では非介入群と比較して経時的な平均発火頻度の減少のような “Rate coding” の異常が抑制されていた一方，動員閾値の低下のような “Recruitment” の異常に対しては影響を及ぼさないことが示唆された。

研究２より，筋コンディショニングを実施すると，運動単位活動のうち，経時的な平均発火頻度の減少が抑制される可能性が示唆された。

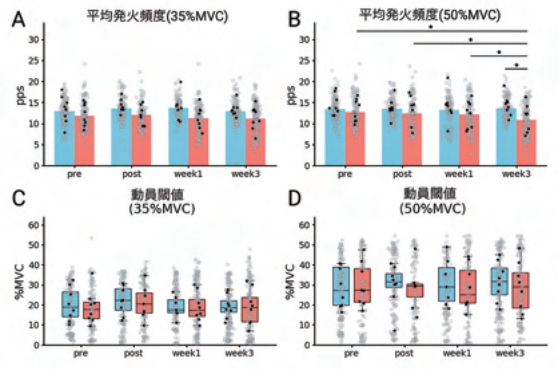


図 6　運動単位活動の結果
%MVC：最大筋力で正規化した力における運動単位活動開始タイミング
pps: pulse per sec

先行研究（Mazzo, et al. J Phyiol, 2021）では，ストレッチなどにより筋の硬さを軽減することで効率的に筋張力が発揮でき，運動単位平均発火頻度が増加することが報告されている。本研究結果では，筋コンディショニングによって，筋を有意に柔らかくし，平均発火頻度を増加したというよりも，非介入群において認められた筋の二次的変性による経時的な筋の硬さ変化に伴う平均発火頻度の減少に対して，予防的な効果をもたらした可能性があると考える。また，筋の二次的変性の変化と同時期に平均発火頻度が減少したことから，運動単位活動パタンのうち，Rate coding は末梢の筋の状態に依存して変化する可能性が高いと考える。

一方で，動員閾値には影響を及ぼさなかったことから，力発揮において動員される運動単位の構成などの Recruitment の要因に対しては，末梢の筋変性の状態に依存して変化する可能性は低く，より中枢の状態の影響を受けている可能性があると考える。

研究 1 及び研究 2 を通じて，次の 2 点が明らかになった。1 点目に，脳卒中患者における運動単位活動の異常は，亜急性期から潜在している可能性があり，慢性期にかけて経時的に増悪する可能性がある。2 点目に，脳卒中後の経過に伴う筋の硬さ変性に対するコンディショニングは，rate coding の調節様式の経時的な乱れを予防できる可能性がある。本研究で得られた知見は，脳卒中リハビリテーションにおいて，随意運動機能の基盤をなす神経筋システムについて，エレクトロニクス技術を活用した評価指標の確立や，その筋システムの予防的介入に対する基礎的知見になると考える。

［成果の発表，論文など］

■論文

1. **Ito M**, et al. Compression of motor unit recruitment threshold patterns are present in the subacute phase post stroke. Journal of Neurophysiology. 134: 896-903, 2025.
2. 伊藤実央，他．脳卒中片麻痺者の運動単位動員様式は病期により異なる特徴を示す．理学療法学 52(1), p20-27
3. 伊藤実央，他．漸増力制御課題で顕在化する脳卒中者の異常な運動単位動員様式の経時的特徴．リハビリテーション医学研究財団研究論文・事例報告集．VOL 27. 2024, p4-9

■学会発表

4. **Ito M**, et al. Muscle-specific interventions may prevent neurophysiological abnormalities in subacute stroke. Neuroscience 2025, Nov.
5. **Ito M**, et al. Characteristics of Motor Unit Activity from Different Types of Electrodes in Multi-Channel Surface Electromyography. Neuroscience 2024, Oct.
6. **Ito M**, et al. The Neuromuscular Functions in Stroke Patients Were Changing Depending on the Post-Onset Phases. ISEK 2024, Jun.
7. 伊藤実央，他．脳卒中片麻痺者への体外衝撃波介入による痙縮筋への影響．第 30 回日本基礎理学療法学会 2025 年 10 月
8. 伊藤実央，他．脳卒中片麻痺者に対する体外衝撃波介入前後における運動単位動員様式の探索．日本物理療法合同学術大会 2025 2025 年 2 月
9. 伊藤実央，他．脳卒中片麻痺者における病期の違いによる運動単位動員様式の解明．第 32 回埼玉県理学療法学会 2025 年 1 月

［研究助成（C）］

脊椎圧迫骨折高齢者の立位バランスを向上させる視覚フィードバックシステムの開発

2237003



研究代表者（助成金受領者）	京都橘大学　大学院健康科学研究科	博士後期課程／日本学術振興会特別研究員DC2	澤井　舜
共同研究者	京都橘大学　健康科学部／京都橘大学　大学院健康科学研究科	准教授	中野英樹
	京都橘大学　大学院健康科学研究科	博士後期課程大学院生	藤川翔也
	京都橘大学　大学院健康科学研究科	博士後期課程大学院生	山本涼介

［研究の目的］

脊椎圧迫骨折は高齢者に頻発する脆弱性骨折の１つであり，その多くはバランス能力低下に起因する転倒によって生じている。現在までに，脊椎圧迫骨折高齢者の立位バランスに対する介入として，バランス機能訓練，下肢機能訓練などの運動療法の効果が検証されてきた［1］。しかしながら，高齢者の転倒は予防できておらず，さらなる効果的な介入方法が求められている。これに対して，特に近年様々な感覚情報を使用したフィードバックトレーニングの効果が検証されている。しかし，高齢者は脳機能や注意機能が低下し，意識的な運動の制御が困難になるため，表在感覚や固有感覚のフィードバックは効果が小さいことが示唆されている［2］。そのため，本研究は高齢者でも理解しやすい視覚情報を用いた重心動揺即時フィードバックシステムを開発し，その効果を検証する。

本研究は検証１から検証３で構成された。まず検証１では，開発した視覚フィードバックシステムを使用し，視覚フィードバックが健常若年者の立位バランスに及ぼす影響を検証した。次に検証２では，視覚フィードバックを付与した条件と付与しない条件の脳波を比較し，視覚フィードバックが立位バランス時の神経活動に及ぼす影響を検証した。そして検証３では，健常高齢者と脊椎圧迫骨折高齢者を対象として，視覚フィードバックが立位バランスに及ぼす影響を比較した。これらの検証１から検証３を実施し，重心動揺即時視覚フィードバックを用いることで，機械と人間の身体機能・脳機能を調和させた転倒予防を構築することを目的とした（図１）。

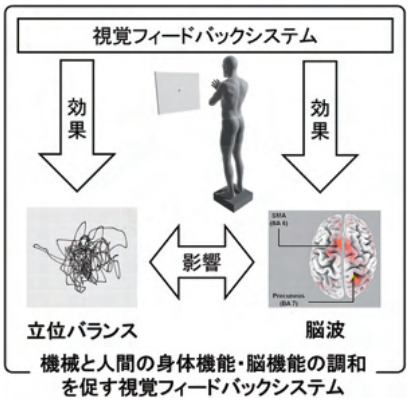


図１　本研究課題の概要

［研究の内容，成果］

検証１：視覚フィードバックシステムが健常若年者の立位バランスに及ぼす影響

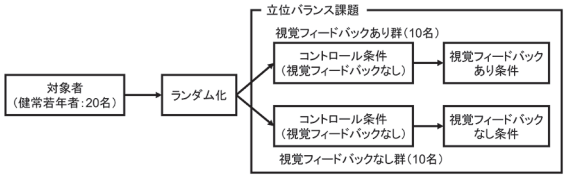


図２　研究デザイン（検証１，２）

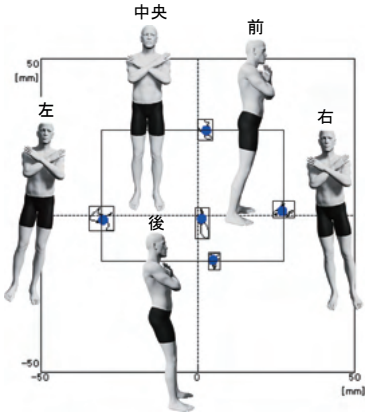


図３　IPS の測定方法

本検証は，健常若年者 20 名を対象とした。全ての対象者に立位バランス課題を実施させ，それに対する視覚フィードバックの効果を検証した。

研究デザインはランダム化比較試験とし，全ての対象者に視覚フィードバックを付与しないコントロール条件での立位バランス課題を実施させた後，ランダムに視覚フィードバックなし群と視覚フィードバックあり群に群分けした。そして，各群に対応した条件で再度立位バランス課題を実施した（図 2）。

立位バランス課題には，軟性フォームラバーを敷いた重心動揺計上で実施する姿勢安定度評価指標（Index of postural stability；IPS）を採用した。IPS は，静止立位での重心動揺を測定した後，前，後，右，左に最大に重心を移動させた姿勢での重心動揺をそれぞれ 10 秒ずつ測定する［3］（図 3）。

そして，各方向の重心動揺データから，重心位置を保持する能力を反映する重心動揺面積と，重心を前後左右へ安定して移動させる能力を反映する安定性限界面積を算出し，以下の式

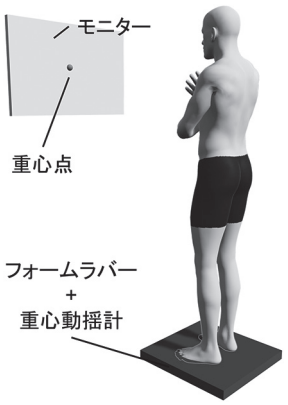


図４　IPS の測定環境と視覚フィードバックシステム

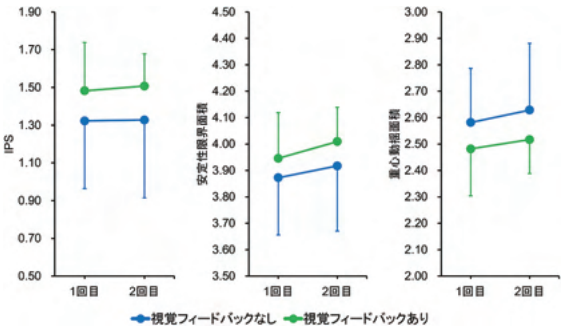


図５　健常若年者における重心動揺の比較

で IPS を算出した。IPS は値が高いほど，立位バランス能力が高いことを示す指標である。

$$IPS = \log \frac{安定性限界面積 + 重心動揺面積}{重心動揺面積}$$

この時，対象者の前にはモニターを設置し，視覚フィードバックあり条件では重心動揺計で測定した重心位置をリアルタイムに即時的に表示した（図 4）。一方で，コントロール条件と視覚フィードバックなし条件では，モニターはホワイトアウトした状態で，重心位置は表示しなかった。

統計解析では，群（視覚フィードバックなし群，視覚フィードバックあり群）と時間（1 回目，2 回目）による 2 要因反復測定分散分析を実施し，IPS，安定性限界面積，重心動揺面積を比較した。統計解析には SPSS バージョン 30 を使用した。

解析の結果，視覚フィードバックなし群は 1

回目から2回目（視覚フィードバックなし条件）でIPSが0.4%上昇した。一方で，視覚フィードバックあり群は1回目から2回目（視覚フィードバックあり条件）でIPSが1.7%上昇した。しかし，有意な交互作用や主効果は認めなかった（$p > 0.05$）。

先行研究ではバランス能力が高い対象者では，視覚フィードバックの効果が顕在化されないことが報告されている［4］。そのため，本検証の対象者である健常若年者は立位バランス能力が高かったことでパフォーマンスの条件間差異を生じなかった可能性がある。

検証2：視覚フィードバックが脳波に及ぼす影響

本検証では，検証1の立位バランス課題実施時に測定した脳波を視覚フィードバックなし群と視覚フィードバックあり群で比較し，視覚フィードバックを付与することによる脳波活動への影響を明らかにすることを目的とした。

比較する脳波は，各群の2回目の条件時とし，視覚フィードバックなし群の視覚フィードバックなし条件，視覚フィードバックあり群の視覚フィードバックあり条件とした（図2）。脳波は脳波計（Polymate Pro，ミユキ技研社）とアクティブドライ電極システムを使用して記録した。また，脳波は国際10-20法に則った19チャンネル（Fp1，Fp2，F7，F3，Fz，F4，F8，T3，C3，Cz，C4，T4，T5，P3，Pz，P4，T6，O1，O2）で記録し，サンプリングレートは1,000 Hzとした。基準電極とアース電極は左耳朶に装着した。記録した脳波は，EEGLABを使用してバンドパスフィルター（0.5～50 Hz），512 Hzへのダウンサンプリングを適用した。また，独立成分分析を実施し，瞬きや筋活動などのノイズを除去した。そして，exact low-resolution brain electromagnetic tomography（eLORETA）を使用して，三次元電流密度分布を推定した。統計解析では，各ボクセルのθ周波数帯域（6.5～8.0 Hz）とα周波数帯域（8.5～12 Hz）の活動を対応のないF検定で比較した。

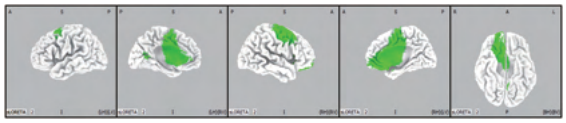


図6　θ波活動の群間比較
（緑の領域：視覚フィードバックあり群で低活動）

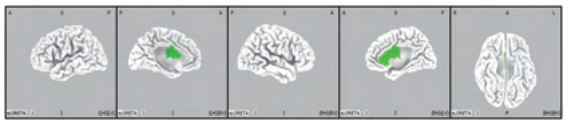


図7　α波活動の群間比較
（緑の領域：視覚フィードバックあり群で低活動）

その結果，視覚フィードバックなし群と比較して視覚フィードバックあり群では，前頭中央領域，運動関連領域のθ波活動が低値を示す傾向にあった（$p < 0.10$）（図6）。また，視覚フィードバックなし群と比較して視覚フィードバックあり群では，前帯状回のα波活動が低値を示す傾向にあった（$p < 0.10$）（図7）。

前頭葉のθ波活動は認知的制御や注意制御［5,6］との関連が報告されている。また，θ周波数帯域の前頭・頭頂ネットワークは人の姿勢制御に関与することが明らかになっている［7］。以上のことから，視覚フィードバックを与えることで，重心位置やその動揺が視覚化されるため，身体を意識的に制御する必要がなくなった可能性がある。これにより，バランスや認知制御に関連する脳領域の活動が抑制され，効率的な神経活動が促された可能性が示唆された。

前帯状回のα波活動は困難な姿勢制御課題ほど活性化されることが明らかになっている［8］。視覚フィードバックなし条件と比較して視覚フィードバックあり条件では，重心位置やその動揺が提示されることにより課題難易度が低く，バランスに関連する脳領域の活動が低値を示した可能性がある。

これらの結果から，視覚フィードバックを付与することで立位バランスに関連する脳領域の活動が低値を示すことが明らかになった。視覚フィードバックは立位バランスに関連する神経

活動を効率化する可能性が示唆された。

検証 3：視覚フィードバックが脊椎圧迫骨折高齢者の立位バランスに及ぼす影響

本検証は，健常高齢者と脊椎圧迫骨折高齢者の立位バランスにおいて，視覚フィードバックを付与する効果を検証した。これにより，健常高齢者と比較した脊椎圧迫骨折高齢者の視覚フィードバックに対する立位バランスの応答を明らかにすることを目的とした。

研究デザインは検証 1 及び 2 と同様に，ランダム化比較試験とし，健常高齢者 30 名と脊椎圧迫骨折高齢者 2 名を対象とした。対象者を 16 名ずつ視覚フィードバックなし群と視覚フィードバックあり群に群分けした。また，視覚フィードバックあり群には 2 名の脊椎圧迫骨折高齢者を含んだ（図 8）。

全ての対象者に重心動揺計上での IPS を測定した（図 4）。この時，健常若年者では軟性フォームラバー上で IPS を測定したが，高齢者に対しては課題難易度が高すぎるため，軟性フォームラバーは使用しなかった。

統計解析では，群（視覚フィードバックなし群，視覚フィードバックあり群）と時間（1 回目，2 回目）による 2 要因反復測定分散分析を実施し，IPS，安定性限界面積，重心動揺面積を比較した。さらに，Crawford-Howell 検定を使用して，視覚フィードバックあり群の中で，健常高齢者の集団データと脊椎圧迫骨折高齢者 2 名の個人データを比較した。Crawford-Howell 検定には R バージョン 4.5.0 を使用した。

その結果，IPS，安定性限界面積，重心動揺面積には，有意な交互作用と主効果を認めなかった（$p > 0.05$）。また，健常高齢者と脊椎圧迫骨折高齢者の集団―個人間比較では，脊椎圧迫骨折高齢者 A の視覚フィードバックありでの IPS と安定性限界面積は健常高齢者と有意な差を認めなかった（$p > 0.05$）。一方で，視覚フィードバックありでの重心動揺面積は健常高齢者と比較して有意に低値を示した（$p < 0.05$）。脊椎圧迫骨折高齢者 B の視覚フィードバックありでの IPS，安定性限界面積，重心動揺面積はいずれも健常高齢者と有意な差を認めなかった（$p > 0.05$）（図 9）。

バランス能力が高い対象者では，視覚フィードバックの効果が顕在化されないことが明らかになっている［4］。本検証で対象とした高齢者は，地域に在住する日常生活が自立した高齢者であった。そのため，比較的立位バランス能力が高く，視覚フィードバックを付与する効果が顕在化されなかった可能性がある。

一方で，脊椎圧迫骨折高齢者の筋力と感覚統合能力低下によって立位バランス能力が低下することが報告されている［9］。また，脊椎圧迫骨折高齢者では，視覚情報や上肢支持条件を操作することで姿勢制御戦略が変化することが明らかになっているが［10］，その一方で，姿勢制御時の感覚情報量を変化させると，姿勢制御における感覚再重みづけが変化し，姿勢制御能力が低下する可能性があることが示されている［11］。以上のことから，脊椎圧迫骨折高齢者に対する視覚フィードバックの付与は，感覚情報

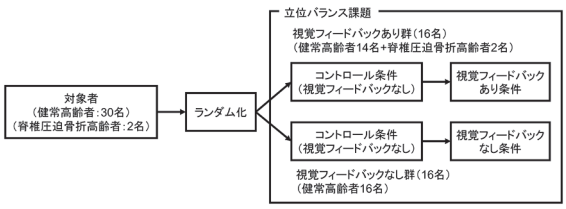


図 8　研究デザイン（検証 3）

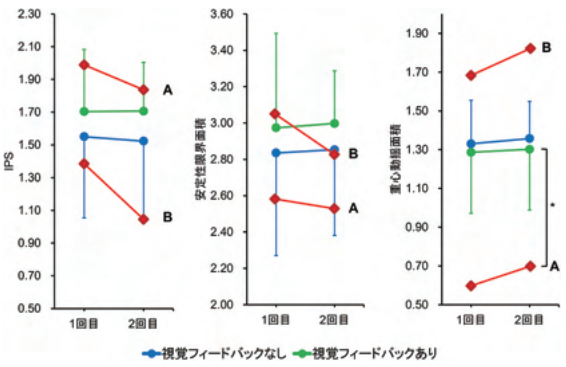


図 9　健常高齢者と脊椎圧迫骨折高齢者における重心動揺の比較（*：$p < 0.05$）

量を変化させることで立位バランス能力を低下させる可能性がある。しかしながら，本検証は2名での検証であり，そのうち1名のみで立位バランス能力が低下したことから，その効果には個人差がある可能性が示唆された。このように，脊椎圧迫骨折高齢者では，個人差はあるものの，視覚フィードバックを付与することで立位バランスが低下することが明らかになった。そのため，視覚フィードバックに対する影響・反応によって，脊椎圧迫骨折高齢者の感覚運動統合の特性や姿勢制御能力の脆弱性を顕在化させる評価ツールとして機能する可能性が示唆された。

［参考文献］

1. Riccio I, et al. Rehabilitative approach in patients with vertebral fragility fracture. Aging Clin Exp Res. 2013; 25 Suppl 1:S109-111.
2. Kasuga S, et al. Integration of proprioceptive and visual feedback during online control of reaching. J Neurophysiol. 2022;127(2):354-372.
3. 望月久・他．重心動揺計を用いた姿勢安定度評価指標の信頼性および妥当性．理学療法学．2000;27(6):199-203.
4. Dault MC, et al. Effects of visual center of pressure feedback on postural control in young and elderly healthy adults and in stroke patients. Hum Mov Sci. 2003;22(3):221-236.
5. Cavanagh JF, et al. Frontal theta as a mechanism for cognitive control. Trends Cogn Sci. 2014;18(8):414-421.
6. Miller J, et al. Anodal transcranial direct current stimulation (tDCS) increases frontal-midline theta activity in the human EEG: a preliminary investigation of non-invasive stimulation. Neurosci Lett. 2015;588:114-119.
7. Mierau A, et al. Cortical Correlates of Human Balance Control. Brain Topogr. 2017;30(4):434-446.
8. Hülsdünker T, et al. Higher Balance Task Demands are Associated with an Increase in Individual Alpha Peak Frequency. Front Hum Neurosci. 2016;9:695.
9. Kuo FC, et al. Center of Pressure Trace and Sensory Components of the Limits of Stability Test in Older Adults With Vertebral Compression Fractures. J Geriatr Phys Ther. 2020;43(1):24-31.
10. Błażkiewicz M, et al. The Impact of Visual Input and Support Area Manipulation on Postural Control in Subjects after Osteoporotic Vertebral Fracture. Entropy (Basel). 2021;23(3):375.
11. Assländer L, et al. Sensory reweighting dynamics in human postural control. J Neurophysiol. 2014;111(9): 1852-1864.

［研究助成（C）］

運動技能獲得支援に向けた共収縮の機能の解明
―高速性と正確性のトレードオフへの挑戦

2237005



研究代表者（助成金受領者）	東京大学 大学院新領域創成科学研究科	博士後期課程	須藤佑介
共同研究者	東京大学	助教	飯野要一
	東京大学	特任研究員	川本裕大
	法政大学	専任講師	木村新
	鹿屋体育大学	特任助教	鈴木智晴
	産業技術総合研究所	研究チーム長	村井昭彦
	東京大学	准教授	吉岡伸輔
	産業技術総合研究所	主任研究員	鷲野壮平

［研究の目的］

近年の我が国の少子化の進行を鑑みるに，熟練技能者の持つワザの伝承が途絶え，完全に失われてしまう恐れが高まっている。そのため，技能習得を支援するシステムの開発が求められているが，それには熟練技能者のもつ巧みな技能がいかなる身体運動の制御メカニズムで実現されているかを明らかにすることが重要である。そこで，あらゆる工芸，技芸，スポーツ等で重要となる，上肢をダイナミックに力強く動かす動作に焦点を当てる。本研究では，球速と投球位置の正確性の両方が求められる野球のピッチング動作を対象の動作とし，投球スピードによって投球位置の正確性が変化するメカニズムの解明を目的とした。

［研究の内容，成果］

・背景

多くの場合，動作の高速性と正確性を両立させることは難しい。動作を高速にするほど動作の正確性は低くなるため，正確性を高めるために人は動作スピードを落とす必要がある。この関係はSpeed-accuracy trade-off（SAT; e.g. Fitts 1954）と呼ばれており，リーチングやポインティング（指差し）課題などの比較的単純な動作では普遍的にみられる関係である。

ところが，上手投げの動作では必ずしもSATが成立しない。上手投げでの投擲を調べた先行研究ではSATを報告する研究（Etnyre, 1998; García et al., 2013）もある一方で，投球スピードと投球位置の正確性の間に関係がないとするもの（García et al., 2013; Van Den Tillaar & Ettema, 2003, 2006; Urbin et al. 2012）や，投球スピードと投球位置の正確性の間に逆U字の関係性を報告するもの（Indermill & Husak, 1984; Freeston et al., 2007; Freeston & Rooney, 2008）もある。特に速さと正確性の逆U字の関係を示す，すなわち高速投球時だけでなく低速投球時にも投球位置の正確性が低下するという事実は，SATの原則から逸脱するものである。本研究では投球スピードと投球位置の正確性の間に逆U字の関係が生じるメカニズムの

解明を目指す。先行研究で逆U字型の関係が示された動作はクリケットの投球であるが，本研究では実験参加者の募集の兼ね合いから，投球距離やスピードが似ている野球のピッチングを対象動作とした。

・分析枠組み

人がターゲットに向かって投球したとき，ターゲットを含む面（ターゲット面）上にボールが当たる位置（投球位置）はボールが手から離れた瞬間（リリース時）に決まっている。これは，手から離れたボールはリリース時のボール位置や速度などの運動学的変数（リリース変数）を初期条件として重力や空気抵抗，揚力などに力学的な要因に従って運動するためである。したがって，ボールをターゲットに投球するということは，ターゲットに当たるようにリリース変数を調整することにほかならない。

この事実に基づくと，リリース変数と投球位置の正確性の間の関係性は数式を用いて表現できる。まず，リリース変数（$\boldsymbol{z}$）と投球位置（$\boldsymbol{y}$）の関係を関数fを用いて次のように表せる。

$$\boldsymbol{y} = f(\boldsymbol{z}).$$

この関数を局所線形化した際，誤差伝播の関係式は次のように表せる。

$$\boldsymbol{\Sigma}_y = \boldsymbol{J}\boldsymbol{\Sigma}_z\boldsymbol{J}^T.$$

ただし$\boldsymbol{\Sigma}$は添え字の分散共分散行列を表し，$\boldsymbol{J}$（$= \boldsymbol{\delta f(z)}/\boldsymbol{\delta z}|_{\bar{z}}$；$\bar{z}$：リリース変数の平均値）はヤコビ行列を表す。

この式より，投球位置のばらつき方（$\boldsymbol{\Sigma}_y$）は，リリース変数のばらつき方（$\boldsymbol{\Sigma}_z$）と，リリース変数と投球位置を結び付ける関数の性質（$\boldsymbol{J}$）により決まることがわかる。以下では平均的な投球位置はターゲットから逸脱していない状況，すなわち投球位置がターゲットを中心としてばらついている状況を考える。

この式より，投球位置の正確性を決める要因は，物理的には以下の三つの要因に分解できる。

①ボールが手指から離れる（リリース）瞬間のボールの位置や速度（リリース変数）のばらつきの大きさ

②リリース変数の誤差がボール到達位置の誤差に与える影響の大きさ（変換比；幾何学的感度）

③リリース変数間の共変動による相殺効果

これら3つの効果を直感的に理解するためにゴルフパッティングを例にとる（図1）。打球位置とホールを結ぶレーンの両側が下り斜面であるような場合には，わずかな射出角度のずれが大きな到達位置の誤差を生む（図1左下）。反対に打球位置とホールを結ぶレーンに向かって斜面が下っている場合は，射出角度に多少のずれがあってもレーンに押し戻されるため最終的なボール到達位置の誤差は小さくなる（図1右下）。この例が示すように，ボール射出変数（この例では射出角度）の誤差が同じであっても，その「変換比（幾何学的感度）」の様相によっては，ボール到達位置の誤差は変化する。また，内向きの斜面の場合，まっすぐに打ち出すほかに，左右に射出角がずれても射出スピードを適切に調整する（共変動させる）ことで誤差を相殺し，カップインさせることもできる。このように，ゴルフではボールの打ち出しのば

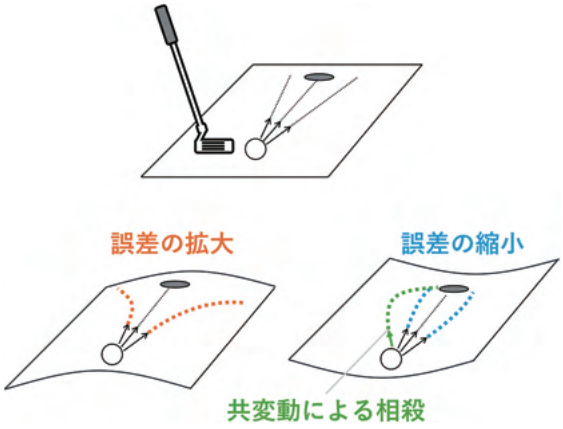


図1　ゴルフのパッティングにおける打ち出し誤差への幾何学的感度や共変動の例。平坦な地形（上）の場合に比べて，地形によっては打ち出した角度のずれの影響は増幅されたり（左下），縮小されたり（右下；青点線）する。また，打ち出しスピードと角度を共変動させることで互いの誤差を相殺することもできる（右下；緑点線）。

らつきだけでなく，誤差の変換比（幾何学的感度）や，共変動による誤差の相殺も，到達位置の正確性を決める要因である。野球のピッチングの場合においても同様に，リリース変数のばらつきだけでなく，誤差の変換比（幾何学的感度）や，スピードと投げ出し角度の間の共変動も投球位置の正確性を決める要因である。本研究では，これらの三要素の組み合わせから，野球ピッチングにおいて高速時だけでなく低速時にも投球の正確性が低下するメカニズムの説明を試みる。

・実験方法

アマチュアの硬式野球投手 13 名(男性；身長：177 ± 6 cm；体重：76.7 ± 7.5 kg；年齢 19.7 ± 1.4 歳；野球歴：11.4 ± 2.3 年；投手歴：7.8 ± 3.0 年）による上手投げのピッチングを対象に，投球スピードと投球位置の正確性の関係を検証した。参加者は最大スピードの 50%，65%，80%，100% に相当する 4 条件でストレートを実際の投球を模した環境）にて投球し，モーションキャプチャ装置により全身運動とボールの運動を計測した（図 2ac）。ターゲット面（図 2b）における投球位置を計測し，全誤差と左右（Y）・上下（Z）方向別の誤差を評価した。さらに，速度変数の幾何学的感度および標準影響度，速度の三要素間の共変動指数を算出し，投球スピード条件間で比較した。

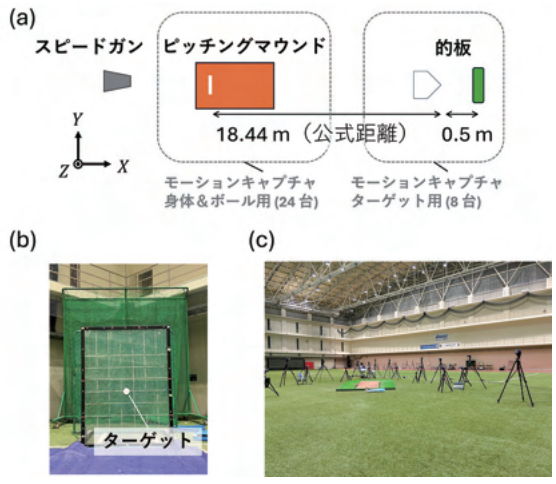


図 2　(a) 実験環境俯瞰図 (b) 投球のターゲット面 (c) 実験場。

・結果

投球誤差の大きさは，規格化スピードに対して有意な二次関数関係を示し，約 80% のスピード条件で最小となる U 字型の関係が確認された（図 3）。この関係は上下方向（Z）の誤差に起因しており，左右方向（Y）では有意な二次項は認められなかった。各スピード条件における平均投球位置はいずれもターゲット近傍に維持されていたことから，スピードに伴う正確性の変化は主として試行間のばらつき（変動誤差）の変化によって生じていた。リリース変数のばらつきに関しては，リリーススピードや速度方位角の標準偏差に明瞭な条件差はみられなかった一方で，速度仰角の標準偏差は 50% 条件で 65，80，100% 条件より有意に大きかった（図 4）。

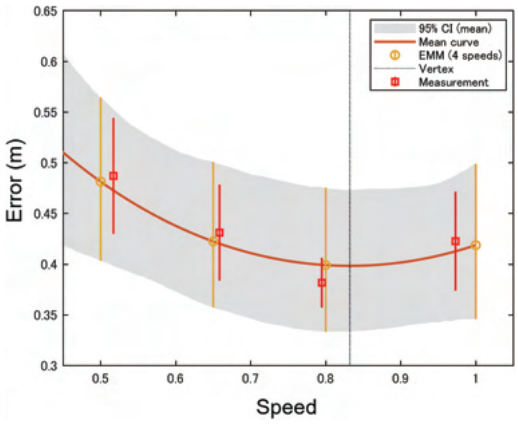


図 3　標準化投球スピードと投球誤差の関係

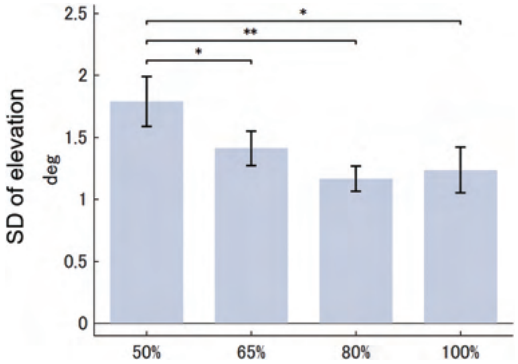


図 4　スピード条件ごとのリリース角度のばらつきの大きさ。

幾何学的感度の解析（Sudo et al., 2026）では，上下方向の投球位置に対するリリーススピードの感度が低速条件ほど大きく，100% 条件に対して 50% 条件で約 8 倍に達すること，標準影響度も同様に低速条件で増大することが示された（図 5）。さらに，速度の各成分（スピード・方位角・仰角）間の共変動については，投球位置のばらつきを共変動が低減させた量を定量できる共変動指数（Müller & Sternad, 2003）を算出した。その結果，スピードと仰角の間の負の相関の結果として低速条件における上下方向の投球位置のばらつきが最大で約 25% 低減し，投球スピードの上昇につれ共変動によるばらつきの低減効果は減少していった（図 6）。しかしながら，投球スピードと速度仰角の間の負の相関関係は低速条件だけでなく高速条件でも維持されていた（図 7）。

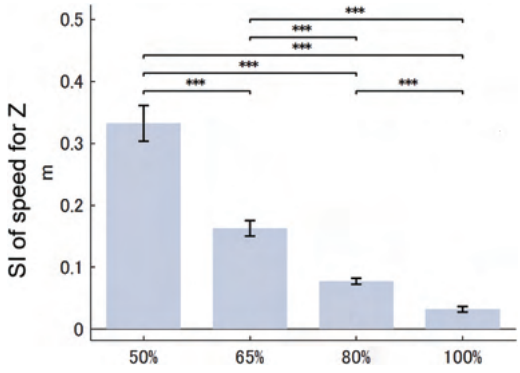


図 5　スピード条件ごとの Z（鉛直方向）の感度（標準影響度；SI）。

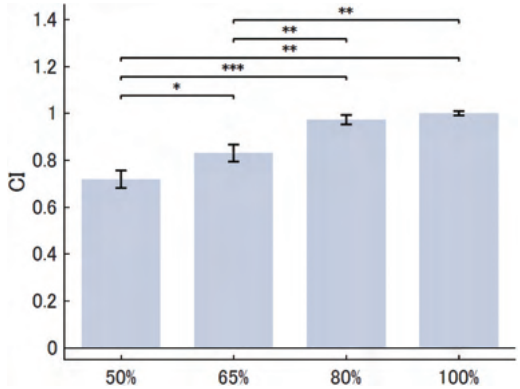


図 6　スピード条件ごとの共変動指数（CI）。1 より小さいほど共変動による投球位置のばらつきの低減効果（相殺効果）が大きい。

・考察

これらの結果を統合すると，野球ピッチングにおける投球スピードと投球誤差の U 字型関係は，(1) 低速条件ではリリーススピードへの幾何学的感度が高く，かつ仰角のばらつきが大きいことによって誤差が増大する一方，(2) スピード－仰角の負の共変動が低速条件において誤差を部分的に打ち消すことで誤差を低減し，(3) スピードが増すにつれて幾何学的感度が低下する一方で共変動の誤差低減効果が弱まることにより，約 80% スピード付近で誤差が最小化されるというメカニズムによって説明される（図 8）。また，全力投球時の制球力が高い投手ほど，80% から 100% へのスピード上昇に伴う誤差の増大が小さいことから，制御の難しい高速投球においても射出変数のばらつきを抑制しうる制御能力の個人差が示唆された。

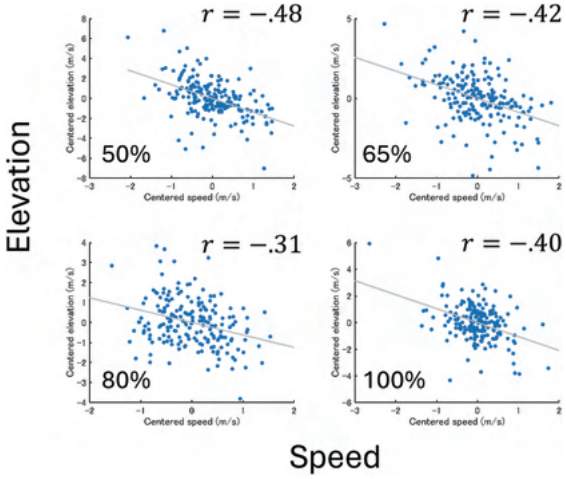


図 7　スピード条件ごとの投球スピードと速度仰角の相関

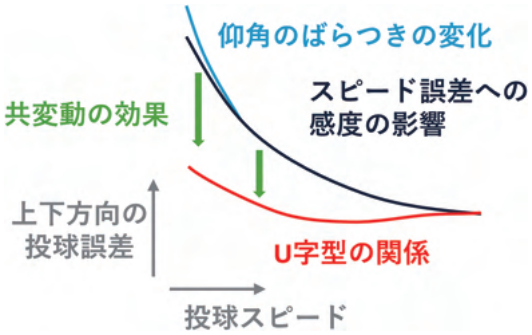


図 8　投球スピードと投球誤差に U 字型関係が生じるメカニズムの概念図。

投球スピードと速度仰角の相関分析の結果からは，低速条件においてみられた共変動による相殺効果が必ずしも運動学習の成果ではない可能性が示唆された。共変動による相殺は，従来は運動学習の結果によって利用が高まると考えられてきた（e.g., Kudo et al, 2000）。しかしながら，投球スピードと速度仰角の負の相関はどのスピード帯にも同程度の大きさで観察された（図 7）。したがって，低速条件にて特異的に共変動が利用されたというよりも，あらゆるスピード帯において投球スピードと速度仰角は共変するが，高速になるほどスピードの変動の影響が小さくなることから（図 5），高速条件において共変動による相殺がみられなくなったと解釈できる。

・参考文献

Etnyre, B. R. (1998). Accuracy characteristics of throwing as a result of maximum force effort. Perceptual and Motor Skills, 86(3 Pt 2), 1211–1217.

Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. Journal of Experimental Psychology, 47(6), 381–391.

Freeston, J., Ferdinands, R., & Rooney, K. (2007). Throwing velocity and accuracy in elite and sub-elite cricket players: A descriptive study. European Journal of Sport Science, 7(4), 231–237.

García, J. A., Sabido, R., Barbado, D., & Moreno, F. J. (2013). Analysis of the relation between throwing speed and throwing accuracy in team-handball according to instruction. European Journal of Sport Science, 13(2), 149–154.

Indermill, C., & Husak, W. S. (1984). Relationship between speed and accuracy in an over-arm throw. Perceptual and Motor Skills, 59(1), 219–222.

Kudo, K., Tsutsui, S., Ishikura, T., Ito, T., & Yamamoto, Y. (2000). Compensatory coordination of release parameters in a throwing task. *Journal of Motor Behavior, 32*, 337–345.

Müller, H., & Sternad, D. (2003). A randomization method for the calculation of covariation in multiple nonlinear relations: Illustrated with the example of goal-directed movements. Biological Cybernetics.

Urbin, M. A., Stodden, D., Boros, R., & Shannon, D. (2012). Examining impulse-variability in overarm throwing. Motor Control, 16(1), 19–30. https://doi.org/10.1123/mcj.16.1.19

van den Tillaar, R., & Ettema, G. (2003). Influence of instruction on velocity and accuracy of overarm throwing. Perceptual and Motor Skills, 96(2), 423–434.

van den Tillaar, R., & Ettema, G. (2006). A comparison between novices and experts of the velocity-accuracy trade-off in overarm throwing. Perceptual and Motor Skills, 103(2), 503–514.

［成果の発表，論文など］

論文（査読有）

Sudo, Y., Kawamoto, Y., Iino, Y., & Yoshioka, S. Mechanisms of speed-accuracy trade-off in tennis topspin forehand of college players. *Sports Biomechanics*, *25*(1), 83–104, 2026.

国際学会における発表

Sudo, Y., Kawamoto, Y., Iino, Y., Yoshioka, S., Murai, A. “Exploring the Speed-Accuracy Relationship in Overarm Throwing: Minimizing the Impact of Ball Flight Dynamics”. The 29th Annual Congress of the European College of Sport Science, Scotland, July 2024.

［研究助成（C）］

深層学習を用いたOCTにおける網膜下液のセグメンテーションと黄斑浮腫早期診断

2247011



研究代表者（助成金受領者）　京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科　博士後期課程　XUE XIAOZHONG
共同研究者　京都工芸繊維大学 情報工学・人間科学系　准教授　杜　偉薇

［研究の目的］

1. 必要性：

光干渉断層撮影（OCT）は，光干渉の原理を利用して生体組織を高解像度で断層的に描出できる非侵襲的イメージング技術であり，特に眼科領域において網膜の詳細な観察に広く活用されている［1］。また，図1に示すように，OCTデータは三次元的に再構成することが可能であるが，臨床においては，通常，断層像を一層ずつ観察する。この断層像はBスキャンと呼ばれ，そこから網膜疾患に関連する液体領域を確認できる。

液体領域は，加齢黄斑変性症（AMD），網膜静脈閉塞症（RVO），糖尿病網膜症（DR）といった主要な網膜疾患の診断や病態把握において重要なバイオマーカーとされている［2］。その精度の高いセグメンテーションは，自動化診断システムの開発において不可欠である。また，液体領域の体積および範囲は，臨床医が処方する抗VEGF薬の投与量に直接影響を与えることが知られている［3］。さらに，既存の研究では，液体領域の大きさが患者の視力予後と有意に関連していることが報告されている［4］。したがって，液体領域の高精度かつ効率的なセグメンテーションは，眼科において不可欠である。

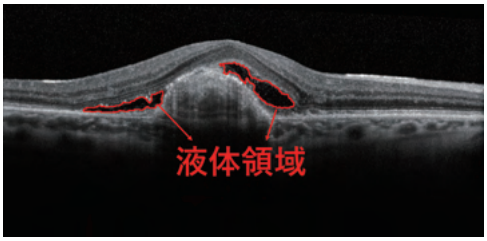


図1　OCTBスキャン

2. 難点：

液体領域のセグメンテーションに関しては，いくつかの研究が行われてきた。一部の研究では，アクティブ輪郭モデルなどの従来手法が用いられている［5］。

従来手法と比較して，深層学習手法は優れた頑健性と有効性を示しており，液体領域のセグメンテーションに多数のモデルが適用されている。その中にはU-Netが含まれるが［6］，U-Netは細部領域のセグメンテーション性能において依然として改善の余地がある。また，Transformerに基づくモデルも提案されているが，これらは計算量が非常に大きく，臨床応用には制約がある［7］。

総じて，図2に示すように，OCT Bスキャンから液体領域をセグメンテーションする際には，以下の三つの主要な課題が存在する。

- **微細領域**：液体領域と周囲組織との境界が不明瞭になりやすい。これらの領域は深層学習モデルによって見落とされたり，誤分類されたりする可能性が高い。
- **異質性**：血液，漿液，その他の生体成分の比率の違いなど内部構成の変動により，液体領域は反射率の異なる部分を示す場合がある。深層学習モデルは液体領域のより一貫性のあ

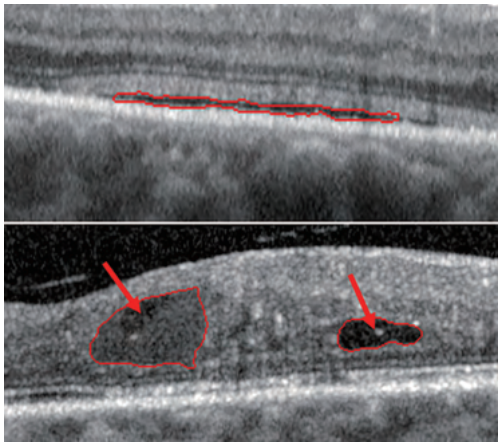


図 2　液体領域セグメンテーションにおける難点

る部分のみをセグメンテーションする可能性がある。

・**深さ情報**：液体領域の境界をより精密に描出するためには，隣接スライス間での構造的連続性を提供する体積的（3D）文脈を取り入れることが有効である。しかし，OCT 全体ボリュームを処理する場合，モデルの複雑性，メモリ消費量，および学習の難易度が大幅に増加する。

総じて，本研究の目的は，液体領域のセグメンテーションにおける微細領域，異質性，および深さ情報という三つの課題を克服し，液体領域のセグメンテーション精度を向上させることであり，これにより黄斑浮腫などの網膜疾患の自動診断の基盤を構築することである。

［研究の内容，成果］

本研究では，多次元損失関数に基づく Y 字型アーキテクチャ「**Fluid-SegNet**」を提案する。多次元損失関数は，デコーダの各段階における**微細特徴の損失を軽減**し，細部の構造を保持することを目的としている。Y 字型アーキテクチャは二つエンコーダを組み込み，2D および 2.5D 入力から**テクスチャ情報と文脈情報**を同時に抽出可能である。さらに，モデル内部には拡張畳み込みを採用し，**受容野を拡大する**ことで，液体領域の異質性特徴の捉える能力を向上させている。

提案モデルの有効性は，2 つの公開データセット（UMN［8］［9］および AROI［6］）を用いて検証した。UMN データセットにおいて平均 Dice 係数 0.8725，AROI データセットにおいて平均 Dice 係数 0.6967 を達成した。さらに，OIMHS［10］データセットにおいて，UMN データセットで事前学習を行ったモデルを小規模な OIMHS サブセットでファインチューニングした場合，平均 Dice 係数 0.8020 を達成した。これらの結果は，Fluid-SegNet が液体領域セグメンテーションにおいて優れた性能と高い汎化能力を有することを示している。

1．提案法：

図 2 に示す Fluid-SegNet は，2D エンコーダ，2.5D エンコーダ，特徴融合モジュール，およびデコーダから構成される。

2D エンコーダは，2D OCT B-scan から特徴を抽出することを目的として設計されており，特徴抽出ユニットとダウンサンプリング層から構成される。各特徴抽出ユニットは拡張畳み込み層を含み，これにより受容野を拡張することが可能となる。大きな受容野を有することにより，モデルは液体領域の境界と異質性領域の境界を同時に観察することが可能となり，その結果，セグメンテーション時に異質性領域の影響を回避することができる。一方，2.5D エンコーダは 2.5D OCT B-scan から特徴を抽出するために設計されており，その主たる目的は深度方向の特徴を捉えることである。特徴融合モジュールは，2D エンコーダおよび 2.5D エンコーダによって対応する次元で抽出された特徴を統合し，スキップ接続を介して融合された特徴マップをデコーダへ伝達する役割を担う。最後に，デコーダはエンコーダによって抽出された特徴を入力画像の元の空間解像度に再構築し，最終的なセグメンテーション結果を出力する。

モデルのトレニングにおいては，二種類の

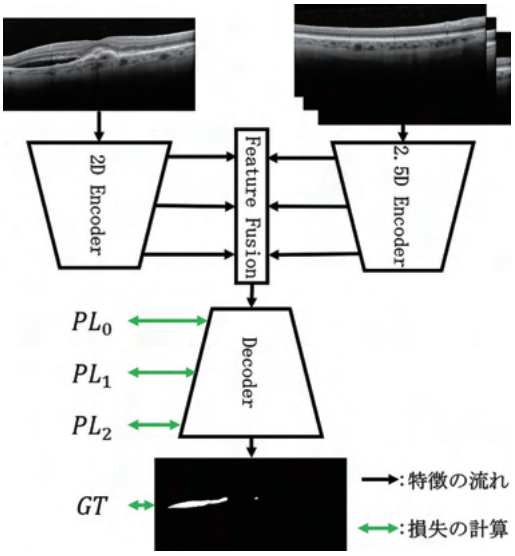


図3　Fluid-SegNet

教師信号を使用した。ひとつは擬似ラベル（PL），もうひとつは医師による手動アノテーション（GT）である。擬似ラベルを用いたトレニンーグでは，提案する多次元損失関数を用いてデコーダの各次元に対してモデル出力を監督し，デコーディング過程で特徴の損失を防ぎ，微細領域のセグメンテーション精度を向上させる。擬似ラベルを教師信号として使用する際には，損失関数としてSmooth L1を採用した。一方，GTを教師信号として使用する場合には，Dice損失とクロスエントロピー損失の加重和を損失関数として用いた。

2. 評価方法：

本研究では，セグメンテーション結果の精度を評価するために，Dice，Precision，Recallの3種類の評価指標を用いた。各指標の具体的な定義は式(1)，(2)，(3)に示す。ここで，SRはセグメンテーション結果を，GTは医師による手動アノテーションの基準を，TPは真陽性を，FPは偽陽性を，FNは偽陰性をそれぞれ表す。

$$Dice = \frac{2|SR \cap GT|}{|SR| + |GT|} \tag{1}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \tag{2}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{3}$$

Diceは液体領域のセグメンテーション結果とGT（Ground Truth）との類似度を測定する指標である。Precisionは，オーバーセグメンテーションの程度を評価する上で有効である。Recallは，アンダーセグメンテーションの程度を評価する上で有効である。

3. 結果：

提案するFluid-SegNetの有効性は，**5分割交差検証法**を用いて2つの公開データセット（UMNおよびAROI）上で検証した。さらに，別の公開データセットであるOIMHSを用いて**クロスデータセット検証**を実施した。

提案法のセグメンテーション精度を評価するために，8種類のモデルをベースラインとして比較を行った。まず，**医学画像セグメンテーション**において広く利用されている一連のモデルとして，U-Net，U-Net++，およびU-Net+++を用いた。次に，**Self-Attention**に基づくSwin-Unetと，**Mamba**に基づくVmamba-Unetを取り上げた。二つのモデルは，いずれも画像セグメンテーションにおいて既に成熟した応用実績を有している。最後に，**関連研究において**提案されたImproved U-Net++，SE-Unet，FAM-U-Netの三種類のモデルを比較対象とした。ただし，Swin-UnetとImproved U-Net++はUMNデータセットにおいて他のモデルと比べて顕著に劣る性能を示したため，AROIデータセットおよびOIMHSデータセットにおいては，この二つのモデルに関する議論は行わないこととした。

表1，表2および表3に示すように，提案するFluid-SegNetは，UMN，AROI，OIMHSの三つの公開データセットにおいて，いずれも最大のDice値およびPrecision値を達成した。Diceの向上は，提案法が液体領域セグメンテー

表 1　UMN データセットにおける結果

モデル	Precision	Recall	Dice
U-Net	0.8822	0.8573	0.8555
U-Net++	0.8910	0.8569	0.8434
U-Net+++	0.8244	0.9001	0.8490
Swin-Unet	0.6714	0.5700	0.5579
Vma-Unet	0.8592	0.8236	0.8218
Im-U-Net++	0.8444	0.4057	0.4741
SE-Unet	0.8713	0.8644	0.8559
FAM-U-Net	0.7620	**0.9179**	0.8094
Proposed	**0.8944**	0.8684	**0.8725**

表 2　AROI データセットにおける結果

モデル	Precision	Recall	Dice
U-Net	0.7062	0.6678	0.6588
U-Net++	0.7320	0.6364	0.6470
U-Net+++	0.7061	**0.7054**	0.6744
Vma-Unet	0.6150	0.6245	0.5783
SE-Unet	0.7186	0.6609	0.6563
FAM-U-Net	0.6974	0.6654	0.6499
Proposed	**0.7472**	0.6994	**0.6967**

表 3　OIMHS データセットにおける結果

モデル	Precision	Recall	Dice
U-Net	0.8161	0.7925	0.7885
U-Net++	0.8357	0.7752	0.7879
U-Net+++	0.7325	0.8840	0.7834
Vma-Unet	0.7901	0.7107	0.7285
SE-Unet	0.8234	0.7859	0.7881
FAM-U-Net	0.7025	**0.8867**	0.7597
Proposed	**0.8482**	0.7839	**0.8020**

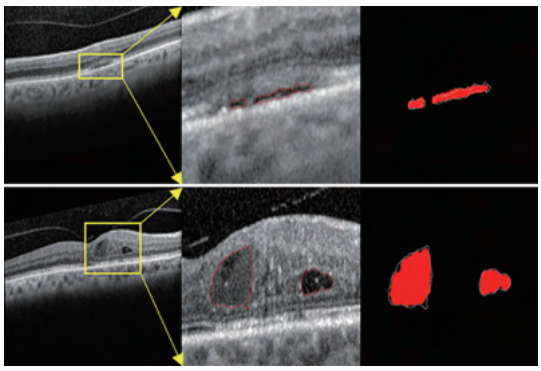


図 4　結果の例図（赤面：セグメンテーション結果。赤線と白線：GT）

ションにおいて優れた性能を有することを示している。Precision の最大は，最も低いアンダーセグメンテーションを示している。アンダーセグメンテーションは通常，背景ノイズが誤って前景としてセグメンテーションされるため，Precision の向上は提案法のノイズに対するロバスト性を反映している。

そして，三つのデータセットにおいて Fluid-SegNet の平均 Recall は最大値には達しなかったものの，他のモデルにおいては，高い Recall が顕著な Precision の低下を伴う傾向が見られた。この現象は，これらのモデルが液体領域の特徴抽出に不十分であり，セグメンテーション戦略がよりアグレッシブとなることで，より多くの領域を誤って前景として分類していることを示す。

これに対し，Fluid-SegNet は Precision を最高水準に保ちながら，なお高い Recall を維持しており，提案法の有効性をさらに実証することができる。液体領域セグメンテーションにおいて Recall が低下する主な要因は，(1) 面積の小さい液体領域やその細部がモデルにより無視される，(2) 液体領域内の異質性の部分が無視される，の二点である。Fluid-SegNet が高い Recall を示したことは，提案法が細部特徴を効果的に抽出できることを明確に示している。

さらに，図 4 からも同様の結論が得られ，提案する Fluid-SegNet は微細領域および異質性領域のセグメンテーション精度を改善していることが確認できる。

4. 結論及び展望：

本研究では，OCT Bスキャンから 2 次元特徴と深度特徴を効果的に抽出する Y 字型アーキテクチャを特徴とする新規深層学習モデル Fluid-SegNet を提案する。本モデルは，多次元損失関数を導入することで精緻な特徴の抽出を強化し，さらに拡張畳み込みを用いることでモデルの複雑性を増加させることなく受容野を拡張する。提案モデルの有効性は，3 つの公開データセットにおいて検証され，Fluid-SegNet が精度を向上させるとともに，液体領域のセグ

メンテーションにおける二つの課題，（1）微細領域がモデルによって見落とされやすい点，(2) 液体領域の異質性に起因するアンダーセグメンテーション，を克服することが示された。さらに，Fluid-SegNet は自動診断システムや自動投薬支援システムの開発に向けた基盤を提供する。将来的な研究計画は，本提案した Fluid-SegNet に基づき，黄斑浮腫の自動診断システムを開発し，**臨床で本研究の有効性を検証する**。

［参考文献］

［1］Fujimoto, J., & Swanson, E. (2016). The development, commercialization, and impact of optical coherence tomography. *Investigative ophthalmology & visual science*, 57(9), OCT1–OCT13.

［2］Gupta, M. P., Herzlich, A. A., Sauer, T., & Chan, C. C. (2016). Retinal anatomy and pathology. *Dev Ophthalmol*, 55, 7–17.

［3］Tah, V., Orlans, H. O., Hyer, J., Casswell, E., Din, N., Sri Shanmuganathan, V., ... & Pasu, S. (2015). Anti-VEGF therapy and the retina: an update. *Journal of ophthalmology*, 2015(1), 627674.

［4］Alasil, T., Keane, P. A., Updike, J. F., Dustin, L., Ouyang, Y., Walsh, A. C., & Sadda, S. R. (2010). Relationship between optical coherence tomography retinal parameters and visual acuity in diabetic macular edema. *Ophthalmology*, 117(12), 2379–2386.

［5］Taubaldy, N., & Ji, Z. (2018, June). Beyond Retinal Layers: An Automatic Active Contour Model with Pre-Fitting Energy for Subretinal Fluid Segmentation in SD-OCT Images. In *2018 IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)* (pp. 326–330). IEEE.

［6］Melinščak, M., Radmilović, M., Vatavuk, Z., & Lončarić, S. (2021). Annotated retinal optical coherence tomography images (AROI) database for joint retinal layer and fluid segmentation. *Automa-tika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, 62(3-4), 375-385.

［7］Xue, X., & Du, W. (2024, January). Retinal fluid segmentation from OCT B-scan using swin-unet. In *2024 2nd International Conference on Computer Graphics and Image Processing (CGIP)* (pp. 1–6). IEEE.

［8］Rashno, A., Nazari, B., Koozekanani, D. D., Drayna, P. M., Sadri, S., Rabbani, H., & Parhi, K. K. (2017). Fully-automated segmentation of fluid regions in exudative age-related macular degeneration subjects: Kernel graph cut in neutrosophic domain. *PloS one*, 12(10), e0186949.

［9］Rashno, A., Koozekanani, D. D., Drayna, P. M., Nazari, B., Sadri, S., Rabbani, H., & Parhi, K. K. (2017). Fully automated segmentation of fluid/cyst regions in optical coherence tomography images with diabetic macular edema using neutrosophic sets and graph algorithms. *IEEE Transactionson Biomedical Engineering*, 65(5), 989–1001.

［10］Ye, X., He, S., Zhong, X., Yu, J., Yang, S., Shen, Y., ... & Shen, L. (2023). Oimhs: An optical coherence tomography image dataset based onmacular hole manual segmentation. *Scientific Data*, 10(1), 769.

［成果の発表，論文など］

［1］薛 暁仲，杜 偉薇，三宅 正裕，佐渡 恵奈．OCT の B スキャンにおける液体領域のセグメンテーション．第 5 回日本眼科 AI 学会総会．2025．査読あり．

［2］Xiaozhong Xue, Weiwei Du, Qinghua Hu, Masahiro Miyake, and Keina Sado. Fluid-SegNet: Multi-dimensional loss-driven Y-Net with dilated convolutions for OCT B-scan fluid segmentation. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, Vol. 124, 102613, 2025. IF: 4.9.

［研究助成（C）］

大脳駆動型および小脳駆動型運動学習における VR から実環境への運動学習転移

2237006



研究代表者（助成金受領者）	大分大学　大学院医学系研究科	博士後期課程	竹　尾　雄　飛
共同研究者	大分大学福祉健康科学部 理学療法コース	准教授	菅　田　陽　怜
	埼玉大学大学院理工学研究科	教授	原　　正　之

［研究の目的］

仮想環境（VE）は，「その場に実際に存在している」という感覚をユーザーに与えることで，現実環境（RE）に近い心理的体験を生み出すことができる[1]。VE は適用性と拡張性から，脳卒中後片麻痺患者の運動機能の改善など，リハビリテーションにおける新たな治療アプローチとして期待されている。先行研究では，VE における運動学習の促進が報告されている[2]。一方で，VE と RE 間における運動学習の転移について，RE から VE への転移，VE から RE への転移，あるいは転移が認められないなど，転移の方向性や有無に関して未だ統一した見解は得られていない[3-5]。我々はこれまでに，VE と RE の間における系列運動学習の転移について検討した。その結果，RE で獲得した系列運動学習が VE へ転移することを明らかにした[6]。しかしながら，系列運動学習は運動学習の一形態に過ぎない。系列運動学習課題に加え，運動学習を評価する代表的な課題として感覚運動適応課題がある。系列運動学習課題では運動野，感覚運動野，小脳，被殻などが関与する一方，感覚運動適応課題では運動野，補足運動野，小脳などが関与することが報告されており[7]，両課題ではそれぞれ異なる神経基盤によって支えられる課題特異的な学習過程を伴う可能性が示唆されている。

以上を踏まえ，本研究では，VE と RE の間における運動学習の転移は，関与する神経基盤の異なる課題の種類によって異なるという仮説を立て，感覚運動適応課題を用いて VE と RE の間で運動学習の転移が生じるかどうかを明らかにすることを目的とした。

［研究の内容，成果］

1. 対象

28 名の右利きの健常者が本研究に参加した。ヘルシンキ宣言に準拠し，実験内容を説明し，同意が得られた被験者にのみ実験を行った。なお，本研究は大分大学医学部倫理委員会で承認を受けたプロトコールにしたがって実施した。

2. 実験手順

参加者は，RE におけるレバー操作課題と，VE における腕到達課題の下記の 2 種類の感覚運動適応課題を行った。

i）RE における感覚運動適応課題（図 1）

参加者は，レバー型コントローラー（Extreme 3D Pro Joystick，株式会社ロジクール）を備えた机の前に座り，ターゲットおよびカーソルの動きが表示されたモニターを正面に見ながら課題を実施した。モニターには，円形の開始位置（ベースポイント）が表示された。参加者がカーソルをベースポイントから 10 mm 以内の位置

に 1,000 ms 間保持すると，ベースポイントは消失し，ベースポイントを中心とする半円上に等間隔で配置された 3 つの円形ターゲットのうち 1 つが提示された。ターゲットの提示をもって試行開始とした。参加者には，2,500 ms 以内に，できるだけ速く，かつ最短軌道でカーソルをターゲットまで移動させるよう指示した。カーソルがターゲットに到達するまでを 1 試行とし，各 Block は 10 試行で構成した。Block1–5 では，カーソルの移動方向は手の移動方向と一致していた。一方，Block6–10 では，参加者に気付かれないように，カーソルの移動方向を手の移動方向に対して反時計回りに 30° 回転させた。

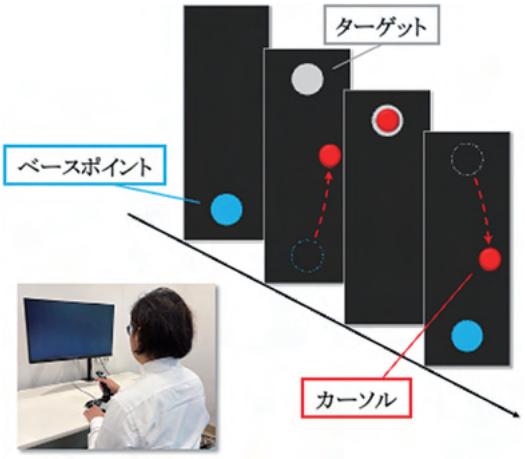


図 1　RE における感覚運動適応課題の概要

ii）VE における感覚運動適応課題（図 2）

参加者はヘッドマウントディスプレイ（Oculus Quest 2，Oculus）を装着し，あらかじめ設定された位置に椅子に座った。この位置は，最小限の腕の動きですべてのターゲットおよびベースポイントに到達できるように調整した。VE は Unity（Unity 2018.3.3f1，Unity Technologies）を用いて構築した。参加者が仮想右手をベース半球内に 1,000 ms 間保持すると実験試行が開始され，ベースポイントが消失した。ベースポイントが消失すると，ベースポイントを中心とする半円上に等間隔で配置された 3 つの円形ターゲットのうち 1 つが提示された。参加者には，実際の右手位置と重なるように表示された仮想右手を，指定されたターゲットに向かって，できるだけ速く，かつ正確に到達させるよう指示した。ターゲットに到達すると直ちにベースポイントが再表示され，参加者はそのベースポイントに触れることで次の試行を開始できた。RE における感覚運動適応課題と同様に，VE における 1 試行は，運動開始から仮想右手がターゲットに到達するまでの期間と定義し，各 Block は 10 試行で構成した。Block1–5 では，仮想右手の視覚フィードバックは参加者の実際の手の動きと一致していた。

一方，Block6–10 では，参加者に気付かれないように，仮想右手の視覚フィードバックを実際の手の移動方向に対して反時計回りに 30° 回転させた。

参加者は，無作為に RE–VE 群または VE–RE 群のいずれかに割り付けられた。RE–VE 群は RE 課題を先に実施し，その後 VE 課題を実施した。一方，VE–RE 群は VE 課題を先に実施し，その後 RE 課題を実施した。すべての実験終了後，参加者にはバーチャルハンド錯覚（Virtual Hand Illusion；VHI）質問票への回答を求めた。

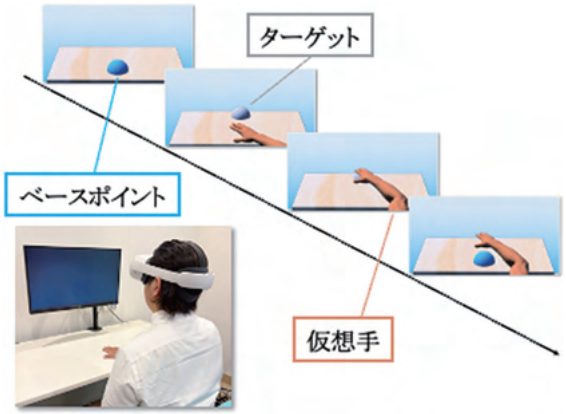


図 2　VE における感覚運動適応課題の摘要

VHI 質問指標

参加者が仮想右手を動かしている際の主観的体験は，Botvinick と Cohen（1998）が開発したオリジナルのラバーハンド錯覚（Rubber Hand Illusion：RHI）質問票に基づいて作成し

た質問票を用いて評価した[8]。参加者は，VHI 質問票に回答した。回答には，–3 から +3 までの 7 件法リッカート尺度を用いた。–3 は「設問の内容に全く同意しない」，+3 は「設問の内容に強く同意する」，0 は「どちらともいえない」を示した。錯覚に関連する項目では，実験中における仮想手に対する身体所有感（Body Ownership：Q1）および運動主体感（Sense of Agency：Q2）を評価した。一方，残りの項目（Q3–Q6）は VHI とは直接関係のない内容であり，被暗示性を評価するための統制項目として設定した。被暗示性とは，質問項目の内容に関わらず，参加者がすべての質問に対して類似した評価を行う傾向を指す。

項目	質問内容	分類
Q1	仮想の手がまるで自分自身の手であるかのように感じた	身体所有感
Q2	仮想の手の動きが自分の手の動きと一致した	運動主体感
Q3	手が大きくなっているように感じた	統制
Q4	自分の手を感じることができなかった	
Q5	自分の手がまるで仮想化していると感じた	
Q6	自分の手がまるで移動しているかのように感じた	

3. 解析

3.1 運動学習能力の評価

ベースポイントからターゲット位置までを結ぶ直線と，外向き速度が最大となった時点（最大速度座標）における運動方向を示す直線とのなす角度を方向誤差と定義し，各 Block における平均方向誤差を算出した（図 3）[9]。さらに，Block1–5 の平均方向誤差をベースラインと定義し，各 Block における方向誤差からベースラインを差し引いた値を算出し，解析に用いた。

3.2 統計解析

統計解析には，MATLAB（R2021b）および JASP（version 0.97.1）を使用した。まず，方向誤差に対する時間（Block6–10）および課題実施順序（RE–VE 群 vs. VE–RE 群）の影響を検討するため，二元配置反復測定分散分析を実施した。球面性の仮定が満たされなかった場合には，自由度に対して Greenhouse–Geisser 補正を適用した。有意な主効果または交互作用が認められた場合には，事後検定を実施し，交互作用の詳細について検討した。次に，VHI 質問票の各質問項目（Q1–6）の評定値について，RE–VE 群と VE–RE 群の間で Mann–Whitney の U 検定を用いて比較した。

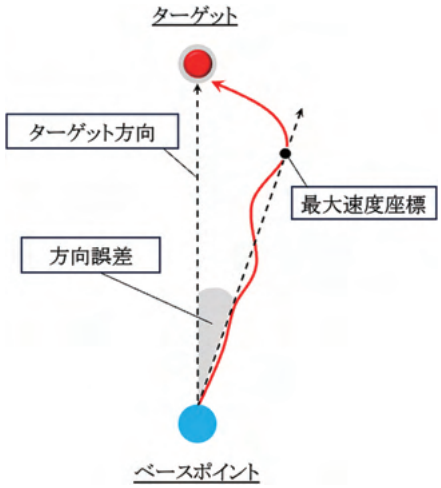


図 3　運動学習能力の算出方法

4. 結果

4.1 RE 課題における運動学習能力の変化（図 4）

時間（Block）および課題実施順序（RE–VE 群，VE–RE 群）を要因とした二元配置反復測定分散分析を行った結果，時間の主効果が有意であった（$F(4,26) = 23.925$, $p < 0.001$, $\eta^2 p = 0.479$）。一方，課題実施順序の主効果（$F(1,26) = 2.601$, $p = 0.119$, $\eta^2 p = 0.091$）および時間×課題実施順序の交互作用（$F(4,26) = 1.310$, $p = 0.271$, $\eta^2 p = 0.048$）は有意ではなかった。

4.2 VE 課題における運動学習能力の変化（図 5）

時間（Block）および課題実施順序（RE–VE 群，VE–RE 群）を要因とした二元配置反復測定分散分析を行った結果，時間の主効果（$F(4,26) = 15.006$, $p < 0.001$, $\eta^2 p = 0.366$）および時間×課題実施順序の交互作用（$F(4,26) = 3.066$, $p = 0.036$, $\eta^2 p = 0.105$）が有意であった。一方，課

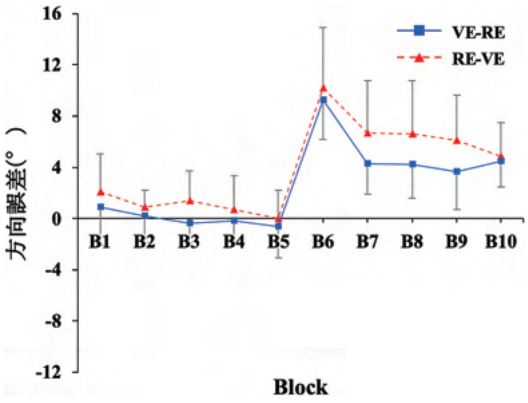


図 4　RE 課題における各ブロックの平均方向誤差

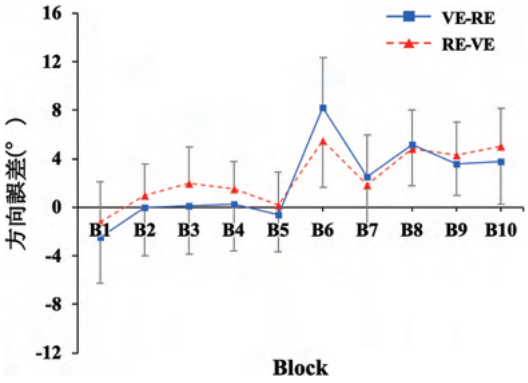


図 5　VE 課題における各ブロックの平均方向誤差

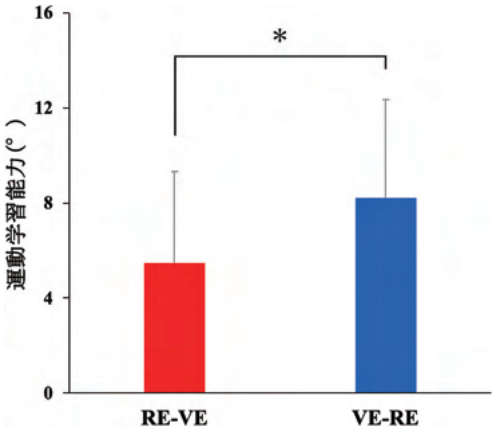


図 6　VE 課題におけるブロック 6 の平均方向誤差

題実施順序の主効果は有意ではなかった（F(1,26) = 0.115, p = 0.737, $\eta^2 p$ = 0.004）。有意な時間×課題実施順序の交互作用についてさらに検討するため，各 Block ごとに Student-t 検定による事後解析を行った。その結果，RE–VE 群と VE–RE 群の間に有意差を認めたのは，Block6（t(26) = 2.502, p = 0.019）であった（図 6）。

4.3　VHI 質問票

Mann–Whitney の U 検定を用いて VHI 質問票の各項目を比較した結果，VE–RE 群と RE–VE 群との間に有意な差は認められなかった（Q1: U = 98.50, p = 1.00，Q2: U = 92.00, p = 0.786，Q3: U = 84.50, p = 0.541，Q4: U = 107.5, p = 0.671，Q5: U = 125.0, p = 0.208，Q6: U = 116.0, p = 0.403）（図 7）。

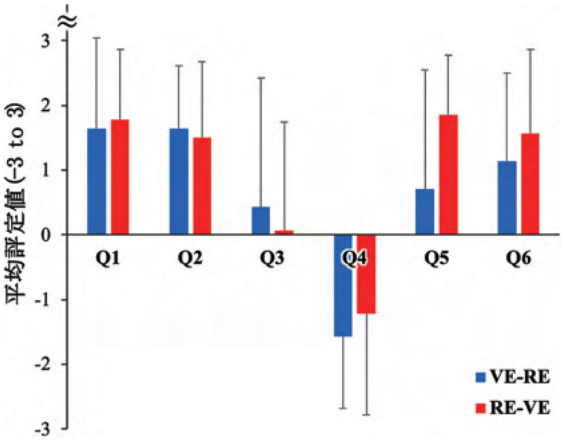


図 7　VHI 質問票における各項目の平均評定値

5.　考察

本研究では，感覚運動適応における VE と RE の間での運動学習の転移について検討した。その結果，RE から VE への運動学習の転移は認められた一方で，VE から RE への転移は認められず，学習転移には非対称性が存在することが明らかとなった。

これまでの感覚運動適応に関する研究では，学習量は運動誤差の大きさに比例し，その誤差が内部モデルの更新を直接促進すると考えられてきた[10,11]。しかし，感覚運動適応における学習は誤差の大きさだけではなく，その誤差の性質にも依存し，非線形な特性を示すことが報告されている[12]。例えば，視覚フィードバックの不確実性が高い場合（すなわちターゲットの解像度が低い場合）には，不確実性が低い場合（ターゲットの解像度が高い場合）と比較して，誤差に基づく内部モデルの更新は抑制されることが示されている[13]。VE では，RE と類似し

た心理的体験を誘発できる[1]。しかし，Harrisらは，VEではREにおける運動制御に重要な視覚情報や体性感覚情報が十分に提供されないことを報告している[14,15]。これらの知見から，本研究のRE条件では，運動制御に必要な視覚情報および体性感覚情報の不確実性が比較的小さく，その結果，誤差に基づく学習と内部モデルの更新が促進されたと考えられる。一方，VE条件では，複数の感覚情報間の不一致によって運動制御に必要な感覚情報の信頼性が低下し，その結果，内部モデルの更新が抑制された可能性がある。さらに，Herzfeldらは，誤差が一貫している環境では学習率が増加する一方で，誤差の一貫性が低い環境では学習率が低下することが示されている[16]。本研究において，RE実施後のVE条件で観察された非対称的な変化は，REで経験した安定した誤差によって一時的に誤差感受性が高まり，その効果がVE課題にも持ち越された結果である可能性が考えられる。

［参考文献］

1 Sanchez-Vives MV, Slater M. From presence to consciousness through virtual reality. Nat Rev Neurosci. 2005;6(4):332-9.
2 Sense F, van Rijn H. Probabilistic motor sequence learning in a virtual reality serial reaction time task. PLoS One. 2018;13(6):e0198759.
3 de Mello Monteiro CB, Massetti T, da Silva TD, van der Kamp J, de Abreu LC, Leone C, et al. Transfer of motor learning from virtual to natural environments in individuals with cerebral palsy. Res Dev Disabil. 2014;35(10):2430-7.
4 Quadrado VH, Silva TDD, Favero FM, Tonks J, Massetti T, Monteiro CBM. Motor learning from virtual reality to natural environments in individuals with Duchenne muscular dystrophy. Disabil Rehabil Assist Technol. 2019;14(1):12-20.
5 Juliano JM, Liew SL. Transfer of motor skill between virtual reality viewed using a head-mounted display and conventional screen environments. J Neuroeng Rehabil. 2020;17(1):48.
6 Takeo Y, Hara M, Shirakawa Y, Ikeda T, Sugata H. Sequential motor learning transfers from real to virtual environment. J Neuroeng Rehabil. 2021;18(1):107.
7 Debas K, Carrier J, Orban P, Barakat M, Lungu O, Vandewalle G, et al. Brain plasticity related to the consolidation of motor sequence learning and motor adaptation. Proc Natl Acad Sci U S A. 2010;107(41):17839-44.
8 Botvinick M, Cohen J. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. Nature. 1998;391(6669):756.
9 Harada T, Hara M, Matsushita K, Kawakami K, Kawakami K, Anan M, et al. Off-line effects of alpha-frequency transcranial alternating current stimulation on a visuomotor learning task. Brain Behav. 2020;10(9):e01754.
10 Thoroughman KA, Shadmehr R. Learning of action through adaptive combination of motor primitives. Nature. 2000;407(6805):742-7.
11 Scheidt RA, Dingwell JB, Mussa-Ivaldi FA. Learning to move amid uncertainty. J Neurophysiol. 2001;86(2):971-85.
12 Wei K, Körding K. Relevance of error: what drives motor adaptation? J Neurophysiol. 2009;101(2):655-64.
13 Izawa J, Shadmehr R. On-line processing of uncertain information in visuomotor control. J Neurosci. 2008;28(44):11360-8.
14 Harris DJ, Buckingham G, Wilson MR, Vine SJ. Virtually the same? How impaired sensory information in virtual reality may disrupt vision for action. Exp Brain Res. 2019;237(11):2761-6.
15 Berger CC, Gonzalez-Franco M, Ofek E, Hinckley K. The uncanny valley of haptics. Sci Robot. 2018;3(17):eaar701.
16 Herzfeld DJ, Vaswani PA, Marko MK, Shadmehr R. A memory of errors in sensorimotor learning. Science. 2014;345(6202):1349-53.

［成果の発表，論文など］

1. 竹尾雄飛：視覚誤差課題を用いた仮想環境における運動学習と実環境における運動学習の転移，第28回日本基礎理学療法学会学術大会，2023年12月
2. Yuhi Takeo, Masayuki Hara, Yui Yasumoto, Hisato Sugata: Transfer of Sensorimotor Adaptation from Real to Virtual Environments. Frontiers in Systems Neuroscience（現在投稿中）

［研究助成（C）］

人間機械系の能力向上に向けた情報改変の普遍的設計論の構築

2247012



研究代表者（助成金受領者）　大阪大学　大学院工学研究科　博士後期課程　田中健太
共同研究者　兵庫県立大学　教授　南裕樹
大阪大学　教授　石川将人

［研究の目的］

現代社会において，ヒトが機械を操作する「人間機械系」はあらゆる場面に存在しており，その操作性と安全性を向上させることは極めて重要な課題となっている。たとえば，自動車の運転，航空機やドローンの操縦，建設現場における重機の操作，さらには医療現場における遠隔手術ロボットなど，私たちの生活や産業の大部分は人間機械系によって支えられている。これらのシステムは，複雑な環境下でもヒトの柔軟な判断力を活かせるという利点がある。しかし人間機械系には，作業者の訓練に大きなコストがかかる場合があったり，疲労や認知負荷によるヒトの操作ミスが人命や財産を脅かすことがあったりという課題が潜在的にある。そのため，操作性の向上が求められている。ここでいう操作性向上には，主観的な操作感の向上だけでなく，操作の習熟にかかる時間の短縮や致命的なエラーの防止なども含まれる。

これまで，人間機械系の操作性を向上させるための主なアプローチとして，操作者に「より正確で，より網羅的な情報」を提示する工夫が数多くなされてきた。具体的な例としては，自動車の死角を補ってより広い視野を提供するバックモニターや，拡張現実を用いて見えない障害物を視覚化する技術，さらには重機操作において土を掘る際の抵抗を力覚としてオペレータの手元に伝えるフィードバック技術などが挙げられる。これらはすべて，対象の真の状態をできるだけ正確にヒトに把握させることで，適切な操作を引き出そうとする試みである。

しかし，どれほど正確で詳細な情報を提示したとしても，ヒトの認知能力や身体的限界に起因する操作性の壁を完全に越えることはできない。なぜなら，ヒトの感覚器官が細かな変化を認識する能力や，神経伝達速度には，生物学的な限界が存在するからである。たとえば，重機のアームの位置をヒトの視力を超えて伝えることはできない。また，機体のバランスが崩れそうであることを表示しても，反応の遅れによりその対処が間に合わない場合も考えられる。つまり，ディスプレイ上の情報そのものが完璧であったとしても，「ただ正確な情報をそのまま見せる」だけでは，それを処理するヒトの限界により情報が実質的に劣化してしまうため，操作性の向上にも限界があるのである。

そこで本研究では，情報をあえて改変してヒトに提示することで，操作性の良い機械に見せかける「仮想ダイナミクス」によって操作性を向上させる，新しい枠組みを提案する。これは，機械から得られた状態情報をそのままディスプレイに映すのではなく，間に「情報改変器」と呼ばれるシステムを挿入することで実現する。そして，どのような仮想ダイナミクスの操作性が良いのか，どのような機械にどのような

情報改変器を挿入すればそのような仮想ダイナミクスを実現できるのかを明らかにし，設計論を確立することを目的とする。

[研究の内容と成果]

1. 情報改変器と仮想ダイナミクスの概念

本研究で導入する「情報改変器」は，機械の状態を受け取り，それを改変してヒトに提示する役割を持つシステムである。制御工学の枠組みに当てはめると，ドローンやロボットといった「制御対象」を動かすために，コンピュータやヒトが「制御器」として命令を送るシステムと見なせる。従来の研究では，情報改変器を制御器の一部として扱う視点が一般的であった。これは，既存の制御器に情報改変器を組み合わせることで，安全性の確保やノイズの除去といった「高度な機能を追加した新しい制御器」と見なす考え方である。一方，本研究では，情報改変器を制御対象の側に含めて考える。すなわち，情報の出口に情報改変器を配置した制御対象を一つの制御対象として扱い，これを「仮想ダイナミクス」と名付けた（図 1）。この視点の転換により，制御器側から見れば，目の前にある機械そのものの性質が，より扱いやすい別の仮想的な機械へと変化したように見えるのである。

仮想ダイナミクスの意義は，制御器がブラックボックスである場合にも対応できる点である。現実世界には，自動車や高度な産業ロボットのように，ヒトや強化学習エージェントといった数学的にモデル化しにくい要素が制御するシステムが存在する。本手法は，制御器ではなく，その周囲にある仮想ダイナミクスだけに手を加えるという視点を持つ。これにより，制御器の中身が複雑であっても，システムの操作性や学習効率を改善できる可能性がある。

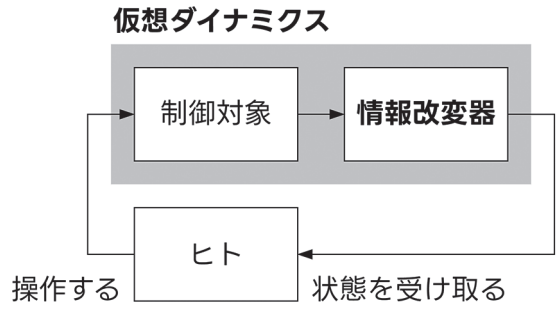


図 1　人間機械系における仮想ダイナミクスと情報改変器の概念図

2. 人間機械系における仮想ダイナミクス設計の有効性の実証

仮想ダイナミクスによって操作性が向上させられる，つまり仮想ダイナミクスが有効である例が存在すること確かめるため，被験者実験を行なった。このようなシステムの候補として，我々が開発した「倒立振子ゲーム」シミュレータが考えられていた（図 2）。倒立振子とは，手のひらの上でほうきなどの棒を立ててバランスを取るようなシステムのことで，不安定で倒れやすい。倒立振子ゲームでは，プレイヤがゲームコントローラを使って画面中央のカートを左右に動かし，上に乗った棒が倒れないようにバランスを保つことが求められる。棒が 45 度以上に傾いてしまいゲームオーバーになるまでの時間を「スコア」とする。スコアが高いほど，

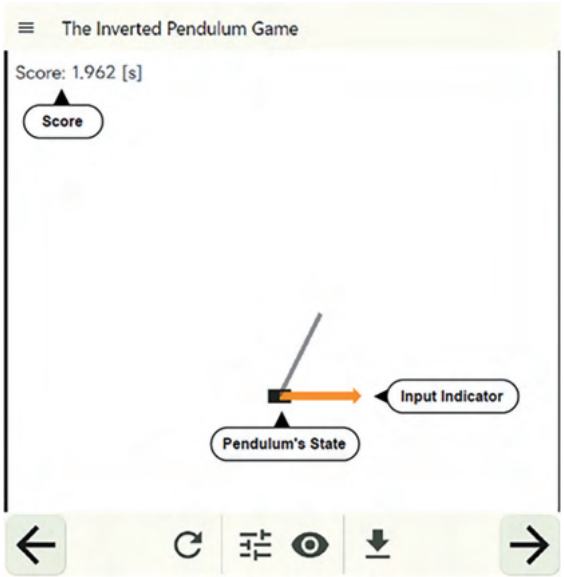


図 2　倒立振子ゲームのゲーム画面の図

棒のバランスを長く保てた，つまり操作性が良かったことになる。

本実験における「情報改変器」としては，現在の状態から 0.6 秒先の未来を予測した状態を画面に提示する手法を採用した（図 3）。具体的には，プレイヤがその瞬間以降何も操作しなかったと仮定して，振り子が 0.6 秒後にどのような状態になっているかをシステム内部で計算する。そして，その予測された未来の姿を，現在の真の状態の代わりに画面に表示した。これにより，現実にはまだ少ししか傾いていない振り子が，画面上ではすでに大きく傾き始めているように見えることがある。

被験者には，現実の姿をそのまま表示する「通常モード」と，0.6 秒先の未来を表示する「改変モード」の両方をプレイしてもらった。図 4 は，両モードのスコアの中央値と四分位数を示している。図のように，すべての被験者において，改変モードでのスコアの中央値が，通常モードの 2 倍以上に伸びることが確認された。これにより，仮想ダイナミクスが倒立振子ゲームの操作性を向上させることが実証された。

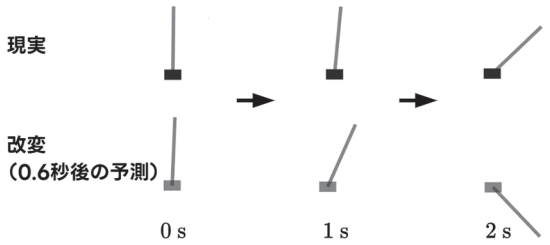


図 3　現実の状態と改変された状態の比較

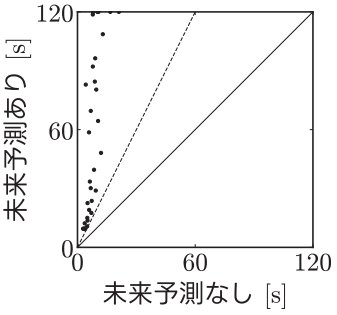


図 4　通常モードと改変モードのスコア比較図

さらに，実験後のアンケートでは，すべての被験者が「改変された情報を提示されたときの方が操作しやすかった」と回答した。被験者からは「傾きの許容範囲が広く感じた」「動きが軽く感じられ，大きな調整も細かな調整もやりやすかった」といった意見が寄せられた。これにより，主観的な操作感の面でも仮想ダイナミクスの有効性が確かめられた。

以上より，仮想ダイナミクスが，人間機械系の操作性を向上させるのに有効な場合があることが実証された。

3. 人間機械系の数理モデル解析による操作能力向上のメカニズム調査

提示する情報を改変することでなぜ操作性が向上したのかのメカニズムを理論的に解明し，設計の明確な指針を得るために，人間機械系を数理モデル化して解析を行なった。

前節の倒立振子ゲームにおいて，ディスプレイを通じてヒトに提示される情報は，台車の位置と振子の角度のみである。台車の速度や振子の角速度は，画像としては表示されておらず，過去の画像との比較により推測する必要がある。ここで我々は，解析にあたり以下の仮説を立てた。

位置と角度のみを使った操作だけでシステムを安定化できるのであれば，速度や角速度の推測が不要となる上に使うべき情報の量が少ないため，操作が容易になる。逆に，位置と角度の情報だけでは機械を安定化できない場合，ヒトは速度や角速度を予測しつつ使わなければならないため，操作が難しい。

数理モデルを用いた解析の結果，情報を改変せずに状態をそのまま提示した場合，位置と速度に対する単純な操作だけでは，倒立振子を安定化させることが不可能であることが判明した。一方，情報改変器を用いて少し先の未来を予測して提示すると，台車の位置と振子の角度に比例した操作でシステムを安定化できることが示された。

この解析結果は，仮想ダイナミクスによって速度と角速度の情報を用いる必要がなくなったことが操作性向上の原理であった可能性を示唆している。これは，人間機械系における仮想ダイナミクス設計の指針につながる発見である。

4. 強化学習を用いたシステムへの応用

これまではヒトが機械を操作する人間機械系に対して仮想ダイナミクスを設計することを主なテーマとしてきたが，AIにも同様の枠組みを適用できるのではないかと考え，強化学習を用いたシステムへの応用を試みた。

強化学習は，AIが試行錯誤を通じて報酬を最大化する行動を自律的に獲得する強力な手法である。しかし，実用的な制御性能を獲得するまでには膨大なデータと試行時間を要することが多く，学習効率の向上が実用化に向けた大きな課題となっている。そこで本研究では，ヒトの操作支援だけでなく，強化学習のシステムに対しても「仮想ダイナミクス設計」の枠組みを適用した。具体的には，制御対象のセンサーから得られた生のデータをそのままAIに入力するのではなく，AIの直前に情報改変器を挿入し，情報を意図的に加工することで，AIにとって「学習しやすい」仮想ダイナミクスを構築し，学習の効率化を図った。

この枠組みの有効性を検証するため，倒立振子ゲームと同様のシステムを安定化するタスクを強化学習する実験を行なった。この実験では，現在の状態から少し先の未来を予測し，それをAIに提示する情報改変器を設計した。

この実験の結果をまとめたグラフが，図5，6である。

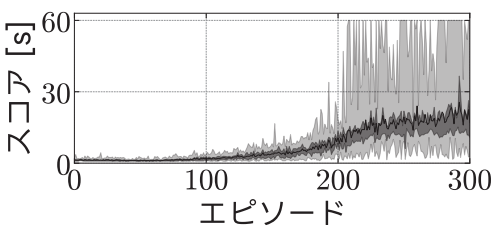


図5　情報改変なしでの学習時のスコアの推移

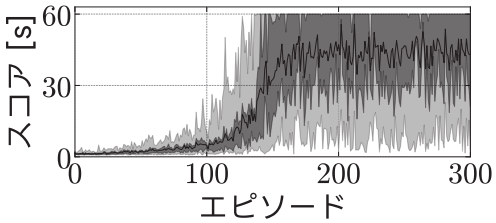


図6　情報改変ありでの学習時のスコアの推移

実験の結果，現在の状態を提示されたAIと比較して，未来の予測状態を提示されたAIは，目標とする制御能力に到達するまでの学習回数が減少し，学習が加速することが確認された。さらに，学習完了後の最終的なスコア自体も高くなる傾向が見られた。これにより，仮想ダイナミクスが強化学習の効率と性能の両方を引き上げる例が存在することが示された。

［成果の発表，論文など］

学術雑誌論文

田中健太，南裕樹，石川将人：情報改変による強化学習の効率化―倒立振子の安定化制御を例として，システム制御情報学会論文誌，Vol. 37，No. 8，pp. 234-236，2024

Kenta Tanaka, Yuki Minami, Masato Ishikawa: Operability improvement of Human-machine Systems by Altering Visual Information: A Case-study of the Inverted Pendulum, IEEE Access, Vol. 13, -, pp. 93566-93573, 2025

田中健太，南裕樹，石川将人：人間機械系における視覚情報改変による操作性向上効果の線形モデル解析，計測自動制御学会論文集，-，-，-，2025（採択済）

国際会議論文

Kenta Tanaka, Yuki Minami, Masato Ishikawa: Improving Controllability of Manual Control Systems by Altering Visual Information, 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics, -, -, pp. 356-359, 2024

Kenta Tanaka, Yuki Minami, Masato Ishikawa: Reinforcement Learning-Based Analysis of the Effect of Presenting Predicted State on Operability of 2nd-Order LTI Systems in Human-Machine Systems, 2025 SICE Festival with Annual Conference, -, -, ThAT11.18, 2025

国内会議論文

田中健太，南裕樹，石川将人：不安定零点を有する動的システムの手動制御のための視覚情報改変，第12回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム，-，-，1PS2-17，2025

［研究助成（C）］

筋電波形を用いた腕の動きに同調するパワーアシスト

2227008



研究代表者
（助成金受領者）

長岡技術科学大学
大学院工学研究科

5年一貫制
博士課程

田　中　太　一

［研 究 の 目 的］

■最終目標

建築・介護現場の怪我や慢性痛を防ぐアシストスーツは最大25 kgを補助できるが，さらなる荷重に対応するには高出力化が必須である。しかし，出力向上に伴う抵抗増大が動作を阻害し，作業効率低下，身体各部への負担増加を通じて肩関節周辺での痛み増大と手先到達精度低下を招く。本研究は，これら課題を克服しつつ高出力化するため，腕動作に同調する上肢用アシストスーツを開発することを最終目標とする（図1）。

■技術的課題

運動の50 ～ 100 ms前にヒトの運動特徴を含んでいるためヒトの動作を予測可能な筋電を用いれば，腕に対して同調動作するアシストスーツを製作できる。ただ，実用化を妨げる2つの課題がある。

①筋電振幅の個人差が大きく，他人のデータで学習した機械学習モデルを使用すると10 ～ 20%予測精度が低下する。個人専用のモデルを得るために事前のデータ計測が必要である。

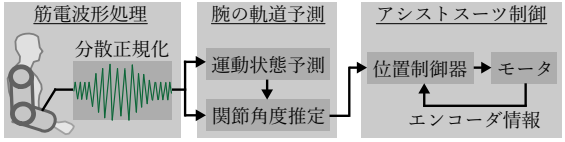


図1　腕の動きに同調するアシストスーツの概要。

②筋電振幅が変動するため，学習時と異なる電極位置の予測精度が10 ～ 20%低下する。30 ～ 180秒のキャリブレーションが必要である。

■研究目的

皮膚の厚さや発汗に伴う皮膚インピーダンス，筋肉量，電極位置の違いにより，筋電振幅は大きく変動する。そこで，本研究では分散正規化によって筋電振幅を揃え，筋電波形から運動を予測することで，二つの課題の解決を目指す。第一に，他者データで学習したモデルの予測精度を本人モデルに近づけること。第二に，異なる電極位置で学習・評価したモデルの予測精度を，同一電極位置で学習・評価したモデルに近づけることである。ここで，目標精度を超えれば精度が近づいたと判断し，研究目標を達成したとみなす。

［研究の内容，成果］

1. 提案手法（分散正規化）

キャリブレーションが不要で，リアルタイムに実行できる正規化法を式（1）に示す。Sliding-window normalization（SWN）はz-scoreと移動窓を組み合わせた手法で移動窓内の信号の平均を0，標準偏差を1にする（図2）。

$$y_{t,\,n+L} = \frac{x_n - m_t}{s_t} \tag{1}$$

ここで，tは離散時間番号，nは移動窓内の番号，

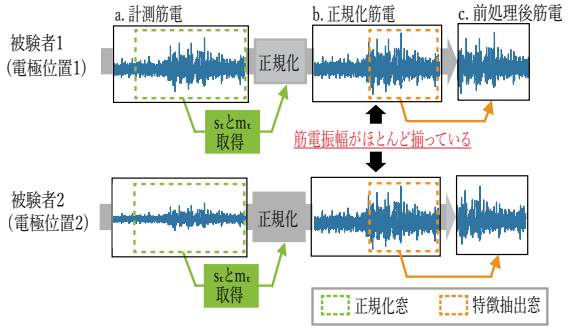


図 2　sliding-window normalization の概要。

L は移動窓の窓長，y は正規化した信号，x は入力信号，m_t と s_t は t^{th} での平均と標準偏差である。

2. 目標精度の計算

3 章では本人のモデルの予測精度，4 章では同じ電極位置で学習と評価したモデルの予測精度を用いて式（2）から目標精度を得た。

$$th_{\text{pfm}} = x_l \left(l = \lfloor v/2 - 1 \rfloor\right)$$
$$v = F^{-1}_{Bin(n,\beta)}(1-\gamma) \qquad (2)$$

ここで，th_{pfm} は目標精度，x は降順ソートされたデータ，l は許容誤差の下限番号，$F^{-1}_{Bin(n,\beta)}(1-\gamma)$ は二項分布の累積密度逆関数，β はカバー率，γ は信頼水準である。$(\beta, \gamma) = (90\%, 95\%)$ とした。

3. 他人のモデル使用による予測精度の低下

3.1. 実験

10 人の被験者が右肘の短関節運動を行った。具体的には 4 つの終始点の内 1 つから他の 3 つの点の 1 つに腕を移動させるタスクである。全被験者が計 360 trials のタスクを行った。右肘の屈曲と伸展運動に関連する 12 channel の筋電（2000 Hz）と，手先，肘，肩の位置データ（500 Hz）を計測した。

3.2. データ処理

筋電には前処理として 3 次ローパスバターワースフィルタ（200 Hz），デシメーション（2000 → 500 Hz），3 次ハイパスバターワースフィルタ（30 Hz），正規化（SWN または正規化無し）を順に適用した。その後，特徴抽出として mean absolute value, mean waveform length, difference root mean square, short-time Fourier transform, stationary wavelet transform の 5 つの特徴を抽出して，20 Hz へデータ量を削減した。

位置データは 2 次零位相ローパスバターワースフィルタ（20 Hz）を適用後，位置→関節角度へ変換，関節角速度を基準に静止，屈曲，伸展のラベルを生成して，20 Hz へデータ量を削減した。

3.3. 評価方法

●研究目標の達成条件

図 3 に示すように，本節では本人のデータで学習したモデル（model_OWN）と他人のデータで学習したモデル（model_OTHER）を使用した。SWN_OTHER（SWN を適用した model_OTHER）の予測精度が SWN_OWN（SWN を適用した model_OWN）と None_OWN（正規化を適用しない model_OWN）の目標精度（2 章で説明）を超えた時，研究目標を達成する。

●機械学習モデルの学習と評価

データは被験者ごとに 50 : 50（180 : 180 trials）で学習データと評価データに分割した。

運動予測では model_OWN は 1 人の被験者，model_OTHER は 9 人の被験者でモデルを学習して，1 人の被験者で評価した。また，関節角度推定では model_OWN は 1 人の被験者で学習して 1 人の被験者で評価し，model_OTHER は 5 人の被験者で学習して 3 人の被験者で評価した。

●パラメータ選定

SWN では正規化と特徴抽出の窓長，正規化無し（None）では特徴抽出の窓長がパラメータと

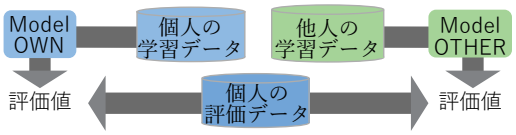


図 3　model_OWN と model_OTHER の学習と評価。

してある。正規化と特徴出の窓長を 200–500 ms 間で 100 ms 単位で変えて機械学習モデルを学習し，窓長間で最も予測性能が高いモデル同士を比較した。

●機械学習モデル

運動状態の予測では多クラスロジスティック回帰を使用して肘関節の静止，屈曲，伸展運動を予測した。また，関節角速度の推定では線形回帰を使用して，肘関節の角速度を推定した。

●多重比較

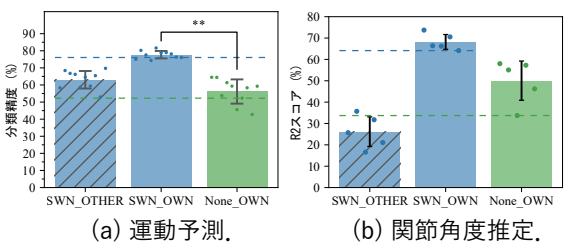
ウィルコクソン順位和検定とボンフェローニ補正を使用した。

3.4. 結果と考察

図 4a は肘関節の運動予測，図 4b は肘関節の角速度推定の model_OTHER と model_OWN の比較結果を示している。

図 4a と b より，運動予測と関節角度推定の両方で目標精度を超える予測性能を達成することができなかった。これは複数の要因が考えられる。(1) ノイズの影響：筋電は SN 比が低い信号である。本節では 30–200 Hz 外のノイズを除去できていないため，このノイズが分散推定に悪影響を与えている可能性がある。ノイズ成分を無視して筋電振幅を推定する必要がある；(2) 適切なスリーリングでない：本研究では線形スケーリングを適用した。しかし，筋電は筋活動に対する振幅の増加が非線形な信号である。そのため，非線形性を考慮した正規化が必要である；(3) 筋活動率情報の欠落：通常の筋電を用いる運動予測と関節角速度推定は，複数のセンサから得た筋電の振幅値で構成されるベクトルを用いる。しかし，SWN は短時間の窓内の筋電の振幅を揃えており，全体的な筋電の活動情報を無視している。そのため，筋活動率を考慮した正規化法が必要である。

ただ，図 4a と b 両方で，SWN_OWN の予測性能が None_OWN より高い。この結果より，他人のモデルの予測性能を本人のモデルに近づけることには失敗したが，モデルの予測性能を向上させることに成功した。



(a) 運動予測. (b) 関節角度推定.

図 4　被験者間の汎用性比較。破線は目標精度を示している。

4. 電極位置による予測精度の低下

4.1. 実験

電極位置が異なる筋電データを計測するために電極位置を腕に対して水平方向に ± 2 cm ずらしてデータを計測した。全被験者は計 3 session の実験を行った。1 session 目は筋電振幅値が最大となる位置，2 session 目は 1 session の位置から右へ 2 cm 移動させた位置，3 session 目は 1 session の位置から左へ 2 cm 移動させた位置でデータ計測した。

各被験者は画面上に表示されたターゲットマーカを手首位置を操作して追従するタスクを行った。ターゲットマーカの軌道は躍度最小規範を基に 5 種類生成された。各被験者は 5 種類のタスクを 4 回ずつ 1 session で計 20 回行った (3 session で計 60 回)。

計測したデータは筋電と位置データである。筋電（2000 Hz）は，腕の屈伸運動に関連する筋肉から 12 channel 分計測した。位置データ (20 Hz) は，手首，肘，肩の 3 か所計測した。

4.2. データ処理

筋電は，6 次バンドパスバターワースフィルタ (40–200 Hz)，デシメーション (2000 → 500 Hz)，正規化 (SWN または正規化無し)，絶対値化，セグメンテーション (100 ms の窓長で 50 ms ごとに信号を抽出)，最後に特徴量を 20 Hz へデシメーションした。

位置データは，位置→関節角度変換後，角速度と角加速度を基準に肩関節の静止，屈曲，伸展運動のラベルに変換した。

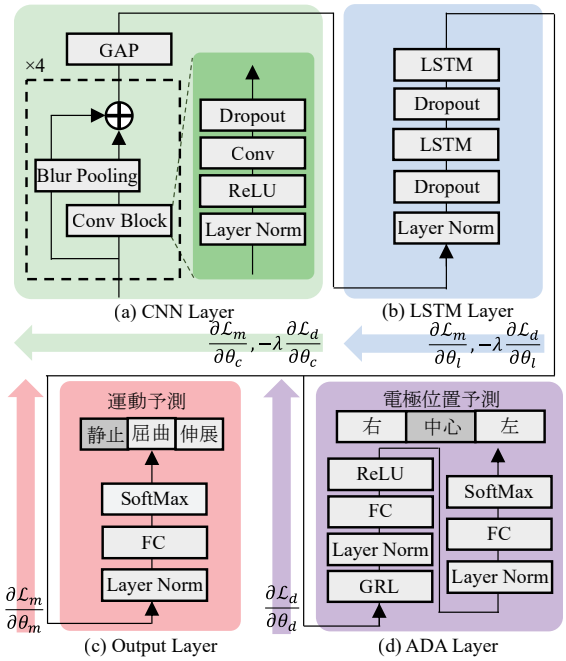


図 5　CNN-LSTM の概要。

4.3. 深層学習モデル

図 5 に示す CNN-LSTM を使用した。これは CNN，LSTM，Output，ADA の 4 つの層で構成されている。CNN と LSTM 層は特徴抽出，Output 層では運動の予測，ADA 層では電極位置の予測を行う。

4.4. 比較手法

● Vanilla

通常の CNN-LSTM モデル。

● Transfer learning（TL）

学習時とは異なる電極位置データでモデルを再学習する。再学習データと評価のデータの電極位置は同じである。

● Adversarial domain adaptation（ADA）

3 種類の電極位置データを使用して，かつ ADA 層を利用してモデルを学習する。

● Mixture of multiple electrode positions（MIX）

3 種類の電極位置データのみを使用してモデルを学習する。

4.5. 評価方法

●データ分割

3-fold cross validation で評価を行った。Vanilla と TL は通常通り学習データを用いて学習した。TL の再学習には，30% のデータを評価時の電極位置の学習データを使用した。ADA と MIX の学習には，30% のデータを 3 種類の電極位置の学習データを使用した。

●電極位置の組み合わせ

Vanilla と TL は 6 通り，ADA と MIX は 3 通りの学習と評価の電極位置の組み合わせがある。

●評価指標

評価指標として式（3）に示す差分分類精度を使用した。これは異なる電極位置で学習と評価したモデルの分類精度から同じ電極位置で学習と評価したモデルの分類精度を引くことで得た。

$$y_{n,i,j} = x_{n,i,j} - x_{n,i,j}^{\mathrm{BASELINE}} \tag{3}$$

ここで，n は正規化法，i は学習の電極位置，j は評価の電極位置，y は差分分類精度，x は n 正規化を適用して i 電極で学習して j 電極で評価したモデルの分類精度である。

●研究目標の達成条件

SWN を適用した Vanilla CNN-LSTM（SWN of Vanilla）において，異なる電極位置で学習と評価したモデルの差分分類精度が同じ電極位置で学習と評価したモデルの差分分類精度から得た目標精度（2 章で説明）を超えた時，研究目標を達成する。

●パラメータ選定

SWN では正規化と特徴抽出の窓長，正規化無し（None）では特徴抽出の窓長がパラメータとしてある。正規化と特徴出の窓長を 200–1000 ms 間で 200 ms 単位で変えて機械学習モデルを学習し，窓長間で最も予測性能が高いモデル同士を比較した。

●多重比較

ウィルコクソン順位和検定とボンフェローニ補正を使用した。

4.6. 結果と考察

図 6 は差分分類精度の比較結果を示している。SWN of Vanilla は SWN を適用した Vanilla モデルの結果であり，TL_None，ADA_None，MIX_None，Vanilla_Nonef は正規化無しの TL，

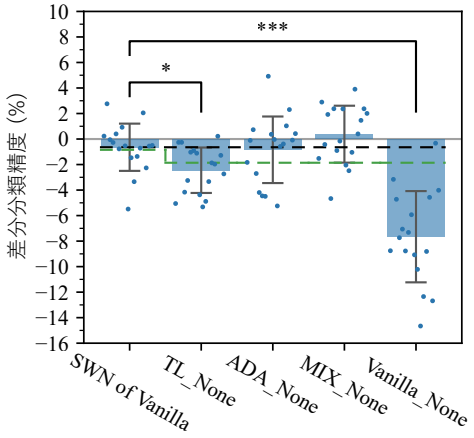


図 6　差分分類精度の結果。緑の破線は目標性能，黒の破線は SWN of Vanilla の差分分類精度の平均値を示している。

ADA，MIX，Vanilla モデルの結果である。

SWN of Vanilla の予測精度と目標精度を比較すると，予測精度の方が目標精度より高い。この結果より，研究目標を達成した。これは，筋電振幅を正規化によって揃えることによって，電極位置による筋電振幅の変動の影響を低減できたためだと考えられる。

しかし，SWN of Vanilla と MIX_None と比較すると MIX_None の方が予測精度が高く，SWN は最も優れた方法ではなかった。また，MIX_None と ADA_Nome の予測精度も目標精度を上回っている。ただ，ADA，MIX，TL と比較した SWN の利点は，複数の電極位置データでの学習と EMG デバイスを使用する前のモデルのキャリブレーション（再学習）が不要なことである。

5. まとめ

課題 1：他人のモデルの予測性能を本人のモデルに近づけることには失敗したが，機械学習モデルの予測精度を向上させることに成功した。

課題 2：目標精度を達成したため，異なる電極位置で学習と評価したモデルの予測精度を同じ電極位置で学習と評価したモデルに近づけることに成功した。

ただ，課題 2 にでも分類しか行っていないため，回帰でもモデルの予測精度を近づけられるか調べる必要がある。また，他人のモデルの予測精度を向上するために，ノイズ除去や非線形性の低減方法を考える必要がある。

［成果の発表，論文など］

■ジャーナル

1. Taichi Tanaka, Isao Nambu, Yoshiko Maruyama, and YasuhiroWada. Sliding-window normalization to improve the performance of machine-learning models for real-time motion prediction using electromyography. Sensors, 22(13): 5005, 2022
2. Taichi Tanaka, Isao Nambu, and Yasuhiro Wada. Mitigating the impact of electrode shift on classification performance in electromyography applications using sliding-window normalization. Sensors, 25(13): 4119, 2025

■国内学会

1. 田中太一，南部功夫，圓山由子，and 和田安弘．Sliding-window normalization による筋電を用いる他人のデータで学習した分類器の予測精度向上．In Proceedings of the 2022 Annual Conference of the Robotics Society of Japan, Tokyo, Japan, September 2022. Non-peer-reviewed, oral presentation (Japanese)

［研究助成（C）］

切り紙・折り紙構造を用いたMEMS三軸触覚センサアレイ

2237008



研究代表者
（助成金受領者）
慶應義塾大学
大学院理工学研究科
後期博士課程
中　島　利八郎

［研究の目的］

Microelectromechanical systems（MEMS）を用いた多軸力センサは，人間の触覚評価や，生物学分野，ロボティクスをはじめとする多様な分野で重要な役割を担っている。MEMS力センサの中でも，ひずみに対して電気抵抗が変化するピエゾ抵抗効果を利用したピエゾ抵抗型力センサは構造が比較的単純であることから数多く研究開発されている。これらのピエゾ抵抗型の多軸力センサにおいて，デバイス側面方向の力を表面方向の力に対し独立して検出するためには，側面の応力集中領域にピエゾ抵抗素子を配置し，三次元的なセンサ構造を実現することが有効である。しかし，従来のMEMSプロセスは主に基板表面上での二次元的な積層加工が中心であるため，デバイス側面のような三次元領域に対して任意形状のピエゾ抵抗層を形成することは困難であった。また，デバイス側面へのピエゾ抵抗形成のためのドーピング工程を実現するためには，追加工程や特殊なプロセスが必要となり，製作工程の複雑化，製作難易度の増大，およびデバイス設計自由度の制限といった問題が生じていた。

そこで本研究では，レーザ加工とレーザドーピングを組み合わせることで，機械的構造と電気的素子を三次元的に形成可能なMEMS多軸力センサ製作プロセスを提案する。提案する手法により，デバイス表面および側面への任意の二次元形状のピエゾ抵抗層が直接形成が可能となり，高い独立性を有する多軸力計測への応用が期待できる。

［研究の内容，成果］

提案する手法の概要を図1上に示す。まず，レーザ加工によって材料となるSiウエハをセンサ形状に加工する。その後，センサ構造の表面と側面の応力集中領域に対して，センサ素子となるピエゾ抵抗層をレーザドーピングによっ

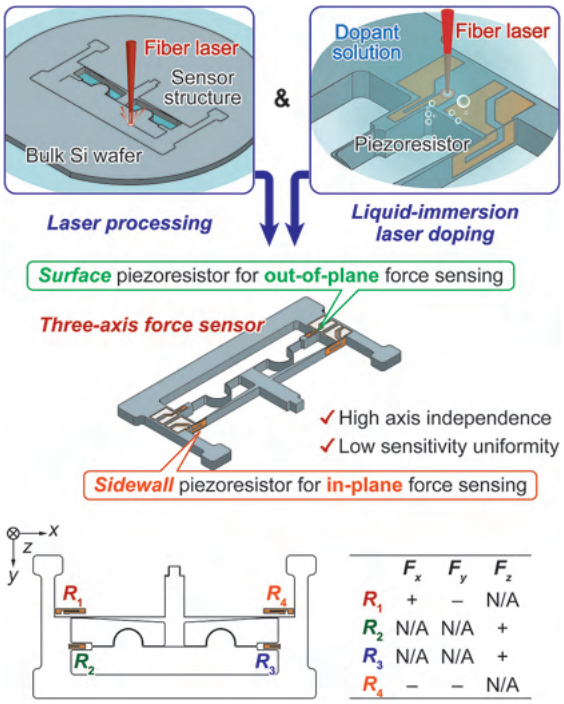


図1　提案する手法の概要

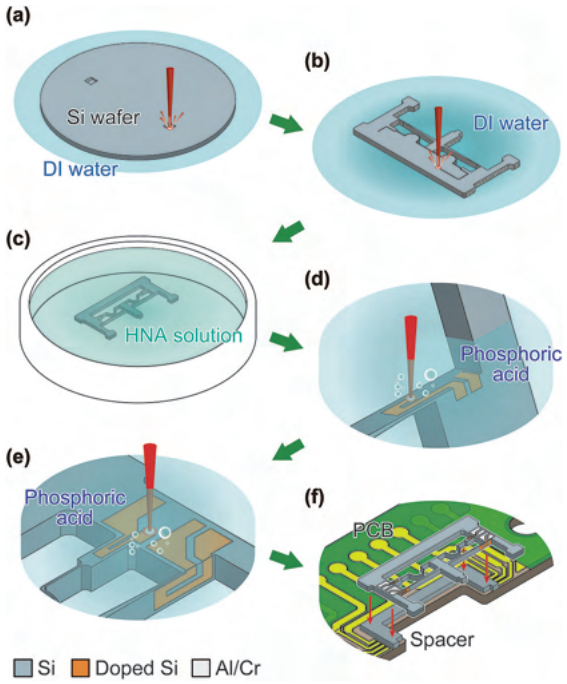


図２　製作プロセス

て形成する。レーザドーピングではレーザ照射箇所のみにピエゾ抵抗層が形成可能である。そのため，センサ素子上の任意の面に二次元形状のピエゾ抵抗層が形成できる。また，液浸式のレーザドーピングによって，側面ピエゾ抵抗層をセンサ表面まで配線することが可能となる。このような手法によって形成される，３次元的なセンサ構造とセンサ素子配置によって，提案するセンサは多軸力に対して独立した応答を示す。

図１下に多軸力に対するセンサ素子の応答を示す。面外力である z 軸方向の力に対しては，センサ素子表面に形成されたピエゾ抵抗層の R_2 と R_3 が応答する。一方で，面内力である x 軸と y 軸方向の力に対しては，センサ素子側面に形成されたピエゾ抵抗層の R_1 と R_4 が応答する。このように，多軸力に対するセンサ素子の応答は独立している。

図２に提案するセンサ素子の製作プロセスを示す。まず，高出力のレーザ照射によって，Si ウエハから裏面にノッチ構造が形成された，センサ構造体を切り出した。次に，レーザ切断によってセンサ素子側面に生じたデブリを除去するため，Si のエッチャントによって，センサ構造体全体を等方的にエッチングした。続いて，リン酸を用いた液浸式のレーザドーピングによって，センサ素子側面と表面にピエゾ抵抗層を形成した。最後に，電極を形成し，基板と電気的に接続することでセンサを製作した。本研究では波長 1064 nm，パルス幅 350 ns のファイバーレーザ加工機を用い，レーザカットとレーザドーピングはレーザ照射条件を調整することで，実施した。

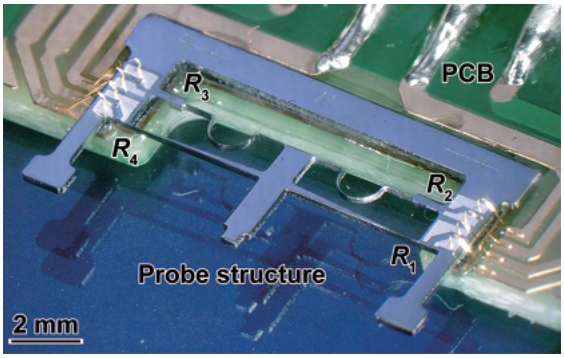


図３　製作したセンサ

図３に製作したセンサの写真を示す。センサ構造及びピエゾ抵抗層は概ね設計通りに製作された。この時，センサチップ外形は 15 mm 四方に収まり，支持梁構造の最小幅は 40 μm で，ピエゾ抵抗層の幅は 80 μm であった。また，４つのピエゾ抵抗の抵抗値はすべて概ね 1.5 kΩ であった。

図４に三軸力に対するセンサの応答を示す。図４（a）から順に，x 軸方向，y 軸方向，z 軸方向からの力に対する，各ピエゾ抵抗層の抵抗変化率を示している。面内力である x 軸方向と y 軸方向からの力に対しては，R_1 と R_4 が線形に応答し，それ以外のピエゾ抵抗層はほぼ応答していない。また，R_1 に関しては応答の正負が逆転している。一方，z 軸方向からの力に対しては，R_2 と R_3 が線形に正の応答を示し，それ以外のピエゾ抵抗層はほぼ応答を示していない。よって，三軸の力に対して，センサは独立した応答を示した。また，センサの応答の独立

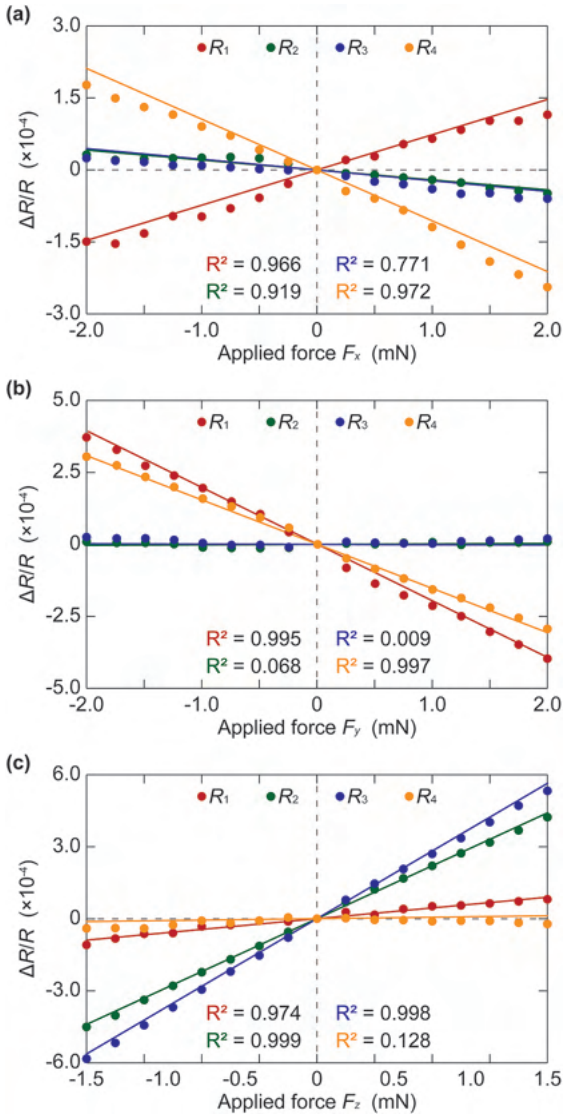


図 4　三軸に対する応答

性を評価するため，センサの感度ベクトル間のコサイン類似度を求めた。コサイン類似度はベクトルの方向の類似性を示すため，この値が直角に近ければ，応答に独立性があると言える。以下にコサイン類似度の角度表記を示す。

$$\begin{pmatrix} 0 & 87 & 100 \\ 87 & 0 & 96 \\ 100 & 96 & 0 \end{pmatrix}$$

x 軸と y 軸の感度ベクトルは互いに約 87°，x 軸と z 軸の感度ベクトルは互いに約 100°，y 軸と z 軸の感度ベクトルは互いに約 96° の角度をなしており，すべての軸間において，一定の応答独立性が確保されていることが確認された。また，ノイズレベルから算出したセンサの分解能は概ね 0.1 mN であった。よって，製作したセンサは 0.1 mN 程度の三軸の微小力を独立して計測できることが示された。

以上の結果より，提案するレーザドーピングを利用したセンサ製作プロセスは，側面ピエゾ抵抗を有する MEMS 多軸力センサの有効な製作手法であることが示された。

［成果の発表，論文など］

【国際論文誌】

1. R. Nakashima *et al.*, “Piezoresistive cantilever for in-plane force measurement using liquid-immersion laser sidewall doping,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 36, no. 1, Art. no. 015012, 2026.
2. R. Nakashima *et al.*, “Laser-based fabrication of piezoresistive cantilevers utilizing pulse laser annealing,” *Adv. Sens. Res.*, vol. 4, no. 11, Art. no. e00092, 2025.
3. R. Nakashima and H. Takahashi, “Triaxial tactile sensor utilizing standing laser-induced graphene cantilevers on polyimide film,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 365, Art. no. 114919, 2024.

【国際学会】

1. R. Nakashima *et al.*, “Laser-fabricated piezoresistive force sensor with liquid immersion laser sidewall-doping,” *Proc. Transducers 2025*, pp. 255-258, Orlando, USA, Jun. 29- July 3, 2025.
2. R. Nakashima *et al.*, “Laser-based fabrication process for piezoresistive cantilever using flash laser annealing,” *Proc. of MEMS2024*, pp. 614-617, Austin, USA, Jan. 21-25, 2024.
3. R. Nakashima and H. Takahashi, “6-axis force-torque sensor utilizing four pairs of standing laser-induced graphene cantilevers,” *Proc. of IEEE Sensors 2023*, 1345, Vienna, Austria, Oct. 29 - Nov. 1, 2023.

【国内学会】

1. 中島利八郎　他，“液浸レーザ側壁ドーピングを用いたピエゾ抵抗型力センサ，”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-3，ライトキューブ宇都宮，栃木，Nov. 10–13, 2025.
2. 中島利八郎　他，“レーザアニールを用いて一括製作したピエゾ抵抗型カンチレバー，”第 41 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム，26A2-D-1，仙台国際センター，宮城，Nov. 25–28, 2024.
3. 中島利八郎　他，“RES構造と斜立したLIGカンチレバーを利用した三軸触覚センサ，”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，6P3-M-4，熊本城ホール，熊本，Nov. 6–9, 2023.

［研究助成（C）］

人工知能を用いた骨盤正面 X 線画像からの四肢筋肉量推定と活動量調査

2257010



研究代表者（助成金受領者）	愛媛大学　大学院医学系研究科整形外科学	博士課程	西　村　亮　祐
共同研究者	愛媛大学　大学院医学系研究科整形外科学	教授	髙　尾　正　樹

［研 究 の 目 的］

1. 研究背景

近年，人工股関節全置換術（THA）を受ける患者数は増加傾向にあり，術後の機能回復の質を高めることが整形外科領域における重要な臨床課題となっている。特に高齢患者においては，術後のリハビリテーションの成否が日常生活動作（ADL）の回復に直結するため，術前から患者個々の身体機能を精度高く把握することが求められている。筋肉量の評価はリハビリテーション計画立案において中心的な指標であるが，従来の MRI や CT による評価は高コストかつ施設・設備の制約があり，日常的な臨床現場での活用には限界があった。一方，AI を用いた単純 X 線写真の解析は，既存の設備を活用した非侵襲的かつ簡便な手法として近年急速に注目を集めており，外来診療や一般的な整形外科施設においても広く応用が期待される技術である。単純 X 線写真は整形外科診療において最も普及した画像検査であり，その活用価値を AI によってさらに引き出すことは，医療資源の効率的な活用という観点からも意義深い（図 1, 2）。また，術後の回復状況を客観的かつ継続的に把握するツールとして，wearable 端末による身体活動量の計測が有用であることが近年多くの研究で示されている。患者が日常生活の中で装着し続けることで，外来受診時だけでは把握しきれない活動レベルの変化を連続的に記録できる点で，従来の主観的評価を補完する客観的指標として優れている。これら二つの技術――AI による筋肉量の定量評価と wearable 端末による活動量計測――を組み合わせることで，術前の筋肉量評価に基づいた個別最適なリハビリテーション計画の立案が可能になると考えられる。さらに，術後の活動量を

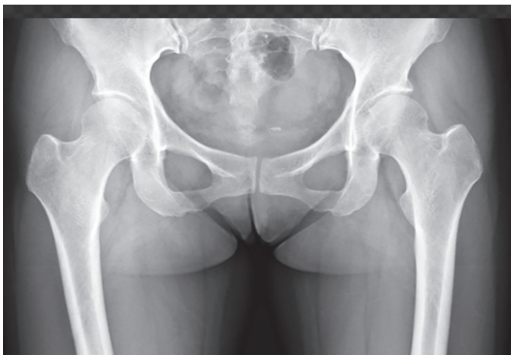


図 1　股関節正面 X 線写真



図 2　人工股関節全置換術（THA）

予測・モニタリングする新たな臨床的枠組みの構築につながることが期待される。

2. 研究目的

術前の単純 X 線写真から AI により推算した股関節周囲筋の筋肉量と，THA 前後の身体活動量との相関を明らかにすること。

［研究の内容，成果］

方法

AI による筋肉量算出

THA 術前の，骨盤・股関節の単純 X 線写真から，AI を用いて撮影範囲内の筋肉量を算出した。この AI は大阪大学・奈良先端大学院大学と共同研究している AI ツールである。この AI は CT で筋肉・脂肪・骨を分けて作った教師データを用い，X 線画像を筋ごとの定量画像に分解する multi-channel image translation を学習している。さらに，骨は剛体で位置合わせしやすいという性質を利用し，推定精度を高めている［1］。この AI からは，大殿筋，中殿筋，小殿筋，腸骨筋，内閉鎖筋，外閉鎖筋，恥骨筋，梨状筋，大腿筋膜張筋を算出できる。

中高強度身体活動（moderate-to-vigorous physical activity: MVPA）

3 ～ 5.9METs の身体活動強度である MVPA は，単なる歩数よりも活動の質を反映する。WHO は成人に対して週 150–300 分の中強度活動，または 75–150 分の高強度活動を推奨しており，MVPA は身体機能回復の評価軸として臨床的意義が高い［2, 3］（図 3）。また，MVPA は，健康アウトカムと最も強く関連する身体活動強度領域の一つであり，心血管イベント，代謝障害，死亡リスク低下との関連が確立している［4］。

THA 後患者でも，加速度計由来 MVPA は術後の歩数，患者立脚型機能，QOL の改善と併せて追跡すべき指標とされ，少なくとも術後 3 か月から 1 年，さらに 3 年にかけて改善する可能性が報告されている［5, 6］。

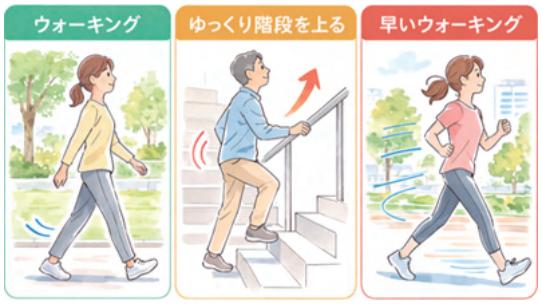


図 3　代表的な MVPA の運動



図 4　オムロン社活動量計

MVPA は，歩数や総エクササイズ量のみでは捉えにくい「十分な強度を伴う活動回復」を評価できる点にある。THA 後の患者では疼痛軽減だけでなく，立脚期安定性，骨盤制御，回旋安定性が揃ってはじめて MVPA が増えると考えられるため，筋肉の質的な回復を反映する可能性がある［5-7］。

身体活動計測

身体活動はオムロンヘルスケア社製 Active style Pro HJA-750C を用いて評価した。HJA-750C は 3 軸加速度センサを搭載し，10 秒ごとに METs を記録し，歩行と生活活動を独自アルゴリズムで識別できる［8, 9］。有効測定日は，装着時間 600 分 / 日（10 時間 / 日）以上を満たした日と定義した。これは高齢者や一般成人を対象とした加速度計研究で広く用いられる［10-12］（図 4）。

対象患者と測定項目

当院で施行した THA の患者，86 例（全員女性），平均年齢は 63.5 ± 9.2 歳であった。

AI 算出の股関節周囲筋の筋肉量と，活動量計から算出した MVPA の活動時間と，活動時間×活動強度（METs）で表されるエクササイズ量（総，MVPA）を算出した。

計測地点は，術前，入院中（術後 2 週），3 か月の 3 地点を計測した。

統計解析

術前筋肉量（g）を説明変数，術前・入院中・3 か月の身体活動指標を目的変数とし，被験者内相関を考慮した generalized estimating equation（GEE）を用いて縦断解析した［13］。係数は標準化 β として表示し，両側 $p < 0.05$ を有意とした。

結果

術前筋肉量を説明変数，術前・入院中・3 か月の身体大殿筋，梨状筋，外閉鎖筋，内閉鎖筋，恥骨筋，大腿筋膜張筋，および合計筋量は，活動量（Ex 合計），MVPA Ex，MVPA 時間のすべてに対して有意な正の関連を示した。

大殿筋は，活動量（標準化 β=0.285, p=0.011），MVPA Ex（標準化 β=0.280, p=0.011），MVPA 時間（標準化 β=0.279，p=0.011）のいずれとも有意に関連した。中殿筋は，活動量（標準化 β=0.211，p=0.076），MVPA Ex（標準化 β=0.209, p=0.076），MVPA 時間（標準化 β=0.210，p=0.071）といずれも正の傾向を示したが，有意には至らなかった。小殿筋も同様に，活動量（標準化 β=0.216, p=0.053），MVPA Ex（標準化 β=0.212, p=0.054），MVPA 時間（標準化 β=0.211, p=0.052）と一貫して正の傾向を示したものの，有意差は認めなかった

腸骨筋についても，活動量（標準化 β=0.192, p=0.077），MVPA Ex（標準化 β=0.187, p=0.083），MVPA 時間（標準化 β=0.185, p=0.085）といずれも有意ではなかった。

一方，梨状筋は活動量（標準化 β=0.204，p=0.045），MVPA Ex（標準化 β=0.199, p=0.047），MVPA 時間（標準化 β=0.200, p=0.044）のすべてで有意な正の関連を示した。外閉鎖筋は，活動量（標準化 β=0.247, p=0.008），MVPA Ex（標準化 β=0.245，p=0.008），MVPA 時間（標準化 β=0.247，p=0.007）と，比較的強い正の関連を示した。内閉鎖筋も，活動量（標準化 β=0.239, p=0.035），MVPA Ex（標準化 β=0.237, p=0.033），MVPA 時間（標準化 β=0.241, p=0.027）において有意な正の関連を認めた。恥骨筋は，活動量（標準化 β=0.254, p=0.018），MVPA Ex（標準化 β=0.250，p=0.018），MVPA 時間（標準化 β=0.248，p=0.018）のすべてで有意であった。大腿筋膜張筋も，活動量（標準化 β=0.187，p=0.042），MVPA Ex（標準化 β=0.185, p=0.041），MVPA 時間（標準化 β=0.180，p=0.044）に対して有意な正の関連を示した。さらに，合計筋量についても，活動量（標準化 β=0.271，p=0.018），MVPA Ex（標準化 β=0.267, p=0.018），MVPA 時間（標準化 β=0.266，p=0.018）のすべてに有意な正の関連を認めた（図 5, Table 1）。

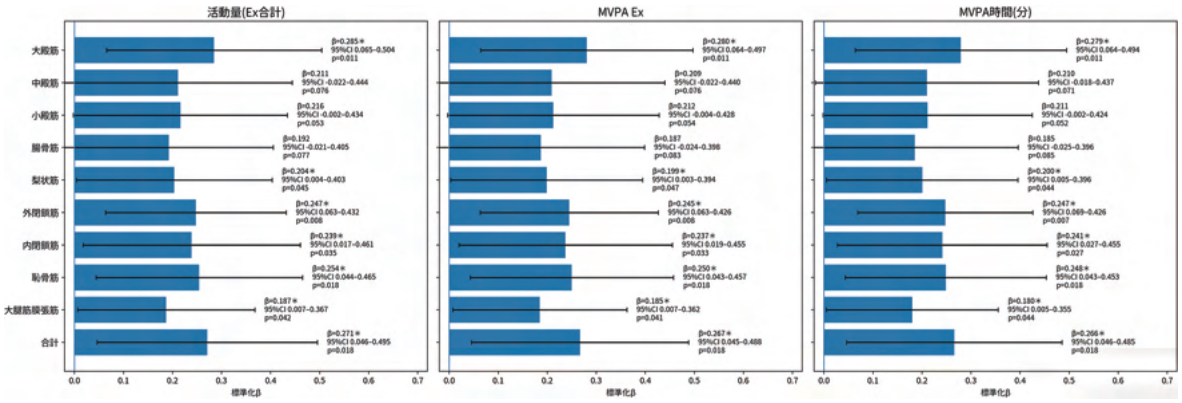


図 5　各筋肉と活動量の関連

Table 1　各筋肉と活動量の関係

筋肉	活動量 β	活動量 95%CI	活動量 p 値	MVPA Ex β	MVPA Ex 95%CI	MVPA Ex p 値	MVPA 時間 β	MVPA 時間 95%CI	MVPA 時間 p 値
大殿筋	0.285*	0.064–0.507	0.011	0.280*	0.062–0.499	0.011	0.279*	0.062–0.497	0.011
中殿筋	0.211	–0.022–0.444	0.076	0.209	–0.022–0.440	0.076	0.21	–0.018–0.438	0.071
小殿筋	0.216	–0.004–0.436	0.053	0.212	–0.004–0.429	0.054	0.211	–0.003–0.425	0.052
腸骨筋	0.192	–0.021–0.405	0.077	0.187	–0.024–0.398	0.083	0.185	–0.026–0.396	0.085
梨状筋	0.204*	0.004–0.403	0.045	0.199*	0.002–0.397	0.047	0.200*	0.006–0.394	0.044
外閉鎖筋	0.247*	0.064–0.431	0.008	0.245*	0.064–0.427	0.008	0.247*	0.067–0.427	0.007
内閉鎖筋	0.239*	0.016–0.461	0.035	0.237*	0.019–0.455	0.033	0.241*	0.027–0.454	0.027
恥骨筋	0.254*	0.044–0.464	0.018	0.250*	0.042–0.458	0.018	0.248*	0.041–0.455	0.018
大腿筋膜張筋	0.187*	0.007–0.367	0.042	0.185*	0.008–0.362	0.041	0.180*	0.005–0.355	0.044
合計	0.271*	0.046–0.495	0.018	0.267*	0.045–0.490	0.018	0.266*	0.044–0.488	0.018

考察

今回の結果は，股関節周囲筋のうち，大殿筋および深部外旋筋群，ならびに恥骨筋，大腿筋膜張筋，合計筋量は，THA 周術期から術後 3 か月までの身体活動指標と有意に関連していた。一方で，中殿筋，小殿筋，腸骨筋は正の関連傾向を示したものの，有意な関連には至らなかった。これは，THA 周術期から術後 3 か月にかけての身体活動が，一般に注目されやすい外転筋群だけでなく，股関節の深部安定化に関与する筋群の影響を強く受けている可能性を示している。

まず，大殿筋が有意であったことは臨床的に妥当である。大殿筋は股関節伸展の主働筋であり，立ち上がり，歩行推進，階段昇降など，MVPA を構成する高強度寄りの日常動作に深く関与する。歩行関連研究では，大殿筋や中殿筋の筋活動は歩行課題や支持性の変化に応じて増大しうることが示されており［14］，また THA 後の身体活動は術後 3 か月以降に増加し，歩数や患者立脚型機能の改善と関連することが報告されている［5, 6］。

このため，術前の大殿筋量が豊富な症例ほど，術前から術後 3 か月までを通した身体活動を高い水準で維持・回復しやすかった可能性がある。

一方で，中殿筋や小殿筋が有意に至らなかった点は重要である。中殿筋は股関節外転筋として THA 領域で最も注目され，術前の中殿筋萎縮が術後の跛行や歩行能力の予測因子となることも報告されている［7］。しかし，中殿筋は主に片脚支持時の骨盤安定性や歩行の質に関わる一方，今回のアウトカムは「歩行能力そのもの」ではなく，術前・入院中・3 か月を通した実生活下の活動量と MVPA であった。この違いが，中殿筋で有意に至らなかった一因と考えられる。加えて，中殿筋は代償動作や対側機能の影響を受けやすく，歩行速度の上昇のみでは選択的な活動増加が明確でない可能性もある［14］。

深部筋，特に梨状筋，外閉鎖筋，内閉鎖筋，恥骨筋が有意であった理由としては，これらが股関節求心位の保持，回旋制御，微細な荷重応答に関わるためと考えられる。外閉鎖筋は大腿骨頭頸部の下方に走行し，股関節の安定化に寄与するとされる［15］。また，梨状筋および内閉鎖筋を含む短外旋筋群は，THA 後の後方安定性や内旋抵抗に関与し，股関節の過剰な内旋を抑制する役割が示されている［16, 17］。これらの深部筋は，単なる関節運動の出力筋というより，荷重時の不安定感を減らし，回旋方向の微細な制御を担う「深部安定化筋」として機能すると解釈できる。そのため，深部筋量が保たれている症例ほど，疼痛や不安定感を抑えながら，より高い活動量や MVPA を達成しやすかった可能性がある。

Limitaion

本研究にはいくつかの限界がある。第一に，症例数が大きくはなく，特に中殿筋・小殿筋のように正の傾向を示しながら有意に至らなかった筋では，検出力不足の影響が考えられる。第二に，筋肉量は主としてベースラインの解剖学的指標であり，術後の筋機能回復や神経筋協調そのものを直接反映するものではない。第三に，身体活動は加速度計で客観評価しているものの，疼痛，脚長差，術式，リハビリテーションの遵守，反対側股関節の状態，年齢や BMI などの交絡因子を十分に調整していない。第四に，今回の解析は関連を示したものであり，因果関係を証明するものではない。さらに，THA 症例に限定された単施設データであるため，他集団への一般化には慎重さが必要である。

結論

THA 周術期から術後 3 か月までの身体活動指標は，大殿筋に加えて，梨状筋，外閉鎖筋，内閉鎖筋，恥骨筋などの深部股関節周囲筋と有意に関連した。一方で，一般に注目される中殿筋は正の傾向を示しつつも有意には至らなかった。これらの結果は，THA 後の身体活動や MVPA の維持・向上には，外転筋のみならず，股関節の深部安定化筋群を含めた包括的評価と介入が重要であることを示唆する。

［参考文献］

1. Gu Y, MSKdeX: Musculoskeletal decomposition from an X-ray image for fine-grained estimation of lean muscle mass and muscle volume. In: MICCAI 2023 Accepted Papers.
2. World Health Organization. Physical activity recommendations for adults. WHO; 2020.
3. Bull FC, World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. *Br J Sports Med*. 2020; 54: 1451-62.
4. Ekelund U, Joint associations of accelerometer-measured physical activity and sedentary time with all-cause mortality: a harmonised meta-analysis in more than 44,000 middle-aged and older individuals. *Br J Sports Med*. 2020; 54: 1499-506.
5. Matsunaga-Myoji Y, Three-Year Follow-Up Study of Physical Activity, Physical Function, and Health-Related Quality of Life After Total Hip Arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2020; 35: 198-203.
6. Harada S, Predictors of physical activity recovery after total hip arthroplasty: a prospective observational study. *Int Orthop*. 2024; 48: 753-60.
7. Nankaku M, Preoperative gluteus medius muscle atrophy as a predictor of walking ability after total hip arthroplasty. *Phys Ther Res*. 2016; 19: 8-12.
8. OMRON Healthcare Co., Ltd. Active style Pro HJA-750C product information.
9. OMRON Healthcare Co., Ltd. HJA-750C feature page: tri-axial accelerometer, 10-second METs recording, and discrimination of locomotive/non-locomotive activity.
10. Herrmann SD, Impact of accelerometer wear time on physical activity data: a NHANES semisimulation data approach. *Br J Sports Med*. 2014; 48: 278-82.
11. Gorman E, Accelerometry analysis of physical activity and sedentary behavior in older adults: a systematic review and data analysis. *Eur Rev Aging Phys Act*. 2014; 11: 35-49.
12. Silva FM, The sedentary time and physical activity levels on physical fitness in the elderly: a comparative cross sectional study. *Int J Environ Res Public Health*. 2019; 16: 3697.
13. Zeger SL, Models for longitudinal data: a generalized estimating equation approach. *Biometrics*. 1988; 44: 1049-60.
14. Lee SK, Muscle activity of the gluteus medius at different gait speeds. *J Phys Ther Sci*. 2014; 26: 1915-7.
15. Kawaguchi Y, Functional and clinical anatomy of the obturator externus muscle: cadaveric studies and clinical findings for total hip arthroplasty in the posterior approach. *J Orthop*. 2021; 25: 93-97.
16. Solomon LB, Anatomy of piriformis, obturator internus and obturator externus: implications for the posterior surgical approach to the hip. *J Bone Joint Surg Br*. 2010; 92: 1317-24.
17. Baba K, Impacts of external rotators and the ischiofemoral ligament on preventing excessive internal hip rotation: a cadaveric study. *J Orthop Surg Res*. 2022; 17: 19.

［成果の発表，論文など］

・第 40 回 日本整形外科学会基礎学術集会
ポスター発表

・第 56 回 日本人工関節学会
一般演題（口演発表）

・第 19 回 日本 CAOS 学会
（Computer Assisted Orthopaedic Surgery）
一般演題（口演発表）

［研究助成（C）］

生体利用型マルチモーダルセンサ系と匂い情報を活用した人捜索システムの構築

2237010



研究代表者
（助成金受領者）
千葉大学　大学院融合理工学府　博士後期課程
福　井　千　海

［研 究 の 目 的］

本研究の目的は，蚊の感覚受容器官が備える高感度かつ高選択的な化学受容機能を工学的に利用し，匂い情報を活用してヒトを追跡・発見できる人捜索システムの基盤を構築することである。昆虫は，餌，交尾相手，産卵場所，宿主といった生存に重要な対象を，空気中を流れる複雑な匂い情報から探索することができる。特に蚊は，ヒト由来の揮発性化学物質，二酸化炭素，熱，湿度，視覚情報など複数の手掛かりを統合しながら宿主を選択的に探索すると考えられており，この仕組みは，視覚に依存しにくい新しい探索技術の着想源となる。

一方で，従来の人工的な小型匂いセンサでは，実環境中でヒトに由来する匂いを高速かつ選択的に検出することは容易ではなく，災害現場や視界不良環境における人捜索への応用には限界がある。そこで本研究では，蚊の感覚受容器官そのものをセンサ素子として活用する匂いセンサを構築するとともに，蚊の宿主探索行動の知見を取り入れたマルチモーダルな人捜索システムへと発展させることを目指した。具体的には，まず蚊の触角を利用したヒト臭検出センサの成立性を検証し，さらに将来的な視覚，熱，距離，気流等の情報と統合した人探索系へ接続することを想定して，センサの小型軽量化とロボット搭載可能性を探った。

本研究の特色は，生物が進化の過程で洗練させてきた宿主選択機構を工学的な探索システムへ橋渡ししようとする点にある。このアプローチにより，雪崩，地震，煙霧環境など視覚情報が制限される状況における要救助者探索への応用可能性を拓くとともに，匂い情報を活用した安全・安心な探索技術の創出に資することを目標とした。

［研究の内容，成果］

本研究では，最終的に匂い情報を活用した人捜索システムへ接続可能な基盤技術として，蚊の触角を利用した匂いセンサの構築，蚊の宿主探索行動の観察，および匂いセンサを実装した人捜索ロボットシステムの構築を段階的に進めた。当初計画では，1年目に蚊触角を利用したヒト臭検出センサの開発と基礎性能評価，および蚊の宿主探索行動の観察用実験装置の構築，2年目にその性能向上と小型軽量化，および蚊の宿主探索行動の観察，3年目に匂いセンサを実装した人捜索ロボットシステムの構築および評価を実施することとしていた。本助成期間中は，特に蚊触角利用型匂いセンサの成立性の検証，検出性能の評価，小型軽量化，ならびに今後のロボット統合に向けた技術課題の整理に重点を置いて研究を進めた。

まず，助成初年度には，空気中からヒト臭を直接検出するための蚊触角利用型匂いセンサの成立性を検討した。対象とした感覚器は主に交尾済の雌の触角であり，触角が匂い刺激に応答して生じる神経活動を電気信号として計測する

ため，差動増幅回路を備えた計測用基板を製作した。製作した基板は，フィルタとアンプを搭載し，2本1組の電極に入力された微小な電位差を増幅して取得できる構成とした。これにより，蚊触角を工学的な匂いセンサとして利用するための基本的な計測基盤を整備した。

次に，蚊触角と電極の接続方法について検討した。当初は，従来の触角電図法（electroantennography; EAG）に準じて触角の両端を切断し，導電性ゲルを介して電極と接続する方式を試みたが，S/N比が低く十分な応答が得られなかった。この結果を踏まえ，触角を身体から切り離さずに計測する方式へと方針を転換した。具体的には，麻酔・固定した蚊の頭部に基準電極を挿入し，触角先端を切断したうえで，その切断面に導電性ゲルを塗布し，記録電極を接触させる構成を採用した。この方法により，比較的大きなS/N比で応答を取得でき，ヒト臭を検出できることを確認した。この知見は，蚊触角を利用したヒト臭センサの成立性を示す初期結果として重要である。

一方で，蚊触角は細く脆弱であり，単純な接触のみの接続では振動や位置ずれにより電極が分離しやすいという課題が残った。このため，接触安定性と再現性を高めるための電極構造の検討を継続した。特に，触角の切断端を安定して記録電極へ接続すること，および接続の作業性を落とさずに，基準電極を含めた系全体の機械的安定性を確保できる機構が，生体器官をセンサとして利用するうえで重要であることが明らかとなった。さらにこれらの検討を通じて，蚊触角利用型センサでは，感覚器官そのものの感度や選択性だけでなく，感覚器と電極との界面設計が性能を大きく左右することが明らかとなった。

自作の回路・基板による蚊触角利用型匂いセンサの成立性の検討の後，専用のアンプおよびA/Dコンバータを導入し，簡易回路で得られていた初期結果を基準機器で再検証した。その結果，蚊触角利用型匂いセンサは，匂い源から離れてもヒト臭構成成分を検出できることが確認された。さらに，繰り返し刺激に対する耐久性も有していることが示唆された。これらの結果は，単に応答が得られるだけでなく，一定距離を隔てた条件でも利用可能性があること，および時間的に連続した運用に向けた基礎データが得られたことを示している。

これらの結果を受けて，ロボット搭載を見据えた小型軽量な蚊触角利用型匂いセンサの構築を進めた。既存の小型基板設計を活用しつつ，蚊触角に適した電極系として，複数種類の電極から構成される電極構造を考案した。このような構造にすることで，触角接続の作業性を維持しつつ，安定した触角-電極接触を比較的長時間維持することが可能となった。構築した小型軽量センサを実験的に評価したところ，ヒト臭構成成分を繰り返し検出できることが示され，蚊触角利用型匂いセンサを固定された計測系から，可搬・搭載可能なモジュールへ近づけることができた。この点は，最終目標である人捜索システムへの実装に向けた重要な前進である。

蚊の宿主探索行動の理解を深めるため，行動実験用アリーナを構築し，実験を実施した。アリーナは，断面を縦横約2 m，長さを約5 mとし，周囲に複数台の高速度カメラおよび赤外線照明を設置した。さらに，アリーナ後方に送風機を設置して内部に気流を発生させるとともに，上流側にはベルマウスを設置し，流入気流をできるだけ乱さないよう配慮した。加えて，アリーナの内外は逸走防止用ネットで仕切り，実験個体が外部へ逸走しない構造とした。このようにして，蚊の宿主探索行動を安全かつ再現性よく観察するための基盤的な実験環境を整備した。

構築したアリーナを用いた行動実験では，上流側に実験者が立った状態で，蚊をアリーナ内に放って行動を観察した。その結果，吸血のモチベーションが高いと考えられる個体は，アリーナ内に放たれると速やかに上昇と上流方向への前進を開始し，その後，徐々に飛行高度を

下げながら，実験者の頭部周辺に対応する位置のネットへ到達することが多いことが観察された。本研究助成期間内では，解析に十分な量のデータが得られておらず，飛行軌跡や各種の宿主手掛かりの寄与を定量的に評価する段階には至っていない。しかし，このような大規模な空間でも速やかな宿主探索を実行できる能力や感覚受容器官を蚊が有しており，それを実験室内で直接確認できた点や，このような実験の成立性，ノウハウが得られた点は極めて重要であった。このように，今後の詳細な解析へ接続できる見通しが得られたことは，本研究の今後の展開に向けた貴重な基盤となりうる。

これまでの実験結果を受け，構築した小型軽量な蚊触角利用型匂いセンサを地上走行型ロボットに搭載・統合して，匂い情報を活用した人捜索システムの構築を進めた。本研究では，比較的低コストで自由な行動コマンドを実行でき，なおかつ LiDAR 等の成熟が進んだセンサを備えるロボットをプラットフォームとして採用した。

助成期間中の人捜索システムの構築においては，蚊触角利用型匂いセンサで得られる情報を基に行動を制御することが可能であるという基礎的な点を実証することに焦点を当てた。そのため，匂いセンサとロボットの物理的な接続は，ロボット上にロッドを立て，そこに匂いセンサを固定するという簡単なものとした。

ソフトウェア・ハードウェアの統合を終えたのち，実験的な評価を行った。その結果，ヒト呼気の検出に基づいて前進を繰り返し実行することに成功し，蚊触角利用型匂いセンサを用いた人捜索ロボットの実現可能性が示された。本研究で開発した匂いセンサや蚊触角-電極構造は，ロボットの行動中に発生する機械的なノイズ下でも安定して動作することが明らかとなり，今後のさらなる人捜索ロボットの開発につながる重要な知見が得られた。

本研究では，工学的観点から生体器官の利用とロボットへの統合，およびロボット上での動作を目指した。この過程で，従来の触角接続方式をそのまま応用するだけでは感度が不十分であることが明らかとなった。また，工学的観点から考えると，接続の機械的な安定性をいかに担保するかが重要であることも明らかとなった。蚊触角は直径数十 μm 程度の非常に脆弱な器官であり，振動や時間経過，外気への曝露によって急速に劣化し物理的に損傷することが観察された。今後の展開として，さらに安定した接続方式の模索や，感覚器官をそのまま使用するだけでなく，より根本的な構造，すなわち受容体のみの利用などの方向性も考えられる。

［成果の発表，論文など］（それぞれ新しい順）

■国際論文

1. **C. Fukui**, J. Hoshina, S. Shimakawa, Y. Yamamoto, H. Liu, D. Terutsuki, T. Nakata, “Effect of the Wake Induced by a Drone on Olfactory Sensing,” *Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms*, vol. 11, no. 1, pp. 28–37, 2025. (Peer-reviewed)
2. **C. Fukui**, T. Uchida, S. Koizumi, Y. Murayama, H. Liu, T. Nakata, D. Terutsuki, “Advanced bio-hybrid drone for superior odor-source localization: high-precision and extended-range detection capabilities,” *npj Robotics*, vol. 3, Art. no. 4, 2025. (Peer-reviewed; **Selected as Hero image** (heading image); **Altmetric = 176** [checked 2026-02-17]; Altmetric details: This article is in the 99th percentile (ranked 2,997th) of the 370,973 tracked articles of a similar age in all journals and the 80th percentile (ranked 1st) of the 5 tracked articles of a similar age in *npj Robotics*)
3. T. Nakata†, D. Terutsuki†, **C. Fukui**, T. Uchida, K. Kanzaki, T. Koeda, S. Koizumi, Y. Murayama, R. Kanzaki, H. Liu, “Olfactory sampling volume for pheromone capture by wing fanning of silkworm moth: a simulation-based study,” *Scientific Reports*, vol. 14, Art. no. 17879, 2024. (Peer-reviewed; †Co-first and corresponding authors)

■国際学会

1. ○**C. Fukui**, T. Nakata, D. Terutsuki, Enhanced bio-hybrid drone for long-range odor source localization, The 9th International Symposium on Aero-aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC 2024), Bangkok, Thailand, 26–28 November 2024. Oral presentation. Peer-reviewed.

■国内学会（ポスター / シンポジウム発表 査読なし）

1. ○**福井千海**，内田智也，劉浩，照月大悟，中田敏是，停

止動作を取り入れたバイオハイブリッドドローンによる長距離匂い源探索，ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2025 in Yamagata，山形ビッグウイング・やまぎん県民ホール，山形，2025年6月4–7日．ポスター．

2. ○福井千海，内田智也，祐川侑司，神崎亮平，中田敏是，照月大悟，バイオハイブリッド匂い源探索ロボットの探索アルゴリズムの改良，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023，名古屋国際会議場，愛知，2023年6月28日–7月1日．

3. ○福井千海，内田智也，小泉咲人，村山友太，祐川侑司，神崎亮平，照月大悟，中田敏是，匂い源探索ドローンに適した匂いセンサの配置の検討，日本機械学会 第35回バイオエンジニアリング講演会，日立システムズホール仙台，宮城，2023年6月3–4日．

■国内学会（口頭発表 査読なし）

1. ○福井千海，近藤匠，村上颯一郎，照月大悟，劉浩，中田敏是，ヒト探索ロボットのための長距離ヒト臭検出技術の開発，日本機械学会 第35回バイオフロンティア講演会，横浜国立大学 経済・経営学部講義棟，神奈川，2024年12月14–15日．**第35回バイオフロンティア講演会若手講演表彰**．

■産業財産権

1. 特願 2025-106666

2. 特願 2025-081109

［研究助成（C）］

ヒト疾走中のアキレス腱 最大 Strain を医工計測から予測する

2257012



研究代表者（助成金受領者）	筑波大学 大学院人間総合科学学術院	博士後期課程 / 日本学術振興会 特別研究員	藤　森　俊　秀
共同研究者	筑波大学体育系	助教	佐　渡　夏　紀

［研 究 の 目 的］

アキレス腱の断裂は，スポーツにおける疾走動作中に突発的に発生し，受傷以前のレベルでの競技復帰が難しい傷害としてスポーツ競技者から恐れられている。本研究は腱断裂の発生要因と考えられている腱 Strain（腱の歪み）を，競技者本人を対象とした医科学計測によって予測可能にする試みである。

アキレス腱は下腿三頭筋と踵骨を結んでいる，ヒト生体で最も大きな腱組織である。腱組織はバネのように力に応じて引き伸ばされて，力が解放されると縮む，バネのような特性を持っている。様々なスポーツ競技で用いられる疾走動作では接地している足を蹴り出す時に，アキレス腱に最大で体重の 8 倍から 10 倍もの張力が作用し，大きく引き伸ばされていると推定されており，疾走動作の「要」といえる。アキレス腱断裂を代表とする腱障害は疾走中に好発し，競技者の 30% が腱障害を経験する（Kujala et al., 2005），手術・リハビリ後も完全には受傷前の状態には戻らず，選手生命に影響することも多いため，受傷の可能性を予測し断裂を予防可能になることが望まれている（図 1）。

Cadaver や動物の摘出腱を用いた引張試験から，腱組織は張力に応じて引き伸ばされ，腱の Strain がある閾値（例えば 8%）を超えたときに腱が断裂することが示されてきた（Robi et al., 2013）（図 2）。そこで我々は，疾走動作中のアキレス腱の Strain を非侵襲的に撮影することができれば，アキレス腱断裂の危険性を予測できるようになる可能性があると考えた。

アキレス腱は生体の内部に位置しているため，外部から目で観察することができない。生きているヒトのアキレス腱を生体内から摘出せず，非侵襲的に Strain を観察する手法として，MRI を用いた手法や超音波 B モード画像を用いた手法が用いられてきた。しかしながら，MRI では狭い MR 装置内でしか観察できない，超音波法では超音波診断装置と研究対象者が数 m のケーブルで接続されているため自由に動き回ることができないなどの問題点があり，疾走動作をはじめとする移動を伴うダイナミックな



図 1　アキレス腱の概要

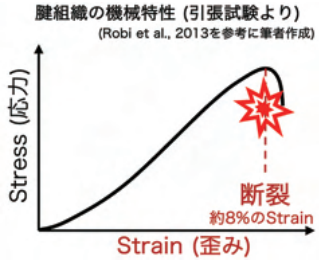


図 2　腱の Stress-Strain 関係

運動中の観察は技術的に実施不可能であった。したがって，疾走中のアキレス腱がどの局面でどれだけ歪むのか，歪みにどれだけ個人差があるのかはこれまでブラックボックスとなってきた。

我々は，このような技術的な問題点を解決する方法として，ポータブルかつ無線の超音波画像装置を用いた実験系の確立に取り組んだ。この手法の確率によって，疾走中の競技者のアキレス腱 Strain の観察をすることが可能になり，さらに各競技者の筋腱複合体の特性の計測を組み合わせることによって，疾走中のアキレス腱 Strain を事前に予測できるのではないかと考えた。疾走実験を可能とした本研究を手始めに，アキレス腱 Strain の定量とその要因が特定されれば，傷害発生機序の解明につながる知見が得られ，更に本研究をもとにした前向き研究が実施できれば，将来的には競技者個々人の傷害リスクを評価できるようになると期待できる。

［研究の内容，成果］

本研究は主に 2 つの実験から構成される。実験Ⅰでは各競技者の腱の力学特性を定量するための生体計測を行い，実験Ⅱでは各競技者の疾走動作中のアキレス腱の Strain を定量するための実験を行った。

①研究対象者

本研究には，陸上競技 男子短距離走競技者 15 名（年齢：21.3 ± 1.6 歳，身長 174.4 ± 6.2 cm，身体質量 69.9 ± 6.7 kg）が研究対象者として参加した。研究対象者の競技記録は，100 m 走の自己ベスト記録 11.21 ± 0.42 秒，100 m 走のシーズンベスト記録 11.33 ± 0.56 であり大学全国大会出場レベルから大学一般レベルの競技者が参加した。

傷害歴が研究結果に影響しないよう，研究参加の除外条件としてアキレス腱断裂歴がないこと，実験日から過去 6 ヶ月間に下肢の傷害歴がないことを設定し，15 名すべての研究対象者が除外条件に当てはまらなかった。

研究対象者には研究参加前に文章を用いて研究の説明をしたうえ，書面で同意をとった。なお，本研究はヘルシンキ宣言に則って実施され，ヒトを対象とする筑波大学の研究倫理委員会の許可のもと実施した（倫理番号 体 023-106）。

②実験Ⅰ

すべての研究対象者は 30 分以上のウォーミングアップを各自で実施した後に実験に参加した。ウォーミングアップの後，Fujimori and Sado（2025）と類似の方法を用いて，各研究対象者のアキレス腱剛性（アキレス腱の機械的な伸びにくさ）を計測した。

実験Ⅰでは超音波画像装置・足関節底屈トルク計・モーションキャプチャを用いて実験が実施された（図 3）。

実験中，研究対象者はトルク計が取り付けられたベット上にうつ伏せになり，足関節と身体を固定された。その状態で，足関節底屈トルクを努力度 0% から 100% まで徐々に発生させ，その時の関節トルクが計測される。また，その際に生体内部でアキレス腱が引き伸ばされていく様子を，トルク計と同期した超音波画像装置を用いて取得する。取得された足関節底屈トルクを各研究対象者のアキレス腱モーメントアームで除すことによってアキレス腱にかかる張力を推定した。アキレス腱の張力とアキレス腱の伸長のデータを用いて，アキレス腱剛性を算出する（図 4）。

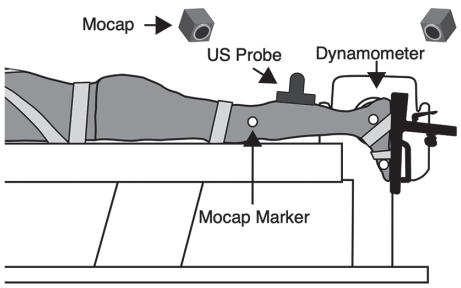


図 3　実験Ⅰの実験設定

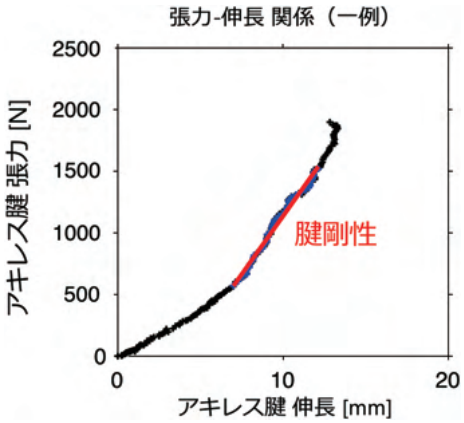


図 4　腱の力–伸長関係の一例

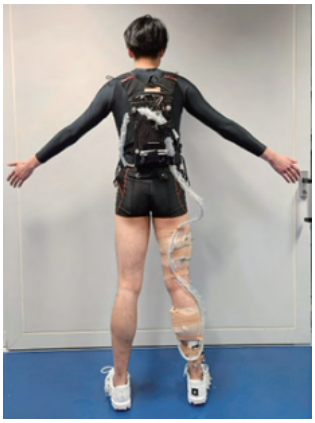


図 6　無線化した超音波画像装置を装着した研究対象者

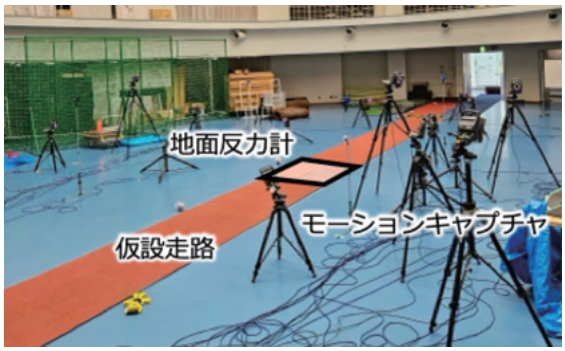


図 5　実験Ⅱの実験設定

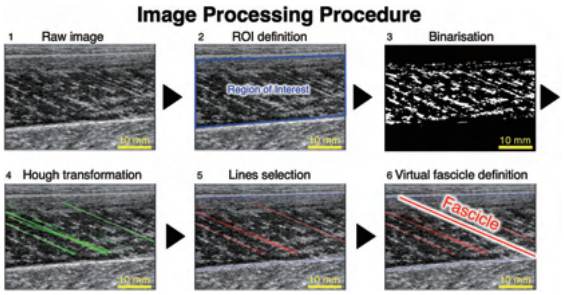


図 7　超音波画像の分析手法

③実験Ⅱ

実験Ⅱでは，全力疾走動作中のアキレス腱 Strain を測定した。実験は陸上競技の公式大会で使用されるものと同じ素材のサーフェスで構成した仮設の屋内走路にて実施した（図 5）。

無線化した超音波画像装置（Telemed 社，60 mm プローブ，サンプリングレート 152 Hz）を用いて生体内部でのアキレス腱の挙動を取得，モーションキャプチャ（Vicon Motion Systems 社，サンプリングレート 250 Hz）を用いて下肢の関節運動を取得，地面反力計（Kistler 社，サンプリングレート 1000 Hz）を用いて地面から足部に作用する力を取得した。

無線化した超音波画像装置は，研究対象者が背中に背負うように身体に密着させて固定し，疾走動作の邪魔にならないよう調整した（図 6）。

得られた超音波画像データから，疾走動作中のアキレス腱の伸長動態を分析した。超音波画像は，152 フレーム / 秒の高フレームレートで取得したため，手作業での分析には莫大な時間がかかり，進めることが困難であった。この問題を解決するために，Hough 変換を用いた，半自動分析プログラムの作成を行い，現在分析を進めている（図 7）。

［要約と今後の展望］

ヒト疾走中のアキレス腱　最大 Strain を医工計測によって予測するシステムの確立を最終目標に，本研究では全力疾走動作中のアキレス腱―内側腓腹筋の筋腱動態をハイスピード超音波画像装置によって捉えること，さらに各個人のアキレス腱の力学特性を計測し，アキレス腱の伸びにくさが疾走動作中のアキレス腱 Strain に及ぼす影響の検証を目指した。

本研究では 2 つの実験を実施した。Ⅰでは生体計測によって，短距離走競技者，個々人のアキレス腱の力学特性を計測した。

実験Ⅱでは全力疾走中に各競技者の生体内部でアキレス腱が歪んでいく様子を，無線化した超音波画像装置によって捉えることに成功した。

今後，実験Ⅰと実験Ⅱを組み合わせた分析を進め，個々人のアキレス腱の特性や動作の特性が疾走動作中の腱 Strain の決定要因となりうるのか検証を進めていく。将来的には本研究で確立した手法をもとに，非侵襲的な医科学計測をトレーニング現場・競技現場で実施し，アキレス腱のコンディションのモニタリング，さらにはアキレス腱断裂のリスクの評価を行っていき，より多くの競技者がアキレス腱断裂の不安から解放され競技を楽しめるように，貢献していきたい。

［成果の発表，論文など］

Power exertion of gastrocnemius fascicle and tendon in running at different speeds: a pilot study. Toshihide Fujimori, Tempei Tominaga, Takeshi Edagawa, Natsuki Sado, 30th Congress of the International Society of Biomechanics, Stockholm, 2025.

［研究助成（C）］

能動的なヒト脳活動における脳内言語情報解読手法開発への挑戦

2257015



研究代表者 （助成金受領者）	お茶の水女子大学 大学院人間文化創成科学研究科	博士後期課程	LIU MUXUAN
共同研究者	お茶の水女子大学	教授	小　林　一　郎
	情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 脳情報通信融合研究センター	特別研究員	西　田　知　史

［研 究 の 目 的］

本研究の目的は，画像を観察した際に被験者が心の中で想起する言語内容を，非侵襲的に計測された fMRI 脳活動データから推定するための基盤的手法を構築することである。脳活動から意味内容や言語内容を解読する研究は近年進展しており，とくに音声や文章のような言語刺激を対象とした研究では，刺激系列が明確な時間軸を持つため，脳信号との対応を比較的取りやすい。実際，音声刺激データでは，BOLD 信号の遅延補正やスライディングウィンドウを用いて，単語単位の言語特徴と脳応答との対応を調べる研究が進められてきた。

しかし，画像観察時に被験者が心の中で自然に想起する文を対象とする場合，従来研究とは異なる難しさがある。この課題には音声刺激のような明確な時間軸がなく，fMRI 信号は固定長の時間系列として取得される一方，想起文の長さは一定ではない。そのため，固定長の脳活動系列と可変長の言語表現をどのように対応づけるかが大きな問題となる。また，対象は一般的な画像キャプションではなく，被験者が実際に想起した内容であるため，視覚特徴の再構成だけでは不十分であり，視覚情報・意味情報・言語表現を結び付ける必要がある。

そこで本研究では，画像と言語を統合的に扱うマルチモーダルモデルの内部表現に着目し，画像観察時の fMRI 信号と，被験者が想起した文に対応する特徴表現とを結び付けるデコーディング枠組みの構築を目的とした。特に，固定長の fMRI 信号と可変長の想起文トークン列との不整合を緩和するために，滑動平均による信号平滑化とリッジ回帰による特徴対応学習を組み合わせた。また，脳活動から直接一つの文を出力するのではなく，複数の候補文を生成し，その中から脳活動とより整合的な候補を評価・選択できるかを検証した。

［研究の内容，成果］

1. 提案手法

本研究では，画像観察時の脳活動と，被験者がその画像から心の中で想起した文との対応関係を扱うために，視覚情報と言語情報を統合的に表現できるマルチモーダルモデル LLaVA の隠れ層表現を利用した。画像観察時の fMRI 信号は固定長の時間系列として得られるのに対し，想起文を言語モデル上で表現した場合のトークン列は文ごとに長さが異なる。そのため，両者をそのまま一対一に対応づけることは難しい。この点が，本研究課題における技術的な中心問題である。

そこで本研究では，まず画像および想起文を

LLaVA に入力し，画像・言語の双方を反映した統合表現を抽出した。LLaVA は視覚情報と言語情報を同一の表現空間で扱うことができるため，画像内容と想起文内容を共通の特徴空間上で比較できる利点がある。一方，fMRI 側については，画像提示時に得られた信号に対して滑動平均を適用し，時間的なずれや局所的なノイズの影響を緩和した。これにより，固定長の脳活動系列を，可変長の言語特徴に対してより安定に対応づけることを目指した。

次に，LLaVA から得られる特徴量から脳活動を予測するエンコーディングモデルとして，リッジ回帰を用いた。リッジ回帰を採用した理由は，高次元の特徴量と多数のボクセルを同時に扱う場合でも，過学習を抑えつつ比較的安定した対応関係を学習しやすいためである。本研究では，画像または候補文から抽出した特徴量を入力とし，対応する fMRI 信号を予測するモデルを構築した。これにより，ある候補文が与えられたとき，その文に対応して予測される脳活動と，実際に観測された脳活動との近さを評価できるようにした。

さらに，脳活動から直接一つの文を生成するのではなく，画像と初期プロンプトをもとに LLaVA から複数の候補文を生成し，それらを脳活動との整合性に基づいて評価・選択する方式を採用した。

2. 実験

実験には，自然画像観察時の脳活動データを用いた。図 1 に示すように，被験者 1 名に対し，



図 1　fMRI 実験全体像

COCO データセットから選出した自然画像を提示し，その際の大脳皮質 fMRI 信号を記録した。各時点におけるボクセル数は 93,452 であり，fMRI の撮像は 1TR（repetition time）= 1 秒で行われた。各試行では，まず画像全体を一定時間観察し，その後，同じ画像に含まれる主要物体へ順次注意を向けながら想起を行う構成を採用した。これにより，被験者は画像全体の場面理解だけでなく，画像を構成する個々の対象にも意識を向けながら，内容を心の中で言語化していたと考えられる。実験を通じて，合計 560 枚の画像に対応する脳活動データを収集した。このうち 448 枚を訓練用，112 枚を検証用として用いた。また，一部のブロックでは同一画像セットを再提示し，想起内容と脳活動反応の再現性も確認できるようにした。さらに，fMRI 計測終了後には各画像を再提示し，被験者自身にその画像を見てスキャナー内で想起していた内容を文章として記述してもらった。この文章を，脳活動と言語表現との対応付けに用いる教師信号として利用した。この点で，本研究が対象とするのは一般的な画像キャプション生成とは異なる。すなわち，ある画像に対して客観的にもっとも妥当な説明文を求めるのではなく，被験者本人がその画像から実際に心の中で想起した内容を扱う。

そのため，同じ画像であっても，一般的な説明文と被験者の想起文は一致しない場合があり，この個人内の意味表象をどこまで脳活動から捉えられるかが本研究の焦点となる。候補文の生成には LLaVA を用い，画像と初期プロンプトを入力として複数の文を生成した。Beam Search，Random Sampling，Top-k Sampling，Top-p Sampling など複数の手法を用いた。具体的には，Beam Search では num_beams を 4 に設定し，Sampling 系の手法では do_sample= True としたうえで，Top-k Sampling では top_k を 2，3，4，Top-p Sampling では top_p を 0.5，0.7，0.9 に設定した。これにより，生成方式の違いによって候補文の多様性や安定性がどのよ

うに変化するかを比較しつつ，脳活動との整合性という観点からどのような候補が選ばれるかを検討した。また，生成された候補文について，日本語として破綻なく出力された割合を成功率として集計し，その結果を表 1 に整理した。

3. 結果・考察

得られた各候補文については，LLaVA から特徴量を抽出し，あらかじめ学習したエンコーディングモデルに入力することで，その候補文に対応して予測される脳活動を算出した。そして，この予測脳活動と実測された fMRI 信号との近さを MSE や相関係数などによって評価し，どの候補文が脳活動とより整合的かを比較した。図 2 に示されるように，平均相関係数そのものは高いとは言えず，脳活動とマルチモーダル特徴量との対応付けはまだ十分に確立された段階にはないと考えられる。一方で，MSE の分布は比較的狭い範囲に収まっており，予測誤差のばらつきが極端に大きくないことから，少なくとも安定した基礎的対応関係は学習できていると解釈できる。したがって，本研究の手法は，画像観察時の内言的な想起内容に対して，完全な復元には至らないものの，候補文を評価するための基盤モデルとしては一定の有効性を持つと考えられる。

次に，デコーダー側の評価では，448 個の fMRI サンプルに対して異なる生成方式を適用し，それぞれから得られた候補文を脳活動との整合性に基づいて評価した。生成に成功したサンプルのみを対象に MSE や相関係数を比較すると，各生成方式の値には大きな差が見られなかった（図 3）。

これは，生成アルゴリズムの違い自体が脳活動との一致度を大きく左右しているというよりも，現段階では，脳活動と特徴表現との対応精度そのものが性能を制約している可能性を示している。すなわち，候補文の多様性をどれだけ増やしても，脳活動側との対応付けが十分に精密でなければ，明確な優劣は現れにくいと考えられる。

しかし，個別事例を詳しく見ると，本手法の有効性を示す重要な結果も確認された。表 2 では，「白い 2–3 人掛けで肘掛けの付いたソファー，上に黄色いクッションが置かれている」という想起文に対し，複数の生成文とそれぞれの MSE，相関係数，平均対数尤度が比較されている。この例では，「キャンディケース」や「アメリカ」など想起内容から離れた語を含む文も生成されていたが，評価指標に基づいて選ばれた文には，「ソファー」「黄色」「布地の描写」など，想起文により近い表現が含まれていた。

このことは，MSE や相関係数，平均対数尤度といった指標が，単なる信号上の近さだけではなく，ある程度は生成文の意味的適合性も反映している可能性を示している。もちろん，すべての事例で明確に想起文へ近づくわけではなく，現段階ではまだ初歩的な結果である。しか

表 1　各生成方式における日本語生成の成功率

手法	成功サンプル数	試行総数	成功率（%）
Beam Search	1675	1792	93.5
Random Sampling	1322	1344	98.4
Top-k Sampling	1326	1344	98.7
Top-p Sampling	1314	1344	97.8

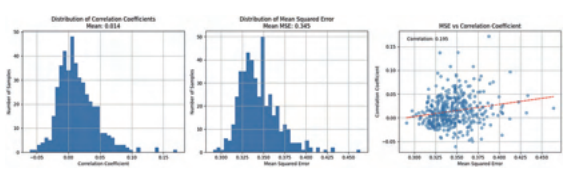


図 2　エンコーディングモデルの精度：MSE と相関係数の分布および比較



図 3　生成例

表2 「想起文：白い 2–3 人掛けで肘掛けの付いたソファー，上に黄色いクッションが置かれている」に対する生成例

生成方法	生成文	MSE ↓	相関係数↑	平均対数尤度
beam_search_1	白いソファに黄色のカーペットが敷かれ，その上に色彩豊かなカーペットが敷かれています.	0.4001	0.0034	–26.6980
beam_search_2	白いソファに黄色のカーペットが敷かれ，その上に色彩豊かなカーペットが乗っています.	0.4022	0.0024	–26.6604
beam_search_3	白いソファに黄色のカーペットが敷かれ，その上に色彩豊かなカーペットが敷かれている.	0.4021	0.0110	–26.5495
beam_search_4	白いソファに黄色のカーペットが敷かれています.	0.4117	0.0022	–26.6693
random_sampling_0.2	白いソファには, 柔らかなカーペットが敷かれています.	0.4140	0.0019	–26.9633
random_sampling_0.5	白いソファに黄色のシーツが敷かれ，カラフルなキャンディケースが敷かれた独特なインテリアが描かれています.	0.4033	–0.0154	–26.7185
random_sampling_0.9	アパートのリビンクルームで，クリーム色のソファが見える.	0.4063	–0.0060	–26.5744
top_k_2	そのソファは，白と黄色の毛布で包まれ，複数の色の毛布で裾が飾られています.	0.4051	0.0400	–26.7571
top_k_3	白いソファーの前には, 床には独特のパターンがある, 豊かな柔らかな雰囲気が漂っている.	0.4017	–0.0018	–26.8489
top_k_4	白いソファーで囲まれた寝室.	0.4139	0.0115	–27.5148
top_p_0.5	白いソファには, 黄色のカーペットが敷かれています.	0.4096	0.0150	–26.6981
top_p_0.7	リビングルームの寝室.	0.4093	–0.0425	–27.5075
top_p_0.9	和田のアメリカ屋の部屋.	0.4301	–0.0134	–27.9701

し，画像観察時の内言的な文想起という扱いの難しい課題に対して，脳活動を手がかりに候補文の妥当性を評価できることを示した点は重要である。以上より，本研究は，画像観察時の想起内容に対して，脳活動に基づいて候補文を評価・選択する基盤プロセスの可能性を示したといえる。

4. 今後の課題

本研究では，全文を生成した後に，その候補文全体と脳活動との整合性を評価する方式を採用した。しかし今後は，生成途中の各段階で脳活動情報を利用しながら文生成を制御する手法へと発展させる必要がある。たとえば, 各デコード時点で脳活動との一致度を参照し，その情報を次トークンの選択に反映できれば，生成後に候補を選別するだけではなく，生成過程そのものを脳活動に沿って誘導することが可能になると考えられる。時間整合の方法についても改善の余地がある。本研究では滑動平均により固定長の fMRI 信号と可変長の言語表現との不整合を緩和したが，より精密な時間対応モデルや, トークン長の違いを明示的に扱う方法を導入することで, 対応精度の向上が期待される。また, 今回のエンコーディングモデルは線形なリッジ回帰を基礎としたが，非線形モデルやより表現力の高い対応学習法を導入することで，脳活動と言語特徴の複雑な関係をより適切に捉えられる可能性がある。以上のような改善を通じて, 今後はより安定した脳活動デコーディング性能を実現し，最終的には，画像観察時に人が心の中で想起する内容をより自然な文として再構成する方向へ発展させたい。さらに, その先には, 発話が困難な状況にある人の意思表現支援や, 人間の意味理解過程の解明といった応用的・基礎的な展開も期待される。

［成果の発表，論文など］

Liu Muxuan・西田知史・小林一郎：「心の中の言葉」はどのように予測できるか？―複数のモダリティの特徴に基づく脳活動デコーディングプロセスの構築―，第 31 回言語処理学会年次大会（NLP2025），2025 年

国際交流助成一覧

国 際 交 流 助 成 一 覧

［抄録は https://www.tateisi-f.org/research_r/report_list.html からご覧いただけます］

［国際交流助成（国際会議発表）］

1. 大 谷 将 史　名古屋大学　言語教育センター　講　師（2252001）

国際会議名：The 23rd AsiaTEFL International Conference 2025 (AsiaTEFL 2025)
発表論文名：EFL University Students' Motivation, Cognitive Load, and Satisfaction with Using Generative Artificial Intelligence (GenAI) for English Learning
開催地（市・国）：香港

2. 桶 川 大 志　東京大学　大学院総合文化研究科　博士後期課程（2252002）

国際会議名：2025 American College of Sports Medicine Annual Meeting (ACSM2025)
発表論文名：Effects of theta burst stimulation to the supplementary motor area on upper limb muscle output characteristics and corticospinal excitability
開催地（市・国）：アトランタ / アメリカ

3. 上 林 恵 太　長岡技術科学大学　技学研究院 機械系　助　教（2252003）

国際会議名：XVIII International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications (COMPLAS)
発表論文名：TOPOLOGY OPTIMIZATION OF MECHANICAL METAMATERIALS VIA FINITE STRAIN ENERGY-BASED ESTIMATION OF MACROSTRUCTURAL PROPERTIES
開催地（市・国）：バルセロナ / スペイン

4. 松 原 虎之介　東京科学大学　大学院理学院物理学系　博士後期課程（2252006）

国際会議名：The 16th International Conference on Quasicrystals (ICQ16)
発表論文名：Aperiodic approximants bridging quasicrystals and modulated structures
開催地（市・国）：ナンシー / フランス

5. Yang Yifan　北陸先端科学技術大学院大学　先端科学技術研究科　博士後期課程（2252008）

国際会議名：2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2025 IEEE 国際地球科学・リモートセンシングシンポジウム
発表論文名：Flood Extent Prediction Using Remote Sensing Data Based on Machine Learning and Dempster-Shafer Theory: A Case Study of Nagano City
開催地（市・国）：ブリスベン / オーストラリア

6. 阿 部 優 樹　北海道大学　大学院情報科学院　博士後期課程（2252101）

国際会議名：The 28th ACM SIGCHI Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing (CSCW 2025)
発表論文名："I feel lonely when they stop chatting": Exploring Auditory Comment Display for Eyes-Free Social-Viewing Experience in Online Music Videos
開催地（市・国）：ベルゲン / ノルウェー

［抄録は https://www.tateisi-f.org/research_r/report_list.html からご覧いただけます］

7. 小　石　翔　太　　京都大学　大学院工学研究科　博士後期課程（2252102）

国際会議名：The 29th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences- Micro-Total Analysis Systems
発表論文名：Development of an on-chip pancreatic adenocarcinoma model to investigate NK cell infiltration into the extracellular matrix in the tumor microenvironment
開催地（市・国）：アデレード / オーストラリア

8. 髙　橋　尚　也　　千葉大学　大学院 融合理工学府　博士後期課程（2252103）

国際会議名：The 6th Joint Meeting Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan
発表論文名：Developments of novel vibrators using adhesive-tape and suction-cup for bone-conducted ultrasound presented to the chest, back, and upper limbs
開催地（市・国）：ホノルル / アメリカ

9. 中　畑　美　紀　　東京科学大学　物質理工学院　博士後期課程（2252105）

国際会議名：2025 Materials Research Society (MRS) Fall Meeting & Exhibit
発表論文名：In-Situ XRD Investigation of In-Plane and Out-of-Plane Lattice Parameters and Orientation Changes under an Applied Electric Field in Piezoelectric Thin Films
開催地（市・国）：ボストン / アメリカ

10. 前　田　新太郎　　千葉工業大学　大学院情報科学研究科　後期博士課程（2252106）

国際会議名：The 33rd International Conference on Computers in Education (ICCE 2025)
発表論文名：Learning from Others' Codes in Game-based Robot Programming: Behavioral Patterns and Outcomes
開催地（市・国）：チェンナイ / インド

［国際交流助成（短期在外研究）］

1. 安　倉　祐　樹　　京都大学　大学院工学研究科　博士後期課程（2256001）

研究課題名：ウェアラブルデバイスの熱設計に向けたフレキシブル熱マネジメント材料の開発
在 留 地 域：カリフォルニア / アメリカ

2. 岩清水　千　咲　　大阪大学　産業科学研究所　特任助教（2256002）

研究課題名：電子損失エネルギー分光法を用いた有機材料のナノスケール電子状態分析
在 留 地 域：パリ / フランス

3. 逸　見　悠　大　　山形大学　大学院有機材料システム研究科　博士後期課程（2256003）

研究課題名：折り紙・切り紙構造を活用した高生体適合性基板による次世代生体センサの研究開発
在 留 地 域：アイントフォーヘン / オランダ

4. 石　川　慶　一　　東京大学　大学院総合文化研究科　博士後期課程（2256101）

研究課題名：侵襲型ブレインマシンインターフェースを用いた脊髄損傷患者への脊髄電気刺激
在 留 地 域：マイアミ / アメリカ

［抄録は https://www.tateisi-f.org/research_r/report_list.html からご覧いただけます］

5. Tortos Pablo　千葉大学　大学院融合理工学府　博士後期課程（2256102）

研究課題名：手の物体操作支援のソフトロボットのシミュレーションモデルと制御
在 留 地 域：ブリュッセル / ベルギー

6. 平 城 裕 隆　東京大学　学際情報学府　博士課程（2256103）

研究課題名：対面での翻訳が可能な音声入力デバイスの開発
在 留 地 域：シアトル / アメリカ

［国際会議開催助成］

1. 清 水　　毅　実行委員長（山梨大学　工学部 基礎教育センター　教　授）（2245003）

The 17th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV2025)
会場：山梨県立図書館　開催期間：2025年6月4日～2025年6月6日

2. 井 手 達 夫　事務局長（一般社団法人サイバーディフェンスイノベーション機構　理　事）（2255001）

CYDEF2025
会場：イイノホール & カンファレンスセンター　開催期間：2025年12月9日～2025年12月31日（アーカイブ配信期間を含む）

3. 大 澤 博 隆　General Chair（実行委員長）（慶應義塾大学　理工学部　准教授）（2255002）

The 13th International Conference on Human-Agent Interaction (HAI 2025)
会場：慶應義塾大学 日吉キャンパス（協生館・来往舎）　開催期間：2025年11月10日～2025年11月13日

4. 奥 出 信 博　実行委員長（一般財団法人東海技術センター　地盤建材事業部　部門長／京都大学　特定助教）（2255003）

IIIAE 2025 世界会議 in 名古屋
会場：名古屋コンベンションホール　開催期間：2025年11月3日～2025年11月7日

5. 木 下 裕 介　実行委員長（東京大学　大学院工学系研究科　准教授）（2255004）

33rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering (CIRP LCE2026)
会場：鎌倉プリンスホテル　開催期間：2026年3月11日～2026年3月13日

6. 古 崎 晃 司　Local Chair（大阪電気通信大学　情報通信工学部情報工学科　教　授）（2255006）

The 24th International Semantic Web Conference (ISWC2025)
会場：奈良県コンベンションセンター　開催期間：2025年11月2日～2025年11月6日

7. 角　　薫　General Chair（公立はこだて未来大学　システム情報科学部　教　授）（2255007）

The 21st International Conference on Persuasive Technology 2026 (PERSUASIVE 2026)
会場：公立はこだて未来大学　開催期間：2026年3月10日～2026年3月13日

8. 大 黒 達 也　実行委員長（東京大学　大学院情報理工学系研究科　准教授）（2255008）

International Symposium on Language Processing Across Cultures
会場：福武ホール　開催期間：2026年1月14日～2026年1月14日

公益財団法人　立石科学技術振興財団
Tateisi Science and Technology Foundation

助成研究成果集　第35号
2026年（令和8年）

発　行　公益財団法人　立石科学技術振興財団
〒600-8234　京都市下京区油小路通塩小路下る南不動堂町11番地
TEL 075-365-4771
E-mail: info@tateisi-f.org
https://www.tateisi-f.org/

https://www.tateisi-f.org/

印　刷　中西印刷株式会社
〒602-8048　京都府京都市上京区下立売小川東入る西大路町146
TEL 075-441-3155

（本紙の一部又は全文の掲載を希望される時は，当財団と研究代表者の許可を得てください.）