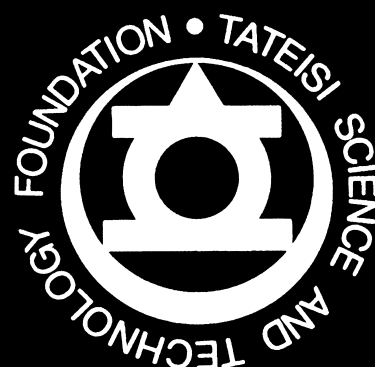


公益財団法人 立石科学技術振興財団

# 助成研究成果集

## 【第34号】

2025年(令和7年)



# 助成研究成果集

第 34 号

2025年(令和7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醸出資金により「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](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  |
| 難波啓一（理事）                      大阪大学大学院生命機能研究科 特任教授 |    |
| 3. 研究室訪問.....                                     | 8  |
| 北海道大学 大学院文学研究院・文学部 田辺研究室                          |    |
| 4. 研究助成成果報告（51 件）                                 |    |
| 研究助成（S）                                           |    |
| 1. 運動と知覚の時空間拡張に基づく手づたえ教示システムの開発 .....             | 13 |
| 桂 誠一郎      慶應義塾大学                                 |    |
| 研究助成（A）                                           |    |
| 1. 触診技術伝承を目指した耳小骨可動性計測訓練シミュレータの開発.....            | 18 |
| 李 信英      大阪大学                                    |    |
| 2. 無給電状態で静的および動的な圧力センシングが可能な編み手袋の開発 .....         | 24 |
| 石井 佑弥      京都工芸繊維大学                               |    |
| 3. 咬合力エネルギーハーベスティングによるバッテリーレスマウスガード型デバイスの開発 ..... | 29 |
| 市川 健太      東京科学大学                                 |    |
| 4. VR を用いた小児弱視訓練用プログラム医療機器の社会実装に向けた橋渡し研究 .....    | 34 |
| 猪俣 武範      順天堂大学                                  |    |
| 5. 柔軟触覚センサによって浮腫の状態を計測するウェアラブルデバイスの開発 .....       | 37 |
| 大西 鮎美      神戸大学                                   |    |
| 6. オンチップテラヘルツ分光システムを用いたラベルフリーバイオセンシング .....       | 41 |
| 大道 英二      神戸大学                                   |    |
| 7. 人間と機械の相互影響度の計量にもとづく他者への配慮の実現 .....             | 46 |
| 奥田 裕之      名古屋大学                                  |    |
| 8. 未病検知を目指した画像診断機器による臓器の生理機能評価及び加齢性機能低下の検証 .....  | 51 |
| 尾崎 公美      浜松医科大学                                 |    |
| 9. 実現場での階段昇降時動作データに基づいた転倒を検知するための機械学習的アプローチ.....  | 57 |
| 加藤 貴英      豊田工業高等専門学校                             |    |
| 10. バーチャルリアリティ空間における脅威刺激認知の脳波による定量評価 .....        | 62 |
| 金山 範明      国立研究開発法人 産業技術総合研究所                     |    |
| 11. 基盤モデルに基づく手話対話システムの構築.....                     | 67 |
| 川上 玲      東京科学大学                                  |    |
| 12. EMS を用いた位置制御・力制御の統合アプローチと制御性能の評価.....         | 72 |
| 北村 知也      東京理科大学                                 |    |



|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 13. 人間機械協調型複合現実融合技術を用いた手術支援基盤技術の開発                    | 75  |
| 金 太一 東京大学                                             |     |
| 14. 災害現場での救援活動を支援する超小型 3 次元再構成センサの開発                  | 80  |
| 小西 克巳 法政大学                                            |     |
| 15. ワイヤメッシュ回路と深層学習の融合によるシート型触覚インターフェースの開発             | 85  |
| 佐藤 貴紀 秋田工業高等専門学校                                      |     |
| 16. マイクロモータを用いた触覚情報伝達インタフェース                          | 88  |
| 芝軒 太郎 岡山大学                                            |     |
| 17. 筋シナジーを用いた随意運動誘引手法による自発的動作に寄り添う正常歩行訓練装置            | 93  |
| 中後 大輔 関西学院大学                                          |     |
| 18. Mixed Reality と慣性センサを用いた空間認知と運動機能の定量化システム         | 97  |
| 林部 充宏 東北大学                                            |     |
| 19. 複合現実空間における漫符を活用したロボットによる自己表現生成 AI に関する研究          | 102 |
| 藤井 綺香 産業技術総合研究所                                       |     |
| 20. 非侵襲的な振動感覚刺激を用いたうつ病症状緩和システムの基盤構築                   | 107 |
| 藤岡 仁美 聖マリアンナ医科大学                                      |     |
| 21. MRI・CT 画像下治療のための多自由度空圧ステッピングモータの開発                | 112 |
| 部矢 明 名古屋大学                                            |     |
| 22. 高分子ゲル超薄膜を用いた指先に貼付可能な全貼付型触覚センサの開発                  | 117 |
| 堀井 辰衛 東京科学大学                                          |     |
| 23. 学習者の主体的な行動を促すグループワーク支援ロボットの研究                     | 122 |
| 増田 寛之 富山県立大学                                          |     |
| 24. Advanced Vector DB —— データ構造ドリブンな LLM 知識注入 ——      | 127 |
| 松井 勇佑 東京大学                                            |     |
| 25. サイバー空間におけるラポール形成へ向けたシステム開発                        | 132 |
| 宮田 紘平 理化学研究所 研究員                                      |     |
| 26. 熟練技能者の技術の継承を支援する人協調型 AI システムの開発                   | 137 |
| 村上 洋 北九州市立大学                                          |     |
| 27. 光弾性を利用した力覚変色表示ソフトアクチュエータの研究開発                     | 141 |
| 山田 泰之 法政大学                                            |     |
| 28. 超低消費電力リアルタイム学習を可能にする二次元半導体光電子メモリの開発               | 145 |
| 山本 真人 関西大学                                            |     |
| 29. 微小針電極による超高密度脳波計測<br>—— 脊髄損傷者の手指動作を脳波から高精度に解読する —— | 150 |
| 横山 光 東京農工大学                                           |     |
| 30. ロボットアーム錯覚は可能か                                     | 155 |
| 葭田 貴子 東京科学大学                                          |     |
| 31. AI を用いた顕微授精アシストシステムの開発                            | 159 |
| 若山 清香 山梨大学                                            |     |

#### 研究助成 (B)

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 1. 超音波ゲルレンズの開発と高速光計測技術への展開                | 163 |
| 小山 大介 同志社大学                               |     |
| 2. 歌唱による嚥下機能保持・向上のための人工知能と脳科学の融合システム基盤の開発 | 168 |
| 八木 直美 兵庫県立大学                              |     |

#### 研究助成 (C)

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 1. 高齢者の自然発話における特徴量を用いた認知機能推定手法の開発       | 173 |
| 五十嵐俊治 東京大学                              |     |
| 2. 高次元空間における力覚フィードバックを用いたインタラクションに関する研究 | 176 |
| 五十嵐治雄 早稲田大学                             |     |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 3. 身体動作と感情の再現を目指すヒューマノイドロボットの開発 .....             | 182 |
| WANG YIWEI 電気通信大学                                 |     |
| 4. 不確実複雑システムの見通しを向上させる設計モデルの構築 .....              | 187 |
| 荻尾 優吾 大阪大学                                        |     |
| 5. 実世界における直観に反した運動の予測と言語生成 .....                  | 192 |
| 黒田 慧莉 お茶の水女子大学                                    |     |
| 6. 片麻痺歩行に対する足関節ロボット治療における適応者および非適応者の特徴分析 .....    | 197 |
| 桑原 嵩幸 関西医科大学                                      |     |
| 7. eスポーツ熟練者の情報処理能力を司る神経機構の解明とトレーニング法の開発 .....     | 204 |
| 鄭 仁赫 東京大学                                         |     |
| 8. ポストコロナ時代における商業・公共施設のための空間管理システムの基盤構築 .....     | 209 |
| 須崎太久弥 北海道大学                                       |     |
| 9. 脳下垂体腺腫の摘出手術のための三次元誘導技術の開発 .....                | 213 |
| 高橋 優太 埼玉医科大学                                      |     |
| 10. iPS細胞を用いた糸球体MPSによる高血糖、脂質異常症、高血圧の相乗効果の評価 ..... | 218 |
| 田淵 史 京都大学                                         |     |
| 11. 単語単位ラベルを考慮したテキストデータ拡張手法の研究 .....              | 220 |
| 寺本 優香 同志社大学                                       |     |
| 12. サービス動的個人適応に向けた対話型ユーザニーズ外化システムの研究開発 .....      | 223 |
| 中田 匠哉 神戸大学                                        |     |
| 13. 機械学習を用いた低侵襲かつ汎用的な腎臓病診断支援モデルの構築 .....          | 228 |
| 野田竜之介 聖マリアンナ医科大学                                  |     |
| 14. 高MHz帯域の強力超音波を用いた小型光流体レンズの開発とマシンビジョンへの応用 ..... | 231 |
| 原田 裕生 同志社大学                                       |     |
| 15. 対人間同期が走パフォーマンスに及ぼす影響とその影響範囲の解明 .....          | 236 |
| 古川 大晃 東京大学                                        |     |
| 16. 原子ビームとねじり振子による気体原子から固体へのスピン移行の汎用的な検出 .....    | 241 |
| 安田 瑠奈 東京農工大学                                      |     |
| 17. 荷重制御した周期的圧縮刺激を印加可能な骨一癌共培養装置の開発 .....          | 246 |
| 吉本 昂希 京都大学                                        |     |
| 5. 国際交流助成一覧 (28 件)                                |     |
| 国際交流助成 (国際会議発表) (14 件) .....                      | 251 |
| 国際交流助成 (短期在外研究) (3 件) .....                       | 252 |
| 国際会議開催助成 (11 件) .....                             | 253 |

## ごあいさつ

助成研究成果集第34号の発行にあたり、ご挨拶申し上げます。

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・立石一真が卒寿を迎えたことを機に、「人間と機械の調和」の促進を趣意として、1990年（平成2年）に設立されました。以来、設立趣意に沿った研究課題への助成を継続的に行っており、これまでの助成件数は約1,700件、累計助成金額は34億円を超えるほどになりました。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。

本年5月に開催された助成金贈呈式は、オンライン形式ではありましたが、助成を受けられた皆様から熱意あふれる研究の抱負が語られ、大いに刺激を受けました。皆様が未来を見据え、夢と志をもって研究に邁進されることを心から期待しております。

さらに、11月には研究成果の共有と研究者同士のネットワーク形成を目的とした「研究助成 成果発表会」を京都で開催いたします。この場が、研究のさらなる発展と学術的交流の契機となり、科学技術による社会課題解決に貢献することを期待しております。

設立から35年目を迎える今、日本を取り巻く環境はかつてないスピードで変化しております。生成AIやロボティクスといった先端技術の進展に加え、気候変動やエネルギー問題、SDGsの達成に向けた国際的な取り組みなど、私たちが直面する課題はますます複雑化しています。とりわけ、少子高齢化という国内の喫緊の課題にも、科学技術による創造的なアプローチが求められています。

当財団はこれからも、民間の立場から、挑戦的かつ独創的な研究を支援し、日本の科学技術力の向上と、持続可能な社会の実現に向けて微力ながら貢献してまいります。研究者の皆様の夢と情熱を支えるパートナーとして、今後とも歩みを共にしてまいります。

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。

2025年10月

理事長

立石 文雄

## 2025 財団への期待——人間と自然と機械の共生をめざして

類人猿から始まり数百万年に及ぶ人類の歴史は常に自然との戦いであった。厳しい気候や他の動物との生存競争の中で水と食料を確保して生き延び子孫を残していくため、250 万年前には石器を考案、100 万年前には火の利用法を獲得し、道具を工夫して駆使しつつエネルギーを扱う術を得て、人類は地球上の生物界の盟主となった。その知能はますます発達して多様な文化や芸術を生み出し、近代的な社会体制を創り出して多くの人々が安心して暮らせる豊かな社会を構築してきた。

それでも近代的な機械が創出されて人類社会が大きく変革したのは 18 世紀に始まった産業革命以来の 300 年ほど。さらに科学技術がめざましい進歩を遂げて原子力や半導体エレクトロニクス、ナノテクノロジー、コンピュータ、情報ネットワークなどのイノベーションにより社会が加速度的かつ劇的に変化したのは 20 世紀後半以降のわずか数十年である。

21 世紀になり、今や地球上のどこにでも半日ほどで飛んで行き、世界中のどこにいてもリアルタイムで画面越しに会話ができる。さまざまな情報や知識が瞬時に手に入り、日々の課題を解決する方法さえ人工知能（AI）が考えてくれる。そういう時代に我々は生きている。

現代社会の人類に豊かな生活と幸福をもたらしたように見える科学技術の進歩は、その一方で確実に制御あるいは解決できるかどうか不安になるほど困難な課題も産み出した。一つは地球温暖化である。地球の天然資源に頼りきり、その影響が自然に影響を与えることまで考えずに拡大してきた人間の経済産業活動は、この数十年という意外なほど短期間で大気の組成に変化を及ぼし、北極圏の海水の縮小、世界各地の異常レベルの降水量や大規模森林火災など、異常気候を頻発させるまでに地球全体の温暖化を引き起こす結果となった。直径 1 万 3 千キロメートルの球体はそれなりの大きさではある。しかし、生物の生存環境を維持提供してくれる地殻と大気圏はそれぞれ 40 キロメートルと 100 キロメートルほどで、直径の 100 分の 1 ほどの薄皮でしかない。宇宙船地球号の生存可能空間は実はさほど大きくなかったのである。それに加えて、世界中に配備された核ミサイル、最先端情報ネットワーク技術の悪用、SNS による無差別個人攻撃、加速度的に進化を続ける人工知能の潜在的脅威など、科学技術が直接産み出した課題も多い。

人間はこれまで自然と戦うために機械を創って活用し、機械と協働することで産業を発展させ豊かな社会づくりを目指してきた。立石財団の理念はその活動を一層高度化するための研究を支援することにある。ただこれからは、人間どうしはもとより、人間と自然、人間と機械が協調し共生して、人類社会の豊かな発展を支えるために我々が何をなすべきか真剣に考えなくてはならない時代になっている。現代社会に生きる我々が相対している数多くの困難な課題の解決を目指し、若い科学者たちの知恵と力を人類社会の発展に役立てられるよう、立石財団には一層視野を広げて支援の輪を拡大していただきたい。今後の活動に大きな期待がかけられている。



大阪大学大学院生命機能研究科 特任教授 難波 啓一（理事）



## 研究室訪問

## 北海道大学 大学院文学研究院・文学部 田辺研究室

2025年7月、2018年度研究助成(A)の受領者<sup>†</sup>である北海道大学大学院文学研究院准教授 田辺弘子先生の研究室を、選考委員の榎木委員とともに訪問しました。これまで主に機能や性能を対象とした研究に触れる機会が多かった中で、魅力や美しさを対象とする研究の面白さと難しさに大いに刺激を受けるとともに、「美しさ」が単なる個人的な主観にとどまらず、性別や年代、さらには社会的・文化的背景や進化適応との関係からも考察されている点が非常に興味深く感じられました。どのお話も、当財団の今後の方向性を考える上で大きな示唆をいただく貴重な一日となりました。

<sup>†</sup> 受領時研究課題：「人間の心を動かすバイオリジカルモーション生成モデルの構築」

リポーター 事務局 橋本光博

——文学部の校舎に入るといのは、私たち初めての経験です。



北海道大学の文学研究院には大まかに2種類ありまして、日本文学や哲学、歴史のようないわゆる文学部としてイメージされる研究室が人文学専攻、もうひとつが私の所属する人間科学専攻で、心理学と行動科学、社会学、地域科学があります。こちらで学位を取ると文学博士ではなく、人間科学博士となります。現在の研究内容は、振る舞いや印象、スポーツ動作における巧みさ、音楽に関連する人の動きと心理などをテーマにしています。昨年度は着任1年目で学生も少なかったのですが、今年度は9名が研究室に所属しています。

——田辺先生がバイオメカニクス、運動制御生体工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。

3回生のときに京都大学 総合人間学部の運動医科学研究室に配属され、「ラットの骨格筋におけるプーアル茶抽出物の取り込み促進効果」というテーマで研究を行っていて、その後は普通に就職する予定でした。当時、学問と同時に熱中していたのがクラシックバレエで、プロと一緒にレッスンを受れたり舞台に立つ機会があり、ダンサーの動きの美しさに感動することがたくさんありました。たしか3回生の終わり頃、その後の指導教員となる神崎素樹先生と立ち話をしていて「プロのダンサーはただ立っているだけできれいなんです」と話したら、それを研究したら面白いんじゃないかと言われ、動きの美しさを科学的に解明できるかもしれないと大興奮して進路変更し、人間・環境学研究科の運動生理学研究室に移りました。

体の動きを見て感動することには、運動制御や認知科学、さらにバレエでは音楽も含まれますので音や身体表現、芸術など多岐にわたる学際的なテーマです。4回生の時点で先行研究を見ても誰も調べておらず、未知の課題だとわかり、研究に着手しました。「美しさ」の対象を決定することが難しかったため、まずは「立っているだけで美しい」という姿勢の制御に注目して立位制御メカニズム（運動制御）を解明するところからスタートし、バレエダンサーのつま先立位時の下肢の関節協調運動を検討しました。立位姿勢を制御するときに連続的な制御ではなく、状態の安定性/不

安定性に基づいて能動的に筋活動を切り替える間欠的な制御（フィードバック制御）が提唱され始めた時期で、倒立多重振子モデルを用いた立位制御シミュレーションや表面筋電図によるON/OFF判別を行って、シミュレーションの結果と生体信号とを比較しました。また、中枢神経系のメカニズムに着目した健常成人での実験も行いました。

——姿勢の美しさと聞くと、一般的に猫背はよくないなど静的なものかと思ってしまうのですが、ダイナミックな制御系が関係するのですか？

バレエで「膝をロックする」といわれる膝を動かさずに大腿部と下腿部を同期して動かすというミクロな動きを計測すると、動静的かの違いがはっきりとわかりました。バレエの基本姿勢であるポジション6種類のうち、3番、4番、5番の足をクロスした立ち方では、より膝をロックして膝関節が動かない状態で揺らいでいます。

——いわゆる「体幹がしっかりしている」ようなものではないのですね。

静止しているけれども非常に制御され安定していて、ちょっとした揺らぎに対しても体幹がしっかりと維持できているという、動的な姿勢です。

——どの段階で制御工学を学ばれたのでしょうか。

M2（大学院修士課程2年生）の頃です。現在、愛知県立大学におられる鈴木康之先生が似たテーマを研究しておられたので、論文を読んで質問をしたところからやり取りが始まり、シミュレーションのやり方等いろいろと勉強させていただきました。その他にも先輩方やそのお知り合いにも助けていただくことができて、環境に恵まれていましたね。2016年度に学位を取得後、東京大学 大学院総合文化研究科で助教に就任し、そこで立石財団の研究助成(A)に採択していただきました。テーマは「人間の心を動かすバイオリジカルモーション生成モデルの構築」です。その翌年に青山学院大学 理工学部 情報テクノロジー学科に移ったため、実際に研究を行ったのは青山学院大学でした。

——助成対象となった研究課題と成果は、どのようなものだったのでしょうか。

美しさや魅力というものは動作主体と観察者の間に発生するものと考えて、対象に選んだのが歩容です。バレエやダンスでの先行研究はありますが、バレエでは回転やジャンプ、アラベスク（バレエにおける基本的なポーズ）などたくさんの動きがあるにもかかわらず、それを対象にする理由がどの論文にも書かれていない。どうも芸術動作を対象にするのは得策ではないなと感じたことから、快楽情動に関連する魅力について日常動作の歩容における美しさの法則性を探ることにしました。



最初に取り組んだのが、歩行による女性の魅力表現ストラテジーの検討です。一般女性とファッションモデルで魅力表現をする歩容の特徴を比較しました。表現側からは身体運動による魅力要素を計測し、鑑賞側の印象評価で魅力を計測する印象評価実験を同時に行い、歩容のパラメータと魅力の評価の因果関係を示すモデルを作りました。視覚情報処理プロセスで魅力の認知と男女にとって魅力の意味を追求する実験、歩容の魅力の視覚情報処理プロセスのモデル化をまとめた論文<sup>†</sup>が成果となります。

<sup>†</sup> Hiroko Tanabe, Kota Yamamoto. 2025 “Gender differences in attentional processes and attractiveness evaluation models during gait observation” Frontiers in Psychology

——歩容は個人認証に使えるほど属人的なものだと聞きます。一方で、ファッションモデルの歩き方を学習して一般の人が表現するような傾向はないのでしょうか。

一般女性とは身体表現の経験がないにもかかわらず「魅力的な歩き方」のイメージは持っていて、データの平均値を比較すると統計的にも有意に「魅力的に歩こうとした歩容」は評価者から魅力的と捉えられ、バイオロジカル・モーションレベルでも魅力的だという結果でした。ファッションモデルと一般女性では頭部前傾、上腕テイクバックは共通するものの、胸腰関節・股関節の運動エネルギーと頭部の水平回転は逆行する結果になりました。腰椎カーブを強調する動きや股関節の運動エネルギー増加、胸部の強調に繋がる動きは生殖機能と、膝伸展は健康さの評価に関連することがわかり、個体の健康状態、若さや女性らしさの表現の鍵になります。モデルの歩容は文化的な美と商業・産業的な美の教師になりえますが、生物として魅力的な歩容とは矛盾する部分があることから、一般女性がモデルの歩容をイメージしていたわけではない可能性が高い。また、最近モデルのジェンダーレス化、キャットウォークをしない傾向等があることも関係しているでしょう。腰椎カーブの増加が魅力的に見える理由のひとつに、妊娠中の女性の腰椎角度と一致するという報告があるので、文化的、商業・産業的な美の基準は変化していく一方で、生殖機能に関連する美の基準は文化や産業等の時間単位では変わらないと考えられます。

——印象評価では、評価者の年齢でばらつきがありましたか。

そう予想していたのですが、20代から60代の評価者10人ずつに参加してもらいましたが、ばらつきは見られませんでした。ファッションモデル7名と一般女性10名にトレッドミル上を裸足/ハイヒールで歩いてもらい、モーションキャプチャーで全身の関節角度を算出してパラメータを通常歩行と魅力的な歩行で比較、さらにモデルと一般女性との比較を行った結果、評価者の年代による差は出なかったのです。さらに視覚情報処理プロセスやその男女差について、神経美学的な視覚情報処理モデルでも検討したところ、視線分析で男女差、すなわち異性間選択と同性内選択があることが確認できました。男性観察者は対象の体幹部を注視する割合が50～60%だった一方で、女性は体幹部を見た後に視線が下に遷移して脚部を見ており、より全身の情報を捉えていることがわかりました。

——今後の展望を教えてください。

今年度は振る舞いの美しさに自己ブランディング、見られたい自分を表現する要素があると考えて「大学生の就職活動時の自己ブランディングと個人属性・振舞いの関係性」という研究を行っています。就活では「ガクチカ」（学生時代に力を入れたこと）が注目されますが、対策としての自己ブランディングやセルフプロデュースといったキーワードも含めています。就職活動を終えた大学生515名（日本人のみ）にオンライン調査をしたところ、大学生のブランディング因子は概ね3つあり、協調性・真面目さ、冷静さ・理性、外交性・元気・積極性が算出されました。そこから性



格・目標志向性の関係性や業種・職種の関係性、面接時に意識した振る舞いの関係性、ガクチカのトピックの関係性を検討しました。今後の課題として、音響的要因・動作等の非言語情報の影響や、成功した場合の採用担当者の印象評価等を検討する必要があります。

——応用研究へと向かっておられるのでしょうか。

そうかもしれません。これまで本質的な美や生物としての魅力を追求してきましたが、日常生活における動作との間に社会的な課題があるのではないかと感じており、ようやく社会実装に目が向き始めました。産学連携の研究に携わった経験から、ノウハウや社会に還元されていく方向性などはだいたい把握しています。特に名古屋大学で産学連携の講座で「ヒューマンマシンインターフェースを用いた ADAS（先進運転支援システム）の評価」に関わったことは大きかったですね。これから自己ブランディングと装い、歩容の関係性に注目しようと考えています。ファッションによって歩き方は変わるので、衣服という要素はかなり大きいはずですね。しかし、従来のモーションキャプチャー技術では自由度の高いスカートの中の足の動き等を計測することはできず、スカートをはくからおしとやかな動きをするのか、あるいは服のシルエットだけでおしとやかさが演出できる（足の動きは関係なく）のか等の違いはわかりませんでした。最近、ウェアラブルな装置が登場したので、服の中の動きを計測してみたいと考えていて、実験でどういう場面を設定するかを悩んでいるところです。また、運動学習を促すようなアプリ開発や、コロナ禍で問題になった子どもの体力不足が未だに改善していないことから、子どもの身体運動を促す ICT 活用システム等の研究も視野に入れています。



研究室では部活等でスポーツに取り組む学生が入ってスポーツ心理学関連も加わりましたし、パイプオルガンが学内にあることから演奏者の視覚と運動の連関を知りたいというオルガン研究会の3年生、ゲーム好きな学生はゲームプレイの動機づけを研究していますし、椅子の座り心地を研究している学生はレビュー論文を書こうとしているところです。音楽を聞いたときに体を動かしたくなる感情と身体運動に関するグルーブ感を研究している4年生は、音に合わせたアクティブな体の制御と音の知覚変化をモーションキャプチャーシステムを用いて実験するなど、学生たちが多様な研究を展開しています。

——研究を続けながらの出産、育児経験についてお聞かせください。

2019年3月に双子を出産し、同時にコロナ禍になったものですから、もう本当に大変です。出生の事情で2人とも持病があり、そうした配慮のいる乳児2人を預けられる保育園が見つからず（医師からは本当は3歳になるまで自宅でお世話することを勧められていました）、勤務先は子の誕生日に関係なく年度末までに復帰というルールだったので、本当に仕事を辞めなければいけないのではないかと状況になりました。幸運にも近所に保育園が新設されて入ることができたのと、オンライン授業が可能になったことで復帰することができました。自宅で双子が交互に泣く中で授業をしていましたね。なので、子どもたちが3歳になる頃までの記憶がほとんどないです…。

対面授業が再開すると、週3回は4限と5限に実習があるため18時半頃まで仕事、保育園は19時までには迎えに行かなければならない。これは職場を変えるしかない、公募が出ていた名古屋大



学に応募しました。トヨタ自動車株式会社の寄附講座で学内業務が一切なく、裁量労働制のため実験や会議に支障をきたさなければ勤務時間は自由、学内に認可外保育園があるという環境で、どうにか仕事と育児を両立させることができました。けれども共同研究はできない、科研費を取ることもできない契約だったため、自分自身の研究に関してはもどかしい状態になり現職の北海道大学の公募に応募し、その後すぐに夫も近くに職を得ることができて現在に至ります。まさに決死の覚悟で北海道にたどり着いた感じです。双子は今年から小学生になり元気に暮らしていますが、2人だと子連れの学会参加などが難しいなど、まだまだ問題は山積みです。

最後に、採択していただいたことで動きの魅力を解明するための一歩を踏み出すことができました。本当にありがとうございました。



# 研究助成成果報告

## [研究助成 (S)]

## 運動と知覚の時空間拡張に基づく手づたえ教示システムの開発

2228001

研究代表者  
(助成金受領者)

共同研究者

慶應義塾大学

東京女子医科大学

慶應義塾大学

慶應義塾大学

広島大学

ラトガーズ大学

教 授

桂 誠一郎

准教授

吉澤 浩志

准教授

板口 典弘

専任講師

大澤 友紀子

准教授

村松 久圭

教 授

Jingang Yi

## [研究の目的]

モーションコントロール技術の発展により、人間の動作を記録し、ロボットにより自動再現させることが可能になっている。加速度制御により速度や力をロボアストに制御することが動作再現の本質であり、人工知能（AI）と統合した研究が多くなされている。我が国は少子高齢化が進んでおり、熟練技能の伝承や、リハビリ・医用応用など、人から人へ動作を伝える手づたえ教示の必要性が高まっている。この問題の解決のためには、従来の人からロボットへの動作再現に加えて、人から人への動作再現に拡張していく必要がある。

本研究は人間の運動と知覚を時空間に拡張して、革新的な手づたえ教示を実現することを目的としている。これにより、個人個人に適した動作解析、予測、適応、さらにはロボットを用いた支援へとつながる「人間と機械の融和スパイラル」が形成できる。

本研究で開発する「手づたえ教示システム」(図1)は、これまでの視覚、聴覚によるマルチメディアデータに加え、人間の動作という物理データベースとヒューマンインタフェースを

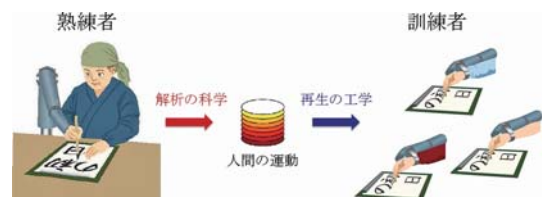


図1 「手づたえ教示システム」の概念図

融合させるもので、社会全体へ与える影響は大変大きい。人間の身体と身体をつなぐネットワーク技術は、電話やテレビと同等のインパクトを持つ可能性がある。特に、熟練技能者のスキル伝承や高度技能保存に基づいた新たなサービスの創出を目指しており、革新的な成果が期待できると予想される。

本研究で得られた成果を社会実装することにより、熟練技能者の持つスキルやノウハウを解析して抽象化し、手づたえ教示の実現性を高めることが可能になるばかりではなく、リハビリテーション、医療・介護、スポーツ、芸術分野などの様々な分野において、効率的かつ遠隔でトレーニングを行うための支援サービスを提供することが可能になる。これは機械との融和に基づく人間の身体性の拡張・進化に他ならない。

## [研究の内容, 成果]

### 1. 「手づたえ教示システム」の開発

本研究では、従来のバイラテラル制御を基本とした「モーションコピーシステム」を拡張し、以下のような手づたえ教示を実現するための方式を確立し、学術的・技術的に体系化することに成功した。

#### ・モーションコピーシステム

(バイラテラル制御方式) (図2)

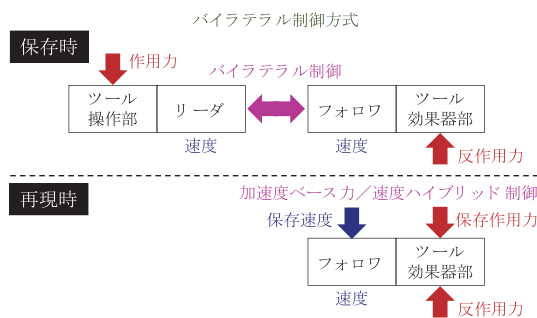


図2 モーションコピーシステム（バイラテラル制御方式）

タスクを行うツールを操作部と効果器部の2つに分割し、それぞれにモータとアームを取り付けてリーダー・フォロワ構成とする。動作を保存する際には、リーダー・フォロワ間にバイラテラル制御を構成し、動作中の作用力と速度を抽出する。動作再現時にはフォロワのみを用い、保存作用力と保存速度をロボットのモータに再現するための加速度ベース力/速度ハイブリッド制御を構成する。

本方式により世界で初めて書道の達人の動作を忠実に再現することに成功し、そのデモンストレーションは多くの注目を集めた。学術的には、力と速度の同時再現が人間動作の再現における十分条件であることを明らかにした。

#### ・モーションコピーシステム

(インツールセンシング方式) (図3)

バイラテラル制御方式によるモーションコピーシステムは、ツールに取り付けるモータやアームにより慣性の増加を招くため、動作抽出時においてタスクへ与える影響が大きいことが

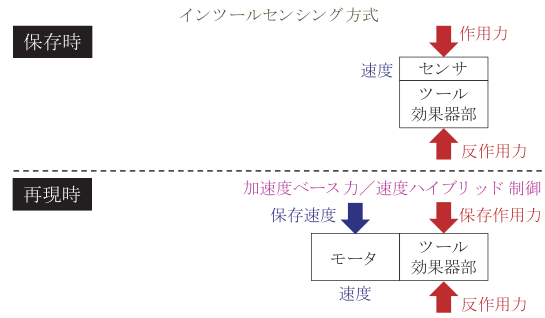


図3 モーションコピーシステム（インツールセンシング方式）

課題となっていた。

インツールセンシング方式はツール内に力や速度を抽出するセンサを埋め込むことにより、上記課題の解決に成功している。本研究では、バイオリンの駒と弓に歪ゲージを貼ることで(図4)、ボーイング動作の抽出ならびに再現に成功した。

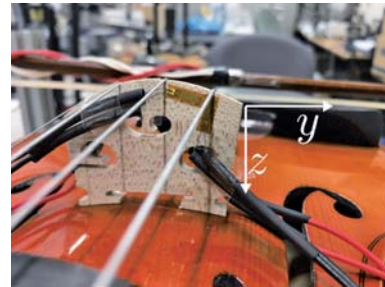


図4 バイオリン動作抽出のためのインツールセンシング

#### ・モーションコピーハンド

(指先力センシング方式) (図5)

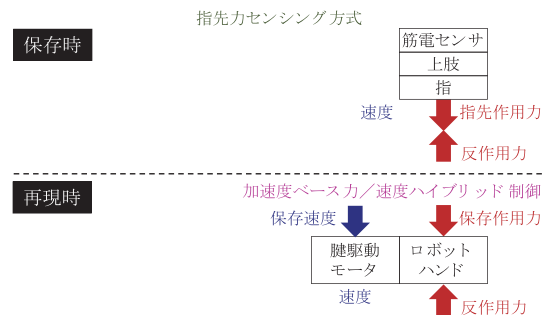


図5 モーションコピーハンド（指先力センシング方式）

上記のモーションコピーシステムはツールを使用したタスクの抽出・再現は行えるものの、

指先で直接行うタスクに適用することができない。そのため、上肢に筋電センサを貼付し、指先力との入出力関係を AI によりモデル化することで、指先力を筋電から推定する手法を開発した。

抽出された指先力と指先の速度はロボットハンドにより再現可能である。狭空間にいかにも多くの自由度を持たせるかが重要となるが、減速機の使用はバックドライバビリティの低下につながり、力制御の性能が劣化することになる。そのため、ダイレクトドライブモータと腱駆動を統合したハンド機構を新たに設計し開発を行った。

#### ・ヒューマンコピーシステム

(機能的電気刺激方式) (図 6)

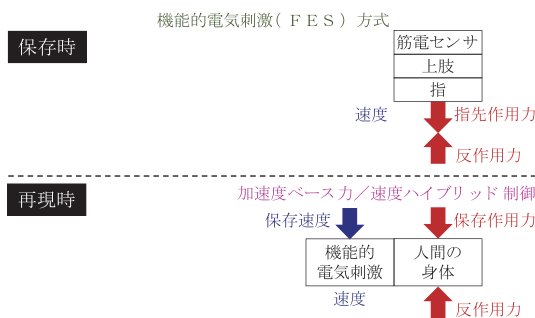


図 6 ヒューマンコピーシステム（機能的電気刺激方式）

手づたえ教示を効率よく実施するためには、運動主体感の向上が欠かせない。そのため、外骨格型システムによる身体の間接駆動ではなく、直接駆動である機能的電気刺激を用いることが望ましいとの結論に至った。

機能的電気刺激をヒューマンインタフェースに用いる研究は多く行われているものの、モータやロボットと異なり、ロバストな制御に関してはあまり研究が行われていない。研究代表者の桂はモーションコントロールへの造詣が深く、機能的電気刺激向けの新たな二自由度制御系の開発を行い、基本特許の出願につながった。二自由度制御により、位置制御（制御剛性 $\infty$ ）から力制御（制御剛性ゼロ）まで、ロバストに実現することが可能になる。

曲げセンサに基づく人間の手指動作のセンシングと機能的電気刺激による手指の直接駆動制御を統合した「手づたえ教示システム」の開発を行った。図 7 に示すように、背側骨間筋に電極を貼付し刺激することで、第 2～5 指を独立に制御することに成功した。さらに図 8 に示すように、第 2～5 指を使用した鍵盤楽器の手づたえ教示が行えることを検証した。

このように、身体と身体をつなぐ手づたえ教示という新たなインタラクションを実現することに成功した。「手づたえ教示システム」により、これまでの視覚、聴覚などのマルチメディア情報に加えて、遠隔地にいる他者と身体を接続し、共有化できる新たな体験が可能になる。

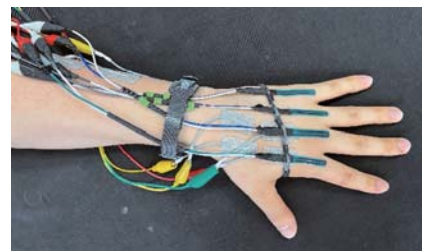


図 7 機能的電気刺激による手指の直接駆動



図 8 鍵盤楽器の手づたえ教示

## 2. 「手関節筋緊張評価システム」の開発

手関節の掌屈・背屈運動ならび尺屈・橈屈運動における粘弾性の物理量を計測する「手関節筋緊張評価システム」を開発し、研究協力者の所属している医療機関（平塚共済病院、宇治徳洲会病院）において、理学療法士の協力の下で評価を行った。開発した「手関節筋緊張評価システム」を使用する様子を図 9 に示す。また図 10 に示すように、本システムにより Modified



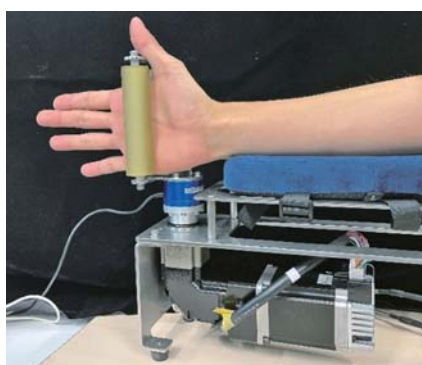


図9 「手関節筋緊張評価システム」

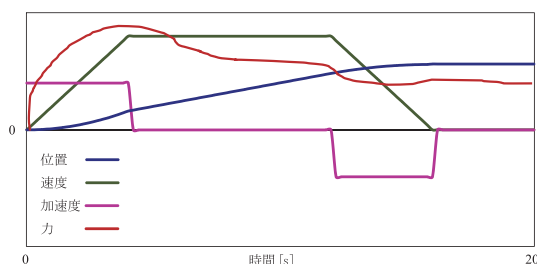


図10 手関節粘弾性の抽出による筋緊張の測定

Ashworth Scale に代わり，定量的な診断やリハビリテーション効果の記録が可能になる。

また，手関節の運動に連動したゲーム型の操作インタフェースを開発した。ゲームの各パラメータを個人ごとの症状に合わせて変更することが可能であるため，スパイラル構造に基づいたリハビリテーション支援につなげることが可能である。

### 3. 国際シンポジウムの実施

2024 年 3 月 6 日～7 日に慶應義塾大学にて国際シンポジウム（International Symposium on Applied Abstraction and Integrated Design, AAID）を主宰し，本研究で得られた成果を広く公表するとともに，国際連携や社会実装など今後の進め方を議論した。

#### 〔今後の研究の方向，課題〕

本研究の出口として，遠隔やセルフでのリハビリテーションなど「手づたえ教示システム」によるスマート医療の新たなサービス創成を目

指しており，医療機関において評価を行うための準備を進め，開発技術の検証および設計へのフィードバックを行いながら社会実装を行っていく。

#### 〔主な発表論文〕

- [1] Kodai Fujisaki, Seiichiro Katsura: "Motion-Copying System with In-Tool Sensing," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 12, No. 4, pp. 793-799, July, 2023.
- [2] Masaki Takeuchi, Seiichiro Katsura: "Robust Velocity Control for Electromagnetic Friction Brake Based on Disturbance Observer," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 12, No. 5, pp. 876-884, September, 2023.
- [3] Shunichi Sakurai, Seiichiro Katsura: "Singularity-Free 3-Leg 6-DOF Spatial Parallel Robot with Actuation Redundancy," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 13, No. 2, pp. 127-134, March, 2024.
- [4] Kosuke Shikata, Seiichiro Katsura: "Wave Dynamics Intrinsic in Symmetric Four-channel Bilateral Teleoperation: Mutual Impedance-based Motion Control," *Mechatronics*, Vol. 102, No. 103209, 13 pages, June, 2024.
- [5] Daiki Socenaga, Issei Takeuchi, Daswin De Silva, Seiichiro Katsura: "Force Estimation from Surface-EMG Using Element Description Method," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, Vol. 6, No. 1, pp. 447-454, January, 2025.
- [6] Sora Yamaguchi, Yuki Tanaka, Seiichiro Katsura: "Contactless Environmental Impedance Estimation: Image-Based Approach Using Confidence Scores of Object Detection Model," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 2, pp. 152-160, March, 2025.
- [7] Yuki Tanaka, Seiichiro Katsura: "Sensorless Reaction Torque Regulation of Multi-DoF Industrial Manipulator Using Gated Recurrent Unit-Based Virtual Environment Quarrier," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 2, pp. 169-176, March, 2025.
- [8] Aina Kojima, Shunichi Sakurai, Seiichiro Katsura: "In-Hand Manipulation Using Interaction Mode Control in Polar Coordinate System," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 2, pp. 177-187, March, 2025.
- [9] Kei Ueda, Seiichiro Katsura: "Passive Tension

- Adjustment of Tendon-Driven Mechanism for Improvement of Drivability,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 2, pp. 277–284, March, 2025.
- [10] Yusaku Kuroki, Seiichiro Katsura: “Three-dimensional Motion Mechanism with Tendon-Driven Gravity Compensation,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 3, pp. 413–422, May, 2025.
- [11] Kazuma Morikawa, Seiichiro Katsura: “Realization of Advanced Contact Motion with Low Moment of Inertia Using In-Link Actuators,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 14, No. 3, pp. 423–430, May, 2025.

[主な受賞]

- [1] The Best Paper Award, The 15th International Conference on Human System Interaction, HSI2022-MELBOURNE, 2022 年 7 月 30 日
- [2] Outstanding Paper Award, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, and Optimization, SAMCON2023-NANJING, 2023 年 3 月 26 日
- [3] 総務省 戦略的情報通信研究開発推進事業 研究開発奨励賞, 2024 年 1 月 23 日
- [4] IIFES2024 学生テクニカルアカデミー コンテスト 特別賞, 2024 年 1 月 28 日
- [5] Istvan Nagy Award, 2024 年 10 月 2 日

## [研究助成 (A)]

## 触診技術伝承を目指した耳小骨可動性計測訓練シミュレータの開発



2241001

|                   |                                    |     |         |
|-------------------|------------------------------------|-----|---------|
| 研究代表者<br>(助成金受領者) | 大阪大学 大学院基礎工学研究科                    | 助 教 | 李 信 英   |
| 共同研究者             | 山梨大学 大学院総合研究部                      | 教 授 | 野 田 善 之 |
|                   | 国立病院機構東京医療センター<br>聴覚・平衡覚研究部聴覚障害研究室 | 室 長 | 神 崎 晶   |
|                   | 電気通信大学<br>大学院情報理工学研究科              | 教 授 | 小 池 卓 二 |

## [研究の目的]

世界保健機関（WHO）によると 2050 年までに難聴者は世界全体で 25 億人にまで増加する見込みであり、難聴は認知症やうつ病の罹患リスクを上昇させるため<sup>1)</sup>、世界的に難聴の予防や治療法が求められている。耳小骨（中耳の 3 つの小さい骨）の固着による難聴は、耳科手術により聴力回復の見込みがある疾患の一つである。耳小骨固着による難聴は耳小骨周囲の靭帯が硬化し、耳小骨の動き（可動性）を妨げることが原因である。非侵襲的検査法では正確な病変部の確認が困難であるため、手術中に耳科用探針を用い、耳小骨を直接加振させ耳小骨可動性の触診を行う（図 1）。術後の聴力改善には耳小骨の可動性評価が重要であるが、術者の経験や感覚に依存する可能性がある。また、内耳などへの副損傷に注意し、微小な力で触診する

必要がある。そのため、経験の浅い外科医でも正確かつ効果的な触診を行えるように、定量的な評価と再現性のある訓練が可能なトレーニングシステムが必要と考えられる。本研究では、仮想現実（VR）における中耳モデルと連動した力覚提示を活用した耳小骨可動性触診のトレーニングシステムを構築し、効率的かつ確かな手術手技の伝承を目指す。これにより、経験や感覚に頼っていた治療法の選択を、明確なエビデンスに基づいて術中に行うことで、術後成績を向上させ、再手術リスクを低減することが期待できる。このように、人間の繊細な感覚を機械で再現する「感覚と経験に基づく診断技術を数値化し、診断支援と技術伝承を行う手法」は、耳科領域のみならず他診療科の触診・打診にも拡張可能であると考えられる。

## [研究の内容、成果]

我々の研究グループは、耳小骨の可動性を定量的に測定するための術中測定システム<sup>2)</sup>を開発している。さらに、ヒト中耳の有限要素モデル（図 1）を用いて様々な病状における可動性をシミュレートし、そのデータを機械学習で分類することで、各病変部における効果的な触診法を提案している<sup>3)</sup>。本研究では、耳小骨の可動性を触診時の変位と反力の比（コンプライア

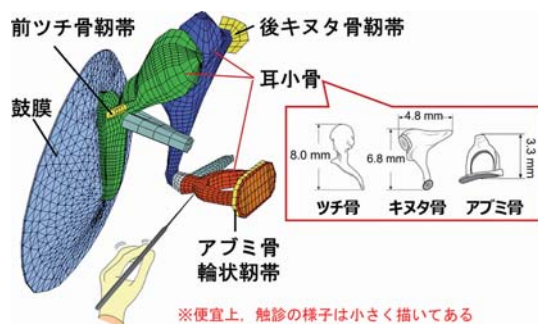


図 1 中耳の有限要素モデルと触診の様子

ンス、図2)として表し、これまでの研究成果を活かした耳小骨可動性触診の訓練システムを構築・評価した。さらに、新たな非侵襲的な触診法のシミュレーションも行った。



図2 耳小骨の可動性（コンプライアンス）の定量評価

## 1. 耳小骨可動性の触診トレーニングシステムの構築（研究成果 [1~2]）

### 1.1 構築方法

耳小骨コンプライアンス（図2）は、ばね定数の逆数として考えられる。計算やプログラムを単純化するため、トレーニングシステム上の耳小骨可動性はコイルばねとしてモデル化した（図3）。本研究では、正常耳と、アブミ骨周囲に固着が生じる耳硬化症（otosclerosis）をモデル化した。病態の有無やその程度に伴うコンプライアンスの変化は、耳小骨可動性計測システム<sup>2)</sup>による側頭標本での計測値と、ヒト中耳の有限要素モデルによる計算値<sup>3)</sup>をを参考に選定した（表1）。モデルのコンプライアンス値の妥当性は、側頭骨標本で歯科用セメントなどを用いて耳小骨を人工的に固着させた場合の耳小骨の挙動変化に関する文献値<sup>4)</sup>と比較して確認した。これらのコンプライアンス値に基づき、

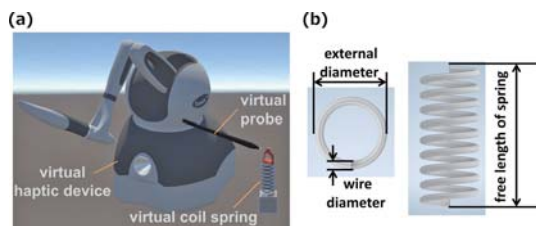


図3 (a) 触診トレーニングシステムの画面  
(b) 耳小骨のばねモデルの寸法

表1 正常耳と耳硬化症におけるアブミ骨のコンプライアンス

| Measurements  | FE-model      |                          |                              |
|---------------|---------------|--------------------------|------------------------------|
| Normal (mm/N) | Normal (mm/N) | Mild otosclerosis (mm/N) | Moderate otosclerosis (mm/N) |
| 1.5±0.9       | 1.3           | 0.48                     | 0.10                         |

表2 仮想耳小骨モデルのコイルばねの特性

|       | wire diameter (mm) | external diameter (mm) | free length of spring (mm) | number of total coils | compliance (mm/N) | mass (mg) |
|-------|--------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------|-----------|
| JA-15 | 0.23               | 2.5                    | 7.5                        | 8.5                   | 3.2               | 22.2      |
| JA-49 | 0.35               | 3.0                    | 7.5                        | 8.5                   | 0.93              | 61.7      |
| JA-52 | 0.40               | 3.0                    | 7.5                        | 9                     | 0.56              | 85.3      |
| JA-55 | 0.45               | 3.0                    | 7.5                        | 9                     | 0.34              | 108       |

表2のコイルばねを選定し、Autodesk Inventor Professional 2025を用いて3Dモデルを作成した。さらに、中耳有限要素モデルに基づいてアブミ骨の3Dモデルも作成した。アブミ骨の3Dモデルとそれぞれのコイルばねを用いて、3Dの仮想現実のコンテンツ制作可能な汎用ソフトウェアUnity (Ver. 2022)における仮想耳小骨モデルとして組み込んだ。各コイルばねの剛性を調整し、正常耳から軽症・重症の耳硬化症までを表現した。また、触覚フィードバックを実現するため、市販のハプティックデバイス (Touch TM, 3D SYSTEMS) とUnityのプログラムを連動させた。実際にデバイスを操作すると、プログラム上の仮想デバイスや仮想プローブ（耳科用短針）が動き、仮想プローブが仮想耳小骨に触れた際の反力がフィードバックされる（図3）。

### 1.2 システム駆動結果と考察

システム評価のため、触診訓練で得られる反力の主観的感觉による定性的評価と、Unityのアニメーション上で動きの定量的な評価を行った。

システムから得られる反力フィードバックを用いて、正常耳モデル (JA-15, JA-49) と軽度耳硬化症のモデル (JA-52), 重度耳硬化症のモデル (JA-55) の耳小骨可動性を識別できた。また、実際に表2のコイルばねを耳科用短針で触診した際の感覚との主観的評価の比較により、概ね一致することを確認できた。ただし、本報告では対象が1人のみであるため、今後は評価対象者を増やし、より多様な耳小骨コンプライアンスをモデル化することで、訓練システムの精度評価を進める必要があると考えられる。



触診時の仮想プローブ先端の3次元変位から求めた速度量と、触診による仮想アブミ骨頭部の3次元変位量を調べ、Unityのアニメーション上の仮想モデルの動きを評価した。計10回の触診を行った結果を図4に示す。実験対象者はUnityの画面を見ながら同じ力を加えることを心掛けているものの、触診を行う速度にはバラツキが認められた。変位量と速度量には比例関係があると考えられるため、図4に線形近似の式および決定係数をまとめた。特に、コンプライアンスが低いモデル(JA-15, JA-49)ほど線形近似時の決定係数が小さく、正常耳の方が触診の不安定性が増すことが示唆された。仮想耳小骨の変位量と仮想プローブ速度の比の分布を図5に示す。この比は、仮想耳小骨モデルの見かけ上コンプライアンスを反映していると考えられ、コイルばね間の相対的な大きさの関

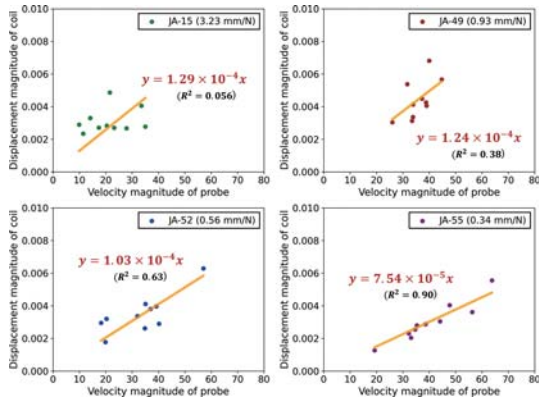
係(表2)と一致していた。そのため、設計されたコンプライアンス変化を再現できており、視覚的フィードバックとして有効であると考えられる。また、触覚フィードバックの再現性向上のためには、実際のコイルばねや仮想耳小骨モデルを触診する際に一定の変位量を与え、その際の反力を計測して比較する必要があると考えられる。

以上の結果から、本研究で構築した耳小骨可動性計測トレーニングシステムは、実際の触診時の耳小骨の動きを概ね再現できていると考えられる。なお、耳小骨固着における様々な病態を正確に診断する技術の獲得のためには、先行研究から得られた知見(定量的測定・コンピュータシミュレーション)に基づく効果的な触診方法を訓練できるようにする必要がある。

## 2. 触診力の評価

### 2.1 方法

耳小骨可動性を触診するには、通常の音刺激による振動より大きな変位を与える可能性がある。残存聴力保存のために、内耳の蝸牛に副損傷を与えない安全な範囲内の力を負荷する必要がある。我々の先行研究<sup>5)</sup>では、耳科手術の経験が異なる医師32名(耳小骨触診の経験がない医師や熟練医までを含む)が術中計測システムを用いて正常耳を模したコイルばね(コンプライアンス0.3 mm/N)を触診し、その力を推定した結果、 $130 \pm 64$  mNと大きなばらつきが認められた。さらに、そのうち21名の医師に対して異なるコイルばね(コンプライアンス0.2~3.3 mm/N)を触診させ、耳小骨固着の有無を判断させた結果、コンピュータシミュレーションに基づく正常値基準(0.26~0.5 mm/N)と一致した判断ができた医師は約50%にとどまり、触診力との明確な関連性は見られなかった。これらの結果から、安全かつ正確な診断のためのトレーニングシステムの必要性が示唆された。そこで、本研究ではトレーニングシステム使用後に、耳科用短針を用いて表2に示すコ



プロットは10回の測定結果を表し、回帰直線はその式と決定係数とともに示す。

図4 仮想耳小骨の変位量と仮想プローブの速度量の関係

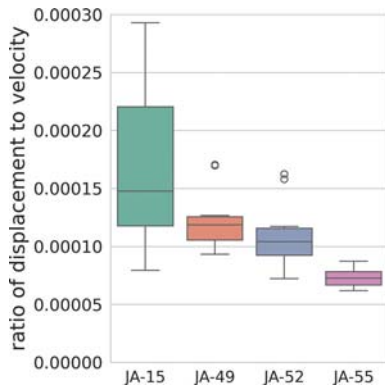


図5 仮想プローブ速度と仮想耳小骨の変位の比



イルばねを触診し、触診力を評価した。コイルばね上部に薄い金属板を接着し、実験対象者にはできるだけ一定の力で金属板の中央を触診するように指示した。レーザ変位計（CL-S015, 株式会社キーエンス）を金属板の中央に当て、変位を計測した（図 6a）。また、正確な触診のため、デジタル顕微鏡（Dino-Lite AM4113T, ANMO Electronics Corporation）で観察しながら（図 6b）、5 回ずつ計測した（図 6c）。

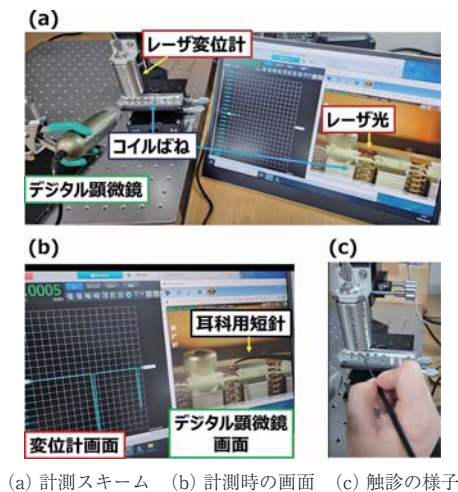


図 6 コイルばね触診時の変位計測システム

## 2.2 結果および考察

レーザ変位計による 5 回の計測結果を図 7 の箱ひげ図に示す。コンプライアンスが大きいコイルばね（JA-15, JA-49）では、計測結果のバラツキが大きかった。一定の力で触診すると、コンプライアンス値が大きいほど大きな変位を

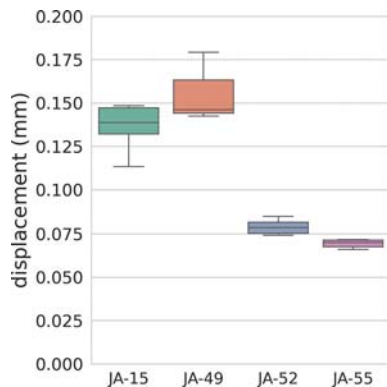


図 7 耳科用探針を用いたコイルばねモデル触診時の変異

示すことが考えられるが、JA-15 と JA-49 では、変位の平均値に大きな差がみられず、コンプライアンスが比較的小さい JA-49 の方の変位が大きい分布を示した。これは、コンプライアンスが大きいコイルほど訓練システムと同様に短針のコントロールが難しく、さらにレーザ変位計は鉛直方向の変位のみを測定しており、ばねの柔らかさによる回転運動を十分に捉えていない可能性があると考えられる。実際の中耳も触診位置や角度によって複雑な動きを示すため、訓練や計測時にその影響をさらに詳細に検討する必要がある。

ばね定数と変位から触診力を算出し、表 3 に示す。ヒト蝸牛モデルを用いた耳小骨可動性計測のシミュレーションを行った結果から、アブミ骨が正常であれば、約 40 mN 以下で蝸牛への安全性が確保できると考えられた。今回の計測結果、正常耳モデル（JA-15）の触診力は  $42 \pm 4.4$  mN であり、安全な触診力の習得が可能であったと考えられる。一方、固着の有る他のコイルばねは、コンプライアンス値が低いため、触診時の反力が感じにくく、触診力が強くなった可能性がある。今回の計測結果は、我々の先行研究における医師の触診力の範囲内であるものの、蝸牛モデルのシミュレーションにより安全性を裏付けする必要がある、訓練システムによって改善の予知があると考えられる。

今後は、医師を対象にトレーニングシステム使用前で診断精度や適切な触診力の習得状況を評価する必要があると考えられる。

表 3 コイルばねの特性と計測した変位から算出した触診の力

| JA-15<br>(3.2 mm/N) | JA-49<br>(0.93 mm/N) | JA-52<br>(0.56 mm/N) | JA-55<br>(0.34 mm/N) |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $42 \pm 4.4$ mN     | $92 \pm 9.4$ mN      | $140 \pm 8.2$ mN     | $210 \pm 7.3$ mN     |

## 3. 低侵襲的なコンプライアンス計測による耳小骨固着診断法の検討（研究成果 [3]）

中耳機能評価は一般的にティンパノメトリーを用いて行われる。しかし、ティンパノメトリーは鼓膜全体の平均的な可動性（コンプライ

アンス)を測定する方法であるため、耳小骨が具体的にどの部位で固着しているかを判断することは難しい。従来、我々が行ってきた耳小骨可動性の評価に関する研究では、中耳の鼓室内で直接耳小骨を触診する侵襲的な方法を主に用いてきた。一方、外耳道を経由して、鼓膜に付着している耳小骨の一つであるツチ骨の特定の位置にてコンプライアンスを評価できれば、より非侵襲的に耳小骨の固着を診断できる可能性がある。そこで本研究では、中耳有限要素モデルを用いて、鼓膜の特定位置を直接振動させ、その位置ごとのコンプライアンスをシミュレーションし、耳小骨固着の診断精度を検討した。その結果、耳小骨の固着部位によって、コンプライアンスの測定場所や、コンプライアンス値の低下パターンが異なることが確認できた。ツチ骨の特定位置における可動性計測に基づく検証および訓練シミュレータ開発により、新たな低侵襲的触診法の提案が可能になると考えられる。

#### [今後の研究の方向, 課題]

耳小骨触診の訓練には、3D プリントなどで製作した耳小骨模型を用いる方法も考えられるが、大きな力で損傷を受けやすく、固着を含めた多様な耳小骨の可動性(0.3~3.9 N/mm)を精度よく再現することは困難である。そのため、本研究で構築したトレーニングシステムは有用であると考えられる。また、中耳有限要素モデルのシミュレーション結果を基に、各病態において効率的に耳小骨固着を診断できる位置や方向に対して、安全で適切な力で触診する技術を習得可能な耳小骨可動性計測訓練システムを本研究では目標としている。このシステムは、耳小骨可動性の変化を理論的な裏付けの下で訓練が可能であり、学術的および臨床的にも意義が高く、医療教育の分野にも貢献できると考えられる。

今後の研究方向としては、より臨床現場に即

したリアリティ度の高い再現を目指す。そのため、今回の研究成果から明らかになった課題を解決するとともに、熟練医から操作感のフィードバックを得て、システムを改善する必要がある。さらに、臨床現場では患者の病態によって手技が異なり、術野と触診可能な位置や角度が変化するため、中耳全体の動きをリアルタイムでシミュレーションし、耳小骨連鎖の一連の動きをAR(拡張現実)化して、触診の方向や位置、耳硬化症など病態による動きの違いを自由に3次元で観察可能な技術を確認する必要がある。また、耳科用探針の先端部は細長く、しなりやすいため、これらもモデル化することで、よりリアルな操作感の再現を目指すことも重要である。

#### [参考文献]

- 1) G. Livingstone et al.: Dementia prevention, intervention, and care: 2020 report of the Lancet Commission, The Lancet, 396 (2020)
- 2) T. Koike et al.: Development of intra-operative assessment system for ossicular mobility and middle ear transfer function, Hear. Res., 378 (2019)
- 3) S. Lee et al.: Classification of ossicular fixation based on a computational simulation of ossicular mobility, Sci. Rep., 14 (2024)
- 4) H.H. Nakajima et al.: Experimental ossicular fixations and the middle ear's response to sound: Evidence for a flexible ossicular chain, Hear. Res., 204 (2005)
- 5) S. Kanzaki et al.: Individual differences in surgeons' procedures and judgements of ossicular conditions during palpation, AAO-HNSF Annual Meeting (2023)

#### [成果の発表, 論文など]

- [1] **Sinyoung Lee**, Sho Kanzaki, Takuji Koike, Yoshiyuki Noda, "Development of Ossicular Palpation Training Simulator Using Haptic Device", Association for Research in Otolaryngology 48<sup>th</sup> Mid-Winter Meeting, Orlando, USA, February 2025
- [2] **Sinyoung Lee**, Sho Kanzaki, Takuji Koike, Yoshiyuki Noda, "Development of ossicular palpation training simulator", The Korean Scientists and

Engineers Association in Japan 16<sup>th</sup> Meeting, Tokyo,  
Japan, March 2025

(バイオエンジニアリング部門 学術優秀賞 受賞)

[ 3 ] 李信英, 神崎晶, 小池卓二, 「ツチ骨柄コンプラ

イアンスの直接計測による新たな耳小骨固着診断法  
開発: 数値シミュレーションによる検討」, 『日本耳  
科学会 第 34 回学術講演会』, 名古屋, 2024 年 10  
月

## [研究助成 (A)]

## 無給電状態で静的および動的な 圧力センシングが可能な編み手袋の開発

2241002



研究代表者

京都工芸繊維大学 繊維学系

准教授

石 井 佑 弥

## [研究の目的]

『人間と機械（特にロボット）の調和の促進』を思い描く上で、人間と機械の物理的接触を伴うヒューマンマシーンインターフェース(HMI)は欠かせない。特にこのようなHMIには、人間がロボットに触れた、握ったなどを電気信号で検知する電子スキンも含まれる。このようなHMIではこれまでに、MEMS圧力センサなどの従来の無機系のデバイス群や、フレキシブルハイブリッドエレクトロニクスに代表される機械的に柔軟な樹脂系の薄膜フィルム状デバイス群が用いられてきた。

他方で、糸からなる編物、織物、組物（ここでは、テキスタイルと総称）は、古来より人間と常時物理的接触を伴いながら愛用されてきた。これは、テキスタイルの肌触りの良さやしなやかに曲がる点など、人間視線からの優れた点を有するためと考えられる。したがって、テキスタイルからなるHMIは、人間と機械の物理的接触が伴う利活用において、優れた適合性を示す。筆者は、無機系のデバイス群と樹脂系の薄膜フィルム状デバイス群と並ぶ第三極として、テキスタイルからなるHMIが積極的に利活用される未来を思い描く。

テキスタイルに電子的な機能を付与し利活用しようとする、電子テキスタイルが知られている。筆者は、繊維系三学会が共同運営するスマートテキスタイル研究会の副委員長（2025年4月現在）として、この電子テキスタイルの

分野に携わるが、テキスタイルを電子機器として開発、利活用するときの技術的なハードルの高さに直面し、この研究分野事態が低迷しているのが現状である。特に、無機系のデバイス群や樹脂系の薄膜フィルム状デバイス群と比べると、再現性や精度がどうしても劣ることが課題である。

上記の課題は認めつつも、テキスタイルと人間の親和性は特筆すべきであるため、キラーデバイス群の研究開発が電子テキスタイルの研究分野、業界から渴望されている。そこで本研究では、このキラーデバイスの有望な一例として、「無給電状態で静的および動的な圧力センシングが可能な編み手袋」を発案し、この開発を世界に先駆けて推進した。

「無給電状態で静的および動的な圧力センシングが可能な編み手袋」は、例えばロボットハンドがこの手袋を着用し、人間が触れた（タッチ）、握った（圧力印加）を無給電状態にもかかわらず電気信号として検出することを目指した。さらに、圧力を印加したその瞬間の（動的な）検知のみならず、静的な圧力印加状態での検知も可能とすることも目指した。これら双方を同時に実現する電子テキスタイルの基礎的な動作を、申請者らは世界に先駆けて発明および論文発表している<sup>1,2)</sup>。しかしこの報告は、「無給電動作可能なスパーサーファブリック型タッチ/圧力センサ」（図1）を報告しており、5層構造の複雑な編物であるため、編み手袋のような複雑な構造体への1回での編み込みは困難で



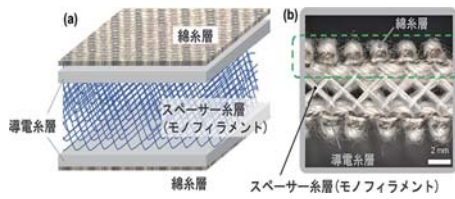


図1 筆者らが新規開発した無給電動作可能なスペーサーファブリック型タッチ/圧力センサの (a) 概説図と (b) 断面写真

ある。そこで本研究では、このスペーサーファブリック型タッチ/圧力センサの構造を抜本的に見直し、HMIを見据えた編み手袋状構造に発展させる。

ここで、類似技術としてこれまでに、テキスタイル型のタッチ/圧力センサとして、「①圧電方式と摩擦帯電方式」、「②圧抵抗方式と静電容量方式」が主に報告されていた。しかし、①については無給電状態でのセンシングは可能であるものの、静的な圧力印加状態の圧力センシングは原理的に困難である。②については、静的な圧力センシングは可能であるが、無給電状態での圧力センシングは原理的に困難である。したがって本研究では、無給電状態で静的および動的な圧力センシングが可能なユニークなテキスタイル型のタッチ/圧力センサ（編み手袋）を開発する。

#### 〔研究の内容、成果〕

これまでに開発した、5層の編み構造からなる「無給電動作可能なスペーサーファブリック型タッチ/圧力センサ」（図1）の特性評価を深めていったところ、ヒトが触れる側の非導電性糸層（綿糸層）と導電性糸層の2層だけでもタッチおよび圧力センシングが可能であることが分かってきた。このため、動作実証の第一検討として、非導電性糸層と導電性糸層の2層のみからなる平編物を作製した。

導電性糸には、導電性銀メッキミシン糸（AGposs<sup>®</sup>, 143/2 dtex, ミツフジ株式会社）を用い、非導電性糸には綿 50%, アクリル 50% の紡績糸（ドラロン綿<sup>®</sup>, 295/2 dtex）を

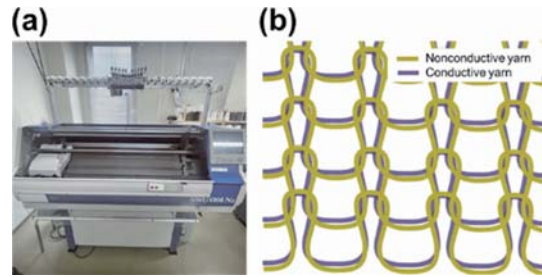


図2 (a) 横編機の外観と (b) プレーティング編みの概説図

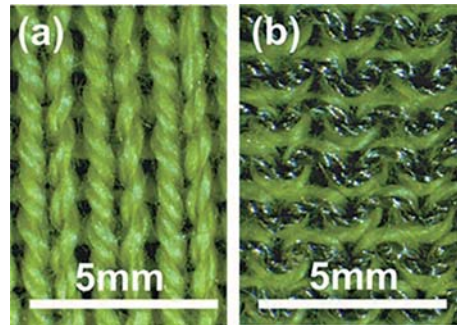


図3 編みあげた2層構造の編物のマイクロスコープ像：(a) 表面、(b) 裏面

使用した。横編機（SWG091N2, 株式会社 島精機製作所）〔図2 (a)〕を用いたプレーティング編み〔図2 (b)〕により、非導電性糸がヒトの触れる側、導電性糸がその反対側に位置するように編みあげた。

図3に実際に編みあげた2層構造の編物のマイクロスコープ像を示す。表面では導電性糸が非導電性糸で覆われており、裏面では導電性糸どうしが接触している。これにより、非導電性糸層と導電性糸層の2層構造が実現していることが分かる。

この2層構造の編物にヒトの指が触れたとき、および押し込んだときの導電性糸層から出力される電圧を測定した（図4）。当該編物にヒトの指が触れると、無給電状態にもかかわらず周波数約 60 Hz の交流電圧が出力された（京都府京都市内で測定）。さらに、指で当該センサを押し込むと、タッチしたときよりも出力電圧が増加した。なお、このときの温度は 25.3℃、湿度は 64.2 %RH であった。この結果から、当該編物は出力電圧の大小によってヒトの指によるタッチおよび押し込み（圧力印加）を無給電



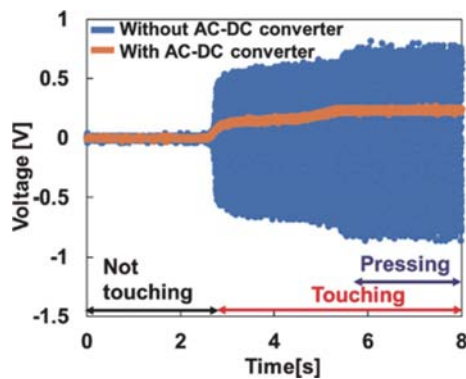


図4 2層構造の編物にヒトの指が触れたとき、および押し込んだときの導電性糸層から出力される電圧

状態で検知できることが示された。また、ヒトの指が接触している間、常に電圧が出力されている。したがって、当該センサは印加圧力が変化しない静的状態の連続センシングも可能であることが示された。なお、この交流の出力電圧は、ダイオードブリッジ整流器とコンデンサからなるシンプルな AC-DC コンバーター回路を出力側に付加することにより、直流電圧としても取り出すことも可能である。

無給電状態にもかかわらず当該編物から交流電圧が出力されるメカニズムとして次のようなモデルを考えている<sup>1)</sup>。商用交流電源で動作する電気機器や配線ケーブルなどから放散された電磁波が、人体内で商用交流電源の周波数の静電誘導が生じさせる。この人体内での静電誘導が、非導電性の鞘糸層を隔てて、導電性の芯糸層に静電誘導を生じさせる。この芯糸層での静電誘導が、交流電圧として出力される。印加負荷の増加に伴う出力電圧の増加の原因については、負荷の増加に伴う鞘糸の厚みの減少や抵抗値の減少などを考えている。

2層構造の編み部分（タッチおよび圧力センシング部分）を10箇所導入して1回で編み上げた、無給電状態で静的および動的な圧力センシングが可能な編み手袋を図5に示す。手型に良好に着用させられる構造に至るまで、編みの条件を試行錯誤した結果、良好に着用させられる手袋が出来上がるに至った。この編み手袋の動作検証をしたところ、無給電状態で静的およ



図5 2層構造の編み部分を10箇所導入して編み上げた無給電状態で静的および動的な圧力センシングが可能な手袋

び動的な圧力センシングが可能であることが明らかになった。しかし、サンプル数を増やして動作検証を進めたところ、導電性の糸が、ヒトが触れる非導電性の糸側の表面に露出している箇所が散見されることが分かってきた。この課題を改善するために、編み条件を変化させるなどして、導電性の糸が非導電性の糸側の表面に露出しないように、編みの条件を検討していったものの、完全に導電糸の露出を抑える編み条件には至らなかった。このため、プレーティング編みを用いた2層編み構造自体を見直し、代替法を検討した。

上述の2層構造と等価な構造を有する芯鞘導電糸（図6）を企業様のご協力により、開発およびご提供いただいた。この芯鞘導電糸は、導電性の銀メッキ糸を芯糸として、この周りを覆うように非導電性の綿糸で燃られた芯鞘2層構造の燃糸である。すなわち、これまで導電性の糸と非導電性の糸の2本をプレーティング編み

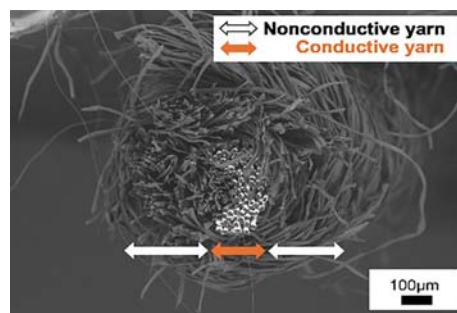


図6 芯鞘導電糸の走査型電子顕微鏡像<sup>3)</sup>

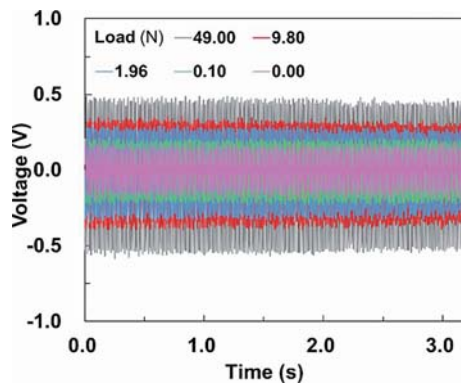


図7 ヒトが触れた状態の金属平端子を用いて、異なる負荷を芯鞘導電糸に印加したときの芯糸で生じる出力電圧<sup>3)</sup>

して、ヒトが触れる側に非導電性糸層、その反対側に導電性糸層を形成した編物2層構造を、1本の糸の内部で実現している。この芯鞘導電糸を使用することにより、導電性の糸が非導電性糸層から露出する問題が解決された。加えて、1本の糸で完結するために、編み上げられる構造の自由度が大きく広がった。

図7に、ヒトが触れた状態の金属平端子を用いて、異なる負荷を芯鞘導電糸に印加したときの芯糸で生じる出力電圧を示す。なお、負荷は当該単糸の短軸方向から垂直に印加した。無給電状態にもかかわらず周波数が約 60 Hz の交流電圧が連続して出力されていることが分かった。また、印加する負荷の増加に伴いこの出力電圧の振幅は増加した。以上の結果から、開発した芯鞘導電糸が、無給電状態で静的および動的な連続圧力センシング可能であることが示された。なお、当該芯鞘導電糸に関する特許を前述の企業様と共同出願した。

続いて、前述の芯鞘導電糸のみを編んだセンサ部を7箇所部分的に編んだ編み手袋を作製した(図8)。手型に良好に着用されられる構造に至るまで、編みの条件を試行錯誤した結果、良好に着用させられる手袋が出来上がるに至った。この編み手袋も1回で編み上げることが可能である。芯鞘導電糸で編んだセンサ部に、ヒトの指がタッチし、さらに押し込んだときの出力電圧を図9示す。指がタッチすると、無給電

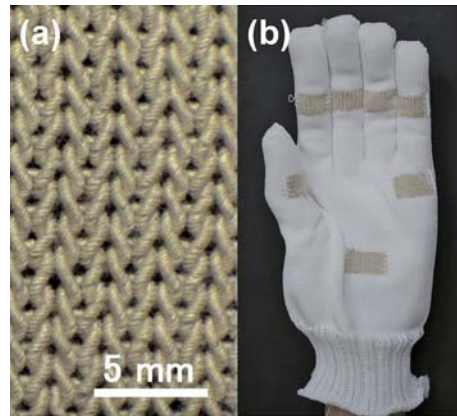


図8 (a) 芯鞘導電糸で編んだセンサ部のマイクロスコープ像と (b) 芯鞘導電糸のみを編んだセンサ部を7箇所部分的に編んだ編み手袋の外観<sup>4)</sup>

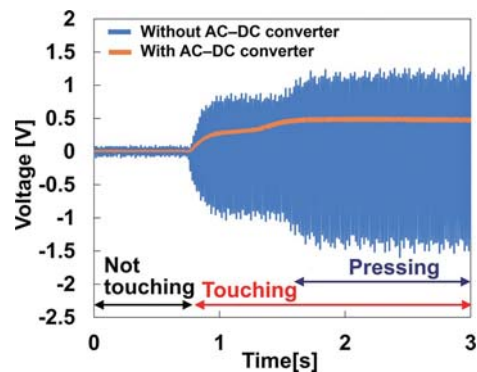


図9 芯鞘導電糸で編んだセンサ部に、ヒトの指がタッチし、さらに押し込んだときの出力電圧<sup>4)</sup>

状態にもかかわらず交流電圧が連続して出力された。さらに指で押し込むと、振幅が増加した。なお、この交流電圧の周波数は約 60 Hz であり(京都府京都市内で測定)、AC-DC コンバータ回路を介した場合には直流電圧が連続して出力された。また、このときの温度は 28.2℃、湿度は 48.1 %RH であった。したがって作製した編物が、無給電状態にも関わらず出力電圧の大小で連続して静的および動的な圧力センシングが可能な圧力センサとして機能する可能性が示された。

最後に、作製した編み手袋を木製のハンドモデルに装着して、これとヒトが握手したときの出力電圧を測定した。この結果、7箇所全てで出力電圧が変化し、同時圧力センシングの可能性が示された。

【参考文献】

- 1) K. Tonomura et al. Smart Materials and Structures, 32(3), 035029, 2023.
- 2) 特願 2021-183160, 石井佑弥, ユーアニー, 外村一樹, 発電部材およびタッチセンサ装置
- 3) 吉田他, 2024 年繊維学会秋季研究発表会, A15, 京都, 2024 年 11 月.
- 4) 梶谷他, 2024 年繊維学会秋季研究発表会, 2F15, 京都, 2024 年 11 月.

【成果の発表, 論文など】

- ・ 梶谷芽衣, 曾我部利帆, 宮田千歌, 石井佑弥, 無給電状態で静的および動的な圧力センシングが可能な

編み手袋の開発, 2024 年繊維学会秋季研究発表会, 2F15, 京都, 2024 年 11 月.

- ・ 吉田登, 梶谷芽衣, 宮田千歌, 石井佑弥, 無給電状態で静的および動的な圧力センシングが可能な糸, 2024 年繊維学会秋季研究発表会, A15, 京都, 2024 年 11 月.
- ・ 曾我部利帆, 梶谷芽衣, 宮田千歌, 石井佑弥, 無給電状態で踏圧の連続センシングが可能なインソール型編物の開発, 2024 年繊維学会秋季研究発表会, A17, 京都, 2024 年 11 月.
- ・ 石井佑弥, 無給電状態で連続センシング可能な編み手袋型タッチセンサ, 繊維機械学会誌 月刊せんい, Vol. 78, No. 3, pp. 27-33, 2025.

## [研究助成 (A)]

## 咬合力エネルギーハーベスティングによる バッテリーレスマウスガード型デバイスの開発

2241004



研究代表者 東京科学大学  
(助成金受領者)  
共同研究者 東京科学大学

助 教 市 川 健 太  
教 授 三 林 浩 二

## [研究の目的]

ウェアラブルデバイスによって装着者の生体情報を無拘束に計測するシステムは一般的となりつつあり、今日ではより多様で高度な生体情報を計測するべく新規計測技術や計測対象の開拓が進められている。その中でも口腔は、唾液成分や咬合状態、口腔温など健康状態に関連する多様な生体情報が存在し、これらを日常生活にて連続的に計測し、その変動を捉えることは、個人によるヘルスケアの促進や医療現場でのデータ活用へと大きな期待が寄せられている。口腔内生体情報をモニタリングするため、マウスガード（マウスピース）に各種センサ素子やその他計測用の電子機器を統合したウェアラブルデバイスの研究開発が進められているが、実用化に際しデバイス駆動のための電源が大きな課題となっている。現在普及しているウェアラブルデバイスの多くでは、バッテリーによる電力供給が一般的に用いられている。一方、マウスガード型をはじめとする口腔内デバイスの場合、誤飲時の重篤な健康リスクからバッテリーの使用は許容されず、実用化に際しては代替となる電源が必要不可欠である。

本研究ではこのような現状に対し、身の回りの微小なエネルギー源を電気エネルギーへと変換・発電するエネルギーハーベスティング技術を活用することにより、口腔内での電力の地産地消を実現し、バッテリーレス化を図った。特に、口腔内に存在する微小エネルギー源として、著

者らが以前より基礎的検討を進めてきた咬合力を利用することとし、マウスガード型口腔内生体情報センサデバイスの開発と咬合力エネルギーハーベスティング技術の開発を相補的に進め、バッテリーレスなマウスガード型デバイスの実現を目指した。

## [研究の内容、成果]

## 1. エネルギーハーベスティング機構の概要

マウスガード型デバイスと統合可能な形態で咬合力エネルギーハーベスティングを実現するためには、マウスガード咬合面に、装着者の自然な咬合を阻害しない極薄形状でエネルギーハーベスティング機構（エネルギーハーベスタ）を実装する必要がある。本研究で開発する咬合力エネルギーハーベスタを図1に示す。本エネルギーハーベスタは、電荷を半永久的に保持する誘電体であるエレクトレットと誘電エラストマー、電極から成る、シンプルな積層構造を取る。図に示すように、エレクトレット表面に保持された負

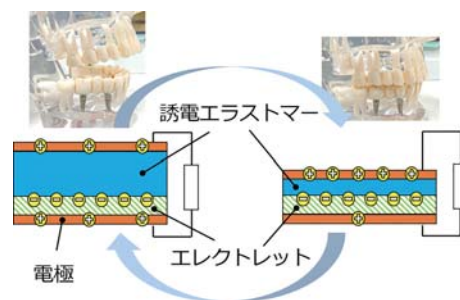


図1 咬合力をエネルギー源とする発電機構



電荷によって上下の電極には正電荷が誘導される。エネルギーハーベスタに対し咬合力が作用すると、誘電エラストマー層が支配的に大変形し内部の静電容量のバランスが変化するため、外部負荷を通して電極間で電荷が移動する。この電荷の移動、すなわち誘導電流を利用することで外部への電力供給を実現する。

咬合力のような機械的エネルギーからのエネルギーハーベスティングでは、エネルギー源の周波数に対し機械的に共振するような機構によって高効率な発電性能を得る。しかし、咬合力を含む生体の運動は、いずれも高々数 Hz と、従来のエネルギーハーベスティングが対象としてきた機械類の振動と比較して低周波であり、マウスガードに実装可能な極薄形状で咬合力と共振駆動し、センサ素子への有効な電力供給を実現することは困難であった。提案するエレクトレットと誘電エラストマーによるハーベスタは、著者らの以前の検討より、咬合力を模擬した外力に対して圧電体と比較し最大数百倍の発電性能を有することが示されており、マウスガード型に適した発電機構と考えられる。

## 2. スパッタ薄膜電極に関するプロセス検討

上記エネルギーハーベスタのマウスガードへの統合・実装を志向し、電極層の製作プロセスについて検討した。

これまでの著者らの検討では、銅板や銅箔等の平面状の電極基材上にエレクトレット層、あるいは誘電エラストマー層を成膜後、両者を重ね合わせることでハーベスタを構築した。しかし、人間の歯列は複雑形状を有しており、それに沿って製作されるマウスガード咬合面も細かい凹凸を有している。従来のハーベスタ試作手法では、このような複雑形状に沿った実装は困難であり、また電極材料として用いていた銅についても口腔内での使用に際して安全上の懸念が存在する。そこで、両者に対応した新たな手法として、生体適合性に優れる銀薄膜を、マウスガード材料上に直接スパッタ成膜し、これを

電極層として用いることについて検討した。

銀薄膜のスパッタ成膜については、研究室に敷設のスパッタ成膜装置を用いた。まず、市販の一般的なマウスガード材料に対して、それぞれ厚さ 300 nm の銀薄膜を成膜し、その後クロスカット試験法に従い銀薄膜のマウスガード材料への密着性を評価した。なお、ハーベスタをマウスガードに実装する際には、2 層のマウスガード内部へと埋め込み、口腔内の湿潤環境からの密閉することを想定している。このとき、ハーベスタに負荷される咬合力はマウスガード層を介して伝達されるため、硬いマウスガード材料の方がハーベスタへの力伝達に有利と考えられる。また、電極上に成膜するエレクトレットに関しては、その材料として検討しているアモルファス系フッ素樹脂 CYTOP (AGC Inc.) の成膜処理および帯電処理に際し、加熱プロセスを要する場合がある。密着性試験にて優れた性能が確認されたマウスガード材料については、追加の試験として硬度および耐熱性を調査した。

硬度試験としてデュロメータ AM 硬度試験を実施し、耐熱性試験としては、くびれ部の断面積が  $3.5 \text{ mm}^2$  となるようにダンベル試験片状に切り出したマウスガード材料の両端に 50 g の静荷重を負荷し、段階的に  $5^\circ\text{C}$  刻みで温度が上昇する恒温オープン内に静置し、軟化点を調査した。各設定温度に到達後、5 分間おもりが垂れ下がらなかった最大の温度を本試験での軟化点の定義とした。これらマウスガード材料に関する試験の結果、優れた密着性（クロスカット試験法で残留率 99.7%）、高硬度（ショア AM 硬度 96.0）、優れた耐熱性（軟化点  $105^\circ\text{C}$ 、検討した材料中で最高）を有した Copolyester 製マウスガード材料 (Essix<sup>®</sup> Plastic Sheet ACE) を用いることで、マウスガード上への銀薄膜電極およびハーベスタの積層成形の可能性が示された。

次に、上記検討で決定したマウスガード材料およびハーベスタ試作プロセスが発電性能に及ぼす影響について確認するため、従来の銅板で



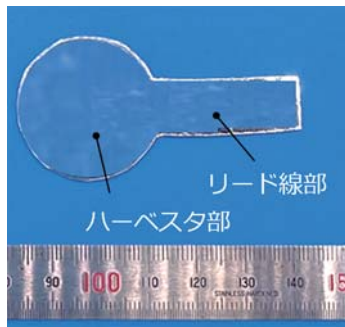


図2 マウスガード材料上に成膜したスパッタ薄膜電極

の基礎検討と同様の直径 30 mm の円形とリード線部の凸形状にマウスガード材料を切り出し(図2, 銀薄膜スパッタ成膜処理済み), ハーベスタを試作しその発電性能を実験的に確認した。

ハーベスタの試作では, 先述の検討と同じく, 切り出したマウスガード材料上に厚さ 300 nm となるよう銀薄膜をスパッタ成膜し, その後エレクトレット材料 (CYTOP CTL-809M), あるいは誘電エラストマー材料 (Dragon Skin 10Fast) をフィルムアプリーケータで所望の厚さに塗膜した。エレクトレットは 105℃での加熱処理, 誘電エラストマーは室温乾燥により硬化するが, この際の硬化前後の厚さの関係については, 事前の実測調査により同定した。また, 硬化後の両層の厚さ設計値については, ハーベスタの等価電気回路に基づくシミュレーションを実施し決定した (エレクトレット: 11.5  $\mu\text{m}$ , 誘電エラストマー: 70  $\mu\text{m}$ )。なお, 成膜した CYTOP 膜についてはコロナ放電処理を施しエレクトレット化した。

試作したハーベスタの発電性能については, 従来と同じく咬合力を模擬した圧縮負荷装置である咬合力シミュレータにより, 最大 0.85 MPa, 周波数 1 Hz の条件で圧縮負荷を与え, 負荷抵抗での消費電力として発電量を計測した。本発電実験の結果得られた発電量を図3に示す。一般にエネルギーハーベスティングの発電量は, 接続する負荷抵抗に依存し, ハーベスタの内部インピーダンスと接続した外部インピーダンスが整合した際に最大化することから, 本実験では負荷抵抗として 10 M $\Omega$  から 1 G $\Omega$  までを接

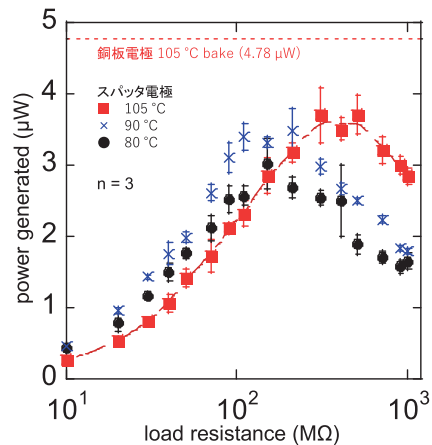


図3 スパッタ薄膜電極を用いた場合の発電量比較

続し, それぞれ発電量を計測した。図3中赤四角プロットで示すように, スパッタ薄膜電極を用いて試作したハーベスタは負荷抵抗 400 M $\Omega$  の際に発電量 3.71  $\mu\text{W}$  と最大の出力となった。しかし, 本出力を従来の銅板電極を用いて試作したハーベスタと比較すると, 最大発電量でおよそ 20% 程度の低下が確認された (銅板電極での最大発電量: 4.78  $\mu\text{W}$ )。この原因として, マウスガード材料を介することによる CYTOP の加熱処理時の伝熱特性の変化に着目し, スパッタ薄膜電極を使用する際にも加熱温度を変更してハーベスタを試作し, 発電量を評価した。その結果, 図3中青バツ印プロット (加熱温度 90℃) や黒丸プロット (加熱温度 80℃) に示すように, 加熱温度の変化に応じて最大発電量も低下することが示された。本現象についてさらなる検討のため, 銅板電極上にてより広範な温度範囲 (80–280℃) 設定でエレクトレットを試作し, エレクトレット単体としての性能指標である表面電位を計測した結果を図4に示す。図からも明らかのように, 加熱温度と正に相関してエレクトレット表面電位は変動することが明らかとなり, この表面電位の変化が発電量に影響したものと考えらえる。なお, この温度－表面電位の関係についてはエレクトレット表面の物理・化学的性状に由来するものと予想し, 現在更なる検討を進めている。

上記のような加熱温度依存性が明らかになっ

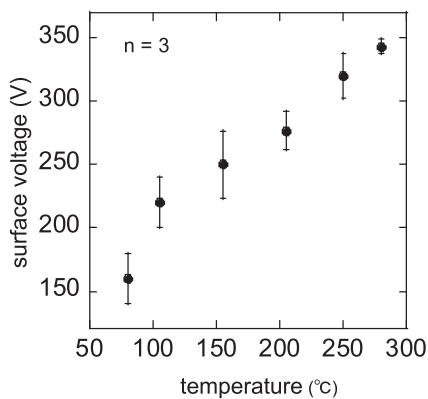


図4 各加熱温度でのエレクトレット表面電位計測結果

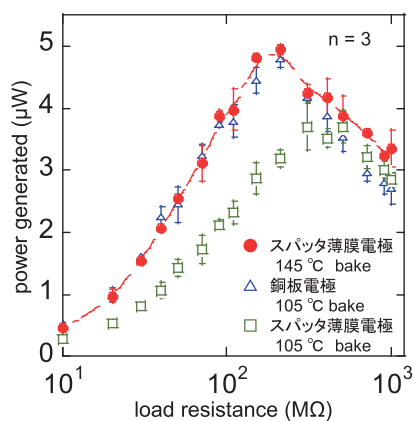


図5 ペルチェ素子併用での加熱処理の効果検証結果

たことから、より高温で CYTOP の加熱処理を実施し、高い発電量を得るための方策として、オープンによる CYTOP の加熱プロセスと同時に、マウスガード材料側にペルチェ素子を接着し、強制的に冷却する手法を検討した。予備検討の結果、本方式を用いることでマウスガード材料の軟化点 105℃ を超え、最大 145℃ までの条件で熱変形を起こさずマウスガードおよびスパッタ薄膜電極上に塗布した CYTOP を加熱処理可能であることが確認された。本条件で改めて試作したハーベスタについて、同様に発電実験を実施した結果を図 5 に示す。スパッタ薄膜電極を用い、145℃ で加熱処理を実施したハーベスタは、最大 4.94 μW と銅板電極と同等の発電性能を有していることが確認された。

これらの結果より、マウスガード材料上に直接銀薄膜をスパッタ成膜し、電極層として利用可能であること、CYTOP 加熱温度に依存して

エレクトレット表面電位が変動し、プロセスの工夫により補償可能であること等が示された。今後、マウスガード材料を歯列の複雑形状へと加工した状態へと発展させ、マウスガード型デバイスへの咬合力エネルギーハーベスタの実装を進めていく予定である。

### 3. 口腔内生体情報センシング技術の開発

上記咬合力エネルギーハーベスタ技術に関する研究と一部並行する形で、給電対象となる口腔内生体情報センシング技術についても検討を進めた。

マウスガード型センサデバイスの活用先としては、唾液中成分等を対象とした電気化学的バイオセンシングが特に研究が盛んに進められている。一方このようなセンサデバイスはセンシングにバイアス電圧の供給が必要であるなど、比較的高い電力量の連続的な供給が必要であり、間欠的な動作である咬合力エネルギーハーベスタによる給電には、別途パワーマネジメント回路等の実装が必要となる。

咬合力負荷に連動した間欠的なオン／オフでセンシング可能な口腔内生体情報として、唾液濁度の光学計測について検討した。本計測システムは、LED とフォトトランジスタ素子をマウスガード内部に埋め込み、両者の間に存在する唾液の光透過率をもとに濁度定量をするものである。本研究期間では、濁度センシング部の形状について、唾液中懸濁物質の粒子を空間的に配置した光学シミュレーションにより、より高感度な計測が可能となるよう設計最適化に取り組んだ。今後、咬合力エネルギーハーベスタとの統合により、バッテリーレスなシステムとしての実装を進める。

#### [成果の発表、論文など]

- ・市川健太, 川瀬源太郎, 飯谷健太, 三林浩二: 無線式マウスガード型光学センサによる唾液濁度の口腔内連続計測, 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, 2024. 11. (優秀ポス

ター発表賞ファイナリスト)

- ・ Kenta Ichikawa, Seiya Fujino, Kumi Yokota, Kenta Iitani, Kohji Mitsubayashi: Effect of cure temperature on charge retention of amorphous fluorinated

polymer for energy harvesting, 20th International Symposium on Electrets (IEEE ISE20), 2025. 9. (採択済み発表予定)

## [研究助成 (A)]

# VR を用いた小児弱視訓練用プログラム医療機器の 社会実装に向けた橋渡し研究

2241005



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

順天堂大学 医学部眼科学講座  
順天堂大学 大学院医学研究科  
遠隔医療・モバイルヘルス  
研究開発講座

順天堂大学 医学部眼科学講座

帝京大学 医療技術学部  
視機能矯正学会

准教授

猪俣 武 範

特任助教

奥 村 雄 一

准教授

根 岸 貴 志

准教授

広 田 雅 和

## [研究の目的]

弱視は一眼あるいは両眼の視力不良を特徴とし、小児における発症率は約 1-5% である。

弱視の治療は、完全矯正眼鏡の常用に加え、アイパッチなどを用いた健眼遮閉による弱視訓練を実施する。

しかし、人の視覚の感受性期は 8 歳までであり、この時期までに適切な治療をしなければ、十分な治療効果を期待できないばかりか、恒久的な視力障害を残す。健眼遮閉による弱視訓練は、患児の年齢が上がるほど一日あたりの遮閉時間を延長する必要があるため、患児への心理的・物理的負担の増大による治療アドヒアランスの低下により弱視の治療効果の低減に繋がる。そのため、健眼遮閉に代わる心理的・物理的負担が少なく、治療効果の高い弱視訓練方法が望まれている。

そこで本研究では、バーチャルリアリティ (VR) を用いた小児弱視訓練用プログラム医療機器 (本製品、図 1) の臨床的安全性ならびに効果を解明し、従来の弱視治療方法よりも患児への心理的・物理的負担が少なく、短期間での弱視治療を実現する。

本研究から、デジタルヘルスを用いた医療における破壊的イノベーションの創出とヒト中心の医療を実現するとともに、視力にハンディ

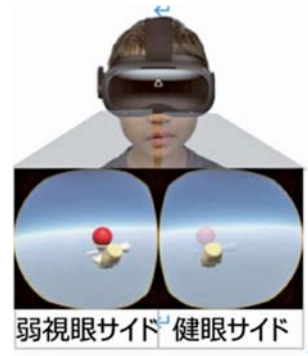


図 1 本製品

キャップを背負う子どもがいない未来を創出する。

## [研究の内容、成果]

## 1. 本製品の成人に対する安全性評価試験

本製品の成人に対する安全性評価試験に向けたプロトコル策定と倫理承認 (帝京大学 22-061) を取得した。成人に対する安全性評価試験として、20 名の若年健常者を対象に、30 分間の本製品使用前後による視覚負荷前後において、5 段階評価の疲労に関するアンケート ((図 2) Q1 眼の疲れ, Q2 視界のぼけや複視, Q3 眼の乾きや瞼の重さ, Q4 肩凝り, Q5 首の疲れ, Q6 頭痛, Q7 眠気, Q8 手首や腕の疲れ, Q9 映像酔い) を実施し比較検証した。

自覚的な眼症状 (Q1-3) はいずれも視覚負

図2 疲労に関するアンケート

図4 プレイログの記録機能

一方、肩凝りといった症状が見られたから、本製品の小児への利用には HMD の軽量化が必要と考えられた。

治験機には、けん玉透明度変更機能（図3）、医師用透明度変更機能、プレイログの記録機能（図4）、ログイン機能、医師側管理画面、説明資料（使用方法等）の表示機能、チュートリアル表示機能（使用方法等）、終了アナウンス機能（過剰に長時間の利用を抑制するため）、フリープレイモード（透明度、課題のクリア状況の制限なくプレイ可能）といった機能を実装し

また、プログラム医療機器としての開発・保守規格に基づくリスクマネジメント計画書、リスクマネジメントワークシート、設計開発計画書、設計開発に係る工程入力情報といった医療機器の基本要件基準に適合した JIS T 2304 (IEC 62304) に基づくソフトウェアライフサイクルプロセスならびにサイバーセキュリティ対策、リスク分析を実施した。

VRを用いた小児弱視訓練プログラム医療機器の小児に対する効果に関わる特定臨床研究のプロトコル立案ならびに倫理申請を完了した。

東邦大学, 帝京大学, CS 眼科クリニックにおいて, 健眼遮蔽を必要とする小児弱視患者 15 名を対象に, VR を用いた小児弱視訓練用プログラム医療機器群 (15 名), アイパッチ群 (15 名) で本製品使用後の 4 週, 8 週, 12 週, 16 週, 20 週, 24 週における最良矯正視力を比



較する。

#### 4. 規制対応

PMDA 相談ならびに東北大学 CRIETO 相談を実施し、2 段階承認制度を利用するのではなく、本製品の小児に対する効果に関わる特定臨床研究の実施が妥当との結論になり、当該の研究プロトコルを作成した。

また、本製品の小児に対する効果に関わる特定臨床研究を実施後、本製品の小児に対する効果に関わる検証的医師主導治験を実施することで、PMDA より承認を得た。

#### [謝 辞]

最後に、本研究に対する立石科学技術振興財団の研究支援に心より感謝申し上げます。

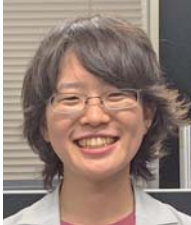
#### [成果の発表, 論文など]

1. Okumura Y, Hirota M, Midorikawa-Inomata A, Nagino K, Negishi T, Ogawa E, Nakao S, Inomata T. The visual fatigue and visually induced motion sickness of a Virtual Reality application for pediatric amblyopia therapy. The Association for Research in Vision and Ophthalmology 2024, Seattle, WA, USA. 2024 年 5 月 7 日.
2. Hirota M, Okumura Y, Nagino K, Hayashi T, Negishi T, Nakao S, Kawasaki H, Inomata T. Safety Evaluation in Healthy Adults of Motion-Based Virtual Reality Dichoptic Training for Pediatric Patients With Amblyopia: Prospective Intervention Study. JMIR Form Res. 2025, 9, e69801.

## [研究助成 (A)]

# 柔軟触覚センサによって浮腫の状態を計測する ウェアラブルデバイスの開発

2241006



研究代表者  
(助成金受領者)

神戸大学 大学院工学研究科

助 教

大 西 鮎 美

共同研究者

神戸大学 大学院保健学研究科

教 授

石 井 豊 恵

## [研究の目的]

浮腫は、組織間隙に過剰な水分が貯留した状態であり、身体の「むくみ」として日常生活でもよく経験される症状である。とくに心不全、腎不全、リンパ浮腫など慢性疾患患者においては、急激な浮腫悪化が全身状態悪化の兆候となるため、日常的なモニタリングが重要である。

一方、従来の浮腫評価法は診断時に限られ、指で皮膚を押した際の戻り速度や圧痕、あるいは据え置き型機器による測定が主流であり、常時モニタリング可能なウェアラブル型デバイスは存在しない。

本研究では、柔軟触覚センサを用いて浮腫状態を推定するウェアラブルデバイスを開発し、日常生活でのモニタリングを実現することを目的とした。提案デバイスにより、たとえば「日常生活の中で着けていて、急激なむくみの悪化を検知した際に受診行動を促す」といった活用が期待される。

## [研究の内容, 成果]

本研究では、皮膚を傷つけにくい柔軟な触覚センサを用いて脚部の周径変化を取得することで浮腫を計測するウェアラブルデバイスを設計、実装した。

## 1. 柔軟触覚センサを備えたリング型デバイスの開発

提案システムの要件としては、皮膚を傷つけないこと、脚などの身体の浮腫が出やすい部分の体積変化が取得できることが挙げられる。本研究では、これらの要件を満たすように、皮膚を傷つけにくい柔軟な触覚センサを用いて脚部の周径変化を取得することで浮腫を計測するウェアラブルデバイスを設計した。

提案デバイスを図1に示す。提案デバイスには、図2のような接触部の3次元変位を取得可能なスポンジ状の柔軟な触覚センサが8つ、直径約12 cmのリング状に等間隔で配置されている。この柔軟な触覚センサは、スポンジ内部



図1 柔軟な触覚センサを備えたリング型デバイス

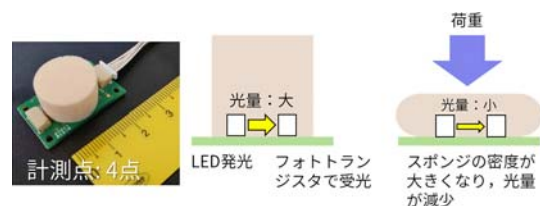


図2 柔軟な触覚センサと3次元変位の計測方法

にLEDとフォトトランジスタを備えており、図2に示す計測原理で、スポンジ部の密度変化による光量変化量から、スポンジの形状変化を計測できる。1つのセンサにつき4チャンネルの値が取得可能で、提案デバイスでは8つのセンサにより合計32個の値を取得できる。

リング状の外装は、ABS樹脂を3Dプリントしたもので、デバイス自体に伸縮性はない。提案デバイスで取得したセンサ値は、モバイル端末に送信され、端末では得られたセンサ値に基づき装着部の周径の状態を機械学習で推定する。

## 2. 計測方法の検討

本研究で対象とする身体がむくんだ状態の計測には、日常生活の常時モニタリングが必要である。図3に提案デバイスを脚に装着して、座位で静止、歩行、座位で静止という行動をそれぞれ10秒ずつ行った際の左脚の計測データを示す。この図の8つのセンサ値は、図3のセンサ配置での計測時に各センサの4チャンネル分のセンサ値を平均したものである。図3のような歩行時に加え、提案デバイスの装着時には、足首の角度を変えるとといった動作時にも脚の形状が変化するため、動いている状況を排除した着座・静止時のような、安静時の状態から状態を推定する必要がある。

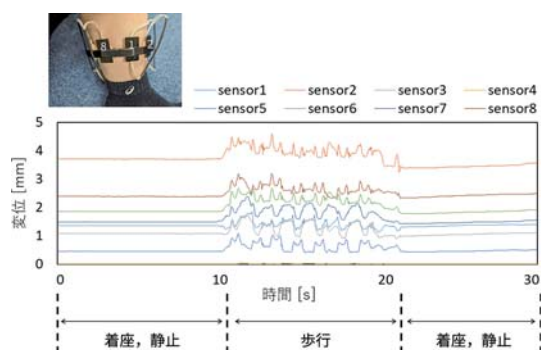


図3 装着した際のセンサデータ例

## 3. 浮腫の指標の検討

神戸大学大学院保健学研究科の専門家とともに、提案するウェアラブルデバイスにおいて推

定対象となる、浮腫の正解データとして使用可能な指標を検討した。

指標の候補として、真皮弾力計、筋硬度計、および柔らかさ計測用の押し込み試験機を用いて、軽度の浮腫傾向にある下肢と浮腫を認めない下肢、および浮腫モデルに対し、比較計測を行ったところ、浮腫モデルおよび下肢ごとに値が異なり、かつある程度専門家の診断とも一致したのは、柔らかさ計測用の押し込み試験機（テック技販製 YWS-50N）で測るヤング率であった。図4に、浮腫モデルに対して、押し込み試験機で計測したヤング率の値を示す。

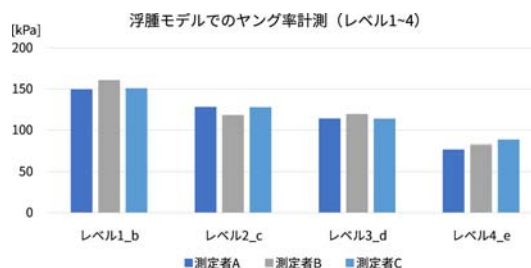


図4 浮腫モデルでのヤング率計測結果

浮腫は複合的な指標によって構成されると考えられ、このヤング率の値が浮腫と完全に対応しているわけではないが、図4の通り浮腫モデルの浮腫の度合いとの一定程度の対応及び計測者間の一貫性がみられたことから、本研究では、この下肢の柔らかさ・弾性が浮腫と関連すると仮定し、ヤング率を仮置きの正解データに決定した。また、この試験機ではヤング率と同時にヒステリシスも計測できるため、この値も同時に推定対象とした。

## 4. 浮腫状態推定アルゴリズム

浮腫の状態は通常「視診・触診」による定性的評価が一般的だが、本研究では下肢の柔らかさ・弾性が浮腫と関連すると仮定し、ヤング率およびヒステリシスを客観的指標として採用した。これは、むくみによる皮下組織の状態をある程度反映した数値と考えられる。図5に示す通り、この押し込み試験機の値と柔軟触覚センサの値を同時に計測して対応づけ、教師あり学



図5 柔らかさ計測機器と提案デバイスによる計測の様子

習を用いることで浮腫の状態を推定する。

提案システムの構成を図6に示す。提案システムでは、柔軟な触覚センサを取り付けたリング型デバイスで得られた値をモバイル端末に送信し、抽出した特徴量から装着位置のヤング率とヒステリシスを推定する。特徴量は、1つのスポンジ状センサの中の4チャンネルのセンサ値の瞬時値の平均値を合計8か所分（計8つ）である。推定アルゴリズムには、RandomForest回帰を用いた。

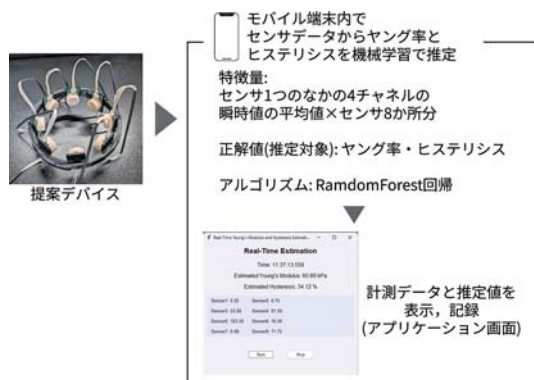


図6 システム構成

## 5. 長時間モニタリング実験

### 実験方法

実験では、健常被験者1名にデバイスを7時間連続装着し、約30分毎に押し込み試験機でヤング率・ヒステリシスを測定し、変化傾向を観察した。実験中、被験者はデスクワークを中心に通常の日常生活動作（座位作業・歩行・軽い外出）を行った。

なお、押し込み試験機での計測方法は、保健学研究科の専門家との予備検討実験により、測

定条件を統一するために、膝は伸ばし、足首関節は被験者にとって自然な角度に設定した。提案デバイスを装着した足とは逆の足の同じ高さの位置で、脛骨前面に押し込み試験機を押し当てた。

### 実験結果

実験で取得したデータを図7に、そのときのセンサ位置を図8に示す。時間経過にともない、被験者の自己申告でも「むくみ感」が出現していた。浮腫傾向の指標としたヤング率（図中の青線）、ヒステリシス（図中の黄線）は、やや不安定であったものの、ヒステリシスは時間経過とともに低下していることが観測された。一方、歩行や姿勢変化時には一時的なノイズが生じたため、静止時データ選別アルゴリズムを取り入れることが課題である。

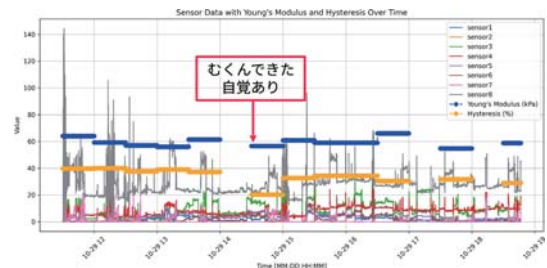


図7 取得した一日装着時のセンサデータとヤング率およびヒステリシス



図8 実験におけるセンサ位置

取得したデータを学習データ80%、テストデータ20%で分割してRandomForest回帰をかけ、ヤング率とヒステリシスを推定した結果を図9、10に示す。

図9、10の結果より、ある程度推定できる可能性が示唆されたものの、今後、同一被験者の別日のデータ、他の被験者データを集めて詳細



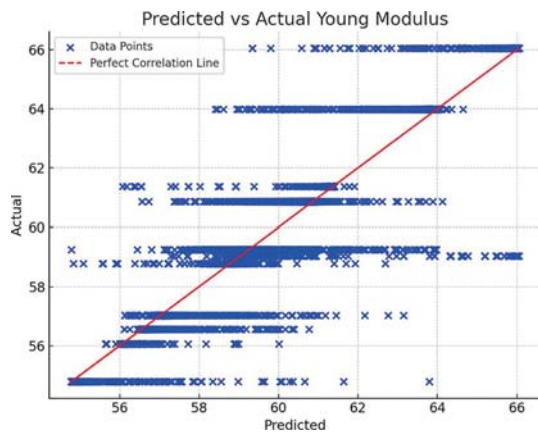


図9 ヤング率 (kPa) の推定結果

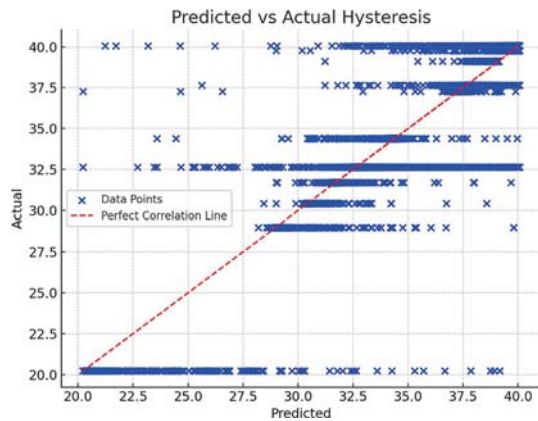


図10 ヒステリシス (%) の推定結果

に評価する必要がある。

## 5. まとめ

本研究では、皮膚を傷つけにくい柔軟な触覚センサをリング状に配置して脚部の周径変化を取得することで浮腫を推定するウェアラブルデバイスを設計、実装した。

浮腫の程度を定量的に計測する方法を検討したのち、機械学習を用いて浮腫の指標としたヤング率およびヒステリシスの推定アルゴリズムを実装し、日常生活での利用に向けた評価を行った。

今後は、推定精度を高めること、簡便な装着型デバイスへの発展（靴下型、衣服内蔵型）や、その他のセンサと組み合わせることの検討、および患者指導・在宅医療応用を目指す。

### [成果の発表、論文など]

大西鮎美, 多鹿理絵, 石井豊恵, 寺田努: 柔軟な触覚センサによって浮腫の状態を計測するウェアラブルデバイスの設計と実装, 第35回看護理工学会年次大会 (2024年11月).



## [研究助成 (A)]

# オンチップテラヘルツ分光システムを用いた ラベルフリーバイオセンシング

224I007



研究代表者

神戸大学 大学院理学研究科

准教授

大 道 英 二

## [研究の目的]

来るべき超高齢化社会において、一人ひとりが健やかな生活を送るためには疾病の早期発見ならびに適切な疾病管理が重要になる。そのためにはいつでもどこでも素早く簡便に自身の健康状態をモニターできるような環境作りが重要になってくる。

そのような方法の一つとして期待されているのが、テラヘルツ波を用いたラベルフリーバイオセンシングである。テラヘルツ波とは0.1-10 THzの周波数をもつ電磁波の一種として知られており、高い物質透過性といった特徴を示す。また、テラヘルツ帯で観測される「指紋スペクトル」と呼ばれる分子固有の吸収スペクトルを利用すると、健康状態を反映する種々のバイオマーカーと呼ばれる有機分子をラベルフリーで検出することができる(図1)。

例えば、涙に含まれるグルコース量は糖尿病患者の血糖値と強い相関を示すことが知られている(図2)。そのため涙の中に含まれる微量

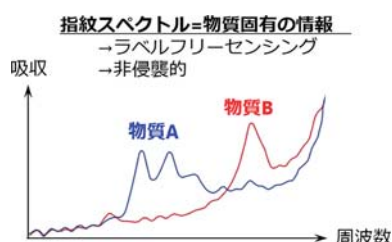


図1 テラヘルツ領域における物質固有の「指紋スペクトル」による物質同定。指紋スペクトルは分子の巨視的な構造に由来するため、赤外線よりもエネルギーの低いテラヘルツ領域において観測される。

## バイオマーカー(汗、涙)

## 非侵襲的検査

・グルコース(糖尿病)

・尿酸(痛風)

・ラクトフェリン(炎症反応)

→QOLの向上、健康管理

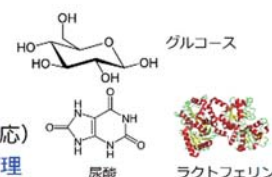


図2 非侵襲的検査に用いられるバイオマーカーの例

なグルコース量を検出することが可能になれば、簡便で非侵襲的な糖尿病検査が可能になる。他にも、バイオマーカーの例として尿酸やラクトフェリンと呼ばれる物質も知られている。前者は痛風、後者は炎症反応に関わっていることが知られている。こういったバイオマーカーを非侵襲的かつ簡便に検出することができるようになれば長期間にわたる健康管理や生活の質の向上につなげることが可能になる。

しかし、涙や汗などに含まれるバイオマーカーの場合、一度に採取できる検体の量が限られていることに加えて、ふくまれているバイオマーカーの濃度は希薄であることが多い。そのため、バイマーカー検出には低濃度で微量な検体に対する高い検出感度が求められる。そのため、現時点で広くテラヘルツ分光に用いられている時間領域テラヘルツ分光装置は感度的にも不向きであると考えられる。また、時間領域テラヘルツ分光装置では大型かつ高価なフェムト秒パルスレーザーを必要とすることから、装置のサイズ面やコスト面では実用化にむけたハードルが高い。

本研究ではこれらの課題を解決し、微量検体に対する高感度なテラヘルツ分光測定を実現す

るため、熱的検出と呼ばれる新しい検出原理に着目する。熱的検出とは、試料によって吸収されたテラヘルツ波のエネルギーを試料自体の温度変化として検出する方法である。通常の透過法とよばれる実験配置では、試料にテラヘルツ波を照射し、透過してくるテラヘルツ波の強度をモニターすることで吸収の大きさを評価している。そのため、テラヘルツ波の入射パスと透過パスが必要となり装置の大型化を避けることができない。また、検出器の検出感度は一般に測定周波数に依存するため、測定可能な周波数範囲に制限が加わる。

一方、熱検出では試料と一体化した温度計を用いてテラヘルツ波の吸収エネルギーを検出するので、透過側の経路が不要になり、装置の小型化が可能になる。また、試料が吸収したエネルギーを熱に変換してから温度計で検出するため、測定感度が周波数に依存せず、広帯域の測定を行えるという利点がある。しかし、これまで熱検出によってテラヘルツ分光が行われた例は無く、新規性の高い研究テーマとなっている。

本研究ではテラヘルツ波光源としてフォトミキシング光源とよばれる連続波光源を用いる(図3)。この光源ではわずかに周波数の異なる2種類のレーザー光をフォトミキサーと呼ばれる半導体デバイスに照射する。その結果、素子間を流れる光電流の強度が2つのレーザー光の差周波数で変調され、テラヘルツ波が発生する。広帯域にわたって発生周波数を連続的にチューニング可能であり、また、スペクトル分解能が高いことからテラヘルツ分光に適した光源である。

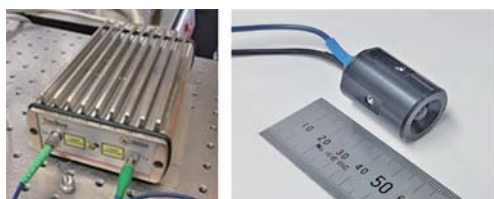


図3 テラヘルツ波の発生に用いる連続テラヘルツ波フォトミキシング光源。(左) 励起用の半導体レーザーと(右) フォトミキサー本体。

また、本研究では、MEMS(微小電気機械システム)技術を用いて作製された示差熱検出デバイスを用いる点が特色に挙げられる。示差熱検出では試料を載せた試料セルと何も載せていない参照セルの温度差に比例した電圧信号を検出するため、高感度な熱検出が可能になる。また、この方法では検出器と試料が一体化しており、測定装置のサイズを大幅に小型化することが可能である。

本研究では、最終的には光源と検出器を合わせたプローブ部分のサイズを $\phi 25 \times 60$  mmまで小型化したプロトタイプ分光装置を自作し、最大で3 THzまでの周波数範囲におけるラベルフリーテラヘルツ分光測定を可能にすることを目指す(図4)。さらに、微量検体中に含まれるバイオマーカーの検出を可能にするため、微量試料に対するオンチップテラヘルツ分光測定を行い、装置の有用性を実証するとともに実用化に向けた課題を洗い出す。

将来的には微小な熱検出デバイスを用いたオンチップテラヘルツ分光によるユビキタスなラベルフリーバイオセンシングの実現を目指す。その結果、一人ひとりの健康状態を非侵襲的な方法で短時間にモニタリングすることが可能になり、健康増進や疾病の早期発見につなげることが可能になる。

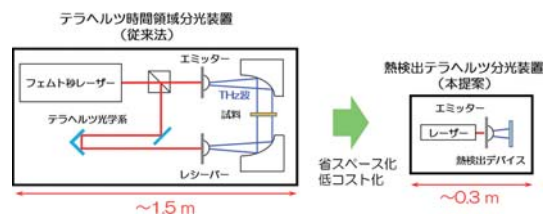


図4 本研究で提案する高感度で省スペースのテラヘルツ分光装置。検出器側の光学パスが不要になることに加え、小型の半導体レーザーによる駆動が可能になる。

### 【検出原理】

本研究では交流比熱測定法と類似した熱的モデルを考える(図5)。後述するように、本研究のセットアップでは測定試料が微小な温度計の上に直接載っており、熱的に強く結合してい

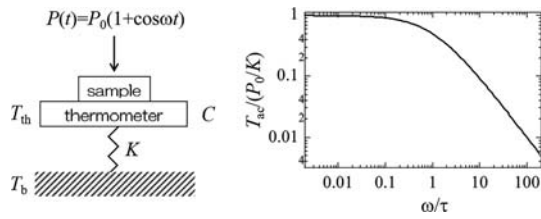


図5 簡略化した熱検出モデル (左)。モデルから期待される熱応答の周波数挙動 (右)。縦軸と横軸は規格化して示している。

と考えてよい、一方、温度計は非常に薄いメンブレン上に形成されているため、メンブレン周辺部の熱浴とは弱く結合されていると考えることができる。そのため、試料が吸収した熱量は速やかに温度計に熱緩和し、試料と温度計は熱平衡状態にあると考える。

以下、温度計の温度を  $T_{th}(t)$  (=試料の温度  $T_s$ )、熱浴の温度を  $T_b$ 、温度計と熱浴の間の熱コンダクタンスを  $K$ 、試料と温度計を合わせた熱容量を  $C$  とする。試料がテラヘルツ波を吸収しない状態では温度計と熱浴が同じ温度にある。テラヘルツ波の強度を周波数  $\omega$  で変調すると、試料のテラヘルツ波吸収に伴い試料が受け取る熱量は時間的に

$$P(t) = P_0(1 + \cos \omega t) \quad (1)$$

という式に従う。従って、試料が吸収する熱量と熱浴に緩和していく熱量の間に成り立つ関係式

$$P(t) = CdT/dt + K(T - T_b) \quad (2)$$

を解くことによって温度計の温度変化を求めることができる。ここで右辺の第1項は吸収した熱量によって試料と温度計の温度が上昇する効果、第2項は熱浴へと緩和していく熱量を表す。この式を解くと、

$$|T_{ac}| = (P_0/K) (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1/2} \quad (3)$$

という振幅で温度計と試料の温度が周期的に変化することがわかる。ここで、 $\tau = C/K$  である。従って、変調の周期 ( $=2\pi/\omega$ ) が  $\tau$  よりも十分に長い ( $\omega\tau \ll 1$ ) 場合、温度計の温度上昇が

$T_{ac} = P_0/K$  に近づくことがわかる。一方、変調の周期が短い場合、熱緩和が温度変化に追従することができないため、温度変化は  $T_{ac} \sim P_0/\omega C$  に従って減少する。従って、高い熱検出感度を得るためには、 $\omega\tau < 1$  の条件で測定を行うことが望ましい。

本研究では、マイクロ熱検出デバイスを用いることから、典型的な  $\tau$  の値はミリ秒オーダーとなっており、高速での応答が可能になっている。一般的な熱的検出では応答速度の低い点がしばしば問題となるが、マイクロデバイスを用いることで測定時間の課題を回避することが可能になる。

### 【研究実施内容】

本研究では、市販の示差熱測定装置に使用されている示差熱検出デバイス (メトラートレド社 Flash DSC 用センサー UFS2) に着目し、新しい検出原理に基づくテラヘルツ吸収スペクトル測定法の原理検証実験を行った。

測定に用いたデバイスを図6に示す。このデバイスは微細加工技術によって作製された微小な示差熱検出デバイスである。同じチップ上に

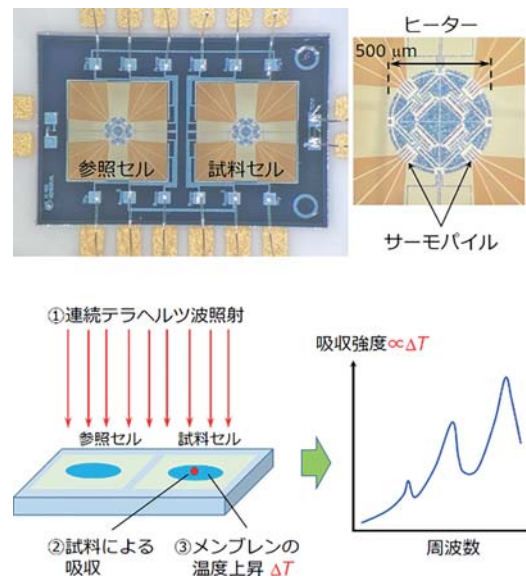


図6 測定に用いる示差熱検出デバイス (上)。左は装置の全体写真、右は熱検出部分の拡大写真を示す。示差熱検出デバイスを用いた測定原理 (下)。試料セルの試料が吸収したエネルギーは熱に変換され、最終的にセンサーの温度上昇として検出される。



参照セルと試料セルが設置されており、いずれのセルも非常に薄いメンブレン構造の中央部に直径 500  $\mu\text{m}$  の試料搭載部が設けられている。試料搭載部には温度計測用のサーモパイルが 8 対設置されており、高感度な温度計測が可能になっている。メンブレンの厚さは数  $\mu\text{m}$  程度となっており、熱伝導を介した外界との熱接触はよく絶縁されている。

試料セルと参照セルのサーモパイルは逆接続されており、2つのセルの間に温度差が生じたときにのみ、温度差に比例した電圧信号が出力される（ヌル検出）。そのため、試料セル側に試料を搭載しておくと、試料によって吸収されたテラヘルツ波のエネルギーは測定用セルのメンブレンへと熱緩和し、最終的には測定用セルのサーモパイルの温度上昇として検出される。示差熱検出デバイスでは出力電圧が2つのセルの温度差のみに依存している。そのため、外気温変化のように時間とともに一様に変動する温度変化を排除することができる。そのため、高い検出感度と高い長時間安定性を実現できるという利点がある。

このような新原理に基づくテラヘルツ吸収分光装置はこれまでに例がないことから、本研究ではまず、その原理検証のための装置作製を行った。測定に用いる光源には、InGaAs フォトミキシング光源を採用した。この光源では、1550 nm 帯の2つのレーザー光のビート周波数にあたるテラヘルツ波を得ることができる。半導体レーザーの高い波長チューニング性能により、0.05-1.1 THz の広い周波数範囲を連続的かつ高い分解能で周波数掃引できる。

テスト測定では、実体顕微鏡下においてラクトース試料粉末（図7）を試料セルのメンブレン上に設置した。ラクトースはガラクトースとグルコースが結合した2糖類の一種であり、化学式は  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  によって与えられる。これまでの報告から、 $f=0.5$  THz 付近に1本の指紋スペクトルが観測されることが知られている。試料の大きさから見積もった測定試料の重量は

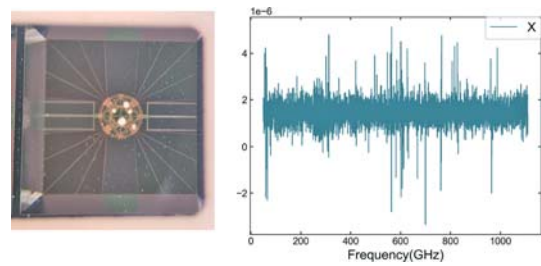


図7 (左) メンブレンの中央部に載せたラクトース試料の写真（5個見える白い粒状のもの）。(右) 実際に周波数掃引を行った際の温度変化に対応する電圧信号のデータ。ラクトースの場合、0.5 THz 付近に吸収が期待される。

およそ数  $\mu\text{g}$  程度であった。テラヘルツ波はチップ上方からテラヘルツレンズを介して試料に集光するように照射した。チップからの電圧信号をプリアンプで増幅し、ロックインアンプとフィルター回路をもちいて雑音低減を図った。研究期間内に測定試料の量や照射条件、変調周波数等の測定パラメータを変えて繰り返し測定を行った。しかし、室温、大気圧の条件下ではラクトースの吸収に起因する信号を検出するまでに至らなかった（図7）。

ラクトースのテラヘルツ吸収に由来する信号が得られなかった結果について考察を行った。その結果、検出可能な温度変化が得られなかった原因として以下の2点が考えられた。

1つ目の原因として、測定セルが大気圧環境に置かれていたため、試料の吸収した熱量がセル上のサーモパイル以外にも大気中に熱緩和している可能性が挙げられた。また、2つ目の原因として室温では試料や温度計の比熱が大きく、試料からの熱緩和によって十分なサーモパイルの温度上昇が得られていない可能性が挙げられる。実際に格子による比熱成分は  $T^3$  に比例することから、室温での熱検出は低温での測定に比べて感度的に不利な条件となっている可能性が挙げられる。また、フォトミキシング光源の出力は 10-100  $\mu\text{W}$  程度となっていることから、室温環境下では試料に対して十分な温度上昇をもたすだけの熱量が供給できていない可能性もあげられる。

以上のような考察から、現在、低温、真空中

での測定に向けた測定系の構築を進めている。ステンレス製の真空容器内に液体窒素溜めを備えたクライオスタットを用意し、この中に測定用セルを設置することでより高感度な熱検出を行いたいと考えている。低温下ではサーモパイルの検出感度が室温に比べて減少することが知られているが、室温と液体窒素温度における熱起電力の減少は数分の1程度にとどまると考えられる。一方、測定温度の低下による比熱の減少、吸収スペクトルの先鋭化、ジョンソンノイズの低減といった効果を考慮に入れると、真空中かつ液体窒素温度の環境下ではより高感度な測定結果が期待できるので、今後も引き続き実験的な検証を続ける予定である。

また、現行のフォトミキシング光源では周波数発生領域が0.05-1.1 THzとなっているが、実際のテラヘルツ吸収スペクトルの多くはより

高い周波数範囲で観測されることが知られている。そのため、本研究では並行して、波長可変レーザー光源とDFBレーザーを組み合わせることでフォトミキシング光源の広帯域化を行った。その結果、発生周波数範囲を2.7 THzまで拡張することができた。この光源と本研究で製作した測定系を組み合わせることにより、より広範囲でのテラヘルツ吸収分光測定が可能になる。このことは、装置の実用的な観点からも、重要な改良点に挙げられる。

#### [成果の発表、論文など]

小路悠斗, 大道英二, 高橋英幸, 太田仁, 「フィードバック制御を用いた高速・高分解能周波数掃引型テラヘルツ分光法の開発」[講演番号: 19p-A34-13], 第85回応用物理学会秋季学術講演会(2024.9.16-20)



## [研究助成 (A)]

## 人間と機械の相互影響度の計量にもとづく他者への配慮の実現

2241008



|                   |                |     |         |
|-------------------|----------------|-----|---------|
| 研究代表者<br>(助成金受領者) | 名古屋大学 大学院工学研究科 | 准教授 | 奥 田 裕 之 |
| 共同研究者             | 名古屋大学 大学院      | 教 授 | 鈴 木 達 也 |
|                   | 名古屋大学 大学院      | 助 教 | 山 口 拓 真 |

## [研究の目的]

近年、空港、駅、ショッピングモール、病院、さらには住宅街など、さまざまな公共空間や生活環境において、自律移動ロボット (Autonomous Mobile Robots: AMR) や電動車椅子、パーソナルモビリティなど、知能的に行動する移動体が急速に普及しつつある。これらの移動体は、移動手段としての利便性を提供するのみならず、物流、サービス、介護などの分野において人間の活動を支援・拡張する存在として期待されている。

しかしながら、これまでの移動体設計では、周囲の人間、すなわち歩行者や自転車、他の車両などを「移動する障害物」として捉え、主として衝突回避の観点からその動きを予測・制御するアプローチが一般的であった。これは、移動体を動かす移動知能が他者に対して常に保守的であり、人に優先度を与える、という意味では一つの方向性ではあるものの、人と人が通常行うような相互の譲り合いやネゴシエーション、または、相手を慮るような行動とは異なる。

これはある程度以上の交通密度において問題になる場合があり、移動体が単に人に譲るばかりでは、多数の人の中で移動が不可能になる場合がある。これは Freezing Robot Problem として知られ、近年問題になっている。たとえ安

全を重視した結果であっても、過度な保守性により移動体はその目的を達成できない場合、移動体のユーザビリティの低下を招く。

これに対して本研究では、人と機械が互いに影響を及ぼし合う存在であるという前提に立ち、機械の行動が周囲の人間にどのような心理的・行動的影響を与えるか、またその逆も含めて、相互の関係性を定量的に評価する指標を構築することを目指す。また、このような指標を確立することで、他者の存在や意図を配慮した協調的な行動計画が可能となり、周囲の人々にとってもより安心・快適な空間の創出が期待される。

## [研究の内容、成果]

本研究では、その最終的な目標として **AMR** のふるまいが人間に「どのように影響するか」という影響度、すなわち“行動の相互作用の強さ”に焦点をあてる。

ただし、本研究ではその前段階として、より深く人の相互作用を研究するために、まずは AMR を用いず、人と人との相互作用を観測し、その影響度を計量する理論、方法について研究を行うことにした。その詳細な理由は後述する。また、当初、提案する可制御性を AMR の行動計画に適用するところまでを目的としていたが、その導出にはいくつかの解決すべき問題があり、

当初の予定より時間がかかったことにより、AMRの行動計画への応用よりも、今回の提案の中心的概念である可制御性の解析を中心に研究を行った。本研究では、下記の手順で研究を進めた。

- ① 人間同士の歩行インタラクションにおける「相互影響」を実験により観測した。実験では歩行者の挙動のみではなく、手持ち入力デバイスを用い、意図と判断のタイミングを観測した。
- ② 得られた歩行データをもとに、歩行者の判断、動作の数理モデル化を行った。
- ③ 得られた歩行者の行動モデルから、制御理論で用いられる可制御性の考え方を適用し、ある歩行者が他者に与える影響度を計量するための理論を確立した。
- ④ 観測データに対して可制御性を評価し、その物理的な意味やどのような状況で可制御性が大きく、あるいは小さくなるかを解析した。

#### 【可誘導性の考え方】

本研究では、ある交通エージェント（歩行者や移動ロボット）が、周囲の歩行者に対して与える影響度を、行動モデルを通して評価する。これは、ある意味で、互いの相互影響の強さを表す指標となると考える。

例えば、図1のような歩行者と移動ロボットが交差するような環境を考える。このとき、一見歩行者Aは移動ロボット（AMR）に物理的に近いが、Aは速やかに通過するため、Aはロボットの挙動の影響を受けにくい。一方で、

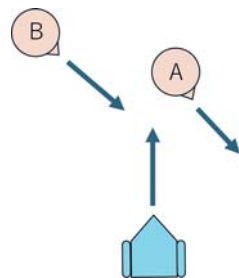


図1 移動ロボット（AMR）と歩行者の交差

Bはロボットの挙動変化の影響を大きく受けると考えられる。

この違いを定量化するためには、単に物理的な距離ではなく、ロボットの挙動変化に対して、歩行者がどのような応答（リアクション）をするか、その応答の大きさに着目して評価すべきと考えた。これを実現するために、

- ① 歩行者のインタラクティブな行動のデータ観測
- ② エージェントの挙動に対する歩行者の応答の数理モデル化
- ③ 得られた数理モデルからの可誘導性の導出

以下ではこれらの流れに沿って紹介する。

#### 【インタラクティブな歩行行動の観測】

本研究では、歩行者の応答を観測するため、図2のような実験を実施し、歩行者対歩行者の相互影響のモデル化を行う。



図2 歩行者実験

本来であれば、ロボット等の将来的に制御したい対象に対して、応答する歩行者の行動を観測するのが望ましいが、まずは上記のように、安全を考慮して人対人の歩行行動を観測したデータを用いる。

人対人の行動観測を行う場合、その参加者間の対称性から、行動モデル推定を行う際には効率的にデータを用いることができる。例えば、A、Bの二者間実験であれば、1回の試行でAに対するBの応答、Bに対するAの応答、の2つの学習データを作成することができ、学習精度の向上が期待できる。

実験では、参加者に小型のハンドヘルドデバイスを持っていただき、実験を行った。手持ちデバイスには、ジョイスティックと、小型のLEDディスプレイが装着されており、実験では、歩行開始の直前に手持ちのディスプレイにより自分が歩行すべき開始点と目的地を指示することで、他者にはわからない形で目標経路を与え、自由歩行していただいた。

実際に歩く際の各歩行者について、モーションキャプチャシステムで頭部・背部の動き、ならびにジョイスティックによる判断入力 (Ahead, Behind, Undecided) を記録している。

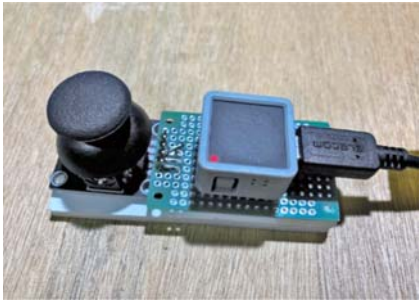


図3 実験参加者が持つ手持ちデバイス

この3種類の意図 (Ahead, Behind, Undecided) は、ある歩行者が他の歩行者のいずれかに対して、先行したい (Ahead)、相手に進路を譲りたい (Behind) と判断した時点で、ジョイスティックを前、あるいは後ろに入力していただく。Undecided はこれら2つの意図を持っていない状態、と定義している。歩行の観測データからこの意図ラベルを推定しなかった理由は、一般に人間は認知・判断をしたからといって、すぐさま行動にでない場合があるからであり、人間の内部的な意図を、できるだけそれに違いタイミングで直接観測するために、このデバイスを用いた。

#### 【歩行者の行動モデルの構築】

次に、歩行者同士の相互影響を定量化するために、モデルの構築を行った。モデルとしては、人の判断と動作とを明示的に数理モデル化する、

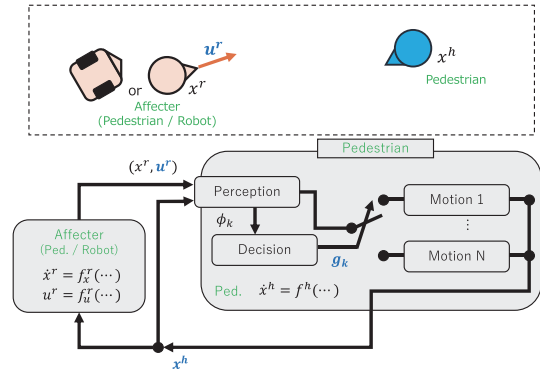


図4 周辺歩行者の行動のHDSモデル

ハイブリッドダイナミカルシステム (HDS) 表現を用いた (図4)。

まず判断モデルとしては、観測データをもとに、他の歩行者との相対関係を説明変数 (入力) とし、先述の3つの意図 (Ahead, Behind, Undecided) を結果編集 (出力) とした、ロジスティック回帰により判断モデルを構築した。

次に、上記で求めた判断確率を参照し、それぞれの意図に応じた速度を持つ動作モデルを構築した。これらの意図の推定確率を重みとする、各意図の速度を加重平均することで、歩行者の速度を予測する。

このようなモデルを用いて、各歩行者の観測点にて歩行者の意図を推定した結果を図5に示す。

ここで、図のカラーの点は、Ped. 0 が各データ点の位置に存在する際の、Ped. 1 の判断をモデルによって推定した結果である。各地点での Ped. 0 の歩行速度、方向がまちまちであるため、

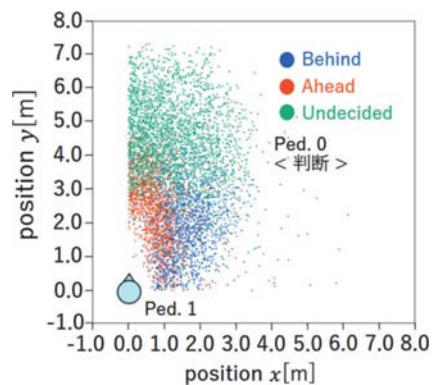


図5 判断モデルの推定結果

類似の位置でも色が異なるように見える点が混ざっているのに注意されたい。

ここでは動作（歩行速度）の予測結果は割愛するが、このときの判断モデルの推定精度はおよそ 80% 程度であった。

### 【可誘導性の定義と数理モデル化】

提案する可誘導性は、「あるエージェントの行動が、他者の判断や行動にどの程度影響を与えるか」を定量的に表現する概念であり、上記の場合、Ped. 0 の歩行速度の変化が、Ped. 1 の判断や動作にどの程度の影響を与えるか、を計量すれば良い。

そこで、Ped. 0 の速度を入力とみなし、下記の 2 つの指標を提案した。

- ・判断感度指標（Sensitivity）：他者の速度変化などの入力に対して、自分の判断確率（例：先に行く・後に行く）がどの程度変化するかをロジスティック回帰モデルの偏微分係数として評価したもの。
- ・可制御性指標（Controllability）：歩行者の状態空間モデルを構築し、相手の行動入力（速度など）が自分の状態（速度・位置）に与える影響度を、可制御性グラミアンの大きさを用いて定量化したもの。

正確な定義は、発表論文[1]に譲るが、これらにより、データに基づいて同定した他者の判断や動作の数理モデルをもとに、自ら（Ped. 0）の速度を変化させた場合に、他者（Ped. 1）の判断や、その状態をどの程度誘導することができるか、を定量化できた。

### 【可誘導性指標を用いた行動解析】

まず、上記で提案された判断感度について、左記の例における判断感度の分布を図 6 に示す。

図 5 と同様に各点は Ped. 0（行動を誘導する側）の観測された分布を示しており、その速度が変化したときの非誘導側（Ped. 1、座標原点に位置）が Behind と判断する確率への影響度の大きさを色で示している。赤色は判断感度が

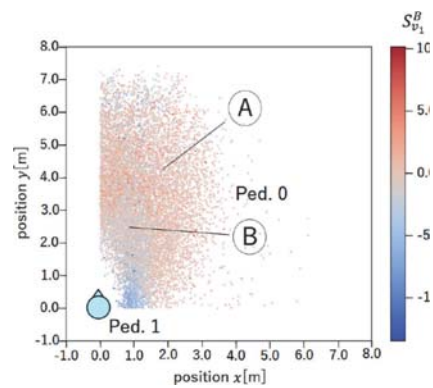


図 6 判断感度指標マップの例（Behind への影響）

正に大きい点であり、Ped. 0 が速度を増すと、Ped. 1 が Behind と判断する確率が増加することを示している。

A の領域は、図 5 では Undecided、つまり先に行くか後に行くか決めていない領域であるが、この領域は赤色となっており、Ped. 0 が加速することで、Ped. 1 を Behind、すなわち Ped. 0 に道を譲る判断へと誘導できることが定量的に示している。

一方で、B の領域は、非常に近いにもかかわらず、判断感度の大きさは淡色で示されており、Ped. 0 が加速、減速しても Ped. 1 の判断確率に大きな影響を与えないことがわかる。このとき、すでに Ped. 1 は、図 5 に示されるように Ahead と判断する確率が高い状態であり、このような状況に一度なると、Ped. 0 が加速しても Ped. 1 を Behind の判断をするように誘導ができないためである。

次に、可制御性指標を評価した結果を図 7 に

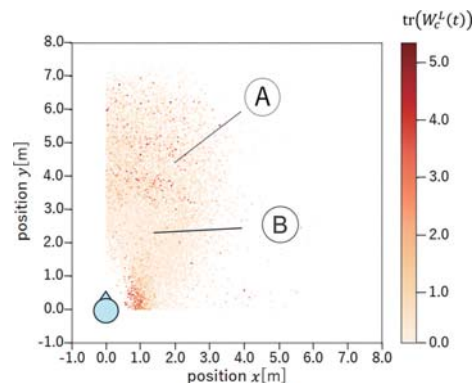


図 7 可制御性指標マップの例



示す。

図7のAの領域では、中間付近のBの領域に比べ可制御性が高いことがわかる。これは先述のように判断が影響されることで状態変化にもつながっていることが原因である。一方でBの領域は、Ped.1の判断が変化しない領域で、状態に関する可誘導性も低く出ることがわかった。

### 【まとめ】

観測データからシステム同定的に得られるHDS型の行動の数値モデルに対して、制御分野で用いられる可制御性の考え方にもとづいて、他者の挙動を誘導・制御できる量を定量化する2つの可誘導性指標を提案した。

得られた2つの可誘導性指標を解析した結果、歩行者の行動の定性的な分析と一致する結果が得られており、説明性の高いモデルを用いながら、歩行者間のインタラクションの強さを計量することができた。

本研究では最後にAMRの行動計画への応用を検討・準備した。たとえば、可誘導性が高く、かつ歩行者がUndecidedな状態であれば、AMRは積極的に先導的な行動を取ることで歩行者の判断を後押しできる。逆に可誘導性が低い場合には、AMRの挙動変化は他者に対して限定的な影響しか与えないため、無理にインタラクションを制御しようとせず、静的・受動的なふるまいを選択すべきであると考えられる。ただし、本研究期間内では移動ロボットへの実装までは達成できなかった。

今後の研究の展開としては、本研究期間内で達成できなかった移動ロボットの行動計画への

応用である。また、別の発展として、本研究では歩行者の1対1でのインタラクション強さの計量を行ったが、複数の歩行者が歩行する場合でも、同様に評価が可能であるのか、検証が必要である。

また、さらなる発展としては、本研究では空間における連続的な位置、速度等の物理情報をもとに可誘導性を定義したが、eHMI（外部ヒューマンマシンインタフェース、音声や画像提示、音声提示等）のように異なるモジュールを用いて人に対して働きかけるような場合にも、その働きかけでどのように判断や行動が変化するかを定量化できれば、同じ可誘導性の概念を導入することができる。

このように、情報提示による可誘導性を評価することで、移動ロボットが、人に情報提示をする際にも、不要なタイミングで提示することを抑止し、“人にわかりやすい提示のし方”を設計することにつながるのではないかと期待している。

### 【成果の発表、論文など】

1. Kentaro Sugiura, Hiroyuki Okuda, Mizuho Aoki, Kazuma Uchida, Tatsuya Suzuki: Inducibility Analysis of Pedestrian's Interactive Behavior, Proc. of IEEE/SICE Int'l Symp. on System Integration (SII), pp. 1-8, 2025
2. 杉浦健太郎, 奥田裕之, 鈴木達也, “可誘導性：歩行者間インタラクションにおける判断感度と可制御性に基づいた評価”, 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 (SSI2024), pp. 1-6, 2024

(SSI 最優秀論文賞受賞)

## [研究助成 (A)]

# 未病検知を目指した画像診断機器による臓器の生理機能評価 及び加齢性機能低下の検証

2241009



研究代表者

浜松医科大学 放射線診断学講座

准教授

尾崎 公 美

## [研究の目的]

「未病」は発病には至らないものの健康な状態から離れつつある状態で、「未病」検知は医療が最終的に目指すべき領域である。「未病」は発病していないがために現在は検知ができないが、人類の発展のためには人は健康である必要があり、これを検知できれば人類全体のよりよい未来に直結する。「未病」の検知が困難な理由は、生体に生じている軽微な変化を現在の医療機器で捉えることができなかったためである。

しかし、近年の画像機器の進歩とビッグデータ解析可能な人工知能の発達により未病検知の可能性を模索できると考えられる。画像は生体の内腔を客観性と再現性をもって描出可能であり、人間の目では検知し得ない軽微な変化や臓器の状態を定量的に可視化できる。かつ、剖検解剖や手術検体では評価し得ない生体のリアルタイムでの評価が可能である。本研究の目的は画像診断機器で得られたビッグデータの解析により、生体臓器の生理的状态変化を評価し、これらからわずかに逸脱した状態を検知することで「未病」を検知する指標を確立することである。『人間と機械（画像診断機器）の調和』による近未来の健康『促進』を思い描いている。

## [研究の内容、成果]

## 1. 肝動態解析法の開発

磁気共鳴画像（Magnetic Resonance Imaging; MRI）の技術革新により、自由呼吸下でのMRI撮像が可能となった。この自由呼吸下で肝臓の動態を連続性をもってとらえる動態画像を用いて、未病検知を試みる方針とした。Taggingやoptical flow法などの肝動態解析法は、特別なシーケンスや入手困難な特殊なプログラムが必要である。古典的なレジストレーションを使ったモーション補正技術も利用可能であるが、特微量・類似度尺度のチューニングや、高い計算コストが必要である。一方、近年の深層学習（Deep Learning; DL）ベースの画像処理技術の向上により、教師データがない状況での画像レジストレーションが可能になりつつある。画像レジストレーションでは、画像内のオブジェクトの変形場も副次的に計算される。これをダイナミックMRIデータに適用すれば、動態解析を精緻かつ高速に行える可能性がある。そこで本研究では、DLベースの画像レジストレーションを使った肝動態解析法を提案し、自由呼吸下のボランティア撮像データを解析して、提案手法の妥当性を検証した。

## 1-1 方法の検証

MR画像から変形場を算出する流れを図1に示す。最初の時刻の画像を基準画像（fixed image）として、後の時刻の画像と基準画像とでレジストレーションを行い、その際に出力さ

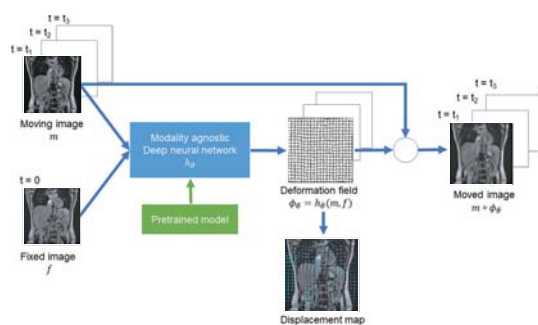


図1 教師なし画像レジストレーションを利用した変位画像 (displacement map) 算出の流れ。レジストレーションモデルからは deformation field (変形場) と moved image (レジストレーション後の画像) が出力される。

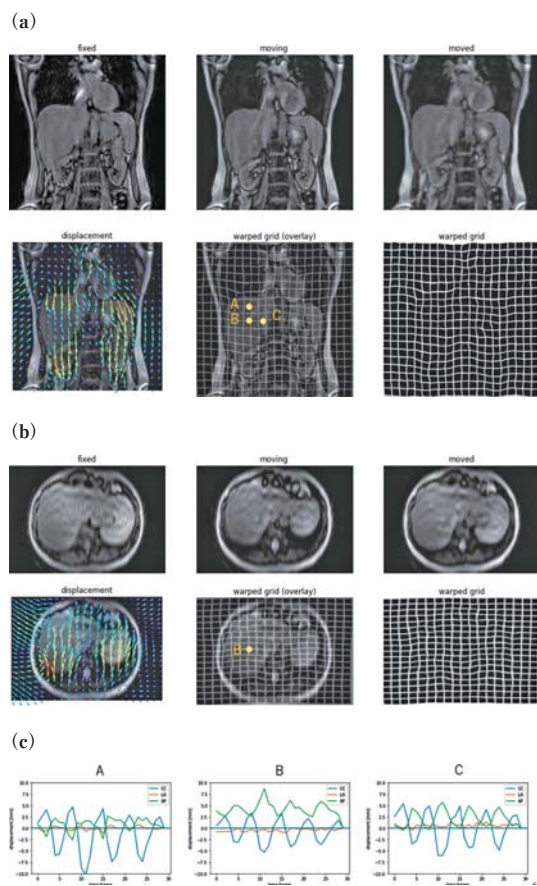
れる変形場から、組織の変位量 (displacement) マップを計算した。この作業をすべての時刻のデータに対して行った。

教師データを必要としない unsupervised 型のレジストレーションモデルとして Synthmorph3 を使用した。これは、画像コントラストや形状情報への依存性が低くなるように改良されている。今回は、手続き簡略化のため、スクラッチからの学習を行わずに、公開されている pre-trained モデルである shapes variant モデルを用いた。レジストレーションの計算時間は1症例当たり10分程度であった (rtx3090 使用)。

3次元 b-FFE シーケンス (FOV=(36 cm) 2, slice thickness/gap=7/3.5 mm, 30 phases) を用いて健常ボランティアにおける検証を行った。

### 1-2 ボランティアにおける初期検証結果

最大吸気時 (11th phase) の解析結果を図2 (a), (b) に示す。基準画像 (fixed image) とレジストレーション後の画像 (moved image) はよく一致しており、レジストレーションは正確に行われていた。図2(a) の coronal 面を見ると、肝臓内の変位場が頭尾 (CC) 方向に向いており、呼吸に伴って大きく移動している様子が分かる。図中 A, B, C の地点の変位量を時間に対してプロットすると (図2(c)), 肝臓の変形に伴い、地点によって移動量が異なっていた。また、axial 断面や経時プロットを見ると、



fixed: 時刻0の基準画像, moving: 時刻tの画像, moved: レジストレーション後の画像, displacement: カラーコード化した変位ベクトル, warped grid: 変形されたグリッド。  
(c) のグラフは画像中の点 A, B, C の変位を時間に対してプロットしたもの。

図2 最大吸気時 (11 フレーム目) の解析結果 (a, b) と変位量の経時変化 (c)

AP 方向にも大きく動いていた。このように、肝臓が三次元的に変形する量を定量化することができた。

他のシーケンスや症例についても、本手法で肝臓の3次元的な変位の経時変化を定量化することも確認した。ただし、画像コントラストによっては、変位量の正確性が低下する場合もあった。今回は、利便性の高い手法の構築を目指して、公開されている学習済のモデルを使ったが、このモデルを改良することで汎化性能を向上できると判断した。

### 1-3 肝疾患を有さない人を対象とした加齢における変化の検証

上記の方法論で、20-30代の若年者を中心に約20名の健常ボランティア撮像を施行した。

コントロールデータとして利用予定である。

#### 1-4 慢性肝疾患を有さない患者を対象とした加齢における変化の検証

浜松医科大学生命科学・医学系研究倫理委員会の承認を得て、同意を得た慢性肝障害を有していない患者に対し前向きに上記で確立した撮像パラメーターでデータ収集を進めている。幅広い年齢と性別からデータを収集し、総合解析することで、まずは加齢に伴う機能低下を把握する必要がある。

#### 1-5 慢性肝疾患を有する患者を対象とした病的変化の検証

浜松医科大学生命科学・医学系研究倫理委員会の承認を得て、同意を得た慢性肝障害を有する患者に対し前向きに上記で確立した撮像パラメーターでデータ収集を進めている。慢性肝障害を背景とした肝細胞癌の発生は最大の予後不良因子である。肝細胞癌の発生率は慢性肝障害により実質の線維化が進行すると上昇する。線維化の進行とともに、肝実質高度が上昇し、それとともに肝動態は制限されるという仮定し、臨床的肝線維化進行度の指標と肝動態の相関を解析し、現在の臨床的指標よりも早期段階での検知、すなわち「未病」検知の予定である。

#### 1-6 今後の課題

現状では1症例の解析時間は約10分程度だが、解析結果と臨床所見の相関関係を解析するにはかなり時間を要している。データ収集は蓄積されているが、現状では解析が追い付いていない。解析の簡略化と収集データ量がトレードオフになっており、今後の現実的な臨床応用の足かせの1つとなっている。

### 2. リン酸化合物可視化システムによる肝エネルギー代謝による検証

MRIの技術革新の別側面として、2024年3月より薬事承認を得たコイルを用いた生体内のリン酸 ( $^{31}\text{P}$ ) 化合物を評価可能となった。この $^{31}\text{P}$ -MRスペクトロスコピー ( $^{31}\text{P}$ -MRS) を用いることで、肝エネルギー代謝及びリン脂質

膜の構成成分を可視化し、肝細胞内の代謝物の濃度や酵素反応速度を非侵襲的に解析可能である。

エネルギー代謝の変化は病態においては必須の変化である。リン脂質膜は生体におけるあらゆる細胞膜の構成成分の1つであり、腫瘍性病変で正常とは異なる組成や細胞分解サイクルを呈することが報告されている。これまでこの変化を捉えるには採取された生体組織の質量分析が必要であった。侵襲的であり、かつ時間とコストがかかる検査であり、主に基礎研究でしか用いられていない。

$^{31}\text{P}$ -MRSは非侵襲的に繰り返し生体内のリン酸化化合物を可視化可能であり、このデータを「未病」検知へと応用できる指標の確立を試みた。

#### 2-1 至適撮像方法の検証

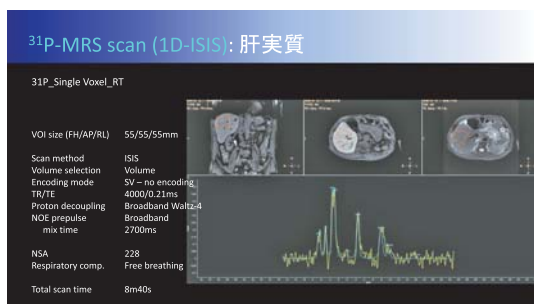
$^{31}\text{P}$ -MRSを撮像可能なコイルは薬事承認を得たものだが、ほぼ世界同時リリースであり、実際の至適撮像法は確立されていない。 $^{31}\text{P}$  (リン) の受診感度は $^1\text{H}$  (プロトン) を1とすると0.066しかなく、適切で安定した信号を得るために、まずは至適撮像条件の検証を行った。

撮像条件には無数のパラメーターが存在し、テストスキャンにて複数のパラメーターの組み合わせを変更しながら検証を行った (図3(a)(b))。具体的なパラメーターは、ポジショニング、2D-chemical shift spectroscopic imaging (2D-CSI) もしくは1D-image selected in vivo spectroscopy (ISIS)、呼吸停止か呼吸同期か、single voxel か multi-voxel か、field of viewの調整、proton decoupling 併用の有無の検証、B1磁場補正の調整、などである。定量評価を見据えると、高い空間分解能を有する画像が望ましいが、撮像時間延長トレードオフである。臨床応用可能な撮像時間としては10分前後と考えており、この制限時間でできるだけ良好なデータを得る検証を行った。

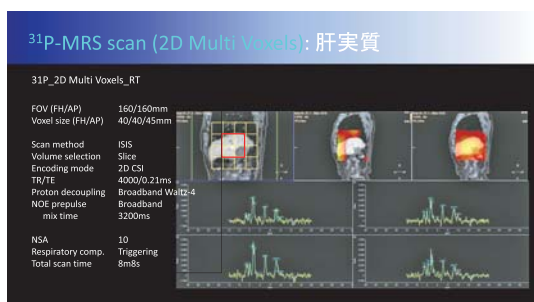
複数のテストスキャンにより、最終的には1D-ISISを主軸としてその他のパラメーターを



(a)



(b)



(c)

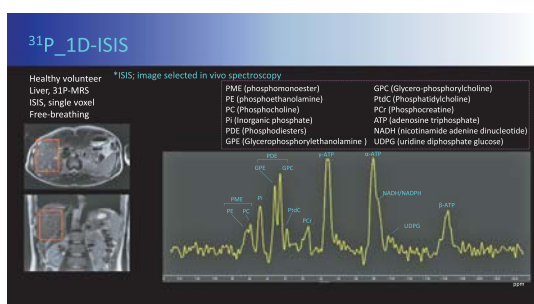


図 3

変更する検証を施行した。

## 2-2 肝実質信号取得における至適撮像方法の健常ボランティアによる検証

1D-ISISを用いた肝実質からの信号取得を呼吸同期、自由呼吸下の双方で検証した(表1)。対象は21名の健常ボランティア(表2)である。呼吸同期撮像は上腹部において一般的に利用され、高いSNRが期待できる。一方で、自由呼吸下では呼吸の乱れや呼吸の深さの個人差に影響を受けやすい。

肝実質で対象となるリン酸化合物はphosphoethanolamine (PME), phosphocholine (PC), inorganicphosphate (Pi), glycerophosphorylethanolamine (GPE), glycerophosphorylcholine (GPC), phosphocreatine (PCr),

表 1

| Parameters                      | Respiratory triggering     | Free breathing |
|---------------------------------|----------------------------|----------------|
| Scan method                     | ISIS                       |                |
| Volume selection                | Volume                     |                |
| Encoding mode                   | Single-voxel — no encoding |                |
| Voxel size (FH/AP/RL)           | 55/55/55 mm                |                |
| Repetition time (ms)            | 4000                       |                |
| Echo time (ms)                  | 0.09                       |                |
| Proton decoupling               | broadband Waltz-4          |                |
| NOE prepulse mix time (ms)      | Broadband 2700             |                |
| Respiratory comp.               | Respiratory trigger        | Free breathing |
| NSA                             | 128                        | 192            |
| Decouple duration (ms)          | 234                        |                |
| Expected examination time (min) | 13                         |                |

表 2

| Number of the subjects                        | 21         |
|-----------------------------------------------|------------|
| Age                                           | 30.0±6.9   |
| Sex ; male/female                             | 15/6       |
| Body composition                              |            |
| Height (m <sup>2</sup> )                      | 168.1±7.5  |
| Body weight (kg)                              | 57.2±9.2   |
| Body mass index (kg/m <sup>2</sup> )          | 20.2±2.7   |
| Body surface area (m <sup>2</sup> )           | 1.64±0.15  |
| Liver enzymes                                 |            |
| Alanine aminotransferase (U/L)                | 16.5±7.1   |
| Aspartate aminotransferase (U/L)              | 19.9±4.5   |
| γ-glutamyltransferase (U/L)                   | 24.0±13.8  |
| Serum lipids                                  |            |
| Triglycerides (mmol/L)                        | 73.5±31.5  |
| High-density lipoprotein cholesterol (mmol/L) | 66.7±21.1  |
| Low-density lipoprotein cholesterol (mmol/L)  | 111.0±26.9 |
| Glycemic parameters                           |            |
| Plasma glucose (mmol/L)                       | 83.2±6.1   |
| Glycosylated hemoglobin (%)                   | 5.2±0.2    |
| Complete blood count                          |            |
| Hematocrit (%)                                | 44.7±3.2   |
| Hematocrit (g/dL)                             | 14.7±1.2   |

nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADPH), uridine diphosphoglucose (UDPG), γ-adenosine triphosphate (ATP), α-ATP, and β-ATP (図3(c)), とこれらから計算可能な以下の比率である; PME/PDE, NADPH/PME+PDE, PME/γ-ATP, Pi/γ-ATP, PDE/γ-ATP, α-ATP/γ-ATP, NADPH/γ-ATP である。更には信号取得の指標として下記の計算式から算出される signal-to-noise ratio (SNR)

がある。SNR=the maximum magnitude of the signal estimate in the frequency domain per noise standard deviations in the frequency domain。

これらの指標に関して、2種の撮像法の比較検証したところ、ほぼ同等のデータが自由呼吸下ではより短い検査時間で得られることが判明した（表3、図4）。

呼吸同期では、個人によって呼吸感覚が異なり、呼吸パターンが乱れると、その時間の撮像がスキップされることがある。その結果「実際の撮像時間」は延長し、撮像終了時間を予測できず、ワークフローが煩雑になる可能性があること判断した。自由呼吸では常にデータを取得し続けるため撮像時間の延長はない。総合的には自由呼吸下において、類似のデータが呼吸同期での撮像よりも短時間で得られた。

### 2-3 慢性肝疾患を有さない患者を対象とした加齢における変化の検証

上記で確立した撮像パラメーターを持ちいて、浜松医科大学生命科学・医学系研究倫理委員会の承認を得て、同意を得た慢性肝障害を有していない患者に対し前向きデータ収集を施行している。幅広い年齢と性別からデータを収集し、総合解析することで、まずは加齢に伴う機能低下を把握する必要がある。

### 2-4 慢性肝疾患を有する患者を対象とした病的変化の検証

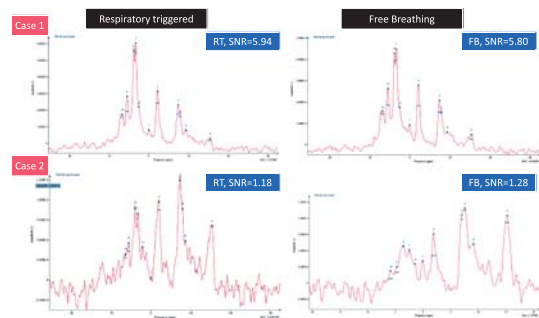
浜松医科大学生命科学・医学系研究倫理委員会の承認を得て、同意を得た慢性肝障害を有する患者に対し前向きに、上記で確立した撮像パラメーターでデータ収集を進めている。慢性肝障害でのデータ収集の理由は肝動態解析における検証と同様である。すなわち、慢性肝障害を背景とした肝細胞癌の発生は最大の予後不良因子である。肝細胞癌の発生率は慢性肝障害により実質の線維化が進行すると上昇する。線維化の進行とともに、細胞膜には変化がもたらされ、リン脂質にもその変化が生じる。リン脂質の変化は線維化の進行に先立って生じる可能性があ

表3

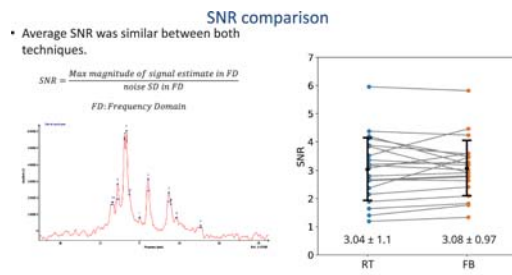
|                               | Respiratory triggering | Free breathing    | p value |
|-------------------------------|------------------------|-------------------|---------|
| Ratio of metabolite peak area |                        |                   |         |
| PME/PDE                       | $0.434 \pm 0.314$      | $0.489 \pm 0.291$ | 0.046   |
| NADPH/PME+PDE                 | $0.312 \pm 0.216$      | $0.391 \pm 0.396$ | 0.931   |
| PME/ $\gamma$ -ATP            | $0.76 \pm 0.64$        | $0.72 \pm 0.52$   | 0.556   |
| Pi/ $\gamma$ -ATP             | $0.70 \pm 0.34$        | $0.74 \pm 0.31$   | 0.931   |
| PDE/ $\gamma$ -ATP            | $1.68 \pm 0.47$        | $1.35 \pm 0.41$   | 0.003   |
| $\alpha$ -ATP/ $\gamma$ -ATP  | $0.66 \pm 0.39$        | $0.67 \pm 0.35$   | 0.332   |
| NADPH/ $\gamma$ -ATP          | $0.64 \pm 0.29$        | $0.59 \pm 0.33$   | 0.394   |
| SNR                           | $2.941 \pm 1.151$      | $2.989 \pm 1.052$ | 0.570   |

Peaks of GPE and PDE (the sum of GPE and GPC) of RT are significantly larger than those of FB. Whereas, there are no significant differences of peaks of others in between RT and FB. PME=phosphomonoester, Pi=inorganic phosphate, GPE=glycerophosphoethanolamine, GPC=glycerophosphocholine, PDE=phosphodiester, PCr=Phosphocreatine, ATP=adenosine triphosphate, NADPH=nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, UDPG=uridine diphosphoglucose, SNR=signal-to-noise ratio.

(a)



(b)



(c)

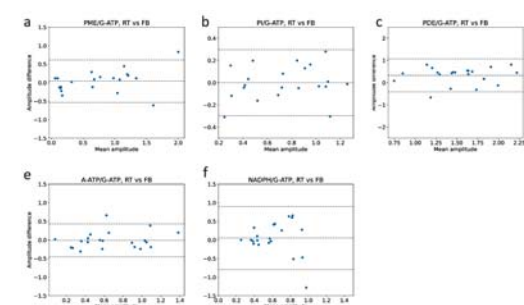


図4

ると仮定し、 $^{31}\text{P}$ -MRS で得られる各リン酸化化合物と臨床的肝線維化進行度の指標と肝動態の相関を解析し、現在の臨床的指標よりも早期段階での検知、すなわち「未病」検知の指標確立を目指している。

### 3. その他の画像を用いた解析

肝動態解析及び  $^{31}\text{P}$ -MRS はこれまでにない全く新しい指標から確立しようという試みである。その他、既存の使いやすい指標を用いた検証も行った。当初は CT 画像を用いた肝容量解析も考慮していたが、プレリミナリーデータ検証では、容量変化は実質の変化がかなり進行してから顕在化することが判明した。そこで、CT で計測可能な他の定量値を用いた検証を試みた。

#### 3-1 Dual-energy CT による定量解析

Dual-energy CT 装置は 2 管球からデータを取得することで物質弁別手法によって、肝内脂肪量、炎症の程度、線維化量などの定量化できる。

これまで報告がある物質弁別手法に加えて、元素の質量減弱係数を混合物にも適用したもので実効原子番号画像は基準物質画像の比率をカラーコード化して表した指標である実効原子番号 (Z effective) 検証を行った。

#### 3-2 実効原子番号の肝実質における計測

臨床例を中心に後方視解析を施行した。肝機能異常を有さない症例 30 例、慢性肝障害を有する症例 60 例 (ALBI grade 1, 2, 3 各約 20 例) の計測を行ったが、実効原子番号と肝障害の相関は現時点では判明しなかった ( $7.23 \pm 2.63$  vs  $7.12 \pm 3.17$ ,  $p > 0.05$ )。CT 機器、機器に応じた解析手法、撮像条件にも影響を受ける値である可能性があるが、CT は放射線被曝を伴うために健常ボランティアでの撮像パラメーターの検証が難しい。本件に関しては指標として組み込んでいくかどうかも含めた再検証が必要と考えている。

### [今後の予定と展望]

現状今回の 1 年という短期間では未病検知のための手法確立の検証にとどまっている。各手法でのデータ収集と解析による未病検知への指標の確立、またより至適な手法の模索を続ける予定である。

### [成果の発表、論文など]

1. 教師なし深層学習ベースのレジストレーションを用いた新しい肝動態解析法の提案。寺田康彦, 藤田直人, 尾崎公美, 五島聡。第 52 回日本磁気共鳴医学会大会 2024 年 9 月 20 日 (金)~22 日 (日) (幕張)
2. 肝実質における single voxel  $^{31}\text{P}$ -MRS のための至適撮像方法の健常ボランティアによる検証。尾崎公美, 権池勲, 勝又康友, Marc Van Cauteren, 大石直樹, 山田洋次, 米山正巳, 舟山慧, 棚橋裕吉, 五島聡。第 53 回日本磁気共鳴医学会大会 2025 年 8 月 29 日 (金)~31 日 (日) (姫路) にて発表予定
3. Tanahashi Y, Kubota K, Nomura T, Ikeda T, Kutsuna M, Funayama S, Kobayashi T, **Ozaki K**, Ichikawa S, Goshima S: Improved vascular depiction and image quality through deep learning reconstruction of CT hepatic arteriography during transcatheter arterial chemoembolization. Jpn J Radiol. 1243-1254, 42(11), 2024.
4. **Ozaki K**, Ohtani T, Ishida T, Takahashi K, Ishida S, Kutsuna M, Kubota K, Funayama S, Tanahashi Y, Ichikawa S, Goshima S: Hepatic extracellular volume fraction obtained by dual-energy CT: a comparison of 3 and 5 minute delayed phases and correlation with clinical data. Br J Radiol. 2025 Apr 12, in press.
5. Miyake K, **Ozaki K**, Maehigashi A, Yamada S: Adjusting Doctor's Reliance on AI Through Labeling for Training Data and Modification of AI Output in a Muscle Tissue Detection Taske. 837-844, 2025
6. Komura K, **Ozaki K**, Yamada S: Robot can reduce superior's dominance in group discussions with human social hierarchy. Proceedings of the 12th International Conference on Human-Agent Interaction 242-249, 2024.

## [研究助成 (A)]

# 実現場での階段昇降時動作データに基づいた転倒を検知するための機械学習的アプローチ

2241010



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

豊田工業高等専門学校 一般学科

准教授

加 藤 貴 英

豊田工業高等専門学校  
情報工学科

教 授

早 坂 太 一

愛知医科大学 医学部

講 師

川 越 隆

国立長寿医療研究センター  
フレイル研究部

副部長

大須賀 洋 祐

豊田工業高等専門学校

校 長

山 田 陽 滋

## [研究の目的]

加齢に伴い、転倒の頻度は増加する（WHO, newsroom “Falls”, 2021）。今日の超高齢社会において、転倒による骨折や転倒後症候群（精神的なダメージ）は医療費と要介護者の増加に拍車をかけ、延いては我が国の経済的負担をさらに増幅させることとなる。このような医療介護の負のスパイラルに歯止めをかけるためにも、科学的エビデンスに基づいた転倒検知システムを構築することは社会的にも重要な意義を持つ。事実、諸外国だけでなく我が国においても高齢者の身体機能データと転倒履歴（Hasegawa et al., 2023）や自己報告式問診票データ（Ikeda et al., 2022）を基に機械学習を用いた転倒診断モデルの検証が進められている。

転倒の発生率が高い場所の1つに階段があげられる。階段昇降時は、片足で踏み昇る動作と片足で踏み降りる動作を左右交互に、かつバランスを保持しながら行わなければならない。また、視覚からの踏み位置情報を即座に、かつ自動的に処理して動作する必要がある。この様に歩行動作よりも複雑なメカニズムを持つ階段昇降動作の3次元解析は、転倒検知の観点から欠かせない課題である。しかしながら、解析機器

の仕組み上、屋外や実現場での階段昇降時の3次元動作解析は寡少である。また、加齢に伴う筋力やバランス能力の低下、視覚認知機能の低下が転倒リスクの増加に起因していることから、あらゆる世代の階段昇降時の動作データを収集し、比較・検証する必要がある。

そこで、本研究では体力テストによる客観データと問診による主観データから見た転倒リスクに対する加齢の影響を検証するとともに、幅広い年齢層の階段昇降時の3次元動作データを収集して機械学習的アプローチによる解析を行い、階段昇降時の動作パターンの識別を行うことを目的とした。そのために60歳代（高齢者）、40歳代（中年者）、20歳代（若年者）を対象に形態計測と体力測定、および転倒に関する問診を実施した。さらに最新の9軸慣性センサ式モーションキャプチャーシステムを用いて実現場での階段昇降時の3次元動作データを収集し、動作パターンの識別を試みた。

## [研究の内容、成果]

## 1. 研究参加者

本研究は、「ヘルシンキ宣言」および「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」（文



部科学省，厚生労働省，経済産業省制定）を遵守し，豊田工業高等専門学校「ヒトを対象とする研究倫理審査」より承認を得て実施した。

参加者は，高齢者群 10 名（ $65 \pm 3$  歳），中年者群 10 名（ $45 \pm 2$  歳），若年者群 12 名（ $25 \pm 2$  歳）の計 32 名であった。研究参加者には事前に実験によって生じる負担や予測されるリスク等を口頭および書面にて説明し，研究参加者から同意書に署名を受けた。

## 2. 問診，形態計測および体力テスト

研究参加者は，転倒ハイリスク者の発見のための問診（鳥羽ら，2005）に回答した。この問診は，「過去 1 年間に転んだことはありますか」，「つまづくことはありますか」等，22 の設問に対し，「はい，いいえ」の 2 件法で回答するものである。問診後，自動血圧計による安静時血圧（収縮期，拡張期，脈拍），身長，体重，インピーダンス法による体脂肪率の測定を行った。その後，体力測定として握力，開眼片脚立ち，5 m 歩行速度，Timed up and go test（TUG）を測定した。握力は立位姿勢で左右 2 回ずつ測定し，それぞれ良い値の平均値を評価値とした。開眼片脚立ちは 2 回計測し，平均値を評価値とした。ただし，180 秒を上限とし，1 回目で 180 秒に達した場合は評価値を 180 秒とした。5 m 歩行速度は，両端に 3 m の加速路と減速路，計測区間を 5 m とした 11 m 歩行を通常速度で 2 回，最大努力で 2 回計測した。それぞれ平均値を評価値とした。TUG は，背もたれにもたれた状態で椅子に座り，手は膝の上に置いた状態を初期姿勢とした。最大努力速度で初期姿勢から立ち上がって，3 m 先に設置してあるコーンで U ターンし再び初期姿勢に戻るまでの時間を 2 回計測し，平均値を評価値とした。

## 3. 階段昇降動作データ収集

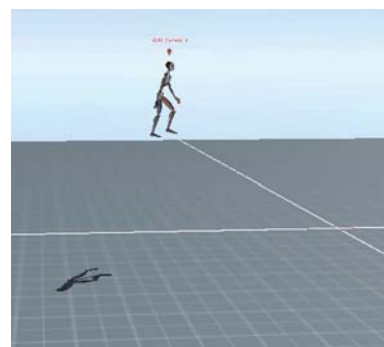
研究代表者の所属先校内にある階段を利用した。研究参加者は，専用ストラップおよびアンダーラップテープを使用して身体 17 箇所（①

頭，② 右肩，③ 右上腕，④ 右前腕，⑤ 右手，⑥ 左肩，⑦ 左上腕，⑧ 左前腕，⑨ 左手，⑩ 右大腿，⑪ 右下腿，⑫ 右足，⑬ 左大腿，⑭ 左下腿，⑮ 左足，⑯ 胸，⑰ 腰）に 9 軸慣性ワイヤレスセンサ（Movella 社製，Xsens MVN Awinda，通信距離 50 m，出力レート 60 Hz）を装着した（画像 1）。

センサ装着後，キャリブレーションを行いセンサが良好状態であることを確認して計測を 2 回行った。研究参加者は校舎 3 階から 4 階までの階段を昇り，4 階廊下で U ターンした後，4 階から 3 階まで階段を降りた。階段の段数は 3 階から途中の踊り場まで 10 段，同様に踊り場から 4 階まで 10 段であった。1 段の高さは 18 cm であった。専用レシーバを介して階段昇降時のデータを取り込み，専用解析ソフトウェア（Movella 社製，Xsens MVN Analyze Pro）で 1 次処理を行った。得られた加速度・角速度・方位情報を 3 次元身体モデルに反映させ，数値データは CSV ファイル形式で，3 次元身体モデル動画は MPEG-4 ファイル形式で保存した（画像 2）。



画像 1 センサ装着の様子



画像 2 階段昇降動作中の 3 次元身体モデル

#### 4. 機械学習手法

まず、動作識別の機械学習に利用できるオープンデータセット (Anguita, et al. 2013, Human Activity Recognition Using Smartphones: HAR) を用いて歩行動作予測モデルを構築した。HAR データセットでは、協力者が腰部にスマートフォンを着用し、3 軸の加速度が 50 Hz のサンプリング周波数で計測されている。各データは、Walking, Upstairs, Downstairs, Sitting, Standing, Laying の 6 つの動作別にラベリングされている。これらのセンサデータを 128 点ごとに、50% のオーバーラップを設けて抽出した。さらに、3 軸の加速度を直列に結合し、384 次元のデータとすることで、学習用およびテスト用データとした。機械学習は、Python 3.7, Scikit-learn 1.0.2 ライブラリを用いた決定木 500 本のランダムフォレストによって行った。

HAR データセットのセンサデータについて、構築した歩行動作予測モデルのテスト結果は、全体の F1-score が 0.819 となったものの、動きの小さい Sitting, Standing, および Laying では誤分類が多い結果となった (表 1)。しかしながら、本実験で取得したデータは、Walking, Upstairs, Downstairs の動作が主であるため、歩行動作予測に十分利用できると思われる。

表 1 推論モデルの学習結果

|            | Walk | Up  | Down | Sit | Stand | Lay | F1-score |
|------------|------|-----|------|-----|-------|-----|----------|
| Walking    | 489  | 2   | 5    | 0   | 0     | 0   | 0.90     |
| Upstairs   | 87   | 378 | 6    | 0   | 0     | 0   | 0.86     |
| Downstairs | 10   | 22  | 388  | 0   | 0     | 0   | 0.95     |
| Sitting    | 0    | 2   | 0    | 279 | 177   | 33  | 0.61     |
| Standing   | 3    | 0   | 0    | 71  | 441   | 17  | 0.75     |
| Laying     | 0    | 0   | 0    | 71  | 26    | 440 | 0.86     |
| 全 体        |      |     |      |     |       |     | 0.819    |

テストデータ：2,947 件

#### 5. 体力テストと問診から見た転倒リスクに対する加齢の影響

高齢者群、中年者群、若年者群の身長、体重、BMI (Body Mass Index)、体脂肪率を対応の

無い 1 元配置分散分析および Bonferroni 法による多重比較検定を行った結果、3 群に有意差はなかった。

次に、過去 1 年間に転倒したと回答した転倒群 9 名と転倒は無かったと回答した非転倒群 23 名に群分けした。そして、形態計測と体力測定データについて群間比較するために対応のない t 検定を行った。結果、形態計測項目である身長、体重、BMI、体脂肪率は両群間で有意差はなかった。体力テスト項目については、転倒群において安静時収縮期血圧が有意に高く、開眼片脚立ち時間が有意に短かった (表 2)。

表 2 形態計測および体力測定データの比較

|                            | 転倒群<br>n=9  | 非転倒群<br>n=23 | 対応のない t 判定                         |
|----------------------------|-------------|--------------|------------------------------------|
| 年齢 (歳)                     | 53±18*      | 40±15        | $t_{(30)}=2.206, p=0.035, d=0.833$ |
| 身長 (cm)                    | 171.3±4.2   | 170.8±3.6    | $t_{(30)}=0.398, p=0.693, d=0.151$ |
| 体重 (kg)                    | 70.2±12.1   | 71.0±11.6    | $t_{(30)}=0.167, p=0.868, d=0.065$ |
| BMI (kg/m <sup>2</sup> )   | 24.0±4.6    | 24.3±3.6     | $t_{(30)}=0.204, p=0.840, d=0.075$ |
| 体脂肪率 (%)                   | 20.9±9.7    | 20.5±5.5     | $t_{(30)}=0.124, p=0.902, d=0.043$ |
| 収縮期血圧 (mmHg)               | 135.3±26.2* | 118.6±12.1   | $t_{(30)}=2.495, p=0.018, d=0.819$ |
| 拡張期血圧 (mmHg)               | 84.4±19.4   | 74.7±9.0     | $t_{(30)}=1.953, p=0.060, d=0.642$ |
| 脈拍 (beats/min)             | 72.7±14.2   | 67.5±9.9     | $t_{(30)}=1.179, p=0.248, d=0.424$ |
| 握力 (kg)                    | 39.2±5.3    | 40.3±6.0     | $t_{(30)}=0.498, p=0.622, d=0.201$ |
| 開眼片脚立ち (sec)               | 104.5±79.0* | 158.2±48.4   | $t_{(30)}=2.345, p=0.026, d=0.818$ |
| 5 m 通常歩行速度 (sec/m)         | 0.72±0.12   | 0.68±0.08    | $t_{(30)}=1.227, p=0.229, d=0.431$ |
| 5 m 最大動力歩行速度 (sec/m)       | 0.43±0.09   | 0.41±0.07    | $t_{(30)}=0.727, p=0.473, d=0.271$ |
| Timed up and go test (sec) | 5.30±0.92   | 4.85±0.60    | $t_{(30)}=1.672, p=0.105, d=0.592$ |

平均値±標準偏差

\* $p<0.05$ , 転倒群 vs. 非転倒群

問診結果については、転倒歴の有無および各質問項目の回答からクロス集計を行い、Pearson のカイ 2 乗検定を行った。しかしながら、期待度数が条件を満たしていなかったため、Fisher の直接法による確率値を確認した。結果、転倒歴と有意な関係性を示す質問項目は確認できなかった。

これらの結果から、過去 1 年間の転倒経験率は高齢になるほど高まることが明らかとなり、これまでどおりの見解と一致した (WHO, newsroom “Falls”, 2021)。転倒経験率と体格との間に関係はみられなかった。そして、転倒経験者は安静時の血圧が高く、バランス能力が衰えていることも確認できた。一方、問診デー

タ間に統計的有意性を示す結果は得られなかったため、今後の研究ではさらなる検証を目的とした追加実験が必要である。

## 6. 機械学習的アプローチによる階段昇降動作パターンの識別

構築した歩行動作予測モデルについて、9軸慣性センサ式モーションキャプチャシステムによって収集したデータにおける腰部の3軸加速度のみを抽出し、予測を行った。これは、HAR データセットが腰部にスマートフォンを着用して3軸加速度を計測していることから、1箇所のセンサで動作パターンの識別が可能であるかを確認するためであった。

図1に高齢者、図2に中年者、図3に若年者、それぞれ動作パターン識別の推定結果の代表例

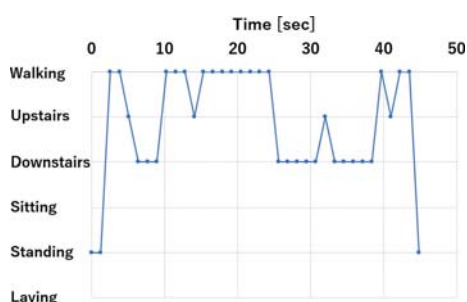


図1 高齢者群参加者 A の動作パターン識別

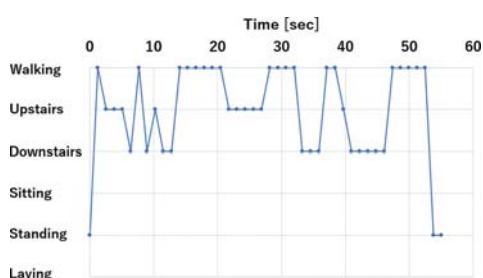


図2 中年者群参加者 B の動作パターン識別

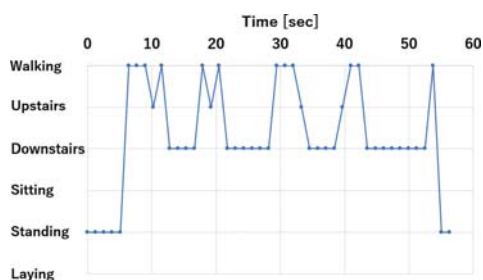


図3 若年者群参加者 C の動作パターン識別

を示す。機械学習に用いたデータは、19歳から48歳までの30名の協力者のものであったが、本実験においては、そうした年代に含まれない高齢者群（61～71歳）の参加者に対するWalking, Upstairs, Downstairs状態の推定結果が比較的良好であった。

推定結果により参加者を2群に分け、各質問項目の回答からクロス集計を行い、Fisherの直接法による確率値を確認したが、有意な関係性を示す質問項目は確認できなかった。本研究における機械学習的アプローチによって、中年者および若年者のデータから構築されたモデルにより、高齢者の動作をある程度予測できることがわかった。しかしながら、腰部の3軸加速度データのみでは、問診および形態計測データや体力テスト結果との連関を見出すことはできなかった。今後は、他の16箇所のセンサデータや、それらの中の角速度および地磁気データを参照することで、動作パターンのさらなる予測精度向上を目指すとともに、転倒リスクの有無を判別できるモデルの構築に繋げていく。

### [謝 辞]

本研究の実施にあたり、公益財団法人立石科学技術振興財団から格別のご支援を賜りましたことに、心より感謝申し上げます。また、機械学習的アプローチに多大なるご協力をいただいた豊田工業高等専門学校専攻科情報科学専攻修了生の山田活樹さん、ならびに現専攻科生の川原遼介さんには、深く感謝の意を表します。

### [参考文献]

- ・ World Health Organization, newsroom “Falls”, 2021. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls/> (最終アクセス日: 2025年5月26日)
- ・ Hasegawa S, Mizokami F, Kameya Y, Hayakawa Y, Watanabe T, Matsui Y. Machine learning versus binomial logistic regression analysis for fall risk based on SPPB scores in older adult outpatients. Digit Health. 2023, 11; 9: 20552076231219438.
- ・ Ikeda T, Cooray U, Hariyama M, Aida J, Kondo K, Murakami M, Osaka K. An Interpretable Machine Learning Approach to Predict Fall Risk Among

Community-Dwelling Older Adults: a Three-Year Longitudinal Study. J Gen Intern Med. 2022, 37(11): 2727-2735.

- ・ 鳥羽研二, 大河内二郎, 高橋泰, 松林公蔵, 西永正典, 山田思鶴, 高橋龍太郎, 西島令子, 小林義雄, 町田綾子, 秋下雅弘, 佐々木英忠. 転倒リスク予測のための「転倒スコア」の開発と妥当性の検証. 日本老年医学会雑誌, 2005, 42(3): 346-352.
- ・ Anguita D, Ghio A, Oneto L, Parra X, Reyes-Ortiz JL. A Public Domain Dataset for Human Activity Recognition using Smartphones, Proceedings of

European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning, 2013, pp. 437-442.

[成果の発表, 論文など]

- ・ 加藤貴英, 早坂太一, 近藤雅哉, 川越隆, 大須賀洋祐. 体力テストによる客観データと問診による主観データから見た転倒リスクに対する加齢の影響. 日本体育・スポーツ・健康学会第75回大会. 2025年8月(発表予定)



## [研究助成 (A)]

バーチャルリアリティ空間における脅威刺激認知の  
脳波による定量評価

2221009



研究代表者

国立研究開発法人  
産業技術総合研究所

主任研究員

金 山 範 明

## [研究の目的]

近年バーチャルリアリティ（以下 VR）技術が進展し、我々は実空間ではできない様々な体験をすることができるようになった。しかしながらその体験は、時には危険なこともある。例えば VR 上でギロチンを体験すると実際に体が麻痺する報告などがあり、やみくもに VR 体験を行うことで人体に悪影響が出る可能性が否めない。人間にとって、VR という新しい技術を適切な形で活用していくためには、VR 上での体験が実身体にどの程度の影響を与えるかの基礎的なデータが必要である。これを、脳波を用いて明らかにすることで、主観報告だけではなく、脳生理反応からその影響を客観的に示すことができる技術を開発する。これにより、VR 技術の適切な活動についてのガイドラインを作る一助としたい。

上記の目的を達成するためには、VR 空間上に提示された身体（アバター）に何らかの刺激を与え、その刺激が生体反応においてどのように評価されているかを計測する必要がある。頭皮上脳波には、侵害刺激に対して反応する脳波成分があることが分かっており、刺激が生体にとってどれほど脅威かを定量的に図ることができる。本研究課題では脳波成分の大きさが、VR 空間上の侵害刺激の視覚的な提示によってどのように調節を受けるのかを明らかにすることを目的とした。しかし VR 映像を閲覧する場合、VR 映像の解像度は現実空間とは大きく異なり、

その質が VR シーンへの十分な没入を妨げている可能性がある。本検討では、VR 環境における疑似痛覚を検討するのに、どの程度の解像度が必要かという技術的課題をクリアしたうえで、侵害刺激が惹起する脳波成分の計測を行い、主観的な侵害度合いを定量的に明らかにする。

## [研究の内容、成果]

## 1) VR 刺激を利用した脳波計測

VR シーン中に呈示される刺激に対する脳反応を計測する試みはさまざま行われている。申請者の先行研究においては、ヘッドマウントディスプレイ（Head-Mounted Display; HMD）を装着し、VR 空間に自身の身体を提示した場合、その身体モデルに対しての接触を示す視覚的情報と、実際の自分の身体に対する接触である体性感覚的情報が時空間的に一致していると高い身体所有感・臨場感を感じることが明らかにされた（Kanayama et al., 2021）。しかしながら、HMD の解像度は実空間に比べて低く、疑似痛覚を感じるレベルに十分かは不明である。本研究では、目的の実験に入る前に、十分な没入感を担保する解像度を明らかにするため、また解像度を変更した際に実空間と脳活動が大きく異なってしまうか確認するための検証実験を行い、「VR 上の手のモデルに対する身体所有感が VR 解像度により変化するのか」（研究 1）、「その際の脳情報処理は解像度によって変わるか」（研究 2）という点について検証を

行った。

## 2) 【研究 1】VR 刺激の解像度が身体所有感に与える影響

VR 刺激呈示を行う HMD の解像度は、公表されているものといないものがある上、レンズ形状等複雑な要因で変化するため、正確な数値については明らかではないが、先行研究 (Kanayama et al., 2021) で使用したものが約 10 PPD、当時のコンシューマモデルとしてポピュラーな Meta Quest2 で約 20 PPD と、ヒトの肉眼に対して非常に低い。先行研究 (Kanayama et al., 2021) で得られた実環境と VR 環境における脳情報処理および主観的体験の違いは解像度に起因する可能性がある。これに対して本研究では中心視野 (27x27 degree) に限定して人の肉眼で実環境を見る際と同等の PPD を提示可能な Varjo XR3 を用いて、ヒトの多感覚情報処理に影響する主観的な体験に関する評価が解像度に依存してどの程度変化するのか検討した。

**方法** 21 名の参加者を募集し、女性 9 名、男性 12 名 (平均年齢 25.43 歳、標準偏差 4.50) が参加した。参加者は全員、眼鏡またはコンタクトレンズによる視力矯正後、または矯正なしに正常視力を有し、右利きで、神経学的または精神医学的疾患の既往歴はなかった。本実験は、倫理審査番号「人 2023-0877」の計画に基づいて実施され、すべての参加者は自らの意思で実験参加に同意し、同意書に署名した。

実験参加者が実験中に閲覧した VR 空間内のシーンは、低解像度の VR 空間 (約 30 PPD 程度)、高解像度の VR 空間 (約 70 PPD 程度)、パススルーによる実空間のビデオ映像の 3 種類であった (図 1)。それぞれのシーンにおける実験を、1 セッションずつ行った。各セッションでは、視覚刺激と触覚刺激の空間的位置が一致するブロックと不一致になるブロックが交互に 2 回ずつ提示された。これらの順序はカウン

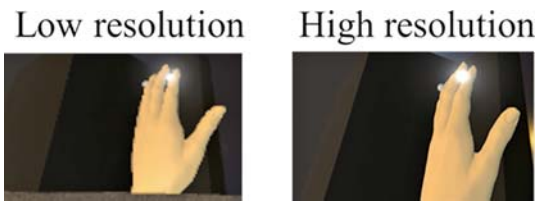


図 1 実験で使用した映像の解像度の異なり

ターバランスが取られていた。各ブロックは 60 試行で構成され、各試行は 50 ミリ秒の刺激提示期間、550 ミリ秒の反応受付期間、および 1600~2000 ミリ秒の試行間隔で構成されていた。参加者は、提示された振動による触覚刺激が人差し指に感じられたか薬指に感じられたかを、ボタンを押して示すように教示された。この間、目の前のタスクとは無関係であり触覚に基づいてのみ押すボタンを判断するように伝えられたうえで、人差し指と薬指の先端背面に取り付けられた点滅する LED (VR の場合それに似せた球体) の発光を見ているように指示された。

実験参加者は、各ブロックの終了後、ラバーハンド錯覚に関する主観的な感覚を口頭で報告した。実験参加者は、錯覚体験の強さを 1 から 100 の尺度で評価した。1 は錯覚が全くないこと、100 は最も強い錯覚があることを示すこととした。質問項目は 5 つでそれぞれ、項目 1「ラバーハンドがまるで自分の手のように感じた」、項目 2「LED の光が自分の手の位置で光っているように感じた」、項目 3「振動がラバーハンドの位置で起こっているように感じた」項目 4「自分の手がラバーハンドの位置にあるように感じた」項目 5「自分の手がゴムっぽくなったように感じた」であった。項目 1-4 で、どの程度 VR 上の偽の手を自分の手だと思ったかに関する評価を行い、項目 5 は統制としてのダミー項目として用いた。

**結果** 統計的検定として、ウィルコクソンの符号順位検定を採用し、p 値は FDR 法を用いて補正した。身体所有感に関わる項目 1 と 4 では、すべての VR シーンにおいて、一致した視触覚

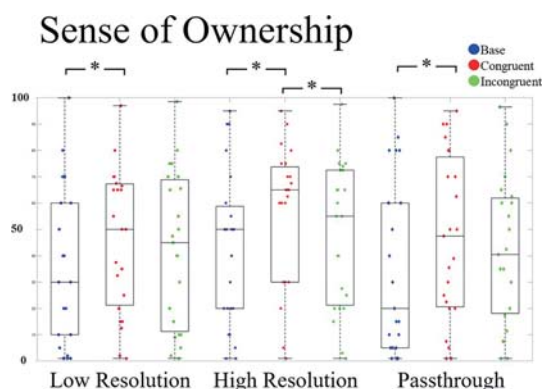


図2 項目1の質問に対する条件ごとの評価値

刺激後に刺激前に比べて身体所有感に関する錯覚の強度が有意に増加した ( $p < .05$ ; 図2)。項目5では、VRシーン閲覧条件において、有意な実験刺激による効果が見られなかったため、項目1と4にみられた効果が要求特性によるものではないことが示唆された。不一致な視触覚刺激条件では、いずれのシーンにおいても実験刺激による有意な身体所有感の変化は観察されなかった。

**考察** 本検討の結果、解像度が低い条件であっても、解像度の高い条件と同様に、視触覚刺激の空間的に一致した刺激の呈示をアバターの手と自身の手に呈示することで、あたかもVR上のアバターの手を自分の手であると感じさせる効果が表れることが明らかになった。

### 3) 【研究2】VR解像度が頭皮上脳波に与える影響

研究1で明らかになった解像度による主観的な感覚の異なりに対し、その際の脳反応がどのように異なるかを明らかにするため、研究1の実験セッティングにおいて頭皮上脳波を計測した。既に同様のセッティングで頭皮上脳波を計測した先行研究の知見と比較し、解像度により脳情報処理の異なりが現れるかどうか確認した。

**方法** 32名の参加者を募集し、男女16名ずつ(平均年齢25.03歳、標準偏差4.10)が参加し

た。参加者は全員、眼鏡またはコンタクトレンズによる正常視力または矯正視力を有し、右利きで、神経疾患または精神疾患の既往歴はなかった。本実験は、倫理審査番号「人2023-0877」の計画に基づいて実施され、すべての参加者は自らの意思で実験参加に同意し、同意書に署名した。

実験セッティングについては研究1と同様で、課題中に、頭皮上脳波を取得した。基準電極はCzに、接地電極はFpzに配置した。サンプリングレートは1000 Hz、記録波形はハードウェアフィルタでフィルタリングされ、低周波カットオフは0.016 Hz、時定数は10秒であった。各電極のインピーダンスは少なくとも20 k $\Omega$ 未満、典型的には10 k $\Omega$ 未満に維持した。

**頭皮上脳波解析** EEGLAB v14\_1\_1b31, 32, Matlab R2018a (Math-Works, Natick, MA, USA) を使用し、記録された波形に、1 Hzのデジタルハイパスフィルタ、50 Hzと100 Hzでクリーンラインプラグインが使用された。次に、データはセグメントに分けられた。セグメントのゼロ時点は、視覚触覚刺激の開始(0 ms)と定義され、セグメントの範囲は刺激の開始に対して-600~1200ミリ秒であった。独立成分分析(Independent Component Analysis; ICA)により、各参加者63個の独立成分(IC)が取得された。これらのICに対してダイポール推定が行われた。得られたすべてのICのうち、ダイポール推定時の残差分散が15%以下であるICのみ選択し、k平均法を用いてクラスタリングした。各ICの波形の周波数ごとのパワー値は、刺激後-100~800 msおよび3~60 Hzで、Morlet Waveletを用いて計算され、時間周波数マップを可視化した。刺激前50~300 msのパワー値をベースラインとして計算し、刺激後データをデシベルに変換するために使用した。前頭葉クラスタと頭頂葉クラスタの2つのクラスタについて、一致/不一致条件間のERSPの差をクラスタ補正を使用したモン



テカルロパーミュテーション法にて統計検定を行った。

**結果** 一致条件と不一致条件の間には、頭頂葉クラスタにおけるガンマ/シータ帯域のパワーにおいて統計的に有意な差が認められた(図3)。特に、先行研究(kanayama et al., 2007; 2021)では200~400 msの間に認められたガンマ帯域のパワー差は、VRシーン閲覧条件では時間的に遅れて認められた。

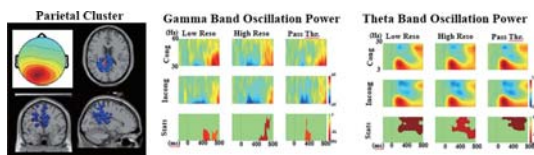


図3 感覚間統合を起こし、VR上の自己身体モデルへの投影を引き起こすと考えられる頭皮上脳波成分

**考察** VRシーンにおいて自分の身体がそこにあると感じる没入感に関連する情報処理を反映すると考えられる脳波成分の計測を試みたところ、先行研究と同様の反応が少し時間的に遅れて出現することがわかった。またこの成分については、解像度を変化させても大きな変化はみられず、映像の解像度に依存しない可能性が高いことが明らかになった。これらの知見から、侵害刺激を用いた実験も、一般に利用されている特別な高解像度出力を持たないコンシューマモデルを用いて検討しても問題ないことが示唆された。

#### 4) VR環境における疑似侵害刺激が惹起する脳波成分の検討

研究1および研究2によって確認した解像度の影響はほとんどないものと考えられることから、特殊な装置ではなく一般によく出回っている機器で、疑似侵害刺激の影響を検討しても、解像度によって臨場感が損なわれたために得られた結果が評価できない可能性は非常に低いことがわかった。よってここではちょうど一般に販売され普及し始めているMeta Quest 3を対象のHMD(25PPD)とした。

**方法** 25名の参加者を募集し、女性10名、男性15名(平均年齢25.04歳、標準偏差6.17)が参加した。参加者は全員、眼鏡またはコンタクトレンズによる視力矯正後、または正常視力を有し、右利きで、神経学的または精神医学的疾患の既往歴はなかった。本実験は、倫理審査番号「ヒ2023-529」の計画に基づいて実施され、すべての参加者は自らの意思で実験参加に同意し、同意書に署名した。

実験は研究2と同等で、LEDの明滅の代わりに注射器のオブジェクトの針部分が、VRシーン中の自身の手にあたるハンドモデルにささる映像に代わったのみであった。視覚刺激と触覚刺激の空間的位置が一致するブロックと不一致になるブロック、また注射器が動かず振動だけ起こる触覚のみ条件、注射器が動くが振動が来ない視覚のみ条件の4条件が、ランダムに提示され、提示順はカウンターバランスが取られていた。参加者は、提示された振動による触覚刺激が人差し指に感じられたか薬指に感じられたかを、ボタンを押して示すように教示された。視覚のみ条件では、動いた注射針をボタン押しで回答した。

実験参加者は、各ブロックの終了後、ラバーハンド錯覚(RHI)に関する主観的な感覚を口頭で報告した。実験参加者は、錯覚体験の強さを1から100の尺度で評価した。質問項目は5つでそれぞれ、項目1「ラバーハンドがまるで自分の手のように感じた」、項目2「注射針がラバーハンドに刺さるとき痛いように感じた」、項目3「注射針がラバーハンドに刺さるとき不快だった」、項目4「自分の手がラバーハンドの位置にあるように感じた」、項目5「自分の手がゴムっぽくなったように感じた」であった。項目1で、どの程度VR上の偽の手を自分の手だと思ったかに関する評価を行い、項目2-3で疑似痛み感覚が起こるかを検討した。

また同時に脳波計測を行った、測定条件、解析は研究2と同様であった。



**結果** 研究1と同様の統計検定を用い、各項目の条件差を確認した。結果項目1では、刺激前に比べ視触覚刺激の空間的位置が一致している条件でのみ、錯覚強度が刺激後に高まった ( $p < .01$ )。このことは、侵害刺激を想起させる映像においても、視触覚刺激の空間的一致による統合処理が、自分がVRの中におり、VRの中のハンドモデルが自分の手のように感じるという没入感を惹起することがわかった。項目2および3については、一致条件と不一致条件の差が統計的に有意となり、一致条件においてより侵害感覚を疑似的に感じる事が明らかになった ( $p < .01$ )。また頭皮上脳波においては、直接的に体性感覚野に対応するクラスタが得られなかったが、頭頂連合野クラスタにおいて、条件の差が有意に見られ、一致条件で最も反応が大きくなった (図4)。

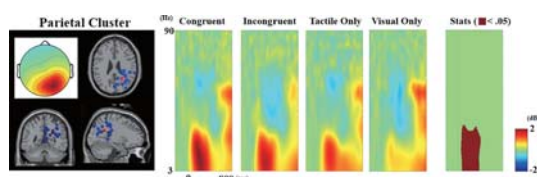


図4 最も疑似痛覚の高かった一致条件でもっとも高まる感覚関連脳波成分

**考察** 項目1におけるVR上のハンドモデル「がまるで自分の手のように感じた」という錯覚が、先行研究や研究1と同様に、空間的一致条件で見られたことは、侵害刺激の臨場感が高まっていることを示している。平均値はちょうど研究1の低解像度条件と同等であり、身体所有感に関する錯覚が再現された。さらに侵害刺激感覚についての項目2も空間的に一致していることで高まることがわかった。これは、VR上の自身のアバターを傷つける体験をする場合、感覚位置情報が適切であるほど、その強度が高まる可能性を示唆している。一方で不快感を洗わず項目3の数値は同様に、一致条件で高まる

ものの、100点中平均で16.5点と非常に低く、ゼロ点も半数近くいたことを考えると、問題にならないレベルといえそうだ。頭皮上脳波計測においても、そもそも侵害刺激に対応すると考えられる部位に信号源を持つ反応は観測されず、その解釈を担うと考えられる部位で条件差が見られたことも直ちに危険の及ばない範囲での臨場感にとどまっている可能性を示唆している。

**結論** VR上での侵害刺激の臨場感を挙げることで、痛みの疑似的な感覚を強めることができる可能性が示されたが、不快感は低く、健康を害さない適切な範囲での刺激にとどめることが十分にできることが示唆された。

#### [成果の発表、論文など]

- N. Kanayama, N. Morishita, Y. Sobue, M. Hara Previous virtual reality experiences impact cortical oscillations during rubber hand illusion in virtual reality environment. 21st World Congress of Psychophysiology, 2023. 6. 26 Geneva.
- N. Kanayama, M. Miyakoshi, M. Machizawa (2023). Evaluation of neural response recorded using scalp EEG in virtual reality environment. 2023 APSIPA ASC (IEEE Xplorer)
- N. Kanayama, N. Morishita, Y. Sobue, M. Hara Impact of visual resolution in VR scene on the sense of body ownership. 27th Association for the Scientific Study of Consciousness 2024, 2024. 7. 2 Tokyo.
- 金山範明・守下奈那・祖父江祐太・原正之 VR 経験がVR空間上の身体認知に及ぼす影響。日本心理学会第88回大会, 2024. 9. 6 (熊本城ホール)
- N. Kanayama, N. Morishita, Y. Sobue, M. Hara EEG responses to visuo-tactile stimulation around body in high-resolution VR scene. Neuroscience 2024. 10. 6 Chicago, USA
- N. Kanayama, A. Imai, T. Tsuchimochi, N. Morishita, Y. Sobue, M. Hara Neural Correlates Correlations of Vicarious Pain Induced by Nociceptive Stimulation Presented on Virtual Avatar. 28th Association for the Scientific Study of Consciousness 2025, 2025. 7. 6 Crete, Greece

## [研究助成 (A)]

## 基盤モデルに基づく手話対話システムの構築

2241011

研究代表者  
(助成金受領者)東京科学大学  
(旧：東京工業大学)

准教授 川 上 玲

共同研究者

東京科学大学

教 授 中 臺 一 博

東京科学大学

教 授 田 中 正 行

東京科学大学

准教授 船 越 孝太郎

## [研究の目的]

日本には約6万から7万人の手話ユーザーがおり、彼らへの技術的な支援の充実が求められている。本助成では、基盤モデルを活用して手話の解析を行い、言語的理解を深めることで、手話を用いる方々をサポートする対話システムの構築に向けた基礎技術の確立を目指す。

手話は、主に聴覚障がい者同士や聴覚障がい者とのコミュニケーション手段として発達し、音声言語とは異なる言語体系を持つ自然言語である。手話は聴覚障がい者がありのままで自由にコミュニケーションができる手段であり、聴覚障がいがある子どもの言語的・社会的発達にも重要な役割を果たすため、できるだけ早期での習得が推奨されている。一方で、手話を話せる（健聴）者は限られているため、たとえば、教育現場や公的機関、道案内など手話が必要とされる場面で、工学的技術がサポートできる部分は大きい。ろう学校の減少に伴い日本手話は消滅の危機にあり、環境整備が急務である。

手話認識は主に自然言語処理よりも画像認識の分野で発展してきたが、これまではグロスという手話セグメント（手話における単語に相当）の認識が主であり、手話ビデオからテキストへの対訳がついたコーパスはドイツ手話やアメリカ手話などの小規模なものに限られていた。

コーパスが小規模なほど翻訳性能が低くなる傾向にあるが、手話データセットで大規模なものは少なく、事前知識を活用しなければ翻訳の性能を実用段階に近づけられない。

そこで、本研究では、手話のコーパス不足を基盤モデル（主に大規模言語モデル）の知識を活用することで補い、手話と音声言語間の変換における基盤技術の構築を目指す。大規模言語モデルのメカニズムの理解は研究の途上であるが、ある程度言語の意味空間を獲得していると考えられ、意味空間を介したテキスト空間と手話の相互変換が学習しやすくなると予想される。

## [研究の内容、成果]

## 手話研究に関する文献調査

手話翻訳、手話生成、および、それらにおける基盤モデルの活用について、現時点での課題を明確化するため、大規模な文献調査を行った。結果を調査論文としてまとめ、出版した[成果1]。論文の特色は、手話の単語認識、翻訳、生成について網羅的に調査している点と、基盤モデルを用いた研究に関する章を設けている点の二点である。

主な知見として、非言語的な手がかりを捉えきれないグロス（単語的）アプローチの限界や、データセット間の大きなばらつきが、頑健な

SLP (Sign Language Production) システムの開発を妨げていることを示した。さらに、評価指標の一貫性がないことを指摘し、手話と言語の両方の特性を考慮した標準化アプローチの必要性を強調した。最後に、既存のデータセットについて、その関連性と手話研究を進展させる可能性を評価した。

大規模言語モデルについては、BERT-style と GPT-style の二種類のアーキテクチャについて調査し長短を論じた。また、言語モデルを利用するものが主流であるが、大規模視覚言語モデルなどマルチモーダルなモデルの利用の可能性についても議論した。手話生成では言語モデルを利用したものはまだ事例がないことから、一般的な動作生成やビデオ生成について調査し、方法論についてまとめた。

#### 大規模言語モデルを用いた手話生成

手話研究の調査 [成果 1] から、手話翻訳と手話生成が独立して研究されていることや、手話生成は手話翻訳に比べて半分以下の研究事例しかないことが判明した。一方で、相互翻訳のためには手話生成に取り組む必要がある。そこで、大規模言語モデル (LLM) を用いた手話生成に取り組んだ。成果は [成果 2] として発表予定である。内容を以下に示す。

これまでの手話生成はグロスを用いるのが一般的であるが、グロスと手話表現が一对一対応でないことから、グロスの正確さに性能が律速されてしまう。また、動作生成では動作を表現するトークンを LLM に推論させ、そのトークンを別のデコーダで動作に変換させるアプローチが性能がよいが [成果 1]、どのように手話動作のトークンを学習すればよいかは自明でない。また、1~2T パラメータ規模の LLM はある程度の手話知識を有していることが事前調査から分かっていたが、これの手話生成への活用は著者らの知る限り試験されていなかった。

そこで、LLM が持つ手話知識と強力な推論能力を活用する手話生成手法 Teach Me Sign

(TEAM-Sign) を提案した [成果 2]。TEAM-Sign は、LLM を活用し、自己回帰的に手話ポーズ列を生成する。具体的には、1~2T パラメータ規模の大規模 LLM (GPT-4o) にプロンプトを与えて、補助シーケンスを生成させる。これを追加学習する数 B パラメータ規模の LLM に補助的に与え、手話とポーズ列の組からなる訓練データから教師あり学習を行う。グロスは用いずにテキストから直接手話を生成するアプローチを選択する。

補助シーケンスには、手話の語順や各単語を表現するのにかかる時間といった情報が含まれており、追加学習用 LLM に正確なステップを教える役割を果たす。手話トークンは、VQVAE (Vector-Quantized Variational Auto Encoder) を用いて、ポーズの再構成を学習させることで獲得する。VQVAE によるトークン学習は動作生成の既存研究に倣っている。

図 1 に手法の概要を示す。事前に、動画から抽出されたポーズ列の再構成を VQVAE で学習しておき、ポーズからトークンのコードを生成するエンコーダ ( $z_e$ )、および、コードからポーズを生成するデコーダ ( $z_d$ ) を得ておく。追加学習 LLM (図 1 の LLaMA) への入力は、翻訳テキスト (図 1 の Text 部分)、補助シーケンス (図 1 の Assistance 部分)、プロンプト (You are a sign language expert. Generate a sequence of number tokens to express the following sentence in {American/German} sign language.), の三つである。

追加学習用 LLM は、正解ポーズ列に対応するコードを予測するように交差エントロピー (CE) 損失で学習を行う。学習には LoRA (Low-rank adaptation) を用い、LLM の重みを凍結させつつ、全体の数 % 程度の学習可能パラメータを追加してそのみを学習させることで学習を効率化する。この学習の際は、VQVAE のエンコーダ、デコーダ、コードは凍結されている。

Phoenix14T (ドイツ手話)、および、How2Sign

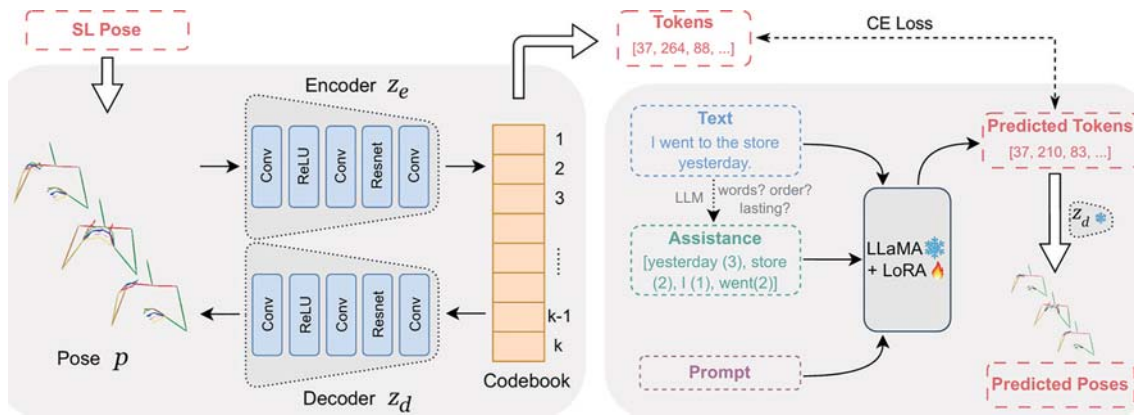


図1 LLMを活用した手話生成手法の概要

Table 1 Quantitative results on Phoenix14T dataset

|                                    | DTW-MJE       | BLEU-1        | BLEU-2       | BLEU-3       | BLEU-4       |
|------------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| PT (w/o data augmentation)         | 0.1383        | 9.583         | 3.787        | 1.642        | 0.692        |
| PT                                 | 0.1276        | 11.388        | 5.782        | 3.569        | 2.077        |
| Proposed - LLaMA3 (w/o assistance) | 0.1204        | 12.861        | 6.105        | 3.719        | 2.636        |
| Proposed - LLaMA3                  | 0.1056        | <b>13.366</b> | <b>6.462</b> | <b>4.239</b> | <b>3.151</b> |
| Proposed - Qwen2 (w/o assistance)  | 0.1051        | 12.950        | 6.129        | 3.865        | 2.813        |
| Proposed - Qwen2                   | <b>0.1038</b> | 13.022        | 6.131        | 4.136        | 3.107        |
| Groundtruth                        | 0.0000        | 30.730        | 20.995       | 15.522       | 12.298       |

Table 2 Quantitative results on How2Sign dataset

|                                    | DTW-MJE       | BLEU-1        | BLEU-2       | BLEU-3       | BLEU-4       |
|------------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| PT (w/o data augmentation)         | 0.1905        | 4.609         | 2.351        | 1.108        | 0.561        |
| PT                                 | 0.1733        | 5.490         | 2.744        | 1.262        | 0.628        |
| Proposed - LLaMA3 (w/o assistance) | 0.1406        | 9.963         | 5.044        | <b>2.476</b> | 1.058        |
| Proposed - LLaMA3                  | <b>0.1371</b> | 10.419        | 5.264        | 2.348        | 1.116        |
| Proposed - Qwen2 (w/o assistance)  | 0.1422        | 9.971         | 5.041        | 2.329        | 1.097        |
| Proposed - Qwen2                   | 0.1397        | <b>10.532</b> | <b>5.278</b> | 2.415        | <b>1.140</b> |
| Groundtruth                        | 0.0000        | 11.230        | 5.469        | 2.500        | 1.228        |

(アメリカ手話) という二つのデータセットで定量評価を行った。先行研究に倣い、DTW-MJE, BLUE- $n$  を評価指標として用いた。前者は、二つの時系列をできる限り揃えたあとに、真値のポーズとの関節間の差の総和を計算する。BLUE- $n$  は生成したポーズを機械翻訳に通し、翻訳された文章の正確さを評価する。生成したポーズ列を翻訳するモデルが公開されていなかったため、これも著者らで実装した。すべてのコードは研究室のウェブサイトで公開予定である。

定量評価の結果を Table 1, および Table 2 に示す。PT (Progressive Transformer) の行は先行研究の結果を示しており、提案法では、

追加学習 LLM に LLaMA3 を用いた場合、Qwen2 を用いた場合の双方で、PT を上回る結果を得た。図 2 は、Phoenix14T と How2Sign での定性評価を示す。視覚的にも、提案法の方が、PT よりも真値の動きに近い。

一方で、翻訳結果の BLUE- $n$  スコアは BLUE-4 で最大で 3 程度であり、実用には不足している。これは、翻訳機の性能によるところもあるが、データセットの性能によって指の表現の正確さが不足している点や、表情が利用できない点も起因している。今後、学習をより大規模化させる必要がある。



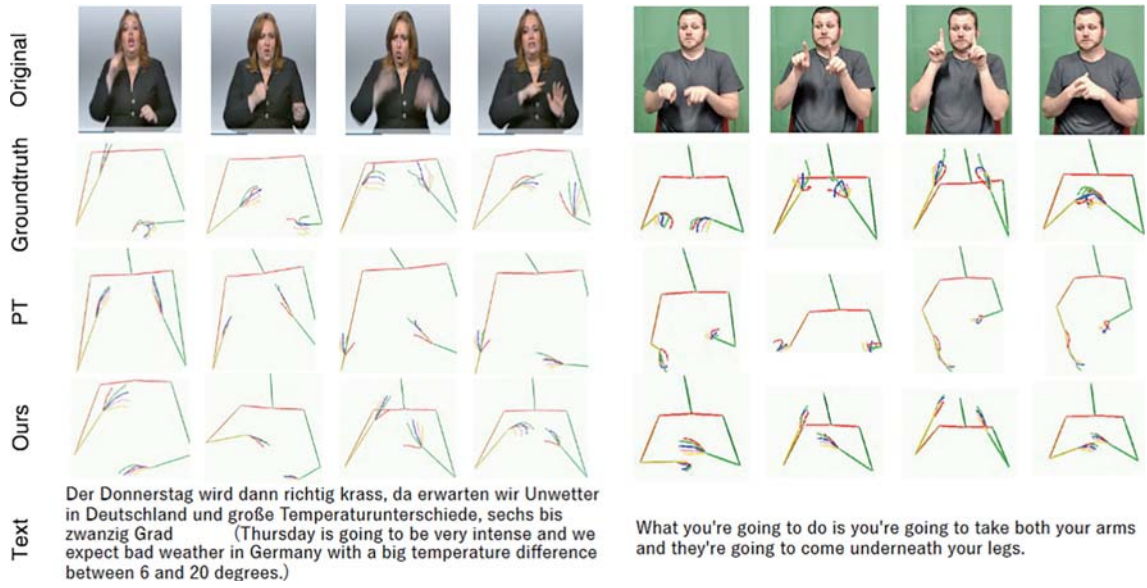


図2 Phoenix14T (左) と How2Sign (右) データセットにおける定性評価

### その他周辺技術の確立

多言語手話翻訳において、Sign2 (LID+Text) という新しい多言語グロスフリーモデルを提案した [成果 5]。トークンレベルの手話言語識別 (Sign2LID) と手話からテキストへの CTC アラインメント (Sign2Text) を組み合わせることで、異なる手話言語間の衝突やアラインメントの困難さを克服している。このモデルは、一対一、多対一、多対多の様々な翻訳シナリオをサポートし、10 種類の手話言語に対応している。

Table 3 に示す通り、Phoenix14T, CSL-Daily で既存の SOTA 手法を上回る性能を示した。また、SP-10 では SOTA 手法に匹敵する

性能を示した。この研究は統一された手話基盤モデルの構築に向けた重要な一歩と位置づけられる。

[成果 5] は、CTC アラインメント [成果 6] に関する知見が活かされている。[成果 6] では、手話ビデオと音声言語間のアラインメントを CTC と Attention の組み合わせによって達成する。CTC と Attention の利用は、一般的な機械翻訳からヒントを得ている。具体的には、エンコーディングの際、グロスの CTC 損失をエンコーダの出力で計算し、テキストの CTC 損失をテキストに翻訳するためのエンコーダの出力で再度計算する。このように段階的に CTC 損失を計算することで、手話における異

Table 3 Experimental results on PHOENIX14T and CSL-Daily dataset for gloss-free SLT (one-to-one SLT)

| Methods                          | PHOENIX14T   |              |              |              | CSL-Daily    |              |              |              |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                  | Dev          |              | Test         |              | Dev          |              | Test         |              |
|                                  | BLEU         | ROUGE        | BLEU         | ROUGE        | BLEU         | ROUGE        | BLEU         | ROUGE        |
| <i>Gloss-free</i>                |              |              |              |              |              |              |              |              |
| NSLT+Luong (Camgoz et al., 2018) | 10.00        | 32.60        | 9.00         | 30.70        | 7.96         | 34.28        | 7.56         | 34.54        |
| CSGCR (Zhao et al., 2022)        | 15.08        | 38.96        | 15.18        | 38.85        | —            | —            | —            | —            |
| GFSLT-VLP (Zhou et al., 2023)    | 22.12        | 43.72        | 21.44        | 42.49        | 11.07        | 36.07        | 11.00        | 36.44        |
| Sign2GPT (Wong et al., 2024)     | —            | —            | 22.52        | 48.90        | —            | —            | 15.40        | 42.36        |
| Fla-LLM (Chen et al., 2024)      | —            | —            | 23.09        | 45.27        | —            | —            | 14.20        | 37.25        |
| SignLLM (Gong et al., 2024)      | <b>25.25</b> | 47.23        | 23.40        | 44.49        | 12.23        | 39.18        | <b>15.73</b> | 39.91        |
| <i>Baseline</i>                  | 22.59        | 49.88        | 22.52        | 49.85        | 12.23        | 36.39        | 11.76        | 36.25        |
| <i>Ours w TxtCTC</i>             | 24.18        | <b>51.74</b> | <b>24.23</b> | <b>50.60</b> | <b>13.66</b> | <b>39.33</b> | 14.18        | <b>40.00</b> |

なる長さの単語や語順の変更に対応できる。定量評価では、特に CSL-Daily で高い性能を示し、SOTA を達成した。

ほかにも、手話翻訳のためのデータ拡張 [成果 7]、手話生成における、Multimodal Gated Attention の利用 [成果 10] や、実時間で手話生成を行う手法 [成果 9]、動きのフレーム補間を行う手法 [成果 4] を開発した。ろう者を招いて、会話のデータ撮影も行い、データセット構築の準備を進めている。学習における基礎技術としては、損失関数が平坦である局所解を探すオプティマイザ向けの交差エントロピー損失を代替する損失関数を提案した [成果 11]。

#### [成果の発表, 論文など]

- [1] Tan, S., Khan, N., An, Z., Ando, Y., Kawakami, R., & Nakadai, K. (2024). A Review of Deep Learning-based Approaches to Sign Language Processing. *Advanced Robotics*, 38(23), 1649-1667
- [2] An, Z., Kawakami, R. (2025). Teach Me Sign: Stepwise Prompting LLM for Sign Language Production. In *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. To appear, Oct. 2025, Anchorage, USA.
- [3] S. Tan, K. Itoyama, & K. Nakadai. (2024). Advancing Human-Computer Interaction: End-to-End Sign Language Translation. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 26(4) pp. 391-398.
- [4] N. Khan, S. Tan, K. Itoyama, K. Nakadai. (2024). Motion Inbetweening Based on Body Parts Integration for Sign Language Generation. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 26(4) pp. 431-442.
- [5] Tan, S., Miyazaki, T., Nakadai, K. (2025). Multilingual Gloss-free Sign Language Translation: Towards Building a Sign Language Foundation Model. In *Proc. of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)* (Acceptance rate ~21%)
- [6] Tan, S., Miyazaki, T., Kahn, N., & Nakadai, K. (2025). Improvement in Sign Language Translation Using Text CTC Alignment. In *Proc. of the 31st International Conference on Computational Linguistics (COLING)*, pp. 3255-3266, Abu Dhabi, UAE, Jan. 2025. (Acceptance rate ~28%)
- [7] S. Tan, T. Miyazaki, K. Itoyama, and K. Nakadai. (2024). SEDA: Simple and Effective Data Augmentation for Sign Language Understanding. In *Proc. LREC-COLING 2024 11th Workshop on the Representation and Processing of Sign Languages: Evaluation of Sign Language Resources*, pp. 370-375, Torino, Italia. ELRA and ICCL.
- [8] N. Khan, S. Tan, K. Nakadai. (2025). Towards Online Sign Language Expression for Real-Time Human-Robot Interaction, *IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, to appear (Aug. 2025).
- [9] N. Khan, B. Wu, C. T. Ishi, and K. Nakadai, (2025). MultiGAU: Real Time Sign Language Generation using Multimodal Gated Attention, *The 38th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE 2025)*, to appear (July 2025).
- [10] Khan, N. & Nakadai, K. (2025). End to End Text to Sign Language Generation using MultiGAU, *IEEE International Conference on Multimedia & Expo (ICME 2025)*, To appear, July 2025.
- [11] Ratchatorn, T., Tanaka, M. (2025). Adaptive Adversarial Cross-Entropy Loss for Sharpness-Aware Minimization. In *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. To appear, Oct. 2025, Anchorage, USA.

## [研究助成 (A)]

## EMS を用いた位置制御・力制御の統合アプローチと制御性能の評価

2241012



研究代表者

東京理科大学 創域理工学部  
電気電子情報工学科

助 教 北 村 知 也

## [研究の目的]

本研究は、筋電気刺激（Electrical muscle stimulation: EMS）を用いた身体制御において、位置制御と力制御を統合的に扱う制御手法を構築し、その妥当性と有効性を検証することを目的とする。EMS は筋に電気刺激を加えることで筋収縮を誘発する技術であり（図 1）、軽量・小型かつ関節近傍に直接作用できる点から、従来のアクチュエータに比して優れた制御特性を持つ<sup>[1]</sup>。また、動作とは位置制御と力制御の重ね合わせであり、モータを用いて人間の動作を再現する場合には位置制御と力制御の両方が性能を向上させることが報告されている<sup>[2][3]</sup>。しかし、既存の EMS 研究では位置制御と力制御を明確に区別せず、筋刺激の設計が経験則に頼ってきた。

たとえば、上腕の屈曲動作では主動筋と拮抗筋が協調して動作を制御している<sup>[4]</sup>。こうした生理的な機構を再現するには、位置制御には拮抗筋の同時刺激を、力制御には単一筋の刺激を適用するなど、制御目的に応じた刺激設計が必

要である。本研究ではこの視点に基づき、EMS による刺激対象筋の使い分けにより、動作の特性がどう変化するかを検証する。

手首関節の単自由度動作を対象とした実験により、位置制御と力制御で再現される動作や感覚の違いを評価し、さらに 3 軸リニアステージを用いた上腕の多自由度運動の抽出と再現を試みる。これにより、制御対象の性質に応じた刺激方法の選択という新たな設計原則を提示する。

## [研究の内容、成果]

## ・研究の内容

本研究では、EMS による位置制御および力制御の統合的な手法を確立することを目的とし、複数の技術的要素を組み合わせたシステムの構築と、2 段階の被験者実験を通じた評価を行った。具体的には、電気刺激回路と 3 軸リニアステージの製作、ならびに 2 種の被験者実験（単自由度・多自由度）を実施した。

まず、EMS 信号の高精度かつ安全な印加を可能とするための電気刺激回路の製作を行った。刺激出力の安定性と双方向性を確保するため、双方向電流供給が可能な H ブリッジ構成と、一定の電流を維持するための定電流回路を組み合わせた設計を採用した。さらに、誤作動や異常動作が発生した際に備えた出力制限機構を回路に実装することで、安全性にも配慮した。回路は電極配置や刺激パラメータの調整を柔軟に行えるように設計した。

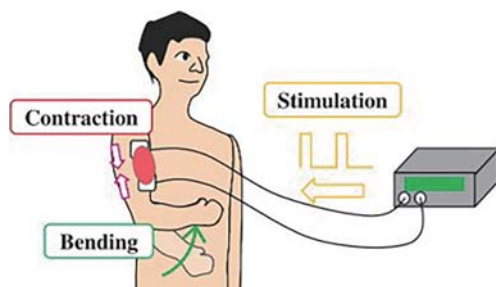


図 1 筋電気刺激の概要

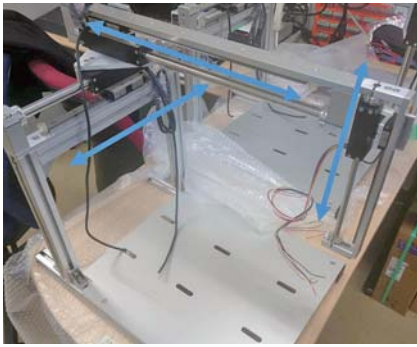


図2 製作した3自由度リニアステージ

次に、人の動作情報を高精度に計測し、かつ力制御によるフィードバックを可能とするために、3軸のリニアステージを製作した（図2）。本ステージは3台のリニアモータを組み合わせて構成され、各軸に独立した制御系を構築した。また、反力推定オブザーバ<sup>[5]</sup>を各軸に実装することで、力センサを用いることなく反力を高精度に推定可能とした。これにより、ステージ全体としての力制御が可能となり、被験者の運動中に生じる力の計測および制御への反映をリアルタイムで行える環境を整備した。

その後、位置制御と力制御の違いによって筋刺激のあり方が変化するかどうかを検証するため、実験Ⅰを実施した。対象とした動作は、手関節の屈曲運動であり、被験者に対してEMSを用いて該当動作を誘発させた。実験では、単一の筋（主動筋）のみを刺激する条件と、主動筋と拮抗筋の両方を同時に刺激する条件を設定し、それぞれを位置制御および力制御の枠組みで比較する形式とした。これにより、刺激方法の違いが運動制御や感覚に与える影響を系統的に分析する体制を構築した（図3）。

さらに、より複雑な運動を対象とした実験Ⅱ

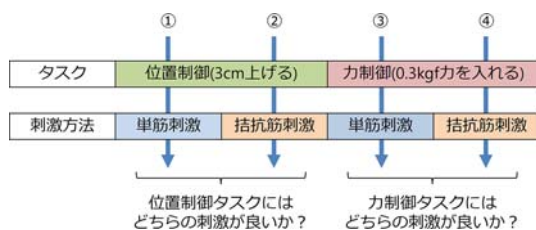


図3 実験Ⅰの検証内容

を実施し、多自由度運動におけるEMS制御の可能性を検討した。実験Ⅱでは、3軸リニアステージを用いて人の上腕における運動軌跡を記録し、そこから抽出された動作情報を基にEMS刺激指令値を生成した。これにより、単一関節ではなく複数関節の連動を伴う運動を、EMSによってどの程度まで再現できるかを評価するための条件を整えた。しかし、後述するようにリニアステージで記録した多自由度の動作をEMSで再現することが困難であったため検証を行うことはできなかった。

### ・研究の成果

本研究では、EMSによる位置制御および力制御の特性を明確に比較するため、被験者実験（実験Ⅰ）を実施した。被験者は健常な20代男性6名であり、すべての実験は東京理科大学の倫理審査委員会による承認を得た上で実施され、事前にインフォームドコンセントを取得した。

実験では、リニアモータを用いて疑似的にバネを再現し、そのバネを電気刺激によって駆動された筋力によって押し込むことで動作を誘発した。被験者には、運動中に筋の随意収縮を行わず、できるだけ脱力した状態を保つよう指示した。運動の種類は、刺激方法（単筋刺激または拮抗筋刺激）とタスクの種類（位置制御タスクまたは力制御タスク）の2×2、計4条件で構成された。

位置制御タスクとは、バネの剛性にかかわらず、関節を常に同じ位置（3cm）まで曲げることを目的とした運動である。一方、力制御タスクでは、常に同じ力（約3N、0.3kgf相当）を出力することで関節を押し込む運動を行う。各条件において、被験者は異なる5種類のバネ剛性に対してEMSにより誘発された運動を体験し、6回目の試行ではEMSを停止した状態で、被験者に自らの意思で同じ動作を再現するように求めた。この6回目のバネ剛性はすべての被験者で100N/mに統一されており、再現性を評価する基準とした。



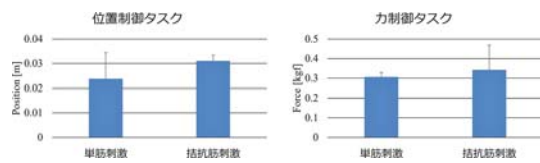


図4 実験Ⅰの実験結果

評価指標としては、6回目の動作と1～5回目における制御目標との乖離を測定し、再現精度を比較した。具体的には、位置制御タスクでは最終的な関節位置と目標位置の誤差を、力制御タスクでは押し込み時の接触力と目標力の誤差を評価指標とした。

実験の結果、位置制御タスクでは拮抗筋を同時に刺激する条件のほうが、単筋刺激に比べて関節位置の再現精度が高いことが確認された(図4)。一方、力制御タスクでは、主動筋のみを刺激する単筋刺激条件のほうが、目標とする力をより正確に再現できる傾向が見られた。すなわち、制御目的に応じて刺激方法を選択することで、EMSによる運動誘発の再現性を高めることができることが示された。

これらの結果は、従来のEMS研究において十分に検討されてこなかった「位置制御と力制御の概念的区別」および「刺激設計の適応的切り替え」の重要性を裏付けるものであり、EMSによる触覚フィードバックの高精度化に向けた技術的基盤を提供するものである。特に、拮抗筋を活用した拮抗駆動による安定した位置制御と、単筋による直感的な力の伝達という二つの特徴は、今後のEMS応用設計において極めて重要な設計指針となる可能性を持つ。

#### ・考察

本研究では、EMSによる制御において刺激方法と制御目標の対応関係を検証した。実験Ⅰの結果から、位置制御には拮抗筋刺激、力制御には単筋刺激が有効であることが示された。拮抗筋刺激による関節位置の再現精度の向上は、関節両側からの制動によって動作が安定するという生理的制御戦略と一致しており、EMSによってその再現が可能である点は極めて意義深

い。一方、力制御では単筋刺激の方が良好な結果を示した。

また、被験者がEMSで誘発された動作を模倣するという課題において、刺激方法が運動の記憶形成や再現性に影響したことから、EMSが力覚フィードバックとしても有効に機能し得ることが示された。これは、VRや遠隔操作における触覚提示への応用にとって重要な知見である。

一方、実験Ⅱでは、EMSによる多自由度運動の再現を試みたが、計画通りの遂行には至らなかった。単自由度制御で得られた知見を拡張するには、上腕全体の複数関節運動を3軸の空間運動に変換する逆運動学的処理が必要であり、加えて各軸の干渉(他軸干渉)も確認された。これらの課題に対処するには、単関節単独の制御を前提としたモデルでは不十分であり、システム全体としてのモデル化と制御系の再設計が必要であることが明らかとなった。多自由度運動への展開は今後の重要な課題である。

#### [参考文献]

- [1] Lopes, P., Baudisch, P.: Immense power in a tiny package: Wearables based on electrical muscle stimulation, IEEE Pervasive Comput., 16, 3, 12-16, 2017.
- [2] Sasagawa, A., Sakaino, S., Tsuji, T.: Motion generation using bilateral control-based imitation learning with autoregressive learning, IEEE Access, 9, 20508-20520, 2021.
- [3] Kitamura, T., Saito, Y., Asai, H., Ohnishi, K.: An Environment-Adaptive Position/Force Control Based on Physical Property Estimation, IEEE Access, 2025.
- [4] Bazzucchi, I., Sbriccoli, P., Marzattinocci, G., Felici, F.: Coactivation of the elbow antagonist muscles is not affected by the speed of movement in isokinetic exercise, Muscle Nerve, 33, 2, 191-199, 2006.

#### [成果の発表, 論文など]

実験Ⅰの成果について、the 12th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2026) @ 韓国に投稿予定。

## [研究助成 (A)]

## 人間機械協調型複合現実融合技術を用いた手術支援基盤技術の開発

2241014



研究代表者

東京大学 大学院医学系研究科  
医用情報工学

特任教授

金 太 一

## [研究の目的]

## 1. 研究の目的と意義

外科手術支援では、仮想空間（医用画像）と現実空間（手術野）との座標系を一致させて両者を比較する必要がある。しかし、両者の性質（解像度や手術進行に伴う変化）が大きく異なるため、AI（人工知能）技術による自動位置合わせは不可能であるといわれている。よって、現状では医師が頭の中で医用画像と手術野との対応関係を推定しており、客観性、他者との情報共有性、および再現性の観点から大きな課題となっている。本研究では人間がインタラクティブにAI処理を修正するという、人間とAIとの協調作業によって仮想空間（医用画像）と現実空間（手術野）とを高精度に空間的に対応付けし、更に現実空間情報を歪ませて仮想空間情報へ融合させるという革新的な複合現実可視化技術を開発する。提案手法によって、人間の最小限の介入によってAIの精度や信頼性が飛躍的に向上し、仮想空間上に本物そっくりの手術野のデジタルツインが構築されるので、これまでになかった革新的な手術支援を提供できる可能性があり、メタバース医療や脳機能解明研究などにも貢献する可能性を有する。

## 2. 研究目標

研究期間中に、人間機械協調型複合現実融合技術を用いた手術支援の基盤技術を開発し、その技術的精度および臨床的有用性を評価する。

そのために下記の5つの技術的課題を解決する。

- ① 医用3次元コンピュータグラフィックス（3DCG）構築；MRIを入力データとして脳3DCGを出力するAIモデルを開発する。
- ② 医用画像と手術野写真との位置合わせ処理；手術野情報（写真）をバッチ処理したAIモデルによって擬似的な非剛体変換として上記①の脳3DCGへ手術野情報を位置合わせする技術を開発する。
- ③ Human-computer interaction技術による位置合わせ補正技術；上記②のAI処理に対して人間のインタラクティブな操作介入を可能とさせるユーザインターフェース技術を開発する。
- ④ 複合現実技術を用いた医用画像と手術野との融合可視化技術の開発；上記③によって座標系が一致した手術野情報と医用画像情報とを複合現実技術を用いて融合し、デジタルツイン手術野を完成させる。
- ⑤ システムの精度検証と臨床評価；脳腫瘍手術症例にて提案システムの精度や臨床的有用性を評価する。

## 3. 本研究の特色・独創的ポイント

- ① 現実空間を歪ませる複合現実技術；現実空間と仮想空間との情報融合に関する先行研究では、両者を変形させないままか、仮想空間情報のみを変形させて融合させる報告はあるが、提案手法のように現実空間を歪ませて仮想空間上で高解像なデジタルツイ

ン手術野を再構築する報告はなく、メタバース医療など様々な用途での活用が見込まれる。

- ② 人間と AI の協調作業による高精度な位置合わせ技術；医用画像と手術野との空間的対応付けは、両者のデータの性質が大きく異なるために、AI による自動処理は不可能とされている。一方で人間が手動的にこの空間的対応付けを実施することはできるが、膨大な時間と手間を要する。提案手法では AI 処理に対して任意のタイミングで人間が介入し、その精度を向上させるものであり、人間と機械の協調処理を活かした独創的な試みである。更にその介入には 2D と 3D の異次元間を dual cursor 法によってリンクさせるというユーザーインターフェース技術を用いる先行研究のない独創的なものである。

#### 4. 学術研究としての位置付け

- ① 複合現実技術による手術支援；類似研究である拡張現実技術（AR）は医用画像を現実空間へ投影する技術であり、対象物の表面に情報が投影されるので、奥行き情報がない。また、対象物の裏側や内部を観察することもできない。提案手法は、現実空間情報を歪ませて仮想空間上で手術検討を実施するもので、どのような角度・視野でも対象物を観察できる独創的な技術であり、研究代表者が所属する研究室以外からの報告は皆無である。
- ② 人間と AI の協調作業による高精度な位置合わせ技術；先行研究の位置合わせ技術としては、自動処理、手動的処理、剛体、非剛体など様々なものが提案されているが、いずれも自動のみ、手動的処理のみ、もしくは両者を交互に独立して行うものである。人間とコンピュータが同時進行的にインタラクティブに共同作業をおこないつつ非剛体位置合わせをする提案手法に類似した技

術は存在しない。

#### [研究の内容、成果]

##### 1. 研究計画

下記の順番通りに実施する。

##### ① 倫理委員会承認（1ヶ月間）

本研究では実際の手術患者のデータを使用するので、研究に先立って東京大学医学部倫理委員会の承認を得る。東京大学医学部附属病院脳神経外科での手術患者から同意を得た医用画像データのみを試料として用いる。本研究で使用する医療情報は、一般の術前検査として必須の CT や MRI などの医用画像データのみを用いるので、今回の研究に対して新たに検査そのものを追加することはなく、研究対象者への侵襲は一切ない。また研究期間中は、本研究成果が実際の医療の診断や治療方針に介入することはない。

##### ② 深層学習技術を用いた医用 3D 画像構築技術の開発（2ヶ月間）

本研究申請者が既に研究開発している深層学習技術を用いた医用画像データからの 3DCG 自動構築法をブラッシュアップして、医用画像データから患者固有の脳 3DCG を出力する深層学習モデル（3D U-Net を改良したアルゴリズムを予定）を開発する。学習データは T1 強調画像データ（約 40000 枚）とし、脳をセグメンテーションした教師データを作成する。更に新規技術として生成 AI（PTNet を予定）を用いた 3DCG のノイズ処理技術も開発する。達成目標は Dice 係数 98% を目指す。

##### ③ 深層学習技術を用いた医用画像と手術野写真との位置合わせ処理技術の開発（2ヶ月間）

現実空間の実際の手術を写真撮影したデータをミニバッチ処理によって数百の正方形の画像データに再分割し、AI アルゴリズム

ム ResNet を用いて、3DCG と位置合わせ処理する。写真データを再分割することによって、擬似的な非剛体位置合わせ処理が可能となる。高精度な位置合わせは困難であることがわかっているので、位置合わせ誤差 3 mm 程度を目指し、下記④の処理によって精度を向上させる。

- ④ Human-computer interaction 技術による位置合わせ補正処理技術の開発（2ヶ月間）  
上記③による手術野写真と脳 3DCG との位置合わせ処理の修正機能として dual cursor 法による支援技術を開発する。Dual cursor 法とは本研究申請者が有している独自技術であり、具体的にはユーザーが手術野写真と脳 3DCG との一致対応点を探索する際に、手術写真上の 2 次元のマウスカーソルと脳 3DCG 上の 3 次元のマウスカーソルとが異次的にリンクして動くことによって両者の一致点を設定する処理を効率化させたユーザーインターフェース技術である。本法を上記③の AI 処理の前後や途中で介入できるようにすることによって位置合わせ精度を向上させる。達成目標は提案手法を用いない AI 位置合わせ処理よりも有意に（2 mm 以上）精度が向上すること、ユーザーの作業時間は 1 分以内、手術野写真と脳 3DCG との最終誤差が 1 mm 以内を目指す。
- ⑤ 複合現実技術を用いた医用画像と手術野との融合 3DCG 構築技術の開発（2ヶ月間）  
上記③④で座標系を一致させた手術野写真と脳 3DCG とを融合可視化する技術を開発する。具体的には上記③④で非剛体変換された手術野写真情報をテクスチャマッピング法を用いて脳 3DCG へテクスチャする。本研究申請者は、本法の先行研究として、AI を用いない用手的な複合現実技術に関して既に複数の論文を報告しており、本研究ではそれを AI と human-computer interaction 技術を用いることによって精

度向上および効率化を目指す。達成目標は提案複合現実 3DCG と実際の手術所見との誤差 1 mm 以内、用手的操作も含めた処理時間が 1 分以内を目指す。

- ⑥ 提案手法を有するアプリケーション開発（1ヶ月間）

上記③～⑤の機能を有するモバイルアプリ（iPad アプリ）を開発し、アプリ上での複合現実 3DCG の回転・平行移動・ズームなどの操作が 30 fps 以上を達成目標とする。

- ⑦ 臨床症例での有用性を確認（1ヶ月間）

上記⑥で開発したアプリを用いて、実際の手術症例を用いて精度と有用性を評価する。脳腫瘍覚醒下手術 3 症例に使用する。医用画像から得られた脳機能情報（言語機能）と手術野の脳を電気刺激して得られた脳機能マッピングの空間的ズレを調査する。精度は 1 mm 以下を目指す。またコントロール群として市販手術ナビゲーションシステムを用いた手術支援と比較し、両者の誤差や有用性を比較する。

- ⑧ 成果取りまとめ（1ヶ月間）

上記研究終了後に成果や課題を取りまとめて、研究期間終了後の更なる研究開発について計画を策定する。

## 2. 成果

計画通りの進捗であり、研究期間中のマイルストーンは全て達成した。研究開発項目毎の進捗は下記の通り。

- ① 倫理委員会

東京大学医学部倫理委員会の承認を得た後に本研究を開始した。

- ② 深層学習技術を用いた医用 3D 画像構築技術の開発

T1 強調画像データからセグメンテーションした大脳の精度は Dice 係数 0.982 であった。生成 AI を用いた 3DCG のノイズ処理技術の精度は Dice 係数 0.962 であっ



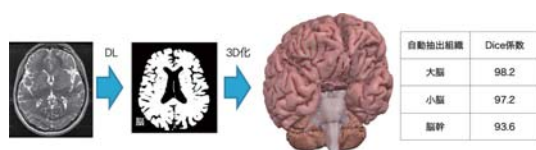


図1 脳自動セグメンテーション

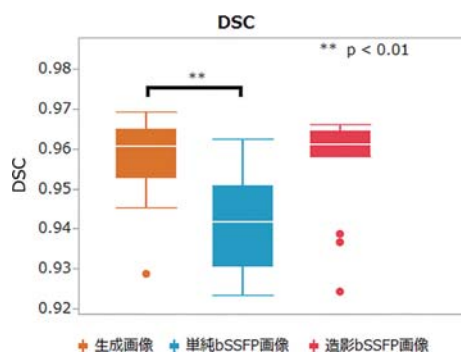


図2 ノイズ（静脈）処理

た。

- ③ 深層学習技術を用いた医用画像と手術野写真との位置合わせ処理技術の開発

AI アルゴリズム ResNet を用いて、手術写真と 3DCG と位置合わせ処理した。精度に関しては下記④に記載。

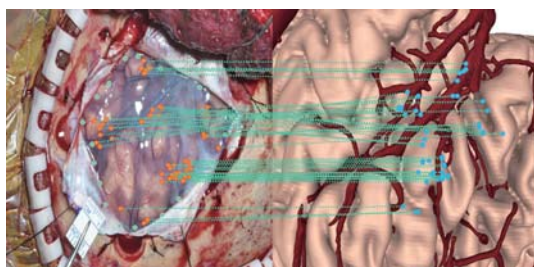


図3 ResNetによるレジストレーション処理

- ④ Human-computer interaction 技術による位置合わせ補正処理技術の開発

手術野写真と脳 3DCG との位置合わせ処理の修正機能として dual cursor 法による支援技術を開発した。10 症例の検討にて誤差は  $1.32 \pm 0.17$  mm (mean  $\pm$  SE) であり、提案手法を用いない AI 位置合わせ処理よりも有意に精度が向上することを確認した。ユーザーの作業時間は 60 秒であった。

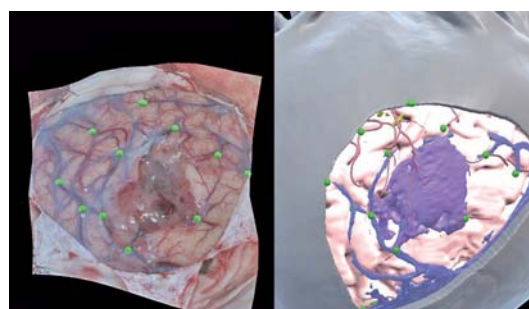


図4 Dual cursor 法による補正処理

- ⑤ 複合現実技術を用いた医用画像と手術野との融合 3DCG 構築技術の開発

上記④で座標系を一致させた手術野写真と脳 3DCG とを融合可視化する技術を開発した。10 症例の検討にて、提案複合現実 3DCG と実際の手術所見との誤差は、 $1.04 \pm 0.14$  mm (mean  $\pm$  SE) であり、手作的操作も含めた処理時間は平均 90 秒であった。

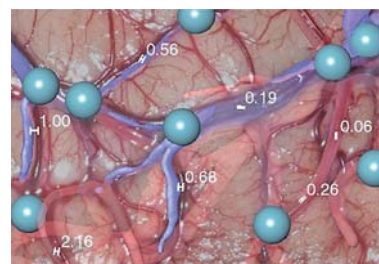


図5 複合現実技術 3DCG

- ⑥ 提案手法を有するアプリケーション開発  
上記③～⑤の機能を有するモバイルアプリ (iPad アプリ) を開発した。アプリ上での

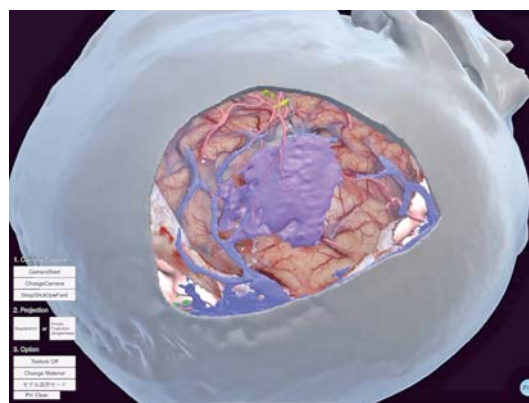


図6 開発したモバイルアプリケーション

複合現実 3DCG の回転・平行移動・ズームなどの操作を実装し、36.2 fps を達成した。

⑦ 臨床症例での有用性を確認

開発したアプリを用いて、脳腫瘍覚醒下手術 3 症例に使用した。開発アプリは実際の手術にて不具合なく使用することが可能であった。腫瘍摘出のための腫瘍境界の同定、脳機能画像との高精度な比較、ブレインシフトに対応した医用画像との高精度な比較が可能であった。



図 7 臨床活用（悪性脳腫瘍）

【成果の発表，論文など】

2025 年 5 月 20 日時点で 2 編の論文を投稿中、1 編を投稿準備中である。本研究に関して学会発表を 2 回実施した。

【論文】

1. 自動セグメンテーション処理に関して投稿中
2. 生成 AI を用いた医用画像ノイズ処理に関して投稿中
3. 臨床的有用性に関して投稿準備中

【学会発表】

1. 「手術検討を中心とした脳神経外科領域における画像処理やその活用」第 15 回お茶の水 Neuroimaging Conference. 8 月 27 日、東京
2. 「Augmented reality and virtual reality in surgical training and practice」JKJC 2024. 9 月 4 日、ソウル

## [研究助成 (A)]

## 災害現場での救援活動を支援する超小型 3 次元再構成センサの開発

2241015

研究代表者  
(助成金受領者)

法政大学

教 授

小 西 克 巳

共同研究者

東京工科大学

講 師

佐々木 亮 平

## [研究の目的]

災害発生時に災害現場の被災状況を早急に把握することは、救援活動における重要課題である。特に人が立ち入ることが困難な屋内等の災害現場では、二次災害を避けるためにも必要不可欠である。近年では、カメラ映像や深度センサ等のセンサ情報から周囲の 3 次元地図を作成する技術が発展してきており、災害現場にドローンやロボットを投入することで 3 次元地図を作成し、災害対応計画を作成することが可能となる。しかしながら、詳細な 3 次元地図を作成するには、カメラを搭載したロボットやドローンが必要となり、コストが高く準備に時間も要するため、実際の災害現場での導入の障壁となっている。そこで本研究では、災害現場に人の手で投げ込むだけで、高精度な 3 次元地図を作成する安価で使い捨て可能な手のひらサイズ以下のボール型 3 次元再構成センサの開発を目指す。災害現場において、人による救援活動、および、人と自律ロボットが協働した救援活動を実現するには、災害現場の詳細な情報を知ることが必要不可欠である。超小型 3 次元再構成センサの実現により、容易に 3 次元地図が作成され、迅速な災害対応計画の立案が可能となる。

本研究で開発を目指す超小型 3 次元再構成センサは、手のひらサイズ以下の小型のボール型カメラで、災害現場に複数個を投げ入れて動画を取得し、その動画像群から超解像度 3 次元地図を生成するものである。本研究の目標は、

ボール型カメラから得られる動画像群から 3 次元地図を作成するソフトウェアを開発するための数理基盤の確立である。カメラ映像のみから 3 次元地図を作成する技術は SLAM と呼ばれ、多くの手法が開発されている。しかし、これらの手法は自動車やロボット等に設置されたカメラで撮影された滑らかに動く映像を想定されている。本研究の目的は、時間方向にも空間方向にも疎にサンプリングされたデータから 3 次元地図を作成する手法の確立である。

## [研究の内容、成果]

## 提案手法の概要

本研究では、災害現場で疎にサンプリングされたデータから 3 次元地図を作成する手法の確立を目指すため、赤外線画像を用いて照明が少ない条件下でも安定した深度補完を行う手法を提案する。RGB ガイド付き手法に着目し、ガイドに RGB 画像ではなく赤外線画像を入力に用いて深度補完手法を構築した。提案手法の全体アーキテクチャ以下に示す。

ネットワーク構造は PENet を参考にし、一

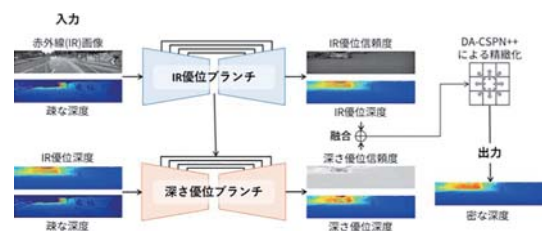


図1 提案手法のアーキテクチャ

方のブランチを赤外線情報に依存した深度を予測する IR 優位ブランチとすることで赤外線画像をガイドに用いた補完を実現した。具体的には、入力チャンネルを RGB+深度の 4 チャンネルから赤外線+深度の 2 チャンネルに減らし、計算の効率化を図った。また、実際のハードウェアに組み込まれることを想定して、実行時間の短縮を目指している。学習データには、深度のグラントゥールスおよび赤外線画像を使用した。実験では、様々な照明条件下で取得されたデータセットを用いて、既存の RGB ガイド付き手法との精度および実行時間の比較を行い、本手法の優位性を示した。

## 2 分岐バックボーン

2 分岐バックボーンは、それぞれのブランチから得られる IR（赤外線）優位の情報と深さ優位の情報を徹底的に利用し、2 つのモダリティの融合を効果的に行う方法である。2 つのブランチでは、同様なエンコーダ・デコーダネットワークを構築し、IR 優位の深度予測と深さ優位の深度予測を行う。IR 優位のブランチは、まず赤外線画像から高密度の深度マップを予測することを目的とする。深度予測の有効性を高めるために、疎な深度マップも入力される、このブランチは、スキップ接続を持つエンコーダ・デコーダ構造のネットワークである。エンコーダは 1 つの畳み込み層と 10 個の基本残差ブロック、デコーダは 5 つの逆畳み込み層と 1 つの畳み込み層を持つ。すべての畳み込みの後に BatchNorm と ReLU を行う。このブランチには赤外線画像と疎な深度マップの両方が入力されるが、このブランチは深度予測のために IR 優位の特徴を抽出し、赤外線画像の構造情報を利用してオブジェクト境界付近の深度を学習できるようにする。深さ優位のブランチは、まず疎な深度マップをアップサンプリングすることで、密な深度マップを予測することを目的とする。このブランチでは、同様のエンコーダ・デコーダネットワークが構築される。さら

に、このブランチに IR 優位ブランチの特徴量を融合させる。具体的には、IR 優位ブランチのデコーダ特徴を深さ優位ブランチの対応するエンコーダ特徴と連結する。さらに、IR 優位ブランチで得られた深度予測結果もこのブランチに入力される。このようにして赤外線と深度の特徴が複数の段階で融合される。最後に 2 つのブランチで予測された密な深度画像を融合する。

## 幾何学的畳み込み

提案手法では、先行研究と同様に 3D 幾何学的情報を符号化するために幾何学的畳み込み層を採用している。この手法によって、カメラ座標における 3 次元位置をレイヤーの入力に連結することで、従来の畳み込みレイヤーを単純に補強することができる。位置マップ (X, Y, Z) は、元の疎な深度マップから導出される。この手法により、3 次元幾何学的情報を 2 つのブランチ特徴により効率的に符号化することができる。

## CSPN++ の拡張と高速化

深層ニューラルネットワークによって生成された深度画像は、入力深度値があるピクセルにおいて入力値を保持しない可能性がある。SPN は有効なピクセルにおける深度値を回復するために隣接画素間の親和性を学習することで、推定された深度画像の精緻化を行う。本手法では、SPN に基づく畳み込み精緻化手法である CSPN++ を採用し、バックボーンによって予測された深度マップを改良する。さらに、CSPN++ をベースにより効率を上げるための伝播近傍の拡大と伝播の並列実装を行い、伝搬手順を大幅に高速化した DA-CSPN++ を採用する。

## 実験

### ・環境

実装は Pytorch で行い、NVIDIA GeForce



RTX 3090 で学習を行った。オプティマイザには Adam を用いた。PENet, 提案手法は重み減衰は  $10^{-6}$  とする。バッチサイズ 6, 初期学習率 0.001, 10 エポックで学習する。画像を  $576 \times 288$  にランダムクロップする。モデルの学習には約 20 時間を要する。

#### ・学習方法

ネットワークのトレーニングには、データセットから取得したガイド画像と深度画像を使用する。ガイド画像にはカラー画像、モノクロ画像、赤外線画像を用いる。疎らな深度画像は、従来の研究と同様にグラントゥルースの有効画素から 70% の画素を欠損させて生成する。疎らな深度画像には 1.25%, グラントゥルースには 4.17% の有効深度値が含まれている。

#### ・データセット

提案する方法でネットワークを学習するためには、同一シーンで撮影された RGB, 深度, 赤外線データを含むデータセットを必要とする。提案手法が Visual SLAM や行動認識などのタスクに応用されることを想定し、本研究では ViViD++ データセットを使用する。

#### ・ViViD++ データセット

ViViD++ データセット [6] は、ロバストな Visual SLAM を開発するために作成され、手持ち式または自動車のセンサーから、異なる条件で繰り返し記録されたデータセットである。センサーは RGB, 赤外線, 深度, イベント (輝度の瞬間的な時間変化) を測定することで、可視光強度に左右されないデータを得ることができる。データセットは、異なる照明条件をもつ屋内シーケンスと屋外シーケンスを持つ。

#### ・データセット生成

ViViD++ データセットは ROSbag 形式で提供されているため、前処理を行い点群データから学習データセットとテストデータセットを生成する。まず LiDAR による点群データをカメラ行列, 歪み行列を用いて変換し, カラー画像または赤外線画像とマッチする深度画像を生成する。その後リサイズとクロップを行う。

具体的には  $1/2$  にダウンサンプリングした後,  $640 \times 320$  にクロップする。本研究で使用する屋外データセットには 8 シーン 55987 フレームが含まれ, そのうち 44782 フレームが学習データに, 11205 フレームがテストデータに用いられる。また, 使用する全 8 シーンのうち昼に撮影された 4 シーケンスを昼間シーン, 夕方と夜間に撮影された 4 シーンを夜間シーンとし, 各シーンのみでも実験を行う。

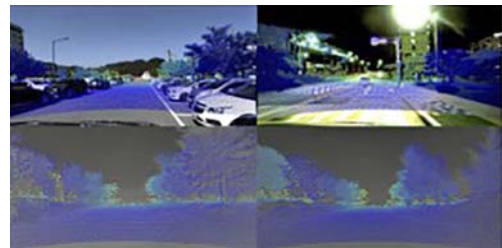


図2 ViViD++ データセットから生成した深度画像

#### ・評価指標

性能の評価は, PENet をはじめとした多くの論文で採用されている KITTI 深度補完ベンチマークと同じく, 平均二乗誤差 (RMSE), 平均絶対誤差 (MAE), 平均相対誤差 (REL) の 3 つの指標を採用する。

#### 実験結果と考察

実験における定性的結果を図 3 と図 4 に示す。左から順に, ガイド画像, 疎な深度画像, 補完した深度画像, グラントゥルースである。これらの図から分かるように, どちらの手法も極めて少ない深度情報から, ガイド画像に従って深度補完が行えていることがわかる。しかし, どちらの結果も空などの深度が欠落している領域にノイズが発生している。この原因は, 使用したデータセットのデータ数や深度サンプル数が少なかったことだと考えられる。深度補完分野の研究に広く用いられている。KITTI 深度補完データセットに含まれる有効画素の割合は約 16% であるのに対し, 本研究で作成した深度画像は 4.17% である。また, KITTI データセットのデータ数は約 9.5 万であるのに対し,

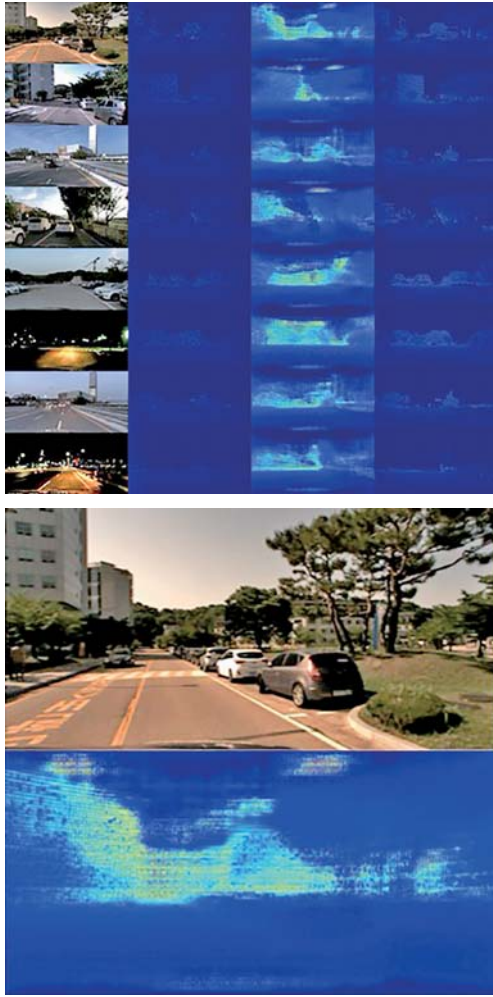


図3 定性的結果 (PENet, RGB)

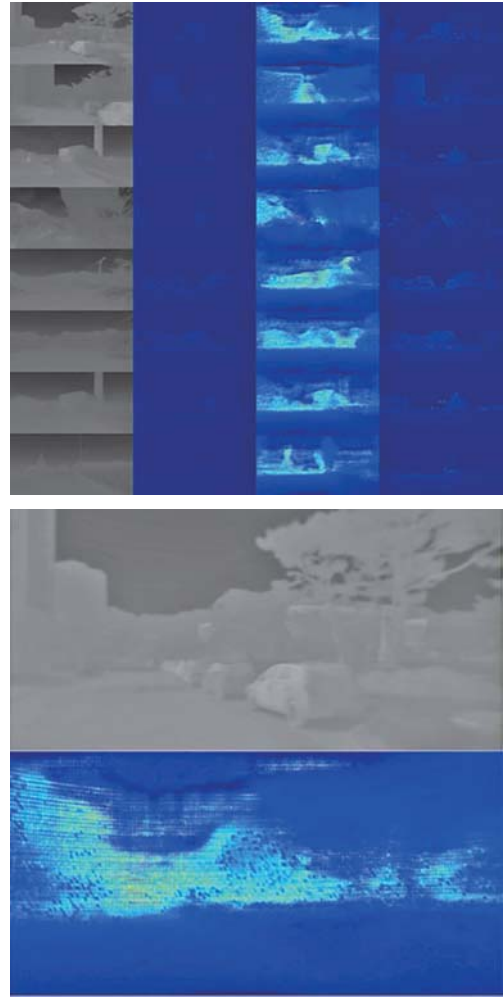


図4 定性的結果 (提案手法, Thermal)

作成したデータセットのデータ数は約5万である。したがって、ノイズの少ない補完を行うためには、より高密度なデータセットを用いる必要があると考察する。

実験における定量的結果を表1に示す。RMSEにおいては、どのシーンにおいても赤外線を入力した提案手法が最もよい結果を示している。カラー画像を入力したPENetと比較すると昼間のデータでは7.18%，夜間のデータでは8.75%，全体では7.93%RMSEが改善した。しかし、MAEおよびRELでは、どのシーンにおいても赤外線を入力したPENetが最もよい結果を示している。MAEやRELと比較して、RMSEは外れ値に左右されやすい性質がある。このことから、提案手法における結果はPENetと比較するとノイズが多く発生してい

表1 定量的結果

| シーン | 手法    | 入力      | RMSE ↓         | MAE ↓          | REL ↓        | sec/itr      |
|-----|-------|---------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| 全て  | PENet | RGB     | 924.663        | 251.880        | 0.043        | <b>0.020</b> |
|     |       | GRAY    | 930.393        | 251.220        | 0.042        | <b>0.020</b> |
|     |       | Thermal | 853.985        | <b>230.731</b> | <b>0.038</b> | 0.024        |
|     | 提案手法  | GRAY    | 915.527        | 246.907        | 0.044        | 0.023        |
|     |       | Thermal | <b>851.344</b> | <u>233.865</u> | <u>0.040</u> | <u>0.022</u> |
|     |       |         |                |                |              |              |
| 昼間  | PENet | RGB     | 888.982        | 245.666        | 0.045        | <u>0.020</u> |
|     |       | GRAY    | 891.149        | 244.817        | 0.044        | <b>0.019</b> |
|     |       | Thermal | <u>827.432</u> | <b>226.792</b> | <b>0.040</b> | <u>0.020</u> |
|     | 提案手法  | GRAY    | 874.117        | 240.801        | 0.046        | <u>0.020</u> |
|     |       | Thermal | <b>825.171</b> | <u>230.198</u> | <u>0.042</u> | <b>0.019</b> |
|     |       |         |                |                |              |              |
| 夜間  | PENet | RGB     | 967.145        | 259.279        | 0.041        | <b>0.020</b> |
|     |       | GRAY    | 977.116        | 258.820        | 0.040        | <b>0.020</b> |
|     |       | Thermal | 885.599        | <b>235.421</b> | <b>0.035</b> | <b>0.020</b> |
|     | 提案手法  | GRAY    | 964.830        | 254.175        | 0.042        | <b>0.020</b> |
|     |       | Thermal | <b>882.505</b> | <u>238.229</u> | <u>0.038</u> | <b>0.020</b> |
|     |       |         |                |                |              |              |

と考えられる。しかしながら、どの誤差指標でも赤外線を入力に用いたモデルが最もよい結果であり、ガイド付き深度補完における赤外線情報の有用性を示しているといえる。

#### むすび

本研究では時間方向にも空間方向にも疎にサンプリングされたデータから3次元地図を作成する手法の導出を行なった。災害現場で疎にサンプリングされたデータから3次元地図を作成する手法の確立を目指すため、赤外線画像を用いて照明が少ない条件下でも安定した深度補完を行う手法を提案した。

赤外線カメラからの画像と、それに対応した低密度の深度データを入力し、高密度の深度データを推定する深層畳み込みニューラルネットワークの実装を行った。提案手法は、2つのオートエンコーダから深度を推定するPENetに照明条件にロバストな赤外線情報を入力することで、撮影時のシーンの照明に左右されない深度補完が可能となる。実験結果から、赤外線

画像を用いた深度補完手法は、カラー画像を用いたものよりも高い精度を達成した。特に、夜間のデータにおける補完では、昼間のデータの結果と比較して精度の改善率が高くなる結果となった。今後の課題としては、ノイズの発生を抑え、赤外線情報を最大限に利用するために、学習率などのパラメータの修正や多様で広範なデータセットを使用する必要がある。加えて、他のネットワークを適用することや、赤外線以外のモダリティを利用することも検討の余地がある。本研究により、照明条件に影響されずに深度補完を行うことが可能となる。この手法をハードウェアに組み込むことにより、暗所での深度測定がより正確になり、ロボットやドローンの物体検知システムなどでの活用が期待される。

#### [成果の発表、論文など]

清水大輔，小西克巳，“赤外線画像を用いた照明条件にとられない深度補完”，電子情報通信学会総合大会，2025年3月

## [研究助成 (A)]

ワイヤメッシュ回路と深層学習の融合による  
シート型触覚インターフェースの開発

2221015



研究代表者

秋田工業高等専門学校  
創造システム工学科  
電気・電子・情報系

講 師

佐 藤 貴 紀

## [研究の目的]

ヒトが身に着けることによって失った・衰えた身体能力を再生・補助するウェアラブルロボットの開発は、介護やリハビリテーションの必要な高齢者や障がい者の自活や社会復帰を促進し、少子高齢化による人手不足、要介護者の増加による介護者不足の両問題を一挙に解決し得る重要な課題である。日常的に着用可能で個人で所有可能なウェアラブルロボットの実現のためには、生体親和性の高い柔軟・軽量の素材で構成され、安全性とメンテナンス性のために比較的単純な構造であることが望ましい。本研究では、機械的構造を持たない次世代の動力として期待されているソフトセンシングアクチュエータに着眼した。ソフトセンシングアクチュエータとは柔軟・軽量のシート状の圧電素材で、触覚センサ機能とアクチュエータ機能を併せ持つソフトマテリアルである（図1）。理論的に

はシート面上のあらゆる部位にセンサ・アクチュエータ機能が偏在していることから、シート材のみでロボットを構成することが可能である。

本構想の問題は、ソフトセンシングアクチュエータのシート面上に偏在する機能を空間分解して計測・制御する技術が未だ存在しないことである。現状のソフトセンシングアクチュエータはシート全体を1つのセンサ・アクチュエータとした利用しかされておらず、シート面上に偏在する機能を活用しきれていない。

本研究では特にセンサ機能について、シート面内を空間分解して多チャンネル計測する手法と、多チャンネル計測値から応力分布を推定するシステムの検討を目的とする。

## [研究の内容、成果]

## 1. ワイヤメッシュ回路による多チャンネル計測

通常のソフトセンシングアクチュエータでは、シート面全体を電極で挟み込む構造をしていることから、面上のどの位置を刺激しても面全体で1chの計測となる。本研究では、ワイヤメッシュ回路を用いたシート面内の多チャンネル計測を検討した。ワイヤメッシュ回路とは計測試料を縦横のワイヤ状電極で挟み込む構造で、縦横のワイヤの組合せを切り替えながら計測することで、各メッシュ交点位置における値の計測が期待できる。

測定対象として高分子圧電素子であるピエゾ

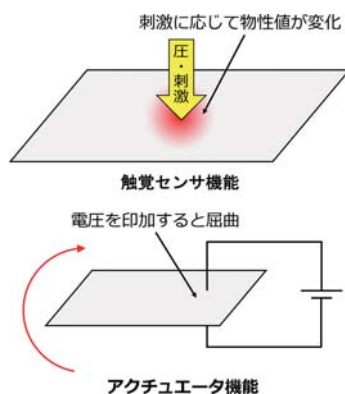


図1 ソフトセンシングアクチュエータの概略図



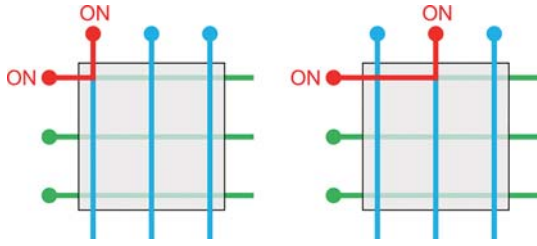


図2 ワイヤメッシュ回路の概略図

フィルムシート (20  $\mu\text{m}$  厚, 5 cm $\times$ 5 cm, 電極なし) を, ワイヤ状電極として銅テープ (1 cm 幅) を使用した。ワイヤメッシュ電極間の計測にはマルチファンクション I/O デバイス (USB-6229-BNC, National Instruments) を使用し, 電極間の電圧の経時変化を計測した。

ワイヤメッシュ電極によって任意の位置の計測が可能であることを検証するために, 1 $\times$ 1 ch の電極構造での計測を行った。シート形状が変形しない条件下で刺激 (硬い台上で圧力を印可) した場合は, 刺激位置にかかわらず計測信号に変化は見られなかった。一方, 形状変形を伴う刺激 (柔らかいスポンジ上で圧力を印可, 曲げ等) の場合には計測信号に変化が見られたが, 刺激に対して再現性のある信号変化は得られなかった。

## 2. 深層学習による分布推定シミュレーション

ワイヤメッシュ回路の計測値からメッシュ交点部位の値を推定可能であることを検証するために, 図3に示す2 $\times$ 2 ch のワイヤメッシュ回路で抵抗値計測を行った場合のシミュレーションを行った。

ワイヤメッシュ回路で計測される4 ch の抵

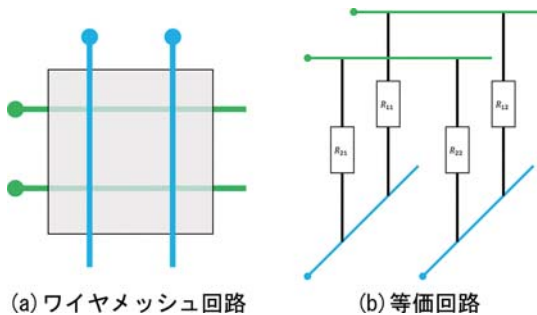
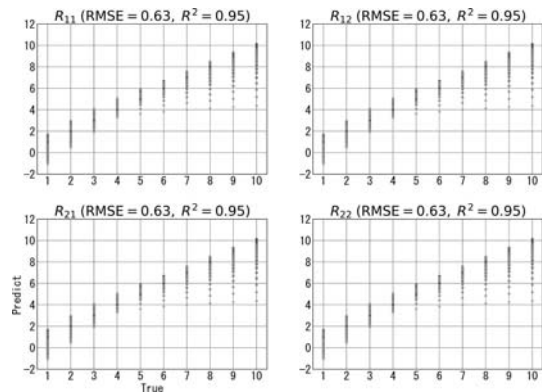


図3 部位抵抗による等価回路

抗値ベクトル  $\mathbf{Z}$  は, 4つのメッシュ交点部位抵抗値ベクトル  $\mathbf{R}$  の合成抵抗である。刺激に応じて  $\mathbf{R}$  が変化すると仮定して,  $\mathbf{R}$  と  $\mathbf{Z}$  のシミュレーションデータセットを作成した。計測値  $\mathbf{Z}$  から部位抵抗値  $\mathbf{R}$  の推定には, 一般線形モデル (GLM: General Linear Model) と多層パーセプトロン (MLP: Multi-Layer Perceptron) を使用し, 推定精度を比較した。

図4, 5に訓練データにおけるGLMとMLPの推定結果を, 図6に両手法の推定誤差 (RMSE: Root Mean Squared Error) の比較を示す。図4, 5より, GLMの推定では真値から大きく外れる推定結果があるのに対して, MLPではどのデータセットでも高精度に推定できていることが分かる。また, 図6に示すように, 推定誤差の平均も分散もMLPの方が顕著に小さかった。

線形モデルであるGLMでの推定誤差が大き



(横軸: 真値, 縦軸: 推定値, 赤丸: 真値)

図4 GLMの推定結果 (訓練データ)

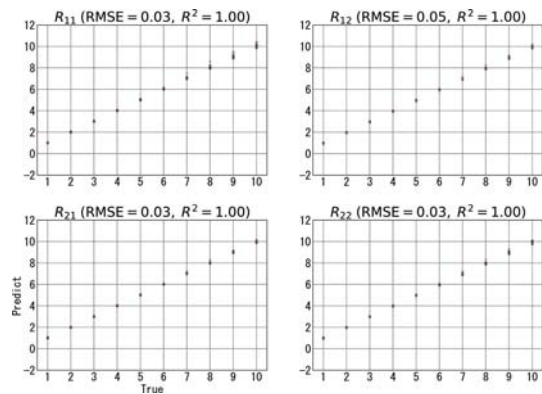


図5 MLPの推定結果 (訓練データ)

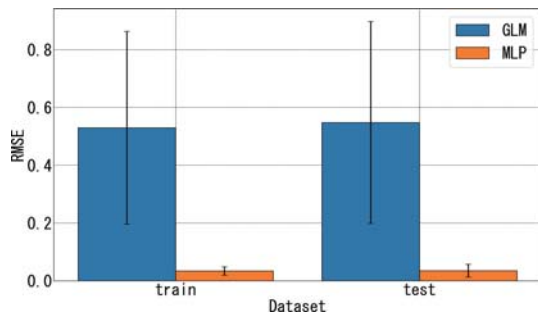


図6 GLM, MLP の推定誤差の比較

いことから、計測値  $Z$  と部位抵抗値  $R$  の関係性は非線形であることがわかるが、MLP を用いることで非線形モデルも高精度に推定可能であることが確認できた。

#### [今後の研究の方向性, 課題]

piezofilmシートに対して1×1 chのワイヤメッシュ回路による電圧計測を行ったところ、再現性のある計測方法・計測条件を同定することができなかった。今後は、シート面の法線方向への感度がより高いシート材の検討、抵抗値・静電容量等の別の物性値特性計測等により、引き続きワイヤメッシュ回路による計測方法・計測条件の確立を目指す。

ワイヤメッシュ回路による抵抗値計測を想定したシミュレーションによって、MLPを用いることで非線形な関係にある計測値と部位値も高精度にモデル化可能であることが示唆された。今回は単純な抵抗としてシミュレーションを行ったが、今後は実際の測定試料のデータシートをもとにしたシミュレーションを行うことで、最適なシート材・計測手法・計測条件の検討や、シミュレーションデータによる訓練データの拡張の検討を行う予定である。

## [研究助成 (A)]

## マイクロモータを用いた触覚情報伝達インタフェース

2231016



研究代表者

岡山大学 学術研究院  
環境生命自然科学学域

准教授

芝 軒 太 郎

## [研究の目的]

近年、VR 技術の発展はめざましく、エンターテインメントや教育、医療などの幅広い分野で活用が期待されている。人は視覚、聴覚、味覚、嗅覚、触覚などの多種多様な感覚器を用いて外界のさまざまな情報を取得しているがその大部分を視覚と聴覚に依存している。そのため、例えば VR 体験において、主にヘッドマウントディスプレイなどを使用した視覚刺激や聴覚刺激が利用されているが、近年の VR 技術の発展に伴い、触覚情報伝達に関する検討がさまざま行われるようになってきている。

触覚には主に筋、腱、関節などで起こる深部感覚と皮膚表面で起こる皮膚感覚があり、皮膚感覚には触覚、圧覚、痛覚、冷覚、温覚などが存在する。本研究では主に皮膚感覚、その中でも触覚と圧覚に着目する。従来、指先へ圧力を生じさせることを目的とした研究や、指先表面の接線方向へ動作を生成する研究などが行われてきた。また、Peizhi らによって全方向への連続的な移動を指先にフィードバックするデバイスや、Samuel らによる指腹面に 3 自由度の力覚提示を実現するデバイスなどが開発されており、重量、摩擦、剛性などの情報を複数の方向に提示できている。Maeda らは 2 個の DC モータを駆動に用いる 2 つの回転軸で指側面を挟み込み、さらに爪側に振動モータを配置したデバイスを開発し、指側面のモータと爪側のモータの動作を組み合わせることで粗さなどの

表面の質感からスイッチなどの機械的な感覚までを提示可能なデバイスを開発している。このデバイスは、指腹面が開放されているため、タッチパネルとの併用ができるなどの利点がある。しかしながら、これらの研究ではデバイスの機構が複雑でありアクチュエータの数も多くなる傾向にあり、開発コストが高くなってしまいう課題があった。

本研究では、単純な構造で複雑な指先触覚を再現可能な新たなフィードバックデバイスの開発および、指先感覚の再現を目的とする。

## [研究の内容、成果]

## 1. デバイス設計のコンセプト

本研究では、複雑な触覚を再現するために主に指先で物体を押したときなどに感じる圧力、物体表面をこすったときの摩擦力、指先に伝わる微細な振動情報の伝達を行う。この 3 つの組み合わせにより、まず複雑な触覚を指先に再現することを試みる。

本研究で開発するデバイスは指先に装着できる程度に小型であり、かつ、操作者の動作を制限しないよう、軽量である必要がある。製作の難易度やコスト、メンテナンス性を考慮すると、アクチュエータやセンサの数は少なく、構造として単純であることが望ましい。

そこでまず、2 種類の回転軸を指先の上下に配置し、圧力、摩擦力、振動などの情報を提示する構造を検討した (図 1 参照)。図 1 左に示

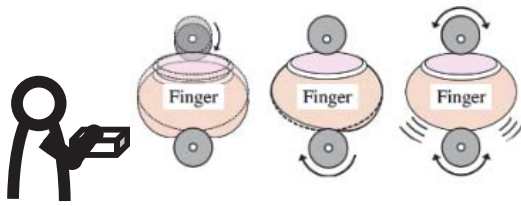


図1 触覚フィードバックデバイスの開発コンセプト

すように、爪側の回転軸を偏心軸とし、軸を回転させることで指を指腹面側の軸へ押しつけ可能とした。各回転軸で指先を挟み込むことで鉛直方向への圧力を提示できる。指腹側の回転軸の回転運動を行うと図1中央のように指腹面へ摩擦力を提示可能である。また、図1右のように、各回転軸の往復運動により微細な振動情報を提示できる。この構造では指腹面を完全に覆ってしまうデメリットが存在するものの、指腹面に対して正確に触覚を提示できるメリットがある。ここで、駆動軸に採用するアクチュエータとしては小型軽量で発生トルクの大きいものが望ましい。そこで、アクチュエータとして市販のマイクロ DC モータとマイクロステッピングモータ、およびマイクロ超音波モータを開発し検討を行った。図2には開発したマイクロ超音波モータの外観を示す。本報告では主に定格電圧 3 V、直径 8 mm のバイポーラスステッピングモータを使用した際の結果について述べる。ステッピングモータには減速比約 100 の金属ギアのギアボックスを装着しており、フィードフォワード制御によって各軸の回転角を制御可能である。

次に、開発した触覚フィードバックデバイスの詳細と制御法について述べる。

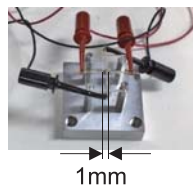


図2 マイクロ超音波モータ

## 2. マイクロ触覚フィードバックデバイス

図3は、触覚フィードバックデバイス実際の写真である。指に装着する部分の大きさは幅 25 mm であり、高さとお行きが約 35 mm である。爪側の偏心軸の回転軸が 0.75 mm 偏心しており、最大で 1.5 mm の変位を発生させることができる。ギアボックスに指先が干渉しないように直径が 13.5 mm となっている。指腹側の軸は底面の直径が 11 mm、側面と中心軸のなす角が  $20^\circ$  である先端を丸めた円錐形としている。また、ギアボックスの出力軸の軸間距離は 20 mm である。各パーツは素材に PLA を用い、3D プリンターで制作した。指先に装着する部分の重量は約 25 g となった。各モータの制御にはマイクロコントローラ、モータドライバを2つ用いることとし、電源は充電電池を使用し約 3.2 V をマイクロコントローラとモータに供給する。また、Bluetooth によるシリアル通信で PC と接続し、各モータの動作を任意に制御可能とした。

2つのステッピングモータは周期と振幅を指定し、独立制御することができる。触覚を提示する開始および終了時間を同時に指定できるため、各制御パターンを自由に制御できる。例えば圧力を提示する場合、爪側の回転軸の回転量  $\theta^\circ$  (偏位量  $x$  mm)、摩擦力提示では指腹面側の回転方向と回転角速度  $\theta^\circ/\text{s}$ 、微細な振動提示では各軸往復回転運動の角速度および周期  $T$  s を、任意のタイミングで任意の時間制御可能である。

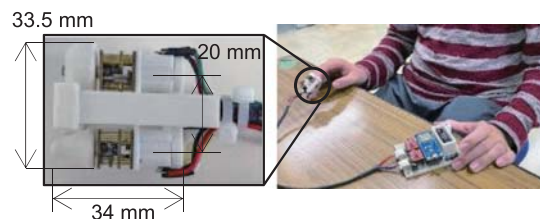


図3 触覚フィードバック装置の外観と詳細



### 3. 小型触覚フィードバックデバイスの検証

#### 3.1. 振動パラメータの決定

開発したデバイスを用いて指先に物体表面の微細な情報を提示するためには、指先への提示振動を適切に設定する必要がある。そこでまず、往復回転運動の振幅を一定にしてその周期を変更した場合と、周期に比例して振幅を大きくした場合との比較を行った。振幅一定の検証において、振幅は約 0.027 mm、振幅が周期に比例する場合では、周期が 10 ms のとき 0.013 mm、90 ms のとき 0.12 mm である。いずれの場合でも周期を 10 ms から 90 ms まで 10 ms ずつ刻んだ 9 段階をランダムで提示する。

被験者には振動の提示ごとにどのように感じたかを 0：ほとんど振動を感じない、1：かすかに振動を感じる、2：はっきり振動を感じる、3：強い振動を感じる、4：揺れを感じる、の 5 段階で評価するよう指示した。

図 4 は各パラメータで最初に提示された 10 回分の結果の平均である。図の左側は振幅一定の結果であり、周期が大きくなるに連れて振動を感じにくくなることがわかる。図の右側は振幅が周期に比例している場合の結果であり、周期が短い方が振動を感じにくい傾向にある。このとき、周期が長い場合でも (a) と異なり振幅も大きくなるため、振動を感じなくなることはなかった。周期が短くなると振幅一定の場合振動は感じやすくなるが、振幅が周期に比例する場合、振幅も小さくなるので感じにくくなる。

振幅や周期が大きいと粗さなどの表面感覚を提示するための振動としては適さない。また、ステッピングモータの性能上振幅一定のまま周期を短くすると必要な回転速度に届かず脱調し

てしまい、正しく振動を発生させられない。これらの結果より、物体の表面質感の提示に、20 ms～30 ms 程度の周期振動を用いることとした。

#### 3.2. 機械的な触覚提示の評価

まずスイッチなどの機械的動作を再現可能か評価するため、被験者 4 名 (27.75±5.93 歳) を対象に実験を行った。この実験では 2 種類のスイッチ：垂直に表面を押下するスイッチおよび、左右に切り替えるスイッチの動作を提案デバイスで再現する。(a) では、仮想空間内でオブジェクトに触れた際、偏心軸を圧力を加える向きに 150 ms 回転させ、離すとき同じ時間逆方向に回転させる。(b) ではスイッチを操作する方向に合わせて 200 ms 間下側の軸を回転させる。また、それぞれのスイッチの触覚提示中に周期 30 ms の振動提示を発生させた際の比較を行った。

図 5 は実験風景である。被験者は利き手の人差し指にデバイスを装着する。実験中被験者は画面を確認し、オブジェクトに触れる瞬間と離れる瞬間に仮想的にスイッチを操作するように人差し指を動作する。各実験は個々に実施し、振動ありと振動なしの触覚をそれぞれ 10 回ずつ交互に提示し、その感覚がどの程度現実のスイッチに近いかを 7 段階で評価させた。7 段階の指標は従来研究との結果の比較のため、被験者がイメージした通りの触覚が最高評価の 7 となるように指示し、実際に提示された触覚の評価を数値で回答させる。

結果は図 6 に示す。左側押下するタイプのスイッチに置いては振動ありの場合の中央値は 4

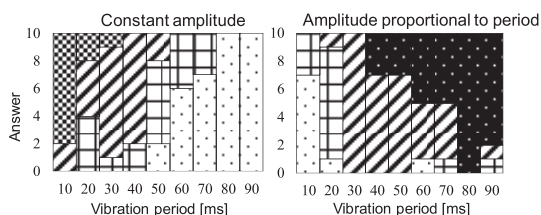


図 4 振動パラメータの同定実験結果



図 5 提案デバイスを用いた触覚提示風景

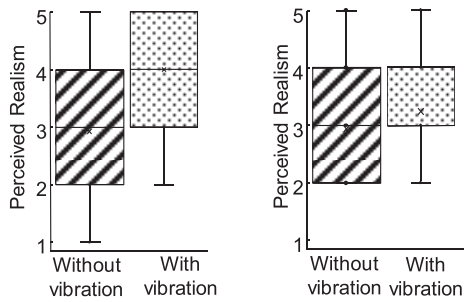


図6 2種類のスイッチ動作の再現検証結果

であった。また、左右切り替えを行う種類のスイッチでは、振動ありとなし両方の場合で中央値は3程度であった。Maedaらの研究に示される既存のデバイスと比較しても中央値が3から4と同程度であり、提案デバイスを用いて機械的動作の再現ができることを確認できた。

### 3.3. 表面粗さ提示の評価

つぎに物体の表面質感を提示可能か評価するため、提案デバイスを用いて物体表面の粗さを表現し、その違いの識別が可能かを評価した。被験者は健常大学生3名(29±6.38歳)を対象とし、画面上で3種類のオブジェクトのテキストを確認しながら提案デバイスで粗さの提示を行う。このとき、1方向への回転運動と往復運動を組み合わせ、振幅を、1. 振動なし、2. 約0.024 mm、3. 約0.034 mmの3段階を用いて粗さを表現する。また、振動の周期を25 msおよび30 msの2種類で実験を行った。実験では、接触を提示するために偏心軸で0.2 mmの変位を同時に与え、指腹面側は30 rpmで回転させている。各振動周期で各被験者にそれぞれ10回ずつの計30回をランダムな順番で提示した。

図7に結果を示す。図は各周期で3段階の粗さをランダムに提示した際の各被験者の回答を示している。周期30 msの場合、正答率はそれぞれ83%、60%、50%であり、25 msの場合、正答率はそれぞれ97%、83%、73%であった。結果には個人差があるが、全被験者に共通して同じ振幅の場合は周期が短い方が識別率はよくなる傾向であった。以上より、振動のパラメー

| Period<br>[ms] | Amplitude<br>[mm] | A |    |    | B |   |    | C |   |   |
|----------------|-------------------|---|----|----|---|---|----|---|---|---|
|                |                   | 1 | 2  | 3  | 1 | 2 | 3  | 1 | 2 | 3 |
| 30             | (1) 0             | 8 | 2  | 0  | 6 | 4 | 0  | 5 | 5 | 0 |
|                | (2) 0.024         | 0 | 7  | 3  | 2 | 5 | 3  | 4 | 3 | 3 |
|                | (3) 0.034         | 0 | 0  | 10 | 0 | 3 | 7  | 1 | 2 | 7 |
| 25             | (1) 0             | 9 | 1  | 0  | 7 | 1 | 2  | 9 | 1 | 0 |
|                | (2) 0.024         | 0 | 10 | 0  | 1 | 8 | 1  | 0 | 7 | 3 |
|                | (3) 0.034         | 0 | 0  | 10 | 0 | 0 | 10 | 0 | 4 | 6 |

図7 3段階の粗さ提示検証結果

タを調整することで物体表面質感を提示できる可能性を示した。しかしながら実験では物体の識別可否にのみ着目しており、指先に目的の触覚を再現するためには、より広い範囲での制御パラメータを用いて検証する必要がある。現在のデバイスではトルクや速度に制限があるため、アクチュエータや減速機の変更を含むデバイスの再設計が今後必要である。

## 4. 前腕部における触覚再現

開発したデバイスを用いて指先触覚をある程度再現できる可能性を示したものの、上肢切断者などがデバイスを使用することは不可能である。そこで、指先触覚を前腕などの他部位で再現する方法として前腕部への刺激による指先触覚の再現性評価を行った。刺激提示には音声振動刺激および電気刺激を用い、DA変換を介した交流信号を用いて刺激波形を生成した。

本報告では振動刺激装置を用い、5種類の粗さの紙やすりを人手および義手を介してどの程度識別できるかを検証した結果について示す。図8は義手指先に指向性マイクロフォンを装着し、物体に触れた際に指先に生じる微細な振動 $w(t)$ を計測・再現している様子である。計測



図8 振動刺激による前腕部への触覚提示風景

した信号はアンプを介して振動装置の制御信号  $A(t)=aw(t+d)$  として用いられる。ここでは、対象に人手および振動装置を用いた前腕部への触覚再現により、各紙やすりをどの程度判別が可能かを比較した。図9に計測波形の一例を示す。各条件において振幅に若干の違いが見られるものの全体にほとんど差が見られないことがわかる。実験では被験者1名を対象に、各粗さを2回ずつランダムに提示し、その正答率を評価した。なお、人手および前腕に装着した義手で実際に紙やすりに触れた際の結果と比較した。

図10に結果を示す。人手では60%強の正答率であるのに対し、義手を介した場合には20%を下回りほとんど判別ができていない。提案する振動刺激による結果では人手と比較して正答率は低いものの義手単体と比べ高い傾向となった。被験者は指先に生じる微細な振動情報を前腕部で感じることができ、各条件を判別できるようになったと考えられる。確率共振現象に基づき300 Hzのホワイトノイズを重畳した際の結果を示している。ホワイトノイズを加

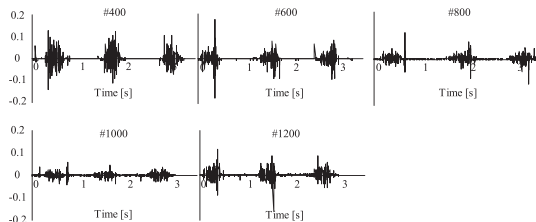


図9 5種類の紙やすりにおける計測波形の一例

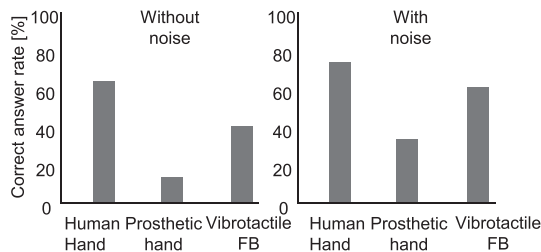


図10 人手および義手による判別精度検証結果

えた場合、全条件においてノイズを加える前よりも正答率は向上しており、提案法を用いて人手と同程度の結果が得られた。以上より、指先感覚を前腕部で再現できる可能性を示した。今後は身体他部位での温覚などを含む指先触覚の再現を目指す。

#### [成果の発表, 論文など]

1. 徳島孝恒, 芝軒太郎, 錯覚現象を利用した移動ロボットのための仮想反力フィードバック法, ライフサポート学会第34回フロンティア講演会, 2025
2. 芝軒太郎: 筋電義手に代表される生体信号インタフェース, おかやま生体信号研究会 第41回例会, 2024
3. 芝軒太郎: 生体信号パターンの「学習」と識別およびその応用, 第29回パターン計測シンポジウム(第109回パターン計測部会研究会), 2024
4. Taro Shibasaki, Takahisa Tokushima: Virtual Force Feedback Based on Phantom Sensation for Teleoperated Robot, 2024 IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics, 2024.
5. Tomoya Shirai, Taro Shibasaki: A Compact Tactile Feedback Device for Fingertips Based on an Eccentric Mechanism, 2024 IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics, 2024.
6. Taro Shibasaki, Shunji Hashiguchi, Kosuke Jin: Myoelectric Prosthetic Hand with Sensory Feedback that Generates Discomfort, Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 10(3), 247-252, 2024.
7. Yoshitaka Mizumoto, Taro Shibasaki: Haptic Sensation Enhancement via the Stochastic Resonance Effect and Its Application to Haptic Feedback for Myoelectric Prosthetic Hands, Proceedings of The 2024 International Conference on Artificial Life and Robotics, 2024.
8. 水本祥宇, 芝軒太郎: 違和感フィードバックを内包した3Dプリンタブル筋電義手, 第34回バイオフロンティア講演会, 2023

最後に、本研究のご支援をいただ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示します。

## [研究助成 (A)]

## 筋シナジーを用いた随意運動誘引手法による 自発的動作に寄り添う正常歩行訓練装置

2241018



研究代表者

関西学院大学 工学部  
知能・機械工学課程

教 授

中 後 大 輔

## [研究の目的]

脳卒中後片麻痺患者の歩行リハビリには各ステージ（急性期、回復期、維持期）があり、特に回復期に正常歩行を成す随意運動を獲得することが大事である。一方、我が国では理学療法士（PT）は回復期の患者に対して付添い時間が長く取れない実情があり、このことが、最低限移動が出来ることを第一とした実用歩行の獲得に主眼が置かれる原因であった。そのため患者の QOL（Quality of Life）を考えた場合、回復期において正常歩行に至る自立的訓練が可能なりハビリ機器が強く要望される。

一方、先行研究に依ればエルゴメータが脳卒中後片麻痺患者のリハビリテーションに有効であること、ペダリング動作が下肢の歩行機能回復を促進することが示唆されている。しかし、これらの研究は理学療法士による主観的な評価に基づくものであり、エルゴメータによる補助力と下肢の筋肉への寄与を定量的に分析した研究はなかった。

そこで本研究の目的は、脳卒中後片麻痺患者を対象として、エルゴメータを用いた安全な座位ペダリング運動にて、正常歩行訓練を効果的に実現するための条件を明らかにすること、その条件を実現するペダル型リハビリテーションロボットを実現することである。

## [研究の内容、成果]

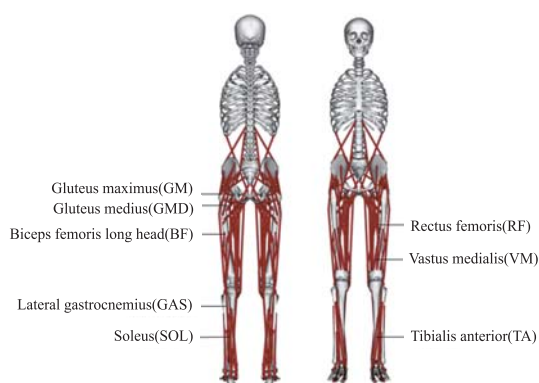
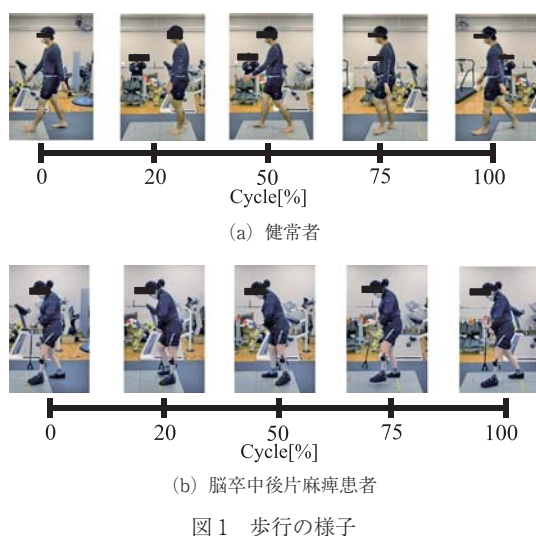
本研究の目的を達成するために、主に以下の二点について研究を実施した。一点目は、健康者と脳卒中片麻痺患者の歩行時の下肢の使い方の違いを筋シナジー解析を用いて比較した。さらに、これらの比較結果から正常な歩行に必要な筋肉の使い方を明らかにすると共に、その筋肉の使い方をペダリング運動で実現するための条件を明らかにした。二点目は、エルゴメータを用いたリハビリテーションロボットを提案し、患者を通常の歩行に近い形で下肢の使い方に導くアシスト機能を提案した。

## A. ペダリング運動のリハビリモデルの構築

人間の歩行は足を上げる、足を蹴るなどの役割の異なるいくつかの基本動作から構成されており、人間は複数の筋肉を協調させることでこれらの基本動作を実現している。各基本動作において各筋肉が発揮する筋力は筋電（EMG）を測ることで確認することができる。しかし、各基本動作は複数の筋の協調によって達成されるため、筋の協調性を評価する指標が必要になる。そこで本研究は、シナジー解析を用いて筋の協調関係を評価した。

まず最初に、健康者（図1(a)）と脳卒中後片麻痺患（図1(b)）の歩行時の筋肉の働き方を調べるため計測実験を行った。本歩行実験では、健康者と脳卒中後片麻痺患者に歩いてもらい、図2に示す筋肉の EGM データを測定した。





これらの8つの下肢の筋肉は、とりわけ歩行動作を生み出すと知られている筋肉である。また、それぞれの歩行動作を構成する基本動作を比較するために、筋シナジー分析を行った。

健常者の筋シナジーを図3(a)に、患者の麻痺肢側と健常肢側の筋シナジーを、それぞれ図3(b)と図3(c)に示す。図3(a)から、健常者の正常歩行は、足を後方に蹴る動作（シナジー1）、足を支持脚から遊脚に切り替えて後方から前方に戻す動作（シナジー2）、遊脚を接地して支持脚として体重を移動する動作（シナジー3）から構成されていることが分かる。図3(b)から片麻痺患者の歩行では、麻痺肢側にはシナジー2に相当する基本運動しか発生しておらず、これは麻痺肢が歩行動作に全く寄与していないことを示している。一方、図3(c)に示すように、健常肢側では健康者と同様に3

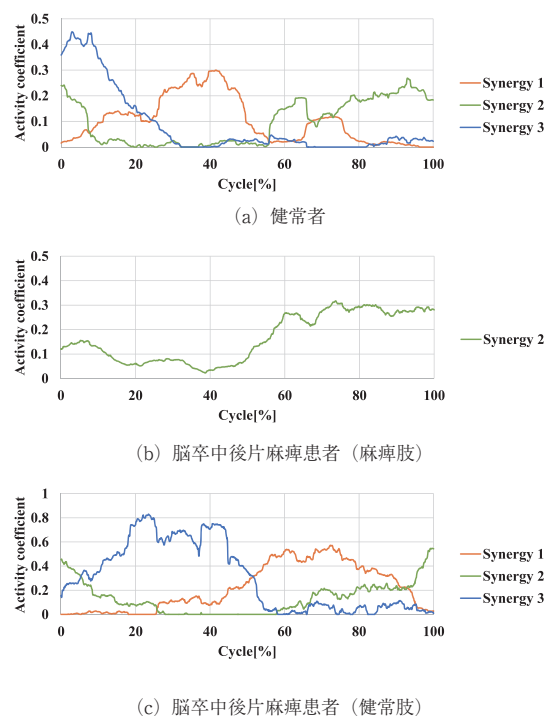


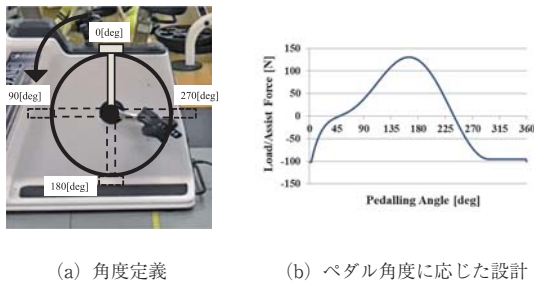
図3 抽出した筋シナジー（活性化係数）

つの基本的な動作が発生しているが、麻痺肢側は底のような動作が発生しており、そのタイミングは異なる。このことから、片麻痺患者でも適切なりハビリテーションを行うことで、これら3つの基本的動作を実現できる可能性を示している。

これらの結果から、正常の歩行に向けたトレーニングでは、足を後方に蹴り出すシナジー1の動作（主な筋肉：GAS, SOL）、足を前方に戻すシナジー2の動作（主な筋肉：TA, BF, RF）、足首を使って足を接地させるシナジー3の動作（主な筋肉：GMD, GM）を促すことが重要であることが分かった。

以上の議論を踏まえて、本研究では以下の方針にてエルゴメータの麻痺肢側ペダルに付加する支援力／負荷を以下の方針に基づいて図4のように設計した。

- ・シナジー1：患者は麻痺肢側で自発的に基本動作を行おうとした。そこで、自発的な基本動作をさらに訓練するために、蹴り出し動作に相当するペダリング動作（90～225[deg]）時に、ペダルに負荷をかけた。

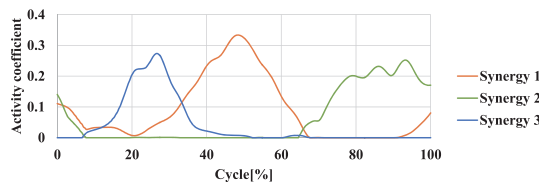


グラフ中の正の値がアシスト力、負の値が負荷（ブレーキ力）を示す。

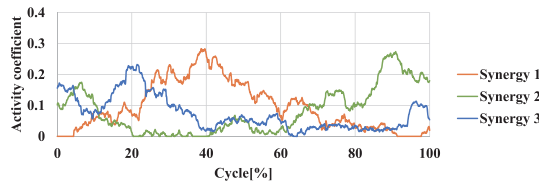
図4 設計したアシスト力／負荷

- ・シナジー 2：患者は麻痺肢側の足を前方に戻す基本動作を行っていない。そこで、被験者が足を前に出す動作を行えるように、ペダルを戻す動作（225～360[deg]）でアシスト力を加えた。
- ・シナジー 3：患者は麻痺肢側の足を安定させ体重を加え始める基本動作を行っていない。そこで、まず足を安定させ体重を加え始める動作を行わせるために、足を下げながらペダルを漕ぐ動作（0～90[deg]）でペダルにアシスト力を加えた。次にシナジー 1 の基本動作に向けて、ペダリングがしやすくなる 45～90[deg] の間で、ペダルをアシスト力から負荷に徐々に切り替えた。

設計した支援力は、患者を模擬する筋骨格シミュレーションにて目標となるシナジーを発生させること（図 5(a)）、そのシナジーは、健常者に B にて開発したペダル型リハビリ装置を



(a) 患者を模した筋骨格シミュレーション



(b) 健常者が試作機を利用した場合

図5 ペダリング運動による筋シナジー（活性化係数）

使用して貰ったときに発生するシナジーに類似していること（図 5(b)）を確認した。

## B. 支援力／負荷の可変制御機構を有するペダリング訓練装置の開発

一般的なエルゴメータは、左右クランクが連結されているため、使用者は左右の足を同時に動かしてペダルを漕ぐ。しかし、片麻痺患者がエルゴメータを漕ぐ場合、動作の大部分を健常肢に頼ることになるため、トレーニングには不適切である。そのため、患者の麻痺肢の自発的な動きを促す必要がある。

そこで、本研究は左右独立式のペダリング装置を考案した（図 6, 図 7）。各ペダルには、負荷・アシスト力を発生させるアクチュエータと回転角度を測定するエンコーダ、踏力を測定する力センサを搭載した。両ペダルのマスター・スレイブ制御により、麻痺肢側のペダルをマスター、健康肢側のペダルをスレイブとすることで、患者が麻痺肢側からペダルを漕ごうとすると、ロボットは通常のエルゴメータと同じように動作する。一方、健康肢側からペダルを漕ご



図6 開発した試作機（使用例）



図7 開発した試作機

うとすると、ペダルはスレイブとなり、ペダルを漕ぐことができない。そのため、患者は麻痺肢側からペダルを漕ぐことになり、正常歩行訓練の効果向上が期待できる。

患者の健常肢側の踏力は健常者と同等の 300 [Nm] が想定される。モータを用いてブレーキ力を発生させた場合、逆起電力によってモータ制御回路に過電圧異常が発生する恐れがあるため、モータ駆動用サーボアンプと回生抵抗器を組み合わせた回路構成とした（図 8）。支援力の制御指令値は図 4(b) を用いた。

左右ペダルの踏力を測定する力センサは現場での取り回しの良さ、配線によって患者の動作を妨げないことを考慮し、Bluetooth 通信にてメインコントローラに踏力情報を通信する方式とした。

本試作機を用いた被験者実験を実施した。本実験では、健常者に我々の提案するロボットに慣れってもらうため、約 10 分間、自分のペースで自由にペダルを漕いでもらった。被験者が本ロボットに慣れたと申告した後、被験者が試作ロボットを漕いでいる間の両脚の EMG 信号を測定した。一連の実験は理学療法士の指導のもと、安全に配慮して実施した。EMG 信号より抽出した筋シナジーを図 5(b) に示す。被験者の下肢に、シミュレーションと同様に正常歩行に似た筋シナジーが発現したことを確認した。

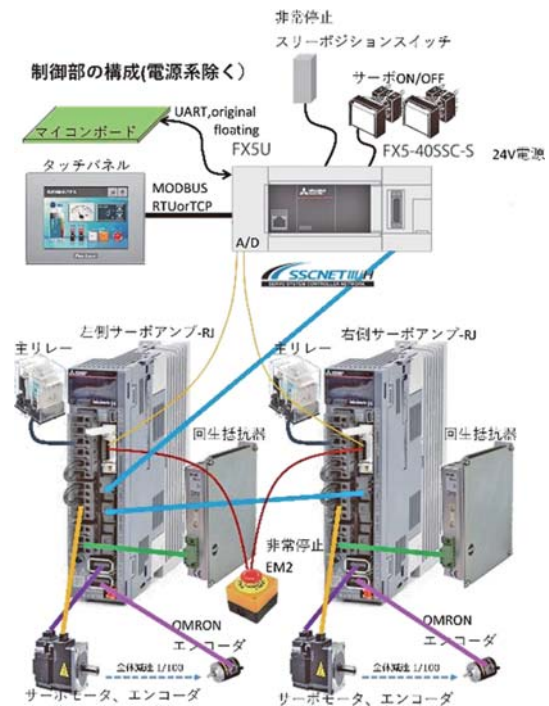


図 8 制御回路図

#### [成果の発表、論文など]

久保穂佳, 中後大輔, 村松聡, 横田祥, 余錦華, 石黒圭広, 橋本洋志, 筋シナジーを利用した随意運動誘導による正常歩行機能改善のためのエルゴメータ型下肢リハビリテーションロボット, 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, 2F5-06, 2024.

## [研究助成 (A)]

Mixed Reality と慣性センサを用いた空間認知と  
運動機能の定量化システム

2241019



研究代表者

東北大学 大学院工学研究科

教授

林 部 充 宏

## [研究の目的]

近年、医療技術の進歩とグローバルな経済成長により、世界的に急速な高齢化が進んでいる。加齢に伴い、運動機能と認知機能の両方が低下し、転倒などのリスクが高まることが広く知られている。その結果、これらのリスクを軽減するためのリハビリテーションサービスの需要は、高齢者人口の増加に伴って増加すると予想されている。リハビリテーションは、要介護状態の予防、症状の緩和、移動能力の維持に不可欠である。しかし、現在の運動機能評価は目視や主観に頼るのことが多い。療法士の経験や知識に依存するため、療法士によって判断が分かれる可能性や正確な情報共有が難しい場合がある。またリハビリテーションは単調な動作を繰り返す行うため、患者のモチベーション維持が難しいという課題が存在する。こうした背景から、患者の意欲を保ちつつ自動的かつ定量的評価が可能なりハビリテーション手法が求められている。

本研究の目的は、一般的なデバイスを使用したトレーニングゲームを通じて、シナジーの観点から歩行や指の運動機能を評価することである。また我々は Mixed Reality (MR) という技術に着目した。MR とは現実世界と仮想世界を融合させる技術として表現される。また認知機能と関わりがある手指機能の定量的評価を目的とするタスクと運動予測の評価を目的としたタスクをそれぞれ MR を用いて開発を目指した。MR 仮想物体操作ゲームを開発し、環

境の現実感を保ちながらトレーニング効果を高める効果を狙った。

## [研究の内容、成果]

## [実験 1: 手指運動評価のための物体把持タスク]

手指機能の評価にはシナジー解析を用いる。運動に潜在する関節や筋肉の協調運動のことをシナジーと呼ぶ。手指運動には多数の関節・筋肉が関わっており、冗長性が高いことから運動の時系列データから解析を行うことは難しい。そこでシナジーを用いることでデータの低次元化を行って協調運動を抽出することとした。本研究では空間的運動を表す Spatial Synergy を用いた。

仮想空間上のオブジェクトを指定された 10 種類の把持方法で操作することが求められる(図 1)。MR 物体把持タスクでは、この仮想オブジェクト操作を MR 環境上で行う。MR 物体把持タスクの様子については図 2 に示す。画面右側に把持対象のオブジェクトが出現する。このオブジェクトを指定された把持方法でつかみ左側のゴールまで運ぶタスクである。オブジェクトをつかみ損ねて落とした場合には失敗

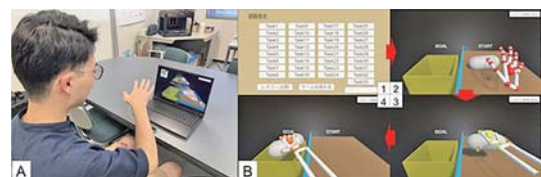


図 1 VR 空間を用いた把持タスクとシナジー解析





図2 Mixed Reality を用いた物体把持操作の様子

となる。10種類の把持方法でそれぞれ3回成功するまでタスクを行う。MRを用いることでPC画面に投影する場合よりも空間的な配置を認識しやすくなる上に、仮想手と自身の手の位置が一致するためタスクに取り組むやすくなることが期待される。図1の物体把持タスクではオブジェクトの上方から把持することを求められた。一方、MRタスクではハンドトラッキング精度を向上させるためにオブジェクトを下方から把持することを求められる。HoloLens 2では頭部のセンサでハンドトラッキングを行う。そのため下方からの把持にすることで手のひら側からトラッキングを行い、自身の手で指関節が隠れることを防ぐことで精度向上が期待できる。

MR物体把持タスクを健常者8名に対して行った。得られた8人の把持動作中の関節角度データに対してPCAとVarimax回転を適用してMR物体把持タスクにおける標準シナジーを抽出した。こうして得られたシナジーと赤井田らの通常VR空間でのLeap Motion Controller (LMC) 物体把持タスクで得られたシナジーを比較した。シナジーの比較には類似度を用いた。類似度の計算は以下の式で求められるコサイン類似度を用いた。

図3にLMCとMRの物体把持タスクで得られた把持動作データから抽出された標準シナジーを示す。W1, W2, W3では類似度が高くMRであってもLMCの場合と同様のシナジーが得られた。一方でW4は類似度が低くなる結果となった。

LMCでは親指の協調運動を表すシナジーが現れていたが、MRでは親指の協調を表すシナジーは現れなかった。表1にLMCとMRでの

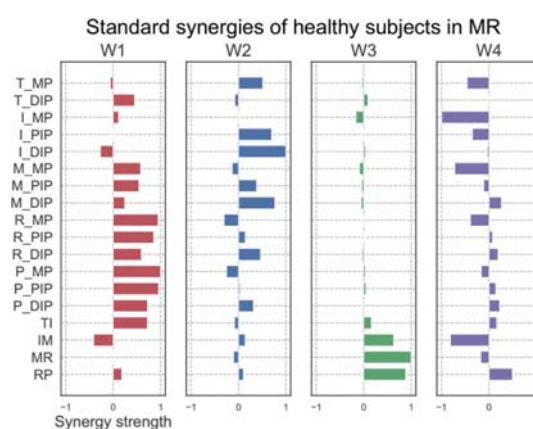
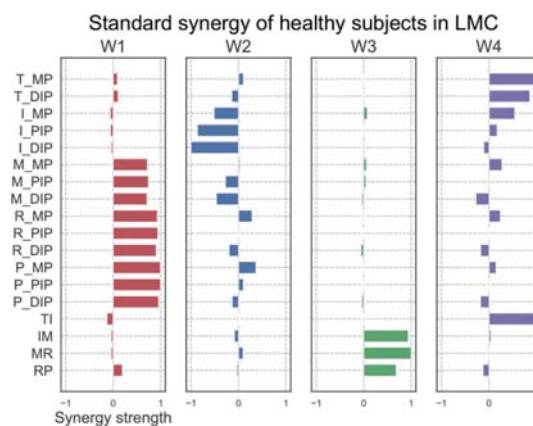


図3 物体把持タスクから抽出された標準シナジー

表1 タスクにかかった時間の平均とミス回数の平均

|     | 平均時間 [s]   | ミス回数     |
|-----|------------|----------|
| LMC | 220.9±67.7 | 12.4±6.3 |
| MR  | 216.1±67.4 | 6.7±3.7  |

タスク完了にかかった時間の平均とミス回数の平均を示す。完了時間にはほとんど差は現れなかった。ゆえにMR物体把持タスクではLMC物体把持タスクと同等の時間効率でタスクが行えることが示された。一方でミス回数はMRの方が5.7回少ない結果となった。このことからMRタスクの方がミスしにくく、取り組みやすいタスクになったことが示された。

異なるシナジーが現れた要因としては大きく二つの可能性が考えられる。一つ目はタスクを変更したことで手の動きが変化した可能性である。オブジェクトをつかむ方向を下方からに変更したことと、MR空間でのタスクに置き換えたことで被験者の手の使い方が変化した可能性がある。二つ目はHoloLens 2のハンドトラッ

キング精度の問題である。MR 物体把持タスクでは親指の協調運動を表すシナジーが現れなかった。ゆえに親指の関節位置を上手く認識できていなかった可能性が考えられる。MR 物体把持タスクでは LMC 物体把持タスクと比較してミス回数が 5.7 回減少した。この要因としては MR 空間にオブジェクトを配置することでオブジェクトとの距離感をつかみやすくなったことと、仮想手が被験者の手に重ねて表示されることが考えられる。MR を用いて空間上にオブジェクトが存在するかのように見せることで、二次元の PC 画面に仮想空間を投影するときと比べて日常に近い環境でタスクに取り組むことができたと考えられる。また LMC では自身の手から離れて表示される仮想手を MR で重ねて表示することでより直感的にタスクに取り組むことができたと考えられる。これらのことから MR を用いることでより取り組みやすいタスクを実現できたと考えられる。

#### [実験 2：運動予測能力評価タスク]

運動予測タスクでは、複数の物体の動きを見ながら適切な判断を下すことができるかについての運動認知能力評価することを目的とした。本タスクでは複数の異なる速度で移動するオブジェクトを適切なジェスチャーでタッチすることが求められる。ゲームの様子を図 4 に示す。

図 4 のように前方に 6 つの赤色と青色の仮想オブジェクトが表示される。その中からいくつかのオブジェクトが異なるタイミング、異なる速度で被験者へ向かって動き出す。オブジェク

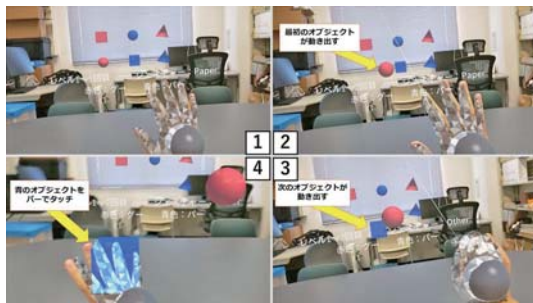


図 4 Mixed Reality を用いた運動予測能力評価

トの動き出すタイミング、速度はランダムに決定されるが、後半に動き出すオブジェクトほど速いスピードで移動する。被験者はそのオブジェクトに対して赤色のオブジェクトにはグー、青色のオブジェクトにはパーのジェスチャーでタッチすることが求められる。ジェスチャーを間違えた場合、タッチできずに通過した場合は失敗となる。動くオブジェクトの数は Task1 では 2 つ、Task2 では 3 つ、Task3 では 4 つとなる。オブジェクトの速度、位置を正しく認識してどのオブジェクトが先に自身のもとへ到達するかを予測する能力が求められる。これによる運動の認知と予測能力を評価する。

MR 運動予測タスクを健常者 3 名に対して行った。3 つのタスクをそれぞれ 5 回ずつ行い、被験者、タスク別の成功率を測定した。成功率は (正しいジェスチャーでオブジェクトをタッチした回数) / (動いたオブジェクトの総数) で計算される。またオブジェクトが動き出した順番通りに被験者へ到達した場合と、後から動き出したオブジェクトが先に動き出したオブジェクトを追い越した場合での成功率についても比較を行った。図 5 に被験者 3 名の MR 運動予測タスクのタスク別の成功率を示す。動き出すオブジェクトの数の違いによる成功率の傾向はみられなかった。この結果から健常者において動き出すオブジェクトの数はタスク難易度には影響しないことが示唆される。次に、タスク中にオブジェクトの追い越しがあった場合となかった場合での成功率を比較したグラフを図 6 に示す。追い越しが発生した場合にはすべての被験者において成功率が低下した。

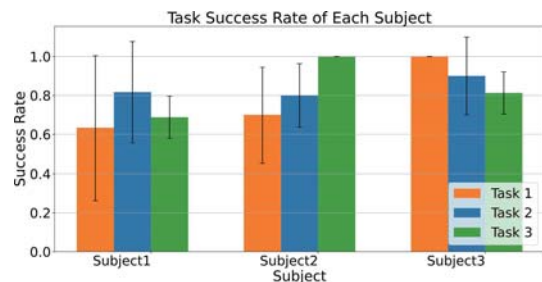


図 5 MR 運動予測タスクのタスク別の成功率

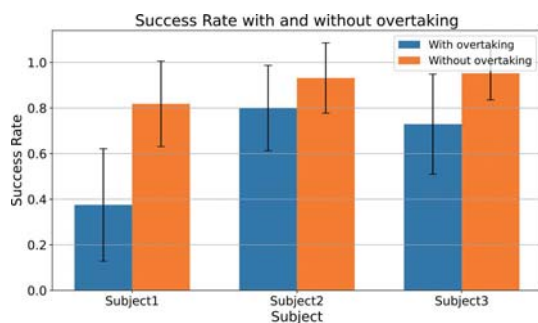


図6 タスク中にオブジェクトの追い越しがあった場合となかった場合での成功率

運動予測タスクでは、被験者間でタスク別の成功率に一定の傾向はみられなかった。このことから動き出すオブジェクトの数はタスクの難易度に大きな影響を与えないことが示唆される。一方で、オブジェクトの追い越しがあった場合となかった場合での成功率を比較するとすべての被験者で追い越しありの方が成功率が低くなった。追い越しありの場合はそれぞれのオブジェクトの位置・速度を正確に認識して、どちらのオブジェクトを先にタッチするか判断する必要がある。そのため、単純に動き出した順番でタッチする場合よりも難易度が上がったと考えられる。この結果から追い抜きの回数、タイミングを調整することでタスクの難易度を設定し、運動予測、空間認知、判断能力などの認知機能を評価できる可能性が考えられる。

### [実験3：慣性センサを用いた運動評価タスク]

手指評価と運動予測評価と共に、日常動作で重要となる歩行評価についてのシステム開発も行った。

2つのIMUセンサのみを使用した下肢運動学予測のための物理情報を取り入れた学習フレームワークを提案した。IMU測定値と人間の歩行バイオメカニカルモデルから導出された幾何学的物理制約を、ディープラーニングネットワークの複合損失関数に組み込むことで、データ駆動型計算を支援する。

システム開発の過程でロボットを活用した歩行評価によりシステムの動作性、実現可能性を

検証しながら開発を行った。またシステム開発後は健常者と慢性期脳卒中患者を対象とした下肢関節角度予測のための2つの異なるグループでの広範な実験により、物理法則埋め込みフレームワークの実現可能性を確認した。提案フレームワークは、学習データ一部しか利用できない場合でも一定の精度を維持できるのに対し、純粋な学習アプローチでは精度を保つために大量のデータサイズが必要であった。この部分の研究結果については現在 Journal 論文に投稿中である。

### [まとめ]

本研究では、Mixed Reality を用いて手指機能評価を目的とした物体把持タスクと認知機能評価を目的とした運動予測タスクを開発した。物体把持タスクでは先行研究と比較して一部異なるシナジーが抽出された。タスクを変更した点とデバイスのハンドトラッキング精度が要因である可能性が挙げられる。一方で、被験者のミス回数は先行研究と比較して減少した。現実世界と仮想世界を融合し、オブジェクトを空間的に配置されているように見せるというMRの特徴を活かすことで運動タスクへの取り組みやすさを向上させることができた。運動予測タスクでは、オブジェクトの数ではなく、オブジェクトの追い越しの有無が難易度に影響を与えることが示唆された。追い越しに着目した難易度設定を行うことで、被験者ごとの運動認知能力をタスクを通して評価できる可能性がある。

今後の課題として、物体把持タスクではデバイスのトラッキング精度の検証が挙げられる。デバイスのトラッキング精度を明らかにすることで、得られたシナジーがMRタスク特有のものであるか、認識精度の影響であるかを明確にする必要がある。運動予測タスクでは新たな難易度設定、評価指標を導入することで被験者の認知機能を定量的に評価することに取り組むことを考えている。

[成果の発表, 論文など]

1. Y. Sorimachi, H. Akaida, K. Kutsuzawa, D. Owaki, M. Hayashibe, Synergy-Based Evaluation of Hand Motor Function in Object Handling Using Virtual and Mixed Realities, *Sensors*, 25(7), 2080, 2025.
2. 反町優平, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏, “Mixed Reality を用いた物体把持操作におけるシナジー抽出を介した手指運動機能評価”, 第 25 回計測自動制御学会 SI 部門講演会, Dec 2024
3. 鈴木俊輔, 反町優平, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏, “リハビリテーション応用に向けた複数人のインタラクションが可能な Mixed Reality ゲームの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2025), June 2025



## [研究助成 (A)]

# 複合現実空間における漫符を活用したロボットによる 自己表現生成 AI に関する研究



2241023

研究代表者

産業技術総合研究所

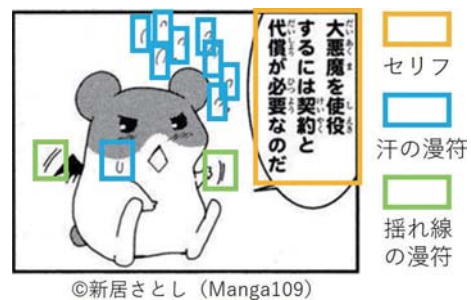
研究員

藤 井 綺 香

## [研究の目的]

近年，社会における様々な場所でロボットを含めたエージェントが活躍を始めている。同じ空間で活動する仲間としてエージェントと人の親近感を高めるためには，情報伝達を行うだけでなく，感情表現を伴うインタラクションが重要であると考えられる。またロボットが，モータの不調や認識機能のエラーなどの内部状態を，人間に対してわかりやすく表現することも有用である。本研究では，自己表現を提示するハードウェアを持たないロボットを含めた様々なエージェントに適用可能で，汎用的な感情表現のインタラクション技術を構築することで，人間とエージェントのより良い協調・共生関係を構築することを目的とする。具体的には，漫符表現（漫画でキャラクターの状態を表現するためにシンボリックに用いられる手法）を活用して，豊かな感情表現を実現することを目指す。

ロボットによる感情表現に関する研究において，表情や動作，音声など，多様な手法の有効性が示されている。しかし，ロボットの形態は，ヒューマノイド，動物型，車輪移動型，アーム型など多岐にわたるため，多様な外観に幅広く適用可能な感情表現の手法を構築する必要があると考えられる。そこで本研究では，漫画において登場人物やキャラクターだけでなく，動物や物体にも豊かな感情表現を与えることのできる漫符に着目する（図1）。過去にも，ロボットにおいて漫符表現を用いることで，感情が伝



©新居さとし (Manga109)

図1 漫画内で使用されている漫符の例

わりやすくなるという基礎実験が行われてきている<sup>[1]</sup>。しかし，漫符表現に関する体系化されたデータベースや，対話の文脈に合わせて漫符を生成するモデルの開発は行われていないため，本研究ではまずこれらに取り組む。また，漫符を用いた従来研究では，ロボットにLEDディスプレイなどの専用の表現デバイスを組み込むことで感情表現を実現している。しかし，全てのロボットに表現デバイスを組み込むのは現実的ではないと考えられるため，複合現実 (MR) 技術を活用した提示手法の検討を行う。

## [研究の内容，成果]

漫符を用いたヒューマンエージェントインタラクションの実現に向け，本年度は，①漫画のデータセットを用いた漫符のアノテーション，②漫符を表示しながら対話インタラクションを行うエージェントのプロトタイプ開発，③複合現実内でロボットに合わせて漫符を提示するシステムの基礎検討，を実施した。

## 1. 漫画のデータセットを用いたアノテーション

### 1.1 漫符のアノテーション方法の検討

まずは、人物や人型のキャラクターに着目して、漫符のアノテーション方法の検討を実施した。漫符をエージェントに合わせて表示するためには、漫符の種類分類と提示位置が大事であると考え、それぞれに関して、分類を行った。

漫符に関する文献<sup>[2]</sup>等を参考に、図2に示すような55種類の漫符を抽出した。オノマトペや、背景や風景に関連するもの、表情やジェスチャーに分類されるようなものは除外した。付与位置に関しては、2次元での位置に関して検討した従来研究<sup>[3]</sup>を参考にするとともに、最終的に3次元空間に存在するロボットにも適用することを想定し、人間の各身体部位の前、後ろ、外側、内側、などを含めた分類を行った。

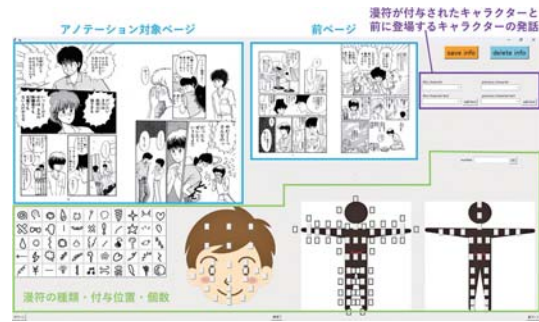
また、実際に漫符を提示する上では、表示する個数も大事となる。例えば、汗を表現するときには、水しぶきの漫符が複数用いられる場合が多い。また、眠りのマークや気づき線などの、典型的に複数個の組み合わせで用いられるものに関しては、まとめて1つとみなして取り扱うこととした。



図2 分類を行った漫符一覧

### 1.2 アノテーションツールの開発及びアノテーション

漫符に関するアノテーションを行うデータセットとして、Manga109<sup>[4,5]</sup>を利用した。これは、109冊の日本の漫画作品からなるデータセットであり、収録されている作品のジャンルは多岐にわたる。コマや、セリフなどのテキスト、キャラクターの顔や身体に関するアノテーションが付与されている。さらに、Manga109



(アノテーション対象例としている漫画：  
© よしまさこ (Manga109 より))

図3 開発したアノテーションツール

内のセリフと発話者を対応づけたデータセットも存在する。しかし、漫符に関するアノテーションは提供されていない。

本研究ではまず図3に示すように、漫画内で描かれている漫符と、関連する登場人物の発話に対応づけてアノテーションするためのツールを開発した。開発は、Pythonでグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）を作成するためのツールキットであるTkinterを用いて行った。GUIには、アノテーションの対象とするページとその前のページの漫画の画像を表示した。漫画の画像内の対象となる漫符をバウンディングボックスでアノテーションできるようにするとともに、その種類と位置をクリックするボタンや、個数を入力する欄を配置した。また、漫符が付与されているキャラクターの名前とセリフの内容を選択するプルダウンボックス及び、その前の文脈に関連するキャラクターの名前とセリフの内容を選択するプルダウンボックスを設けた。そして、これらの漫符と対話内容に関するアノテーション結果をcsv形式で保存できるようにした。

開発したアノテーションツールを用いて、Manga109データセットのアノテーション作業を実施した。本年度はまず人物に関連する漫符に焦点を当て、データセットの一部に対してアノテーションを行った。今後は、動物や物体などに付与されている漫符等も含めてアノテーションを拡張していきたいと考えている。

## 2. 漫符を用いた対話インタラクションシステム

### 2.1 文脈に合わせた漫符の生成

会話の文脈に応じて適切な漫符を推定・出力するモデルを構築するために、大規模言語モデルのファインチューニングを行った。大規模言語モデルには、OpenAI の GPT4o (gpt-4o-2024-08-06) を採用した。また、漫符と発話内容を関連づけた csv 形式のアノテーションデータを、GPT-4o に対応する JSONL 形式に変換することで、ファインチューニング用のデータを作成した。そして、アノテーションの方針に沿い、会話内容に関連した漫符の種類、場所、個数を、OpenAI API の function calling 機能を用いて取得できるようにした。

### 2.2 漫符を提示可能な対話エージェントの開発

図4に示すように、3DCG エージェントが対話の文脈に合わせた漫符を提示することで、豊かな感情表現を行うことを目指した対話インタラクションシステムのプロトタイプ開発を行った。

システム構築基盤として、キャラクター制御やユーザーインターフェースの設計に優れ、MR アプリケーションも開発可能なゲームエンジンである Unity を採用した。また、エージェントとして表示される 3D キャラクターモデルは、VRoidHub という 3D キャラクターの共有プラットフォーム内で公開されているものを利用した。

ユーザーインターフェースはシンプルな構成



図4 漫符を用いた対話インタラクションシステムのプロトタイプ

であり、ユーザーが任意の会話内容をテキストで入力すると、それに対するエージェントからの応答がテキストで出力される。同時に、その対話内容に応じた漫符がエージェントの 3D モデルに合わせて表示されるというものである。エージェントのテキストによる応答内容及び、表示される漫符の種類や表示位置、個数に関しては、前述のファインチューニングを行った大規模言語モデルを用いて決定している。

漫符の提示に関する具体的な実装としては、まず Unity のシステム内にあらかじめ漫符の画像データを準備しておくとともに、3D エージェントモデルの既存のボーンに対応付けた漫符表示ポイントを設定した。そして、大規模言語モデルからの出力に応じて、対応する表示ポイントに画像データを Unity の GameObject として追加したり削除したりすることで、インタラクティブに漫符を提示するシステムとしている。

## 3. ロボットへの応用に関するシステム検討

実世界のロボットに漫符を用いた感情表現を拡張するために、MR 空間でロボットの身体に合わせて漫符を提示する手法の検討を実施した。

ロボットのモデル情報や、各関節角度の情報、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) 等による位置推定情報が取得可能な場合は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) 装着者の座標系とロボット座標系を対応付けることで、ロボットの骨格に応じて漫符を配置して提示することができる。また位置情報に関しては、AR マーカーを利用することでも、HMD 装着者とロボットとの相対的な位置関係を取得可能である。

一方で、ロボットの位置情報や関節角度情報などを取得できない場合は、HMD のカメラなどで取得した画像からのロボットの骨格推定が必要と考えられる。初期検証として、人型に近い身体デザインを有するロボットの画像に対して、MediaPipe や MMPose などの従来は人間

の骨格推定に用いられているモデルを適用し、検討を行った。その結果、HRP-4 や NAO などの二足歩行ロボットでは主要関節を推定でき、既存モデルを適用可能であった一方で、Miroki などの車輪移動ロボットなどは上半身も含めてうまく推定できない場合が多かった。今後は、ロボット実機のデータやシミュレータ上でのデータを用いて既存モデルの転移学習などを行うことで、ロボットのための骨格推定器を構築することを検討している。

上記の事柄を考慮して、Unity を通じて Robot Operating System 2 (ROS2) と MR ヘッドセットを組み合わせたシステムの開発に着手した。

#### 4. おわりに

##### 4.1 本研究のまとめ

本研究では、エージェントの感情表現を拡張する技術として、漫画におけるシンボル表現である漫符を活用する新たなアプローチを提案した。

まず、55 種類の漫符を抽出するとともに、人型のキャラクターにおける 3 次元空間への拡張を視野に入れて付与位置の整理を行った。そして、漫画のデータセット内の漫符と発話内容に対応づけたアノテーションデータと大規模言語モデルを用いて、会話の文脈に基づいて適切な漫符を提示するためのシステムを構築した。

また、漫符を用いたエージェントとのインタラクションのプロトタイプとして、3DCG エージェントに合わせて漫符を表示しながら対話を行うアプリケーションを実装した。ロボット実機への応用に向けて、ロボットの骨格推定や位置推定情報を基に、MR の HMD を用いて漫符の表示を行う仕組みの検討を進めた。

##### 4.2 今後の展望

今後はまず、現在開発中の MR 空間でロボットの身体に合わせて漫符を提示するシステムの開発をすすめるとともに、対人実験を通じた評価を実施したいと考えている。

また現在は、人間に近い身体デザインのキャラクターを対象に、漫符のアノテーションを実施しているが、動物や物体に付与されている漫符に関しても分析を行いたい。そして、アーム型ロボットやロボット掃除機のような人型にも動物型にも該当しないエージェントの場合は、どのように漫符を提示するのが適切かということなども検討していきたい。

提示する漫符に関しても、現在の画像データから 3D モデルに変更し、動的エフェクトやアニメーションなどをつけることで、より豊かな表現を行うことができると考えている。

汎用的な感情表現手法である漫符と、比較的低コストで実装可能な複合現実技術を組み合わせることで、家電などの身近なものも含めたインタラクション技術への拡張も可能であると考えられる。本研究成果を発展させ、エージェントとのより良い共生社会の実現に貢献したい。

#### [参考文献]

- [1] T. Kishi, H. Futaki, G. Trovato, N. Endo, M. Destephe, S. Cosentino, K. Hashimoto, A. Takanishi: Development of a Comic Mark Based Expressive Robotic Head Adapted to Japanese Cultural Background, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2608-2613, 2014.
- [2] こうの史代: ギガタウン漫符図譜, 朝日新聞出版, 2018.
- [3] 赤井友紀, 盛山将広, 松下光範: 漫符を利用したコミック内の心情・行動描写検索システム, 情報処理学会研究報告, Vol.2017-DCC-15, No.42, pp.1-7, 2017.
- [4] Y. Matsui, K. Ito, Y. Aramaki, A. Fujimoto, T. Ogawa, T. Yamasaki, K. Aizawa: Sketch-based Manga Retrieval using Manga109 Dataset, Multimedia Tools and Applications, vol.76, no.20, pp.21811-21838, 2017.
- [5] K. Aizawa, A. Fujimoto, A. Otsubo, T. Ogawa, Y. Matsui, K. Tsubota, H. Ikuta: Building a Manga Dataset "Manga109" with Annotations for Multimedia Applications, IEEE MultiMedia, vol.27, no.2, pp.8-18, 2020.



[成果の発表, 論文など]

- [1] Ayaka Fujii, Ken Fukuda: Development of a Human-Agent Dialogue Interaction System Using Comic Symbols for Enriching Agent Expression, HCI International 2025, 2025. (発表予定)

## [研究助成 (A)]

## 非侵襲的な振動感覚刺激を用いたうつ病症状緩和システムの基盤構築

2231024



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

聖マリアンナ医科大学 医学部  
生理学

講 師

藤 岡 仁 美

聖マリアンナ医科大学 医学部  
生理学

講 師

藤 原 清 悦

聖マリアンナ医科大学 医学部  
生理学

研究技術員

鳴 海 栄

## [研究の目的]

日本では現在 100 万人以上がうつ病と診断され、治療を受けている。患者が受ける苦痛に加え、うつ病によって生じる社会経済的損失は大きい。うつ病の治療の基本は抗うつ薬を中心とした薬物療法であるが、およそ 3 分の 1 の患者は寛解に至らず、このような治療抵抗性を示すうつ病に対する新たな治療方法を開発することは急務である。

うつモデル動物を用いた基礎研究では外側手綱核ニューロンの活動が健常ラットと比較して高い事が知られている。また、うつモデル動物の小脳皮質活動を人為的に上昇させるとうつ様行動が改善される (Baek, Elife 2022)。さらに、体性感覚情報は小脳にも入力している事が知られている。これより、我々は動物の体幹に慢性的に感覚刺激を与えれば、小脳皮質活動が増加し、その変化は前頭前野を経由して外側手綱核の活動頻度を低下させて、うつ病様行動が改善される可能性があると考えに至った (図 1)。

我々は上記可能性を検証するために、動物用

振動刺激装置を新たに開発し、うつモデル動物に対して慢性的に振動刺激を与えて、うつ様行動の変化を観察した。さらに、振動刺激に対する当該動物の脳神経活動の変化についても検討した。

## [研究の内容、成果]

## 1. うつモデル動物の選定

うつモデル動物を作成するには、健常動物に対して、慢性的なストレスを与えてうつ様行動を発現させる手法が一般的に用いられている。このモデル動物では、セロトニン再取り込み阻害剤 (SSRI) 等の一般的な抗うつ剤の効果が高く、新規薬剤の評価に頻繁に使用されている。しかしながら、時間の経過による自然治癒の可能性を考慮する必要がある、治療効果の判定には慎重な対応が求められる。Wistar Kyoto rat (WKY rat) は先天的にうつ脆弱性を持ち、特別な操作無しで、うつ様行動をとる事が知られており、うつ様行動の自然治癒の見込みはなく、さらに、SSRI 等の一般的な抗うつ剤の効果が無いことが知られている。そのため、WKY ラットは、ヒトの抗治療性うつ病のモデルとして使用されている。

先に述べたとおり、本研究では、治療抵抗性うつ病を主なターゲットとする新たな治療法を開発する事を目的としているため、WKY ラッ

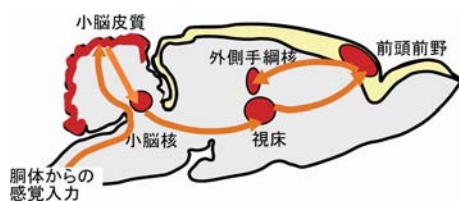


図 1 想定される神経経路

トを被験動物として使用した。

## 2. 慢性的な振動刺激による動物のうつ様行動の改善

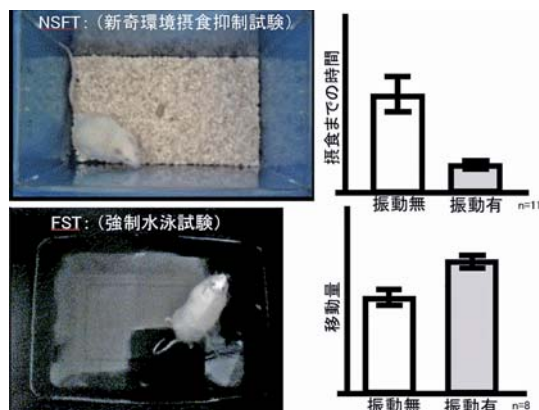
### 2.1 慢性振動刺激

開発した動物用振動刺激装置を WKY ラットに装着し、数週間程度、慢性的に振動刺激を加えた（装置の諸元と詳細なプロトコルに関しては、知的財産保護の観点から省略）。

### 2.2 新奇環境摂食抑制試験 (Novelty Suppressed Feeding Test; NSFT)

慢性振動刺激終了直後より、被験動物を 24 時間絶食した。その後、新奇環境下で中央に餌ペレットを 1 つ置いた状態の新規ケージ中に被験動物を入れて、摂食するまでの時間を計測した。この試験における摂食までの時間は、うつ様行動を発現している動物では長く、健常動物では短い事が知られている。

我々の実験結果では、慢性的な振動刺激を印加した群は、印加しなかった群と比較して摂食するまでの時間が有意に短縮した（図 2 上段右）。



上段左：新奇環境摂食抑制試験の様子  
 上段右：試験の結果（摂食までの時間）（合計 11 匹）  
 下段左：強制水泳試験の様子  
 下段右：試験の結果（移動量）（合計 8 匹）  
 （具体的な数値に関しては、知的財産保護の観点から省略）

図 2 行動試験結果

### 2.3 強制水泳試験 (Forced Swimming Test; FST)

前述した NSFT から約 1 週間後に、被験動物を温水で満たしたプールに入れて、上方より 5 分間ビデオ撮影を行った。記録されたビデオ

動画を解析して動物が泳動した累積移動量を求めた。この試験における累積移動量は、うつ様行動を発現している動物では短く、健常動物では長い事が知られている。我々の実験結果では、慢性的な振動刺激を印加した群は、印加しなかった群と比較して 5 分間の累積移動量が有意に長かった（図 2 下段右）。

### 2.4 行動試験のまとめ

NSFT および FST の結果より、体幹への慢性的な振動刺激は、先天的なうつモデル動物である WKY ラットにおいて、うつ様行動を改善させる効果がある事が判明した。

## 3. 振動刺激に対する前頭前野ニューロンの応答

前節で述べた慢性振動刺激によって、振動刺激に対する神経系の応答が変化している可能性を検討するために、慢性振動刺激を行った後の被験動物に対して、麻酔下で前頭前野に電極を刺入し、ニューロンからの細胞外記録を行いながら、体幹に対して振動刺激を行い、振動に対する反応の変化を記録した。

### 3.1 実験系

被験動物にウレタン麻酔を腹腔内投与した後、開頭し、前頭前野にタングステン電極を刺入して細胞外記録を行った。慢性振動刺激に用いた振動刺激と同等なパラメータで刺激できる振動子を新たに作成し、本実験の振動刺激に用いた。当該振動子を被験動物の体幹に当てて、2 s の刺激期間、2 s の休止期間を持つ振動パターンを 100 回繰り返し、その間の神経活動を記録した。記録箇所を変更して、同様な刺激—記録を繰り返した。

### 3.2 データ処理

記録された波形に対してカットオフ周波数 400 Hz でハイパスフィルタをかけて低周波成分を除去し、波形全体の平均と標準偏差を求めた。平均値から標準偏差の 3 倍の値 (mean-3SD) を閾値とし、閾値より低いピーク値を示した箇所をスパイク（活動電位）として検出した（図 3）。

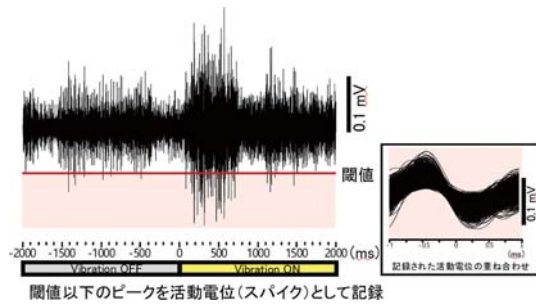


図3 記録された波形 (例)

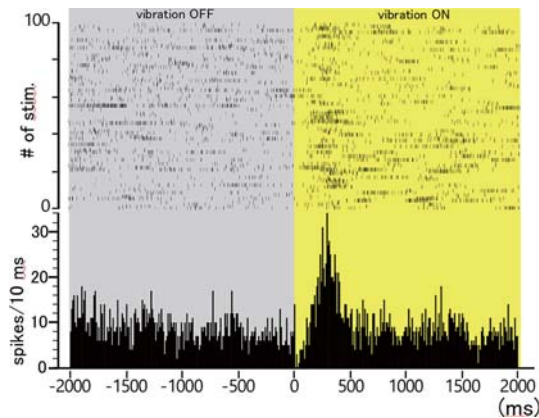


図4 スパイクのラスタプロット (上段) とヒストグラム (下段) の例

検出したスパイクを1つの点として示したラスタグラムを作成し、それを100回繰り返したラスタプロットを作成した (図4上段)。さらに、このラスタプロットに対して、bin幅10 msでスパイク数をカウントしたヒストグラムを作成して、これを振動刺激に対する神経活動の応答とした (図4下段)。

### 3.3 振動刺激に対する反応

健常で慢性刺激を印加していない動物、うつモデルで慢性刺激を印加していない動物、うつモデルで慢性刺激を印加した動物 (各1匹) それぞれに関してスパイクのヒストグラムを作成した (図5)。健常動物では体幹への振動刺激開始から500 ms前後でピークが現れる記録箇所が多く見られ (図5上段)、うつモデルで慢性刺激を印加した動物でも同様なピークが見られた (図5下段)。これを振動刺激に対する前頭前野ニューロンの反応として、この反応が観察された記録箇所をカウントし、全記録箇所に対する反応出現箇所の割合を算出したところ、

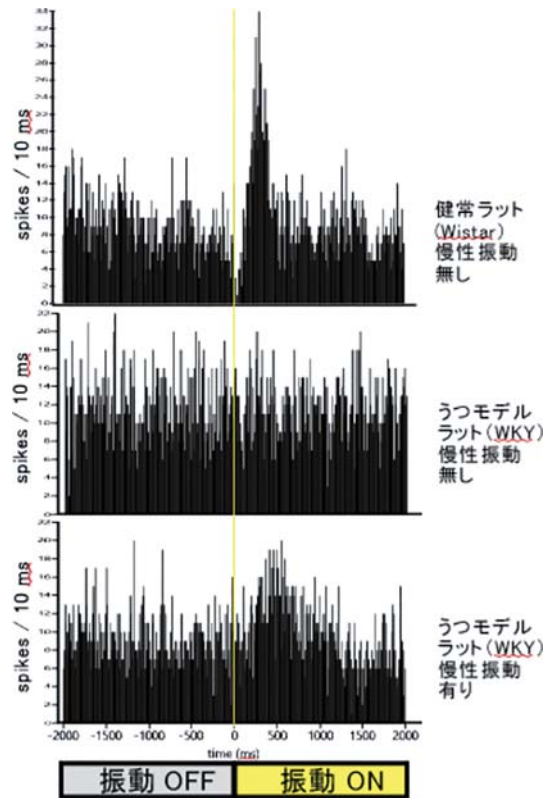


図5 スパイクのヒストグラム (代表例)

健常動物では72.7%, うつモデルで慢性刺激を印加していない動物では0%, うつモデルで慢性刺激を印加した動物では43.8%となった (表1)。

表1 振動刺激に対して反応を呈した箇所数とその割合

|                  | 健常<br>慢性振動無 | うつモデル<br>慢性振動無 | うつモデル<br>慢性振動有 |
|------------------|-------------|----------------|----------------|
| A: 全記録箇所数        | 47          | 25             | 16             |
| B: 反応を呈した<br>箇所数 | 34          | 0              | 7              |
| (B/A)×100 [%]    | 72.7        | 0              | 43.8           |

以上より、前頭前野の振動刺激に対する反応性は、健常動物は高く、うつモデル動物では反応しない、もしくは反応性が低いことが示唆される。さらに慢性的な振動刺激を与えられたうつモデル動物では、振動刺激に対する前頭前野の反応性がある程度回復していると考えられる。



#### 4. 振動刺激に対する応答脳領域の免疫蛍光染色による検討

2節で述べた慢性振動刺激により神経応答の変化する脳領域を検討するため、うつモデル動物に慢性振動刺激を行った後、脳組織切片を作成し、神経活動マーカータンパク質である c-Fos に対する免疫組織蛍光染色を行い、うつとの関連が示唆される各脳領域での c-Fos の発現の変化を観察した。

##### 4.1 免疫蛍光染色

被験動物またはコントロール動物をベントバルビタール深麻酔下にて、4% パラホルムアルデヒドによる灌流固定を行った後、脳を摘出した。摘出した脳からクリオスタットにて厚さ 30  $\mu\text{m}$  の脳切片を作成した。作成した切片のうち、前頭前野、視床下部室傍核、外側手綱核を含む切片について、抗 c-Fos 抗体を用いた免疫染色を実施し、続いて脳領域を同定するため蛍光ニッスルによる対比染色を行った。

背側縫線核を含む切片については、縫線核領域を明らかにするためセロトニンニューロンのマーカーである抗-TPH 抗体と抗 c-Fos 抗体との二重蛍光染色を実施した。

##### 4.2 画像解析

正立光学蛍光顕微鏡を用いて、背側縫線核、室傍核および外側手綱核の画像を取得した。これらの領域に対応する関心領域 (ROI) は、蛍光ニッスルまたは TPH2 免疫反応性の蛍光パターンに基づき、各画像から手動で描出した。

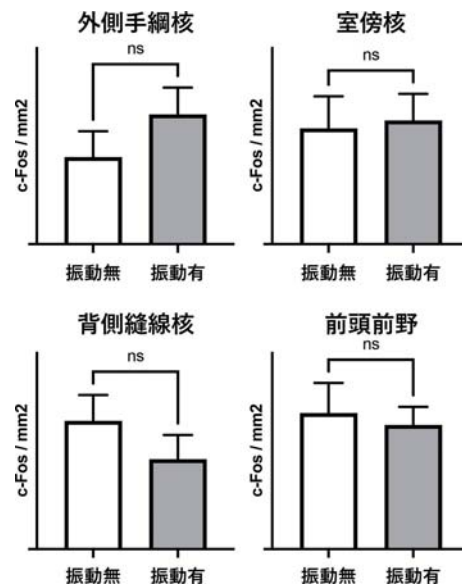
前頭前野の ROI は、共焦点レーザー走査型顕微鏡と ZEN 3 blue edition ソフトウェアを用いて取得した。前頭前野を含む切片全体のタイリング画像から、蛍光ニッスル染色パターンを指標に、Fiji ソフトウェアと ABBA プラグインを使用して、Waxholm Space Atlas に照らし合わせ決定した。

定義した各 ROI 内の c-Fos 免疫陽性細胞数は、SimpleCellCounter ソフトウェアを用いて自動的にカウントした。データはラット 1 匹あたり 1 領域につき 3 枚の脳スライスから取得し、

各群 5 匹のラットを使用した。

##### 4.3 慢性振動刺激による c-Fos 発現の変化

うつとの関連が示唆される各脳領域について、慢性刺激を印加した群と対照群における 1  $\text{mm}^2$  あたりの c-Fos 陽性細胞数を比較した。その結果、対象とした、前頭前野、室傍核、外側手綱核、背側縫線核のいずれの領域においても、統計的に有意な差は検出されなかった (図 6)。



(具体的な数値に関しては、知的財産保護の観点から省略)

図 6 各うつ関連脳領域における c-Fos 発現細胞数の比較 (n=5 each)

本報告書の 3 節で示した電気生理学的実験では、うつモデル動物への慢性振動印加により、振動刺激に対し前頭前野の応答が増加することが示唆された。しかしながら、本項目では、前頭前野における神経活動のマーカーである c-Fos 発現細胞数においては、慢性振動刺激の有無による差は観察されなかった。この差異については、特定の刺激への反復暴露がその刺激による c-Fos 発現誘導を減少させるという報告があることから、本実験でも振動刺激を繰り返し与えた結果、誘導される c-Fos 発現が、対照群のレベルまで減少していた可能性が考えられる。

## 5. 全体のまとめと今後の展望

うつモデル動物の体幹に対して慢性的に振動刺激を加えたところ、うつ様の行動指標に改善が見られた。また、慢性的に振動刺激を加えた動物では、振動刺激に対する前頭前野ニューロンの反応性が高くなっている事が判明した。これらは、体幹に対する慢性的な振動刺激が、前頭前野の活動性を変化させて、うつ様行動を改善させた可能性を示唆する。一方、振動刺激によるうつ様行動改善に関わる前頭前野以外の領域については、今後さらなる検討を重ねる必要がある。

本助成研究により得られた結果は、治療抵抗性うつ病に対して慢性的な振動刺激が有効な治

療方法である事を示唆する事から、我々は次の段階としてヒトへの適用を目指し、ヒト用振動刺激装置の開発に着手している。振動刺激を用いたうつ病治療装置が実現できれば、非侵襲的で患者負担が少なく、容易に従来手法と併用可能な治療機器となる。これによりうつ病の寛解率の向上に貢献できる事から、本研究の結果は医学的に重要であり、人間と機械（振動装置）の調和の促進に貢献すると考えられる。

[成果の発表、論文など]

【特許出願】 藤岡仁美，鳴海栄，藤原清悦，特願 2024-82629：振動刺激装置，振動刺激器具，及び治療方法

## [研究助成 (A)]

MRI・CT 画像下治療のための  
多自由度空圧ステッピングモータの開発

2241024



研究代表者

名古屋大学

准教授

部 矢

明

## [研究の目的]

MRI・CT 画像を見ながら術者が病変に針を刺すのみで肝・腎・肺などのがん治療や病変採取等を行う画像下治療が注目されている。画像下治療は外科手術と比較して患者へのダメージが小さいため、高齢化も相まってニーズが高まっている。しかし、人が入った MRI・CT ガントリ内は狭小空間となるため、手技の空間が狭く、アプローチが困難な場合がある。また、MRI は強磁場による金属の吸引事故の危険性があり、CT は X 線により患者だけでなく医師も被ばくする。加えて、MRI・CT の撮像面に金属が存在する場合、ノイズにより画像信号が欠損（金属アーチファクト）し、画像診断が困難となる問題がある。これらの背景から、術者が手術室の外から遠隔操作する非金属性手術支援ロボット<sup>(1)(2)</sup>が開発されている。しかし、従来の MRI・CT 画像下治療用手術支援ロボットの針の姿勢変更機構は、1 自由度空圧モータを複数組み合わせしており、大型化が課題となる。加えて、姿勢測定のためにはモータの数だけの角度センサが必要となり、姿勢測定機構の小型化にも課題が残る。そこで本研究では、MRI・CT 環境で駆動可能な小型多自由度回転機構の実現を目的として、樹脂のみで構成可能かつ 1 台で多自由度回転を実現する多自由度空圧ステッピングモータを提案する。

## [研究の内容、成果]

## 〈コンセプト〉

本研究で提案するモータのコンセプトを以下に示す。

- ① 1 台で 2 自由度回転
- ② 樹脂のみで製作可能
- ③ 角度センサを用いずに高精度位置決め

上記コンセプト①を満たすため、球状歯車を回転子として採用し、複数方向から直動する歯を微小にずらして噛み合わせることで 2 自由度回転を実現できないかと着想した。そして、この歯の直動機構に空圧シリンダの構造を応用すれば、空圧力によって回転を生み出し、一般的な電磁モータのように金属が必要なく、樹脂のみで製作できると考えた（コンセプト②）。さらに、直動する歯を等間隔で固定して配置すれば、球状歯車に対して歯を噛み合わせた回数（＝歯の直動回数）によって現在角度が決定するため、ステッピングモータのように角度センサが不要と考えた。また球状歯車の歯のピッチを細かくすることで高精度化が可能のため、コンセプト③を満足すると予想した。以上のコンセプトをもとに、実際に検討した構造について次に示す。

## 〈基本構造〉

提案構造を図 1 に示す。回転子は内側に配置された球状歯車であり、その外側には球状歯車をヨー方向に回転させるためのヨーギアユニッ

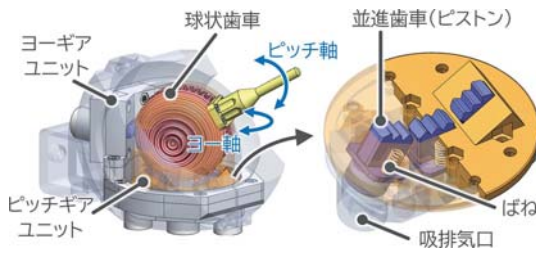


図1 2自由度空圧ステッピングモータ

ト、ピッチ方向に回転させるためのピッチギアユニットが配置されている。

各ユニットの内部には先端に歯形を有する空圧ピストン（並進歯車）が3つ配置されている。ピストン内部には復動用のコイルばねを設置しており，加圧することでピストンが直動し，開放することでばね反力によって戻る。そのため，加圧と開放を繰り返して往復運動が可能となっている。球状歯車は，図2に示すように，ヨー回転用の同心円状の歯形と，中心にピッチ回転用の歯を有している。従来の球状歯車は図2中の左のように1方向からのみ歯形を有するものであり，提案歯車は，図2右のように部分的に2方向から切られた歯形を有することが特殊な点である。

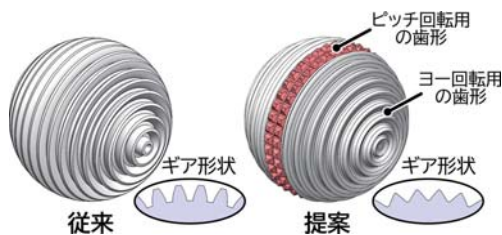


図2 提案モータにおける球状歯車

### 〈動作原理〉

提案モータの動作原理について述べる。まず，1軸回転における動作原理を図3に示す。歯車のピッチ $\theta$ に対して，各回転軸周りに3つの並進歯車が $\theta/3$ の間隔で配置されている。そのため，並進歯車が空圧により押し出され，球状歯車と噛み合うことで $\theta/3$ 回転することができる。この一連の動作を各並進歯車で順番に行うことによって，連続的に回転することができる。ま

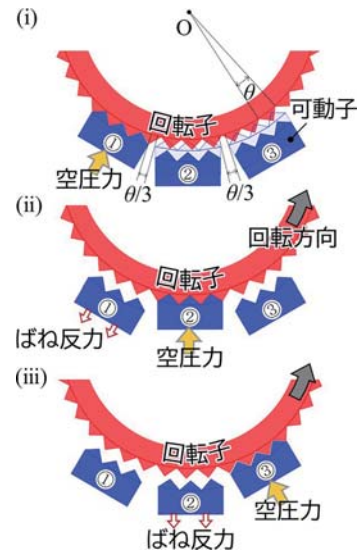


図3 1軸回転原理

た，並進歯車の駆動順序を変えることで回転の方向を変えられるため，任意の方向へ回転が可能である。

この1軸回転原理は既存の1自由度ステッピングモータ（Sajima et al., JRM, 2012）と同様である<sup>(3)</sup>。単純にこれを利用して2自由度回転を試みても，各軸が互いの軸に干渉し，幾何的に拘束されるため，2自由度回転は不可能である。そこで考案した2自由度回転原理を図4に示す。ピッチギアユニットは球面歯車に同期してヨー回転するため，常に球状歯車と同一平面となりピッチ回転用の歯との噛み合いが保たれる。また，ヨー回転用の歯形は同心円状のため，ピッチ回転時にヨー回転用の並進ギアと干渉しない。このように，各軸で独立して回転を行うため，入力圧力波形の指定のみで2自由度回転

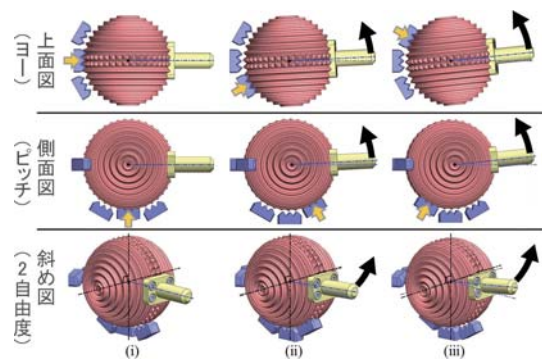


図4 2自由度回転原理



の位置決めが可能となる。

### 〈試作機〉

製作した試作機を図5に示す。球状歯車の外径は60 mmである。また、歯車のピッチは9 deg.とし、ステップ角はヨー・ピッチ回転ともに3 deg.である。図6に駆動ユニットと球状歯車の外観を示す。

駆動ユニットの内部構造を図7に示す。前述の動作原理に示したように、空圧ピストン内部にはばね定数 $k$ の復動ばねが組み込まれている。圧力 $P$ をピストン受圧面 $S$ にかけ、推力 $F$ が発生し、変位 $x$ が起こる。この空圧ピストンに働く推力を力センサ（PFS080YS102U6S, レプトリノ社）により実測した。その測定環境を図8に示す。空圧シリンダ部にかかる空圧は圧力制御バルブ（VP5010SBJ111H00, NORGREN社）を利用しており、バルブに与える電圧に応じて圧力を制御できる仕様となっている。0.1



図5 試作機



図6 駆動ユニットと球状歯車

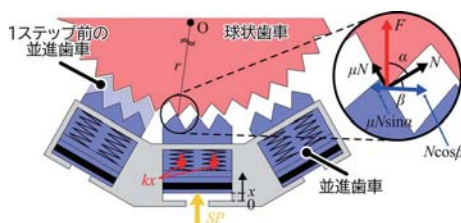


図7 駆動ユニット内部構造

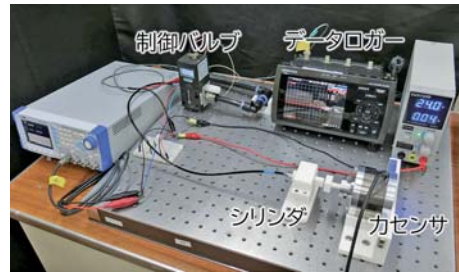


図8 空圧シリンダの推力測定環境

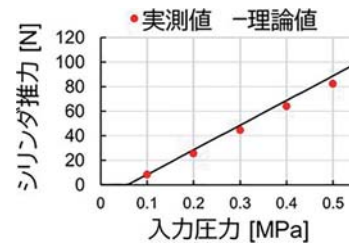


図9 空圧シリンダの推力

MPa ずつ圧力を上げた際の力センサによる推力測定結果と理論値を図9に示す。なお、最大0.5 MPaまで加圧した。理論値と実測値を比較して、その誤差は10%以下であったことから、両者の定性的な一致を確認した。

### 〈動作精度検証〉

提案モータの動作精度を評価するため、図10に示す実験環境にて動作試験を行った。モータの出力軸は2つのガイドレールに接続されており、出力軸の回転によってガイドレールがそれぞれ1方向に回転する機構となっている。モータのヨー・ピッチ回転角度は、ガイドレールの回転角度をエンコーダによって測定することで取得する。なお、本実験においては、エン

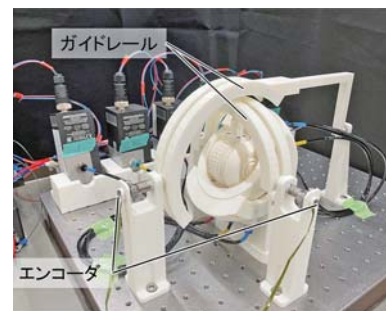


図10 動作精度検証の実験環境

コードは角度検出のみに用いており、モータの制御には一切利用していない。2自由度同時回転を含む圧力指令を与えたときの回転角度を3回測定し、その平均値を求めた。本実験における圧力指令は回転速度が9 deg./sとなるよう与え、入力圧力が0.2 MPaとなるパルス波とした。駆動システムを図11に示す。制御用PCからデジタルシグナルプロセッサシステム(sBox II, MIS社)へ指令を出し、圧力制御バルブにはコンプレッサ(SLP-07EEDC6, ANEST IWATA社)から圧縮空気が供給されており、電圧に応じて圧力が変化し、提案モータの各空圧シリンダの圧力を変化させる。

動作検証結果について述べる。ヨー方向の角度測定結果を図12(a)に、ピッチ方向の角度測定結果は図12(b)に示す。赤線がエンコーダによる測定結果であり、黒波線が圧力指令に

よる理想角度である。実験結果から、全時間においてモータが目標角度まで回転していることが確認できる。これは、2軸同時回転時にも動作原理通りに駆動していることを示している。目標角度との最大誤差は、ヨー角で1.64 deg., ピッチ角で0.97 deg.であった。駆動のために角度センサは利用していないため、角度センサなしで位置決めを実現できている。

#### 〈従来球状歯車機構との比較〉

文献<sup>(4)</sup>では、球状歯車を有する2自由度回転機構が提案されている。電磁モータを駆動源として、球状歯車型回転子の2自由度回転が実現されている。また、文献<sup>(5)</sup>では、球状歯車と鞍状歯車を噛み合わせ、球状歯車型回転子の3自由度回転が達成されている。いずれも電磁モータを駆動源とすることを想定しており、本研究とは方向性が異なる。また、球状歯車の形状においても差異がある。本研究では、球状歯車に対して部分的にピッチ・ヨーの両方向に歯形を構成している。この構造を採用することで、球状歯車に対して中間の変換用歯車なく直接噛み合いトルクを与え、2自由度回転を生み出すことができる。この点が本研究の独自性となる。

#### 〈まとめと今後の研究〉

本研究では、MRI・CT環境において撮影画像に影響なく駆動可能な樹脂製2自由度空圧ステッピングモータを提案した。球状歯車を採用した回転子に対して2方向から空圧駆動の並進歯車を噛み合わせることで2自由度回転が可能であることを試作機により実証した。また、並進歯車の直動回数によって現在姿勢が決定する動作原理により、角度センサなく任意姿勢への位置決めが可能であることを実験から示した。今後は、提案モータを複数製作し、それらを組み合わせて駆動するマニピュレータのMRI・CT環境での動作実験を予定している。

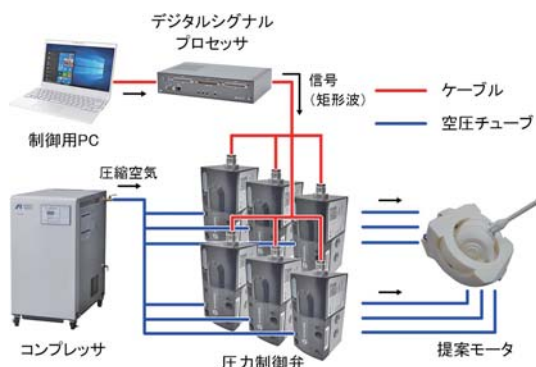
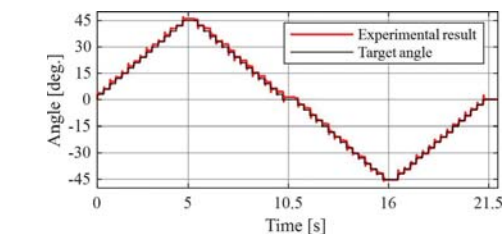
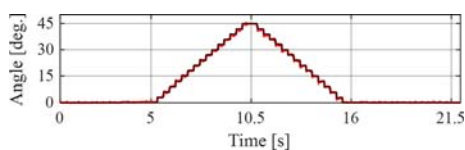


図11 駆動システム



(a) ヨー方向角度



(b) ピッチ方向角度

図12 動作精度の検証結果

[参考文献]

- (1) A. Melzer et al., INNOMOTION for Percutaneous Image-Guided Interventions, IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, vol. 27, no. 3, pp. 66-73, 2008.
- (2) Vincent Groenhuis et al., Design and Characterization of Stormram 4: An MRI-Compatible Robotic System for Breast Biopsy, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017.
- (3) H. Sajima et al., MR-Safe Pneumatic Rotation Stepping Actuator, Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 24 no. 5, pp. 820-827, 2012.
- (4) 多田隈ら, 2自由度を有する球状全方向駆動歯車機構の研究, 日本ロボット学会誌, vol. 36, no. 9, pp. 627-638, 2018.
- (5) K. Abe et al., ABENICS: Active Ball Joint Mecha-

nism With Three-DoF Based on Spherical Gear Meshings, IEEE Transaction on Robotics, vol. 37, no. 5, 1806-1825, 2021.

[成果の発表, 論文など]

1. 森田希, 部矢明, 井上剛志, MRI・CT 画像下治療のための2自由度空圧ステッピングモータの動作検証, 第33回日本コンピュータ外科学会大会, 24(5)-6, 2024/11/09
2. 森田希, 部矢明, 井上剛志, 球状歯車型空圧モータ, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-A07, 2025/06/05
3. 世界初! MRI・CT 内で動く, 球状歯車型空圧モータを開発, 名古屋大学研究成果発信サイト, 2024/11/08

## [研究助成 (A)]

## 高分子ゲル超薄膜を用いた指先に貼付可能な 全貼付型触覚センサの開発

2241025



研究代表者

東京科学大学

特任助教

堀 井 辰 衛

## [研究の目的]

手術などの医療行為や、自動車板金塗装の検査のような、熟達者の精緻な感覚や触覚を定量化し触覚情報を共有することは、技術伝達の観点から重要である。そのためには、装着者に対して拘束感や不快感を与えない材料や構造を有する装着型触覚センサの開発が急務である。近年、高分子材料を基にした静電容量型触覚センサの開発と高感度化が検討されている<sup>[1,2]</sup>。しかし、一般的に誘電エラストマーは比誘電率が10以下と低く、高感度化には不向きである。一方で、ポリ塩化ビニル (PVC) ゲルは $10^3$ 以上の高い比誘電率を持つ<sup>[3]</sup>だけでなく、印加力に対して電位変化を示すことがわかっており<sup>[4,5]</sup>、可塑剤の種類や含有比率によって物性を制御可能である。PVC ゲルシートを平板電極とメッシュ状電極で挟んだ単位構造体の膜厚方向に圧力を印加すると二つの電極間に電位変化が生じることが知られているが<sup>[4]</sup>、そのメカニズムには議論の余地がある。また、金属を電極に用いるためにセンサ素子全体が硬質であり、生体親和性の求められる装着型触覚センサには不向きである。一方、電極を配置したPVC ゲルシートの表面に対して、人体のような誘電体が触れたときに生じる電位変化を利用したPVC ゲルトライボエレクトリックナノジェネレータが報告されており<sup>[6,7]</sup>、タッチセンサとしての評価系について詳細に議論されているが圧力変化に対する検討や考察は乏しい。そこで私

は、ゲル表面への電極の接触状態の変化について着目した。

本研究では、柔軟な電極材料とPVC ゲルシートを組み合わせたファブリック様圧力センサの開発を目的とした。具体的には、Cu と Ni をコートしたポリエチレンテレフタレート (PET) モノフィラメントから成る導電布を電極として用いたときの、PVC ゲルシートの印加した力に対する電位変化を測定することで、センサ特性を評価した。電極構造と電位変化特性との相関に関する観点から、従来の SUS メッシュや平板金属、柔軟な導電織布を用いたPVC ゲルセンサの特性について検討した。

## [研究の内容、成果]

## 【実験】

図1に示すアルミ (Al) シート、SUS メッシュ (#150)、さらに、市販の導電布2種、導電ニット (硬質タイプ)、導電フォームの合計6種類のファイバー幅やピッチ、折り方の異なる導電材料を検討した。レーザーカッターを用いて直径30 mmに短冊状の配線部分を残した形状に切り出した。PVC 粉末 (平均 Mw ~ 233,000) とアジピン酸ジブチル (DBA)、テトラヒドロフランの重量比が1:4:10となるように容器に量りとり、THINKY ARE-310を用いて攪拌脱泡することで均一なPVC ゲル溶液を得た。この溶液を直径15 cmのテフロンシャーレに15 mLキャストし、室温で24時間





図1 本報告で用いた導電材料外観

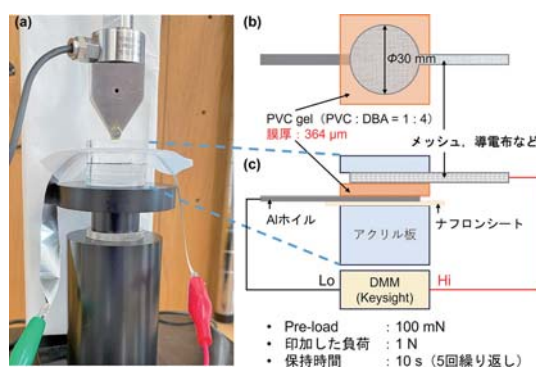


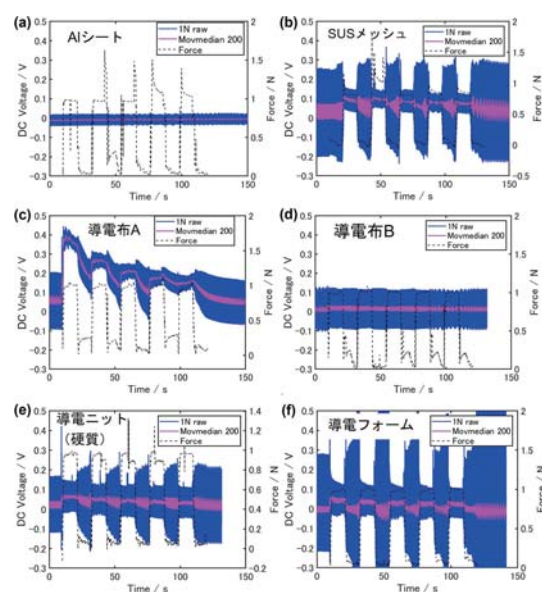
図2 (a) PVC ゲルセンサのセンサ応答測定系外観, (b) PVC ゲルセンサの俯瞰図, (c) センサ応答試験におけるセンサの電位変化測定系の概略図

以上乾燥させることで膜厚約  $364\ \mu\text{m}$  の PVC ゲルシートを作製した。図 2b, c に示すように、各導電材料を得られた PVC ゲルシート上に設置し、対極には Al シート電極を用いることで PVC ゲルセンサを作製した。圧縮試験機 (Univert, CellScale) を用いてセンサを圧縮する際に均一に力がかかるため膜厚 5 mm, 直径 30 mm のアクリル板 2 枚でセンサを挟み、測定を行った。電位変化は、デジタルマルチメータ (34461 A, Keysight) を用いて測定した。

## 【結果・考察】

### 〈電極表面形状の効果〉

それぞれの導電材料について 5 回繰り返し 1 N の力を 10 秒間ごとに印加した際の結果を図 3 に示す。得られた電位変化の生データを青色、移動平均 (ウィンドウ数: 200) で平滑化した結果をピンク色、印加した実際の力を黒破線で示す。まず、Al シートと導電布 B (図 3a, d) は印加した力の変化に対してほとんど電位変化を示さなかった。これに対し、他の導電材料は生データに大きなノイズを含むものの、明確に電位変化を示した。図 4 に示すように各導電材料は様々な表面形状を有しており、Al シートや導電布 B は凹凸が少なく、ゲルとの接触状態が変化しにくかったため電位変化がみられなかったと考えられる。一方で、メッシュや織布構造により圧力印加時の電極/ゲルの接触状態が変化しやすく電位変化を示したと考えられる (図 5)。図 3 に示す平滑化曲線から、各導電材料における繊維径 (繊維束径) やピッチ (繊維密度) と初期サイクルの電位変化幅を表 1 にまとめた。導電ニットや導電フォームは繊維が複雑に編まれており、繊維径最も太い箇所、ピッ



(a) Al シート, (b) SUS メッシュ, (c) 導電布 A, (d) 導電布 B, (e) 導電ニット (硬質), (f) 導電フォーム

図3 10 s ごとに 1 N 負荷を 5 回繰り返し印加した際の PVC ゲルセンサの電位変化

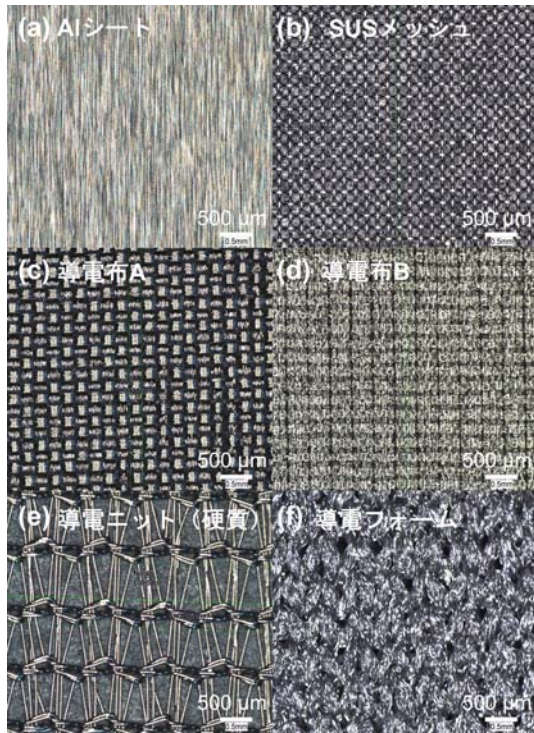


図4 Alシート, (b) SUSメッシュ, (c) 導電布A, (d) 導電布B, (e) 導電ニット(硬質), (f) 導電フォーム

図4 各導電材料の実態顕微鏡像(倍率:75)

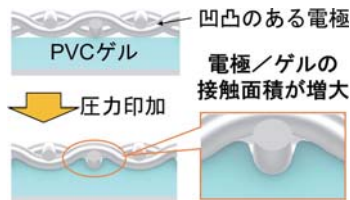


図5 圧力印加時の電極とPVCゲルとの接触状態変化に関する概念図

表1 各導電材料における繊維径(繊維束径), ピッチ, 初期サイクルにおける電位変化

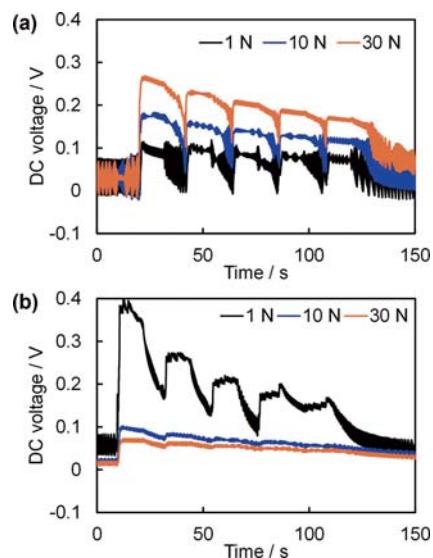
| 電極            | 線径/mm             | ピッチ/mm          | 電位変化幅/V |
|---------------|-------------------|-----------------|---------|
| SUSメッシュ(#150) | 約0.06             | 約0.2            | 約0.05   |
| Alシート         | N/A               | N/A             | ND      |
| 導電布A          | 約0.2              | 約0.2            | 約0.3    |
| 導電布B          | 約0.1              | 約0.1            | ND      |
| ニット(硬質)       | 約0.04<br>(横糸一束当り) | 約0.05<br>(横糸束間) | 約0.04   |
| 導電フォーム        | 約0.2              | 約0.3            | 約0.05   |

チは大きい箇所では画像解析により算出した。現段階では明確な仮説立案は難しいが、繊維径とピッチの組合せが重要と考えられる。例えば、繊維径が小さく密に織り込まれている(ピッチ小)場合だと、圧力印加時にゲルが網目に入り

にくく、電位変化は小さい。一方で、繊維径が大きくゲルとの接触状態変化が大きい場合でも疎に織り込まれていると電極全体での電極/ゲルの接触状態変化が起きずらいため、電位変化は小さくなる可能性が考えられる。今後は、有限要素法のようなシミュレーションによる電極/ゲル界面の接触面積変化の予測が重要と考えられる。

#### 〈印加力と電位変化との相関〉

SUSメッシュと導電布Aについて、印加力を変化させたときの電位変化を図6に示す。SUSメッシュでは測定開始20秒後に力印加試験を開始し、導電布Aでは10秒後に試験を開始した。SUSメッシュは初期サイクルにおいて10, 30 Nでそれぞれ約0.15, 0.2 Vの変化を示し、サイクル数が増加するとともにピーク電位は低下した。また、力除去後に電位は減少したが、測定開始時の電位には戻らなかった。これはおそらく、PVCゲルの応力緩和時間が長いと考えられる。そのため、2サイクル以降の電極/ゲル接触面積変化が減少し、電位変化幅の低下につながったと考えられる。一方で、導電布Aでは1 N印加時の1サイクル目の電位変化幅は約0.3 VとSUSメッシュよりも大



(a) SUSメッシュ, (b) 導電布A  
1 N, 10 N, 30 Nの順番で測定。10秒間力を印加→10秒間力を除去(0.1 N)を1サイクルとして、5サイクル実施。

図6 印加力を変化させたときの電位変化

さいが、サイクル回数の増大とともに減少した。また、SUS メッシュと対照的に、印加力が増大するとともに電位変化幅は減少した。これは、ゲルの応力緩和も考えられるが、力印加による導電布 A の表面構造変化によるものと考えられる。導電布 A は Cu と Ni がコーティングされた PET モノフィラメントで構成されるため、SUS メッシュと比較して柔軟であり、繊維同士の滑りや座屈によって繊維束内部や繊維束間の構造変化が起こりやすいと考えられる。今後は、PVC ゲルシートの動的力学特性や応力印加時の電極構造変化についての検討や、導電フィラーやイオン導電体を含有させたエラストマーの単繊維のように構造変化の起きにくい構造の検討が必要不可欠である。

### 【まとめ】

PVC ゲルから成る装着型触覚センサ開発の足掛かりとして、PVC ゲルシートの電位変化特性について電極構造の観点から検討した。Al シートや密に織り込まれた導電布は力印加に対する電位変化はほぼ示さなかったのに対して、ゲルが入り込む目開きがある電極材料（SUS メッシュ、導電布 B、導電ニット、フォーム）では電位変化を示し、繊維径とピッチの組合せに相関があることが示唆された。また、導電布 A は繊維同士の滑りや座屈による繊維束内部、繊維束間の構造変化が起こりやすく、そのため SUS メッシュよりも大きな電位変化を示したと考えられる。以上から、電極／ゲル接触面積を最大化する電極構造と、外部応力に対する電極構造の維持または変形のヒステリシスの低減が重要であることが示唆された。

本研究助成にて購入した設備を用い、今後は電位変化応答の再現性も含め、系統的に電極構造と電位変化との相関、PVC ゲルシートの応力緩和特性や応力印加時の電極構造変化について調べることで、センサ特性の向上やメカニズム解明に繋げる。さらに、圧力に対する構造変化のヒステリシスが小さくなるような繊維構造



図7 (a) PVC ゲル芯鞘導電ファイバー、(b) 身体装着可能な PVC ゲルファブリックセンサの概念図

(例：導電フィラーやイオン導電体を含有させたエラストマーの単繊維の利用) の開発や、図7に示すような PVC ゲル芯鞘導電ファイバーや身体装着可能な PVC ゲルファブリックを開発する予定である。

### 【謝 辞】

本研究を助成いただいた、公益財団法人 立石科学技術振興財団様へ感謝いたします。東京科学大学生命理工学院 藤枝俊宜教授の研究室内設備や試薬を一部使用して研究を推進しました。藤枝俊宜教授へ感謝申し上げます。

### 【参考文献】

- [1] B. Ji et al., "Gradient Architecture-Enabled Capacitive Tactile Sensor with High Sensitivity and Ultrabroad Linearity Range," *Small*, vol. 17, no. 43, p. e2103312, Oct. 2021.
- [2] H. Niu, Y. Chen, E. -S. Kim, W. Zhou, Y. Li, and N. -Y. Kim, "Ultrasensitive capacitive tactile sensor with heterostructured active layers for tiny signal perception," *Chem. Eng. J.*, vol. 450, p. 138258, Dec. 2022.
- [3] T. Hirai, "Dielectric Gels," in *Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives*, K. Asaka and H. Okuzaki, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 245-258.
- [4] M. Hashimoto, "Application of electroactive polymer," *J. Robot. Soc. Jpn.*, vol. 31, no. 5, pp. 457-460, 2013.
- [5] J. Neubauer, H. Jeremy Cho, and K. J. Kim, "Tunable polyvinyl chloride (PVC) and thermo-



- plastic polyurethane (TPU)-based soft polymer gel sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 31, no. 11, p. 115025, Oct. 2022.
- [ 6 ] M. Kim et al., "Stretching-insensitive stretchable and biocompatible triboelectric nanogenerators using plasticized PVC gel and graphene electrode for body-integrated touch sensor," *Nano Energy*, vol. 107, p. 108159, Mar. 2023.
- [ 7 ] H. Park et al., "Plasticized PVC-Gel Single Layer-Based Stretchable Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy and Tactile Sensing," *Adv. Sci.*, vol. 9, no. 22, p. e2201070, Aug. 2022.



## [研究助成 (A)]

## 学習者の主体的な行動を促すグループワーク支援ロボットの研究

2241026



研究代表者 富山県立大学  
(助成金受領者)  
共同研究者 富山県立大学

教授 増田 寛之  
教授 小柳 健一

## [研究の目的]

近年、アクティブラーニングの重要性が高まり、少人数でのグループワークによる主体的な課題解決活動が教育現場に導入されている。グループワークでは、発言や参加意欲にばらつきが生じやすく、教員や支援者による個別支援が学習効果の向上に重要である。一方、教育現場では教員数が限られており、各チームの進捗管理や個別指導には大きな負担がかかるという課題がある。

本研究では、グループワークにおいて、少人数でペアを組んだチーム毎にコミュニケーションロボット（以後、アシストロボット）を配置し、ロボットが学習者との対話を通じて学習のモチベーション向上を目指すとともに、情報収集を行うことで教員にとって有効な支援環境の構築を目的とする。この目的達成に向けて、まず第1段階では、アシストロボットの導入によってチーム単位での学習支援を実現し、学習者の主体性や協働的な取り組みの促進に繋がるかを明らかにする。さらに、学習者の主体性や共同的取り組みを効果的に促すロボットコミュニケーションのあり方を議論する。次に第2段階では、ロボットが収集したチームの学習進捗や行動データを教員と共有する仕組みを構築し、教員がグループワーク全体の進捗を容易に把握できる教育支援システムの実現を目指す。これにより、学習者の成果向上と教師の負担軽減をまとめて期待できると考えている。

本報告書では、まず第1段階に焦点を当てる。対象は、小学生向けロボットプログラミング教室におけるグループワークとし、アシストロボットによるチームごとの支援を通じて、主体的な学習の促進として機能することを実証的に検証することが目標である。従来の研究では、e-Learningなどの個別学習支援において、ロボットによるモチベーション向上や学習効果が報告されているが、グループワークにおいてチームごとに状況を把握しながら支援を行う事例は乏しく、その有効性や行動変容に関する知見は十分ではない。これを踏まえて、本研究では以下の2点の技術課題に取り組む。

- ① チーム毎の応答に基づいたアシストロボットのコミュニケーション機能の開発
- ② 学習者の進捗状況を自然な形で記録するシステムの構築

①については、親しみを感じさせる外観と表現に加え、音声認識・チームの学習進捗に基づいた動作の実現が重要となる。②については、記録されていることを学習者が過度に意識しない仕組みとすることが重要となる。

## [研究の内容、成果]

## 【グループワークにおける課題設定】

本研究では、小学生がLEGO SPIKEを用いて移動ロボットを製作し、図1で示すようにアシストロボットを移動ロボットに搭載して、目的地まで移動させるという課題を設定した。課



図1 グループワークにおける課題設定

題は、目的地到達、経由地点通過、マップの周回といった異なる難易度の課題を用意し、チームの進捗状況に応じて柔軟に提示できるよう構成した。進捗の早いチームには追加課題を提示することで、学習が途切れることを防ぎ、学習機会を最大限に活用できるよう設計した。

プログラミング教育の進行は、開始から20分程度でマニュアルを見ながらLEGOブロックを用いて移動ロボットを製作する。続いて、LEGO SPIKEを動かすためにScratchベースのプログラミング環境の基本を学ぶため、モータの動作、センサとの連動、及びライントレースのプログラムを学ぶ練習課題を3つ実施する。その後、走行マップ上でアシストロボットを目的地まで運ぶ課題に取り組む構成とした。

### 【アシストロボット「小ドンマス」の開発】

図2に開発したアシストロボット「小ドンマス」の構造を示す。小ドンマスは、可動箇所として肩・肘・腰の合計5軸を有し、学習者との対話的インタラクションを実現する複数の機能



図2 アシストロボット「小ドンマス」の構造

を備えている。視線表現には超小型LCDを用い、目の表情を動的に変化させることで状態を伝える。マイクは手元に配置し、手挙げ動作と連動した音声認識を実現しており、使用者にとって直感的な操作が可能である。さらに、IMUによりロボットの持ち上げ動作を検出し、NFCリーダにより移動ロボットへの搭載状態を認識できる構成とした。センサ・モータ制御はArduinoで実装し、音声認識やネットワーク通信など高機能な処理はRaspberry Pi 4Bを用いて実装した。

外装は、富山県立大学のPRキャラクター「ドンマス教授」をベースとし、小学生から親しみを持って受け入れられるデザインとした。また、子供っぽさを感じられる音質の音声合成ツールを搭載した。教室でのグループワーク実施に対応するため、同一仕様のロボットを計5台製作した。

アシストロボットのコミュニケーションにおける方針として、フランク心理学に基づく手法を適用した<sup>[1]</sup>。既存研究において、フランク心理学に基づくロボットコミュニケーションは、ロボット自身が弱さを示す発話や行動をすることで、被験者が得られる価値に気付かせることによって自発的な行動を促すことを示している。そこで、ロボットの発話として、「〇〇（目的地）まで自分で行きたい」や「もっと早くいけないかな」といった自身ができない弱みを示す発話を行うことで、学習者に「助けてほしい」という感情や責任感を喚起させることに繋がる。これにより、ロボットとの関係性を通じて学習者の内発的動機づけを高め、プログラミング教育におけるモチベーションの向上に繋がることを期待している。

### 【行動・進捗計測システムの構築】

ロボットが学習状況に応じた適切な支援を行うために、図3のような複数のデバイスが連携するシステムを構築した。各チームに配付したPC (Chromebook) にはマニュアルアプリを搭

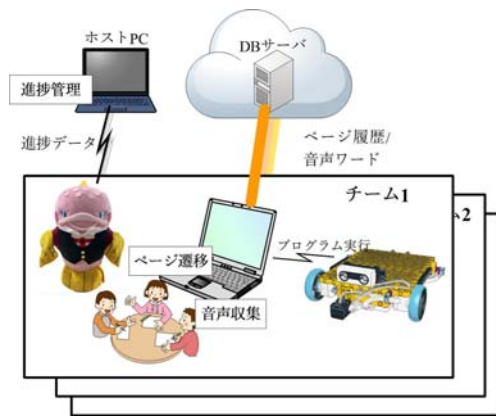


図3 ロボットを用いたプログラミング教育のシステム構成  
載し、開いたページ番号をIoTサーバへ随時記録する。加えて、音声認識APIを用いて発話内容（主語・動詞・形容詞）を定期的に収集・解析して、MySQL DBに記録する仕組みとした。ホストPCではDBに集約したデータをもとに、チーム毎に現在の学習フェーズ、学習時間、及びチーム内の会話の傾向をリアルタイムに分析する。ソフトウェアとしては、既存のシステム構成を元に、モジュール分割した構成とし、問題が起こっても常にロボットが動作し続けることを優先した構成とした<sup>[ii]</sup>。

実証実験に向けた最初の段階として、音声データより過去5分間における否定的語彙（例：「～ない」「だめ」等）の頻出度合いがしきい値を超えた時や、マニュアルのページが一定時間変化しない状況が継続した場合に、対応するチームのアシストロボットへコマンドを送信する。ロボットは、指令に基づいて、マニュアルの現在ページに関連する補足発話を行うことで、学習者の自律的な問題解決を支援するよう設計した。

### 【実証実験と評価】

実証実験として、連携している学童施設にてロボットプログラミング教室を実施した。ロボットありにて実施した際の実証の様子を図4に示す。参加した児童は小学3～6年生であり、2024年1月にはロボットを使用しないグループワークを行い参加者は18名（8チーム）、



図4 実証実験の様子

2025年3月には本研究のロボットシステムを導入したグループワークを行い参加者は13名（5チーム）、いずれも1チームあたり2～3名とし、同じ教育課題で実施した。本実験にあたっては、富山県立大学倫理審査委員会の承認のもと、保護者の同意を得てデータの収集を行った。

実験結果において、客観的な指標に基づく比較として、チーム毎のマニュアルのページ送りの推移を図5（ロボット無し）、図6（ロボットあり）に示す。ページを切り替えた時間でマーカーを表示しており、マーカーの区間が長い箇所は同じページを開き続けたことを示している。マニュアルのページとしては、30ページまで

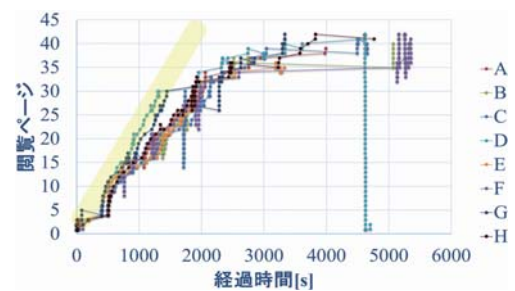


図5 ロボット無しのマニュアル進捗

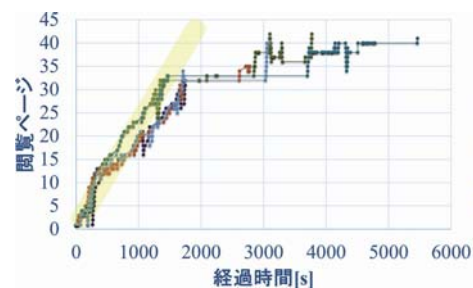


図6 ロボットありのマニュアル進捗



がロボットの組み立て、34 ページまでがロボットの動作のためのプログラミングの基礎、35 ページ以降はセンサと連携したプログラムなど小学生には難易度高めの内容となっている。ロボット無しの状況では、34 ページに到達するのに 30～40 分かかっているのに対し、ロボットありの状況では 25 分～30 分と進行が早かった。

取組中の発話内容の分析として、発話内容を各チームの PC で録音し、Whisper API で文字起こしをした後、MeCab を用いて品詞分類を通して検出頻度の高いワードを抽出した。図 7 にロボットありの時に頻繁に検出されたキーワードを示す。「いい」「回」の検出頻度が高く、ロボットの無しと異なる点はなかった。ただし、環境音として収集したため、ノイズや音量の小ささから文字起こしの精度が低くなり適切な仕分けができなかった点が課題となった。

主観的な評価として、教室終了後にアンケートを行った。図 8 にアンケートの集計結果を示す。各項目でロボットありと無しにおいてカイ二乗検定を行ったが、有意差は確認されなかった。しかし、基本的に配付したマニュアルを各自で読んで進めるスタイルながら、ロボットありでは教室の進行や説明の分かりやすと感じる傾向が分かった。特に、小学生には難しめの課題設定としているが、むずかしい問題に対して、ロボットありでは、より友達と相談する傾向が強い事が分かった。自由コメントでは「プログラミングは難しいけれど、動かすのは楽しかった」と回答するなど、難しいと感じていた

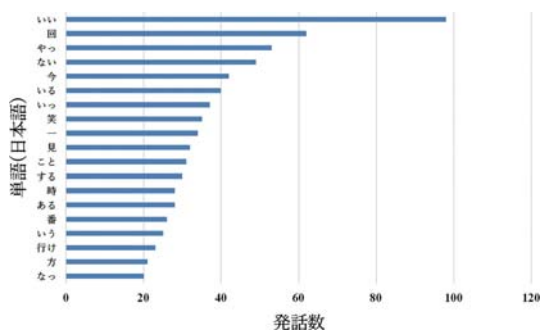


図 7 ロボットありの発話キーワード

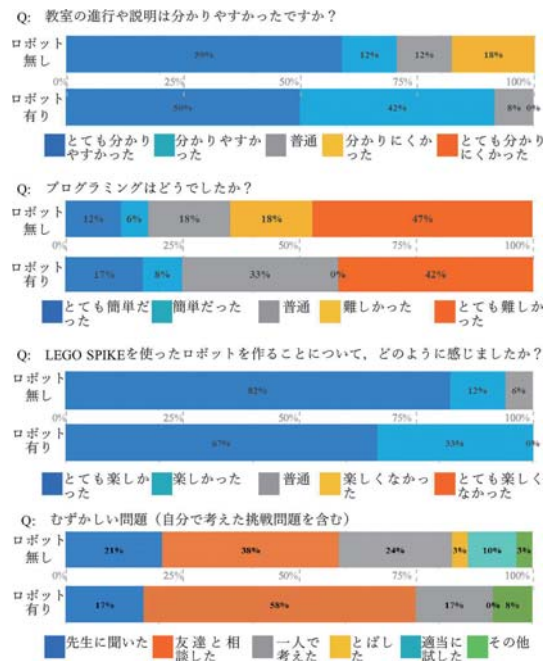


図 8 主観評価の結果

がロボットを動かしたりみんなで相談して楽しいと感じる学習者が多かった。

教員による観察・評価について、ロボット無しのときは進捗が停滞したチームにつきっきりになることがあり、他のチームの進捗が停滞するなど、進捗停滞と教員の負荷の大きさが問題となった。ロボットありのときは、子供達がロボットの発話するキーワードに反応し、チーム内で様々な議論、試行を重ねることに繋がる様子を観察できた。ロボットの発話内容は、進捗に対して適切とは限らないケースも観察されたが、チーム内では気になるキーワードを議論のきっかけとして、チーム内での工夫を相談し、より充実した試行錯誤をしていた。結果として、教員のサポートが特定のチームに集中する場面が減少したと感じた。

## 【まとめ】

本研究では、小学生向けのグループワーク教育におけるチーム単位の学習支援を目的とし、アシストロボット「小ドンマス」と進捗計測システムを統合した教育支援環境を構築した。

実証実験の結果、ロボットの導入により学習



の進捗が促進され、児童の自発的行動やチーム内の相談が増加したことが確認された。また、教員の観察からは、支援の偏りが減り、学習者の自発的な活動が促進される可能性が示された。

今後の課題として、収集したデータからより状況に適した支援タイミングの推定など、理解促進を促すコミュニケーション手法のあり方、教師と共同で支援を行うための仕組みの構築を検討している。

[成果の発表、論文など]

- [1] 堀江悠生, 増田寛之, 布施陽太郎, 小柳健一, 澤井圭, 李豊羽, アルマスリ アハメド: “グループワークでのチーム支援を目的としたコミュニケーションロボット「小ドンマスロボット」の開発”,

第 42 回日本ロボット学会学術講演会 RSJ2024, 3A1-05, 2024.

- [2] 増田寛之: “教育支援ロボットに求められる機能とシステム構成”, 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol. 36, No. 4, pp.105-110, 2024.

[参考文献]

- [i] 増田寛之, 松尾優成, 林憲玉: “フランク心理学に基づくパートナーロボットの知的インタラクション”, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol. 26, No. 1, pp.549-558, 2014.
- [ii] H. Masuta, E. Hiwada and N. Kubota: “Control Architecture for Human Friendly Robots Based on Interacting with Human”, 4th International Conference on the 2011 International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Part II, LNAI 7102, pp. 210-219, 2011.

## [研究助成 (A)]

## Advanced Vector DB

## —— データ構造ドリブンな LLM 知識注入 ——

2241027



研究代表者

東京大学  
大学院情報理工学系研究科

講 師

松 井 勇 佑

## [研究の目的]

ChatGPT といった Large Language Model (LLM) は社会を変革する力を持つが、「自分の持つ情報を LLM に読み込ませる」という極めて単純かつ重要な操作について、どうするのが一番よいかという明確な答えがまだ無い。例えば小説を一冊分 LLM に読み込ませ、LLM に「太郎の友達是谁？」と質問し返答させたいとする。このとき、小説の情報を LLM に読み取らせる最も簡単かつ有力な方式はベクトル探索 (Vector Database; Vector DB) を元にしたものと言われている。ところが、この Vector DB による探索は現在「色々な人が色々なことをやってみている」という状況にある。私はこの Vector DB に対しデータ構造の深化という方向で取り組んだ。

Vector DB による LLM 知識注入は次のステップからなる：① 自分が持つ文章情報を細切れにし、それらを文章特徴量抽出器に入力し、特徴量ベクトルたちを得る。② LLM への質問文も同様に特徴量ベクトルに変換する。③ 質問に似ている特徴量を探す。④ その結果を質問文に追記し、質問する。ここにおける技術的課題は、上記の既存探索アプローチは極めてナイーブな「似てるもの探し」であり、少し複雑な状況になると途端に対応できないという点にある。例えば小説の例で「太郎にはたくさん友達がいるが、特に花子と親しく、花子に会ったシーンがたくさんある」とする。この時、「太

郎の友達是谁？」という質問に対し、上記既存探索アプローチは花子シーンばかりを探してきてしまい、「太郎の友達花子です」としか答えられないかもしれない。

このようなナイーブな似ているもの探しを脱却するために、申請者は探索部分のデータ構造・アルゴリズムレベルで、複雑な探索をサポートする方式を提案する。上記の例でいうと、「検索結果がうまく散らばる (花子ばかりではなく、花子・次郎・ケンジとする)」ように探索データ構造レベルで対応した。

## [研究の内容、成果]

以下に、本計画の主たる成果である「多様な探索」の方式を記す。本方式はコンピュータビジョン分野に関する国内最大の会議「画像の理解・認識シンポジウム (MIRU)」にて、査読を経てオーラル発表に選定された。加えて、オーラル発表の各セッション中、投票で一位のものに与えられる「オーディエンス賞」を受賞した。

## ■はじめに

近似最近傍探索とは、クエリに近いベクトルをベクトル集合から高速に探す処理である<sup>[23]</sup>。近似最近傍探索は様々なシステムの構成要素であり、画像検索や情報推薦など広い分野で用いられている。近年は、大規模言語モデルに情報を入力する Retrieval Augmented Generation

(RAG)方式のために近似最近傍探索は注目されている<sup>[3]</sup>。

近似最近傍探索は有用だが、探索結果が必ずしも多様ではない。例えば猫画像をクエリとすると、その猫に似た画像が多数存在する場合、探索結果上位に同じ猫が並んでしまい、均一な結果となる。このような状況では、ただクエリに似ているだけでなく、探索結果がお互いに似て「いない」、すなわち多様な結果が好まれる場面がある。そのような探索問題は多様近傍探索<sup>[10,32,38]</sup>と呼ばれるが、多くの既存の多様近傍探索方式は以下の理由により遅い。(1) 最新の近似最近傍探索方式の知見が取り込まれていない、(2) 組み合わせを計算する必要がある、(3) 元のベクトルそのものにアクセスする必要がある。

我々は、超高速な多様近傍探索を実現する。提案方式は、事前に準備した足切り表を用い、近似最近傍探索結果に対し貪欲に候補を絞り込み、多様な探索を実現する。提案するデータ構造および探索方式はシンプルであり、高速である。その概念図を図1に示す。我々の貢献は以下である。

- ・提案方式は近似最近傍探索結果に対する「後処理モジュール」である。そのため、最新の超高速な近似最近傍探索方式をブラックボックスとして利用出来る。
- ・パラメータである閾値 $\varepsilon$ を事前に学習する方式を提案する。提案方式は煩雑なパラメータ調整が無い。
- ・提案方式は大規模データ（106本の96次元

ベクトル）にも有効であり、0.05[ms/query]しかかからない。

## ■事前準備

$N$ 本の $D$ 次元ベクトル $\{x_n\}_{n=1}^N$ があるとする。クエリ $q \in \mathbb{R}^D$ が与えられた際、 $q$ に近くかつ多様な $K$ 本のベクトルを得たい。得られた結果は、IDの集合として $\mathcal{K} \subseteq \{1, \dots, N\}$ かつ $|\mathcal{K}| = K$ で表す。

探索は2ステップから成る：(1) クエリに対して近似最近傍探索を実行し、クエリに近い $S$ 本のベクトルを得る。これを初期候補集合 $\mathcal{A}$ とする。2つ目のステップは、候補集合 $\mathcal{A}$ から、部分集合 $\mathcal{K}$ を選び取ることである。これは評価関数 $f: 2^{\mathcal{A}} \rightarrow \mathbb{R}$ を最小化する、部分選択問題として定式化される： $\argmin_{\mathcal{K} \subseteq \mathcal{A}, |\mathcal{K}|=K} f(\mathcal{K})$ ここで $f$ はID集合が「クエリへの近さ」と「多様性」の両方を考慮してどれほど良いかを示す指標である。これを、我々は次のように立式する。

$$f(K) = \frac{1-\lambda}{K} \sum_{k \in \mathcal{K}} \|q - x_k\|_2^2 - \lambda \min_{i, j \in \mathcal{K}, i \neq j} \|x_i - x_j\|_2^2$$

ここで第一項は選択されたベクトルたちとクエリがどれほど近いかを示す、最近傍探索そのものである。第二項はベクトルたちの多様度を示す指標である。ここでは[1], [16]に習い、ベクトル同士の中で最も近い距離とした。ここで $\lambda$ は2つの項を調整するパラメータであり、0であれば最近傍探索に、1であればクエリを考慮せず集合の多様度を評価するMAX-MIN多様化問題<sup>[31]</sup>となる。

## ■提案方式

提案方式は各点から距離が近いものを事前に調べIDを表に保存し、探索時にIDを表引きして候補から除外する。これをOrderedSetというデータ構造で高速に実現する。

### 前処理

前処理をアルゴリズム1に示す。データと、二乗距離の閾値 $\varepsilon$ を入力とする。L2において、まず近似最近傍探索のデータ構造（インデク

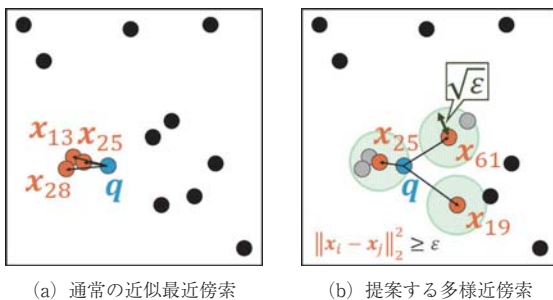


図1 提案方式の概要図

ス)  $I$  を構成する。 $I$  には任意のもの (例えば HNSW<sup>[22]</sup>) を使用して良い。次に L2-3 で足切り表を構成する。各点について、自身との二乗距離が  $\varepsilon$  未満のベクトルの ID の集合  $\mathcal{L}_n$  を記録する。これを足切り表 (整数配列の配列) と呼ぶ。足切り表を計算するには各点をクエリに範囲探索を実行する。この計算量を合計  $O(NT)$  とする。この処理は最近傍探索ではなく範囲探索だが、簡単のため近似最近傍探索と同じ  $O(T)$  とした。後に表 2 で示す通り  $N=10^6$  の場合このステップの実行時間は最大 10 秒程度である。

足切り表の要素数の平均値を  $L$  とすると、足切り表に必要な素朴なメモリ量は、要素に 64 bit 整数を用いて  $64 LN[\text{bit}]$  となる (表 2 より、 $L$  は 100 以下程度)。

#### Algorithm 1: BUILD

Input:  $\{\mathbf{x}_n\}_{n=1}^N \subseteq \mathbb{R}^D$ ,  $\varepsilon \in \mathbb{R}$   
 1  $\mathcal{I} \leftarrow \text{BUILDINDEX}(\{\mathbf{x}_n\}_{n=1}^N)$  # Index of ANN  
 2 for  $n \in \{1, \dots, N\}$  do  
 3  $\mathcal{L}_n \leftarrow \{i \in \{1, \dots, N\} \mid \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_i\|_2^2 < \varepsilon, n \neq i\}$   
 4 return  $\mathcal{I}, \{\mathcal{L}_n\}_{n=1}^N$

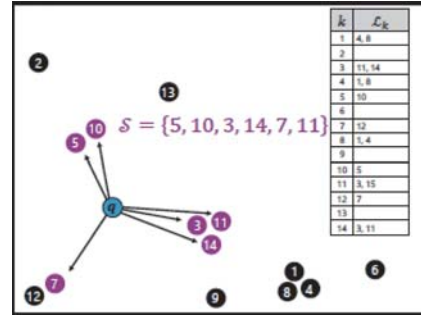
#### 探索のアルゴリズム

アルゴリズム 2 と図 2 で探索について述べる。入力は、クエリ、初期探索の結果個数、最終的な結果個数、インデクス、足切り表になる。

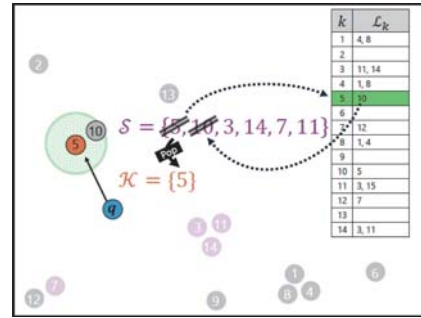
まず L1 (図 2a) にて近似最近傍探索を実行し候補集合を得る。次に L2 にて最終結果のための整数集合を準備する。L3-6 では、要素数が  $K$  になるまで集合  $\mathcal{K}$  に要素を追加する。L4-5 では、候補集合から、最もクエリに近い (配列の先頭にいる) ID を  $k$  として取り出し、くわえる。L6 が収容である。現在注目してい

#### Algorithm 2: SEARCH

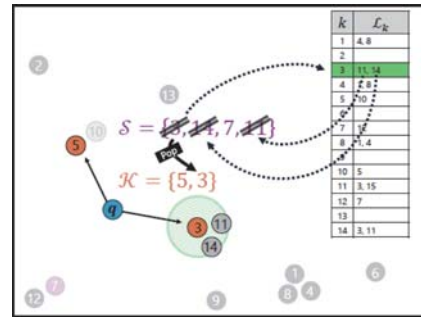
Input:  $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^D$ ,  $S(\leq N)$ ,  $K(\leq S)$ ,  $\mathcal{I}$ ,  $\{\mathcal{L}_n\}_{n=1}^N$   
 1  $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{I}.\text{SEARCH}(\mathbf{q}, S)$  #  $\mathcal{S} \subseteq \{1, \dots, N\}$   
 2  $\mathcal{K} \leftarrow \emptyset$   
 3 while  $|\mathcal{K}| < K$  do # At most  $K$  times  
 4  $k \leftarrow \text{POP}(\mathcal{S})$  #  $O(L)$   
 5  $\mathcal{K} \leftarrow \mathcal{K} \cup \{k\}$  #  $O(1)$   
 6  $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \setminus \mathcal{L}_k$  # Remove as applicable.  $O(L)$   
 7 return  $\mathcal{K}$  #  $\mathcal{K} \subseteq \mathcal{S}$  where  $|\mathcal{K}| = K$



(a) 初期探索の実行 ( $S=6$ )



(b) 第一候補を採用。表で足切り。



(c) 次の候補を採用。表で足切り。

図 2 提案方式の流れ

る  $k$  に関して、 $\mathbf{x}_k$  に近いベクトルたちの ID は  $\mathcal{L}_k$  に保存されている。よって、これを候補集合から除去することで、候補集合中から似たものを消すことができる (図 2b)。このステップを繰り返すことにより、最終的に得られる  $\mathcal{K}$  の要素はお互いに少なくとも  $\sqrt{\varepsilon}$  は離れているものとなる。

#### ■実験

性能を評価する。全実験は AWS EC2 インスタンス (3.2 GHz Intel Xeon CPU, 仮想 32 コア, 64 GiB メモリ) で実行した。前処理はマルチスレッドで、探索部分はシングルスレッドで実行した。近似最近傍探索部分は faiss ライブラ



り<sup>[8]</sup>中の HNSW 方式<sup>[22]</sup>を用いた。提案方式は、c++ コードを nanobind<sup>[17]</sup>で python から呼んだ。

Deep1B<sup>[4]</sup>の一部である Deep1M を探索対象とした。これは、 $10^6$ 本の 96 次元ベクトルから成る。104 本のクエリ、および訓練のために訓練セットの先頭 1000 本を用いた。

表 1 にて方式を比較する。比較対象は近似最近傍探索単体の HNSW、および、 $S$  に対しお互いが遠くなるように貪欲に結果を更新する GMM<sup>[1,31]</sup>を選んだ。

- ・提案手法は HNSW 単体に比べてより多様な結果（小さい多様化項）を実現している。GMM は最も多様な結果を得ているが、その分探索項が犠牲となっている（クエリに似ていない結果となっている）。
- ・提案方式は高速（0.047 [ms/query]）であり、初期探索（0.273 [ms/query]）の 1/6 程度しかかからない。そのため、多様化無しの HNSW 単体と同程度の時間しかかからない。一方、GMM は全対を計算するため、提案の 30 倍である 10.1 [ms/query] の時間がかかる。

表 1 比較実験の結果

| 手法                    | 精度 (↓) |        |             | 実行時間 [ms/query] (↓) |       |       |
|-----------------------|--------|--------|-------------|---------------------|-------|-------|
|                       | 探索項    | 多様化項   | 最終性能( $f$ ) | 初期探索                | 多様化   | 合計    |
| HNSW [22]             | 0.559  | -0.162 | 0.199       | 0.207               | -     | 0.207 |
| HNSW [22] + GMM [31]  | 0.652  | -0.479 | 0.086       | 0.280               | 9.87  | 10.1  |
| HNSW [22] + 足切り表 (提案) | 0.585  | -0.280 | 0.153       | 0.273               | 0.047 | 0.320 |

## ■まとめ

多様な探索を実現するための「後処理モジュール」を提案した。提案方式は足切りを実現するテーブルを用いる。実験により、提案方式は最新の近似最近傍探索と同程度の時間で多様な探索を実現した。

## 参考文献

- [1] Amagata, D.: Diversity Maximization in the Presence of Outliers, Proc. AAAI (2023).
- [2] André, F., Kermarrec, A.-M. and Scouarnec, N.

- L.: Quicker ADC: Unlocking the Hidden Potential of Product Quantization With SIMD, IEEE TPAMI, Vol. 43, No. 5, pp. 1666–1677 (2021).
- [3] Asai, A., Min, S., Zhong, Z. and Chen, D.: ACL2023 Tutorial on Retrieval-based Language Models and Applications.
- [4] Babenko, A. and Lempitsky, V.: Efficient Indexing of Billion-Scale Datasets of Deep Descriptors, Proc. IEEE CVPR (2016).
- [5] Baranchuk, D., Babenko, A. and Malkov, Y.: Revisiting the Inverted Indices for Billion-Scale Approximate Nearest Neighbors, Proc. ECCV (2018).
- [6] Chen, D., Li, W., Li, Y., Ding, B., Zeng, K., Lian, D. and Zhou, J.: Learned Index with Dynamic  $\epsilon$ , Proc. ICLR (2023).
- [7] Ding, J., Nathan, V., Alizadeh, M. and Kraska, T.: Tsunami: A Learned Multi-dimensional Index for Correlated Data and Skewed Workloads, Proc. VLDB (2020).
- [8] Douze, M., Guzhva, A., Deng, C., Johnson, J., Szilvasy, G., Mazaré, P.-E., Lomeli, M., Hosseini, L. and Jégou, H.: The Faiss Library, arXiv, Vol. 2401.08281 (2024).
- [9] Douze, M., Sablayrolles, A. and Jégou, H.: Link and code: Fast indexing with graphs and compact regression codes, Proc. IEEE CVPR (2018).
- [10] Drosou, M. and Pitoura, E.: Search Result Diversification, Proc. SIGMOD (2010).
- [11] Drosou, M. and Pitoura, E.: DisC Diversity: Result Diversification based on Dissimilarity and Coverage, Proc. VLDB (2012).
- [12] Ferragina, P., Lillo, F. and Vinciguerra, G.: Why Are Learned Indexes So Effective?, Proc. ICML (2020).
- [13] Ferragina, P. and Vinciguerra, G.: Learned Data Structures, Springer International Publishing (2020).
- [14] Ferragina, P. and Vinciguerra, G.: The PG-Mindex: a fully dynamic compressed learned index with provable worst-case bounds, Proc. VLDB (2020).
- [15] Fu, C., Xiang, C., Wang, C. and Cai, D.: Fast Approximate Nearest Neighbor Search with the Navigating Spreading-out Graph, Proc. VLDB (2019).
- [16] Hirata, K., Amagata, D., Fujita, S. and Hara, T.: Solving Diversity-Aware Maximum Inner Product Search Efficiently and Effectively, Proc. RecSys (2022).
- [17] Jakob, W.: nanobind: tiny and efficient C++/Python bindings (2022). <https://github.com/wjakob/nanobind>.
- [18] Jégou, H., Douze, M. and Schmid, C.: Product

- Quantization for Nearest Neighbor Search, IEEE TPAMI, Vol. 33, No. 1, pp. 117-128 (2011).
- [19] Kochenderfer, M. J. and Wheeler, T. A.: Algorithms for Optimization, The MIT Press (2019).
- [20] Kraska, T., Beutel, A., Chi, E. H., Dean, J. and Polyzotis, N.: The Case for Learned Index Structures, Proc. SIGMOD (2018).
- [21] Liu, Q., Zheng, L., Shen, Y. and Chen, L.: Stable Learned Bloom Filters for Data Streams, Proc. VLDB (2020).
- [22] Malkov, Y. A. and Yashunin, D. A.: Efficient and Robust Approximate Nearest Neighbor Search using Hierarchical Navigable Small World Graphs, IEEE TPAMI, Vol. 42, No. 4, pp. 824-836 (2020).
- [23] Matsui, Y., Aumüller, M. and Xiao, H.: CVPR2023 Tutorial on Neural Search in Action.
- [24] Matsui, Y., Imaizumi, Y., Miyamoto, N. and Yoshifuji, N.: ARM 4-bit PQ: SIMD-based Acceleration for Approximate Nearest Neighbor Search on ARM, Proc. IEEE ICASSP (2022).
- [25] Matsui, Y., Yamaguchi, T. and Wang, Z.: CVPR 2020 Tutorial on Image Retrieval in the Wild.
- [26] Mitzenmacher, M.: A Model for Learned Bloom Filters, and Optimizing by Sandwiching, Proc. NeurIPS (2018).
- [27] Nathan, V., Ding, J., Alizadeh, M. and Kraska, T.: Learning Multi-dimensional Indexes, Proc. SIGMOD (2020).
- [28] Oguri, Y. and Matsui, Y.: General and Practical Tuning Method for Off-the-Shelf Graph-Based Index: SISAP Indexing Challenge Report by Team UTokyo, Proc. SISAP (2023).
- [29] Ono, N. and Matsui, Y.: Relative NN-Descent: A Fast Index Construction for Graph-Based Approximate Nearest Neighbor Search, Proc. MM (2023).
- [30] Rao, V., Jain, P. and Jawahar, C.: Diverse Yet Efficient Retrieval using Locality Sensitive Hashing, Proc. ICMR (2016).
- [31] Ravi, S. S., Rosenkrantz, D. J. and Tayi, G. K.: Heuristic and Special Case Algorithms for Dispersion Problems, Operations Research, Vol. 542, No. 2, pp. 299-310 (1994).
- [32] Santos, R. L. T., Macdonald, C. and Ounis, I.: Search Result Diversification, Foundations and Trends in Information Retrieval, Vol. 9, No. 1, pp. 1-90 (2015).
- [33] Sato, A. and Matsui, Y.: Fast Partitioned Learned Bloom Filter, Proc. NeurIPS (2023).
- [34] Subramanya, S. J., Devvrit, F., Simhadri, H. V., Krishnawamy, R. and Kadekodi, R.: DiskANN: Fast Accurate Billion-point Nearest Neighbor Search on a Single Node, Proc. NeurIPS (2019).
- [35] Vaidya, K., Knorr, E., Mitzenmacher, M. and Kraska, T.: Partitioned Learned Bloom Filters, Proc. ICLR (2021).
- [36] Wang, M., Xu, X., Yue, Q. and Wang, Y.: A Comprehensive Survey and Experimental Comparison of Graph-Based Approximate Nearest Neighbor Search, Proc. VLDB (2021).
- [37] Wu, J., Zhang, Y., Chen, S., Wang, J., Chen, Y. and Xing, C.: Updatable Learned Index with Precise Positions, Proc. VLDB (2021).
- [38] Zheng, K., Wang, H., Qi, Z., Li, J. and Gao, H.: A Survey of Query Result Diversification, Knowledge and Information Systems, Vol. 51, pp. 1-36 (2017).

[成果の発表, 論文など]

- (1) 松井勇佑, “学習型足切り表による高速な多様近傍探索”, 画像の認識・理解シンポジウム, (MIRU), オーディエンス賞, Oral, 2024.

## [研究助成 (A)]

## サイバー空間におけるラポール形成へ向けたシステム開発

2241028

研究代表者  
(助成金受領者)

理化学研究所

研究員

宮 田 紘 平

共同研究者

東京大学 大学院総合文化研究科

教 授

工 藤 和 俊

お茶の水女子大学 文理融合 AI・  
データサイエンスセンター

講 師

土 田 修 平

## [研究の背景]

新型コロナウイルスの感染拡大により、三密の回避、ソーシャルディスタンスが推奨され、私達の交流の場は対面からオンラインへの移行を余儀なくされた。この取り組みは一定の効果を持ち、感染者数を抑えることに成功してきたが、感染拡大の長期化は孤独感・孤立感を高めることになった（コロナ下での人々の孤独に関する調査、2022年2月、JST）。オンラインによる空気という媒介物の喪失、それを感じると身体性の制約は私たちのインタラクションの質、対人関係にどのような影響を与えたのだろうか。

同様の問題は、当該研究分野においても存在する。模倣・運動同期はラポール（心が通じる状態）形成を促すが、その神経メカニズムを明らかにするために、機能的磁気共鳴画像法（fMRI）や脳波（EEG）といった脳機能イメージング手法を使って、インタラクション中の2人の脳活動を同時記録する試みが行われてきた（Dumas et al., 2010; Miyata et al., 2021）。これまで個人間で脳活動が同期することが報告されてきたが、fMRIとEEG研究で一貫した知見に達していない。この背景として、イメージング手法で捉えられる神経活動の側面の違いに加えて、インタラクションの空間が異なることも要因として考えられる。EEG研究では基本的に対面だが、fMRI研究では装置の制約上オン

ラインによるインタラクションにせざるを得ない。これら空間の違いが脳活動に与える影響は未だ不明である。また、メタバースのようにサイバー空間が次世代のインタラクション空間として期待されているが、アバターという新しい身体性を得た時、対面と同じようにインタラクションできるのか。インタラクション空間がコミュニケーションの質や人間関係に及ぼす影響を理解することは、ヒトの社会性の理解、情報技術の開発、そして感染症との共存社会・デジタル社会における Well-being に重要であるが、未だ不明である。

## [研究の目的]

本研究の大きな目標は、ヒトのインタラクション空間がコミュニケーション及びラポール形成に与える影響を明らかにすることである。最終的に、サイバー空間でもフィジカル空間と同様のインタラクションを生む諸条件を同定し、未来のコミュニケーションにおける機械とヒトの調和を目指す。

インタラクション空間の影響を明らかにするためには、インタラクション空間そのものを系統的に操作する必要がある。そこで本申請研究では、インタラクション空間を自由自在に操作可能なサイバー空間およびフィジカル・サイバー空間両方で同等に実施可能な実験課題の選

定など、実験実施のためのシステム開発を目的とした。

### [研究の内容]

本申請期間内での目標は、フィジカル空間と同等のサイバー空間および実験課題を開発することである。インタラクション空間の影響を検討するためには、課題、視野、聴覚情報など空間以外の諸条件を統制する必要がある。この統制が本研究において大きな課題であり、最終目標達成において非常に重要である。申請者はこれまでにヒトとAIの絆形成を目的とした技術開発に携わり、アバターを介した模倣インタラクション研究を行った経験をもつ (Numata et al., 2020)。対面での模倣は、意図が模倣者と被模倣者間で共有され、一体感や相手への親近感といったラポールが形成されるインタラクションである (Cirelli et al., 2014)。しかし、このときはモニターに映し出されるアバターとのインタラクションであった。今回は、より空間への没入感、身体性の高い仮想空間やアバターによる模倣インタラクションを課題として用いる。サイバー空間構築には、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション分野を専門とする土田修平氏の協力を仰ぎ、実験課題については身体性研究を専門とする工藤和俊教授の協力を仰いだ。

### 開発方針と機材選定

当初、Meta Quest 3 と Unity を用いた自作システムの構築を想定していたが、より自然な刺激提示と課題動作の実現のため、採択後に発売された Apple Vision Pro を採用する判断を下した (図 1)。Vision Pro は、空間内での自然なハンドトラッキングと高精度な視線認識機能を備えており、従来のコントローラ型 VR よりもユーザーの没入感と操作直感性に優れている。これにより、実験参加者のシステム操作に対する学習コストを最小限に抑え、自然な動作を引



図1 開発に使用した Apple Vision Pro

き出すことが期待される。開発環境については、Xcode を用いて開発を行った。

### フィジカル空間と同等のサイバー空間の開発

フィジカル空間については、所属研究室の実験室をモデルとした。実験室は心理実験用の部屋で、およそ 30 平米の部屋にシールドルーム 2 部屋や机などの家具が配置されている。サイバー空間をフィジカル空間に合わせて一からデザインすることは労力がかかるため、空間を 3 次元スキャンする方法を用いた。空間を Light Detection And Ranging (LiDAR) センサーと Apple 社が提供する RoomPlan API を用いて、壁・床・天井・家具などの空間を 3D スキャンする。このスキャンしたデータを元に仮想空間を構築した (図 2)。



図2 再構築された実験室全体のイメージ

スキャンによって取得した実空間の 3D データを、Vision Pro 上でイマースブ（没入型）表示できるように Xcode 上でシステム構築した。ユーザーが VR ゴーグルを装着すると、現実世界を置き換えるかのように仮想空間が 360 度の視界に広がり、あたかもその場所にいるかのような体験が得られる。さらに視点の移動や首の



回転に応じて、リアルタイムで視界が変化するようにし、ユーザーが空間内を自由に見回したり、歩き回ったりすることができるようにした。基本的にビデオシースルー機能で見られる空間とサイバー空間が近くなるように設定した。

#### サイバー空間での実験課題の開発及び動作記録

VRゴーグルをつけた状態で動き回することは可能であるものの、しばしばVR酔いが生じることが知られている (Chang et al., 2020)。VR酔いは乗り物酔いに似た症状であり、不快感、吐き気、倦怠感が引き起こされ、申請者自身も開発中に幾度も苦しめられた。一般的には、乗り物酔いと同様に、三半規管の平衡感覚と目から入る視覚情報の間の不一致によって生じると考えられている。そのため激しい動きや長時間の装着はVR酔いを引き起こしやすくなる。実験課題の選定にあたっては、ある程度自然かつダイナミックな運動ではあるものの、視野が大きく変化することのない課題である必要がある。

そこで実験課題として、2人の参加者が鏡のように動きを合わせるミラーゲームを手の動きで行うこととした。ミラーゲームは先行研究で開発・確立されている課題であり (Noy et al., 2011)、近年では仮想空間内でアバターを用いたミラーゲーム実験も行われている (Llobera et al., 2022)。この課題は先行研究との比較が可能であることに加え、フィジカル空間とサイバー空間で同等に実施することができるという条件を満たし、手の動きに限定することで視野の変化を最小限にすることができる。また、動作計測も Vision Pro 内蔵のセンサーで完結できるというメリットがある。

両手の動作を Vision Pro で記録・保存できるように開発を行った。Vision Pro 内蔵センサーを用いて手指の検出を行い、JSON ファイルで出力できるようにした。Vision Pro 上では、手の検知は映像のリフレッシュレートに依存し、60-90 Hz とその時々で変わってしまう。また高頻度でのデータ保存はシステムに負荷をかけ

るため、サンプリングレートは十分に手の動作を認識でき、安定してデータを取得できる 30 Hz とした。

#### [今後の展望と課題]

今回のフィジカル空間のスキャン方法ではサイバー空間に多少の歪みが生じていた (図3)。今回の実験室は、空間的に複雑な情報であったため、実際の運用にあたってはよりシンプルな実験室を利用することで、歪みを抑えられると考えられる。



図3 実際の実験室との比較

より精度の高い仮想空間の構築に加え、空間内で相手をどのように表示させるかというのが残された大きな課題である。フィジカル空間との比較を行うことを考慮すると、相手の見た目はそのまま表示できたほうが好ましい。Vision Pro にはユーザーの手の背景を切り取り、サイバー空間内にユーザーの実際の手を表示させる機能がある。同様の方法を用いて、目の前の人を切り出して、サイバー空間に切り出すことを試みたが、公式にサポートされた API がないため現状では困難であった。直接的なフィジカル空間とサイバー空間の比較を諦めて、アバターを利用することでサイバー空間内での比較が現実的な解決方法であると考えられる。アバターという身体性の影響を調べるためにも、実際の人の姿から徐々にかけ離れていくようなコントロール可能なアバターの作成を今後行う必要がある。

一方で、今回の開発中に Apple 社から Spatial Persona 機能のベータ版が公開された。Spatial Persona とは、Apple 社の Facetime といったビデオ通話機能を発展させた機能であり、Vision Pro を装着しているユーザーの空間内に相手のアバター（現時点では頭部と手のみ）を表示させる機能である。相手が実際には存在しない場合でも、より空間を共有している感覚を味わうことができる。

また、同じ部屋にいる人が Vision Pro を装着している場合は相手の視線や表情をみることができないが、Vision Pro でユーザーの視線や表情を読み取り、ゴーグルを装着している人の上にスキャンしたユーザーのアバターを重ねて表示させ、視線や表情を反映させることができる。これらの機能を応用することができると考えられる。

これらの課題を解決したのち、今後行動実験を実施し、EEG の 2 個体同時記録実験を実施する予定である。以下に現在計画している具体的な実験例をあげる。

### 計画している実験例

2 人の参加者が空間内で向かい合い、手を自由に動かすミラーゲーム課題を行う。各試行は 1 分として、最初と最後の 20 秒は相手の動きが見えないようにし、中間の 20 秒で相手の動きが見えるようにする。この中間の 20 秒については、参加者 A と B がお互いに合わせる条件、参加者 A が参加者 B に合わせる条件、参加者 B が参加者 A に合わせる条件の 3 条件とする。

空間については被験者間条件として、フィジカル空間（VR ゴーグルなし）条件、シースルー（フィジカル空間がそのまま見える）条件、仮想フィジカル空間（フィジカル空間ベースとした空間）条件、サイバー空間（フィジカル空間情報から色などの情報を除いた無機質な空間）条件を設定する。

行動データは Vision Pro 内蔵センサーを用

いて手指の動作を検出、記録を行う。お互いの空間内に動きを反映させるために光学的 3 次元動作解析装置を用いて外部カメラによって記録し、その情報を相手の空間内に反映させる。行動データの記録と合わせて EEG の同時計測を行う。ラポール形成については、インタビューと主観的評価尺度（例：相手への親近感、理解感、一体感）を用いる。

仮説として、実際に空間を共有しているフィジカル空間条件で、ラポール関連の指標は最も高く、サイバー空間条件になるに従って、場の共有感が減少し、ラポール関連指標も低下すると予想される。同様のパターンが、「手の軌跡の重なり度」といった運動協調のパフォーマンスや 2 人の脳活動間の機能的結合の強さにも見られることが予想される。

これら空間の統制による行動・神経活動変容、主観的評価との関係性を明らかにし、離れた場所にいながら場の共有感をつくる環境構築に資する研究へ発展させる。

### [引用文献]

- Chang, E., Kim, H. T., & Yoo, B. (2020). Virtual reality sickness: a review of causes and measurements. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36(17), 1658-1682.
- Cirelli, L. K., Einarson, K. M., & Trainor, L. J. (2014). Interpersonal synchrony increases prosocial behavior in infants. *Developmental science*, 17(6), 1003-1011.
- Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *PloS one*, 5(8), e12166.
- Llobera, J., Jacquat, V., Calabrese, C., & Charbonnier, C. (2022). Playing the mirror game in virtual reality with an autonomous character. *Scientific Reports*, 12(1), 21329.
- Miyata, K., Koike, T., Nakagawa, E., Harada, T., Sumiya, M., Yamamoto, T., & Sadato, N. (2021). Neural substrates for sharing intention in action during face-to-face imitation. *NeuroImage*, 233, 117916.
- Noy, L., Dekel, E., & Alon, U. (2011). The mirror game as a paradigm for studying the dynamics of

- 
- |                                                                                                                                                         |                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| two people improvising motion together. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(52), 20947-20952.                                          | cation by enabling virtual agents to imitate positive expressions. Scientific reports, 10(1), 5977. |
| — Numata, T., Sato, H., Asa, Y., Koike, T., Miyata, K., Nakagawa, E., Sumiya, M., & Sadato, N. (2020). Achieving affective human-virtual agent communi- | [成果の発表, 論文など]                                                                                       |
|                                                                                                                                                         | 該当なし                                                                                                |

## [研究助成 (A)]

## 熟練技能者の技術の継承を支援する人協調型 AI システムの開発

2231029



研究代表者 北九州市立大学 国際環境工学部 教授 村上 洋

## [研究の目的]

近年、少子高齢化に伴う製造業の人手不足により熟練技能者の技術伝承が困難となりつつある。そこで産業界では人手不足を補うためスマートファクトリー化が進展し、生産工程の自動化や加工中の異常の検知・予測技術に関する関心が高まってきている。スマートファクトリー構築において機械加工工程の自動化は生産工程全体を自動化する際の重要な問題の一つである。特に主軸や工具状態の監視技術は適切な時期に工具交換することによる工具コストの低減、加工面品位の向上や工作機械ダウンタイムの低減による生産性向上などに寄与する。実際に製造現場において工具交換を行う際は、熟練技能者が五感を駆使して工具寿命を判断する場合や、一度加工を止めて測定して判断する場合などがある。同じ形状を大量に加工する場合は、一定個数加工後あるいは一定時間加工後に工具を交換することが多く、まだ使用可能な工具も破棄していることが多い。同一の加工条件、工具、工作物においても工具摩耗の進行は大きく異なるため、かなり安全を見て工具交換することが多く、工具の有効利用率は現状高くはない。したがって、生産性、加工表面性状の向上のためには熟練技能者に頼らなくても加工中の切削工具の状態を監視することが可能な加工状態監視システムを構築し、切削工具を適切な時期に交換することが重要となる。生産性向上やコスト低減の他にも機械の破損や故障、消耗品劣化

などを防ぐ予知保全効果も期待できる。工具摩耗の進行には様々な要素が影響しているため、同じ加工条件でも摩耗量は加工毎に大きく異なる。さらに、AE 信号や切削力は工具摩耗だけでなく切込み量や切削速度が変動しても変化するため単体のセンサで工具摩耗状態を信頼性高く推定することは困難である。そこで、本研究では、ソフト（人工知能技術）とハード（複数のセンサ）を融合させることで熟練技能者の技術の伝承を支援する人協調型 AI システムを開発することを目的とする。

## [研究の内容、成果]

スピンドルや工作機械ステージなどに複数のセンサを取り付けて加工実験を実施し、そのデータを用いて信号処理技術および工具摩耗を予測する機械学習モデルの開発を行った。リニアモータステージ上に多成分動力計を設置し、その上に工作物をボルトで固定した。多成分動力計は加工中の X, Y および Z 方向の切削抵抗を計測するために用いる。動力計のトッププレート側面には高感度 AE センサを取り付けており、切削加工の際に工作物とエンドミルの摩擦や塑性変形により発生する AE 波を取得する。スピンドルのハウジング部には 3 軸加速度センサを取り付けており、スピンドルの X, Y および Z 方向の振動を測定する。マイクロフォンはマグネットベースを用いて工具先端に向けて設置されており、切削加工で生じる音を記録す



る。各センサ信号はサンプリング周波数 1 MHz で取得した。また、NC の制御装置から XYZ 軸駆動用モータのトルク、モータ電流、主軸トルク、主軸消費電力の信号をサンプリング周波数 1 kHz で取得した。

工作物の材料には S50C, SKD11 および NAK55 を用いて、2 枚刃のスクエアエンドミルにて加工を行った。送り速度、切削速度、軸方向切込み量、ドライ・MQL 加工など切削条件を変えて加工実験を実施し、合計 21 回分のデータを取得した。工具摩耗を測定する際は工作機械を一時停止し、主軸から取り外した工具先端のマイクロスコープ画像から逃げ面摩耗幅を計測した。

機械学習を用いて高精度な予測を行うためには生データから工具摩耗や表面粗さと相関の高い情報を抽出・選択することが重要となる。今回は時間領域、周波数領域のそれぞれから特徴量を求めた。今回は得られた生データから 9 種類の時間領域特徴（平均値、分散、尖度、歪度、波形率、など）、FFT により求めた周波数スペクトルから 21 種類の周波数領域特徴（平均、分散、歪度、尖度、50 kHz 毎のパワースペクトルの平均、工具切れ刃通過周波数のパワースペクトルなど）、計 30 種類の特徴量を求めた。上記 16 のセンサ信号それぞれに対して、30 個の特徴量を計算し、合計 480 個の特徴量を得た。これまでに機械学習を用いた様々な工具摩耗量の予測手法が提案されてきたが、教師データが必要であるために、膨大な加工実験を実施する必要があった。そこで、本報では従来の教師あり学習法（Random forest, GBTD（Gradient boosting decision tree）, SVR（Support vector regression）, Deep learning, LightGBM（Light Gradient Boosting Machine）, XGBoost（eXtreme Gradient Boosting））と大量の教師データを必要としない教師なし学習（One-class SVM）による新しい摩耗予測法の性能を比較検討した結果について報告する。

複数のセンサ信号から得られた上記特徴量と

機械学習モデルの一つである One-class SVM を用いて工具摩耗の予測を行う。One-class SVM とは Support Vector Machine を用いる外れ値検知手法である。One-class SVM は正常データを囲むような境界を作成し、この境界からの距離を異常度として計算する。今回は各実験の最初のデータの特徴量のみを用いてモデルの境界を作成した。その後、取得した加工中のデータをそのモデルを使用して異常度  $a$  を算出した。この異常度に加工条件のパラメータ（切削速度、送り量、切込み深さの累乗）と工具と工作物の組み合わせによる係数、切削液に関する係数を乗じることで摩耗を算出する。パラメータ指数の同定には複数の実験結果を必要とする。また、One-class SVM などの機械学習の評価関数には一般的に RMSE（Root Mean Squared Error）が用いられることが多い。しかし、今回のような加工において工具摩耗を予測する場合、加工条件によっては構成刃先などが発生し、その影響で各種センサ信号が変動することで予測した摩耗量に大きな変動が生じることがある。そこで、今回は摩耗予測の大幅な変動を抑制させるために新たな評価関数 NEF を式（1）のように定義して用いることにした。

$$NEF = \sqrt{\underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}_{\text{RMSE}} + \underbrace{\alpha}_{\text{調整係数}} \underbrace{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N (y_i - y_{i-1})^2}}_{\text{摩耗の不連続性}}} \quad (1)$$

$y_i$  は切削回数  $i$  番目における摩耗量の予測値を示しており、前回の予測値との不連続性を少なくすることによる変動の抑制が期待できる。

図 1 に工作物（S50C）を加工した際に One-class SVM を用いて予測した結果を示す。実線が実験で測定した工具逃げ面摩耗幅、破線が評価関数に RMSE を用いて予測した工具逃げ面摩耗幅、一点鎖線が評価関数に NEF を用いて予測した工具逃げ面摩耗幅を示す。新しい評価関数を用いることで予測値の変動が抑制可能であることが確認できる。

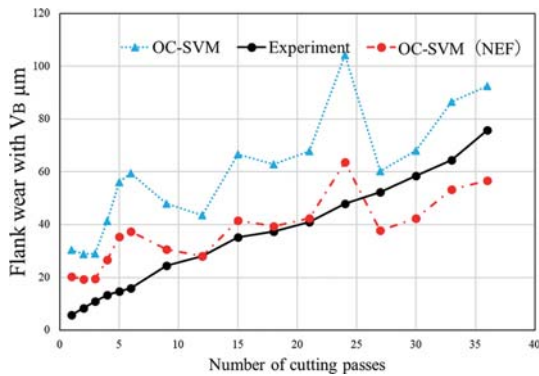


図1 One-class SVM を用いた工具摩耗量予測結果

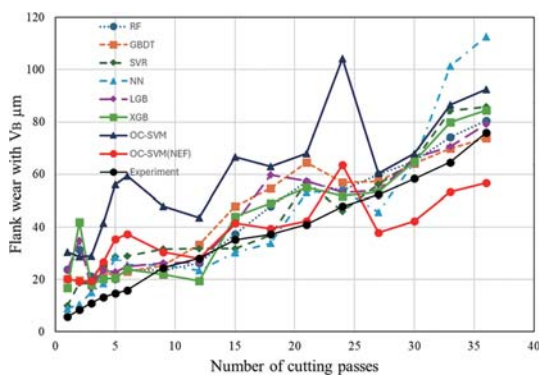


図2 各機械学習モデルによる工具摩耗予測結果

表1 予測結果の比較 (RMSE:  $\mu\text{m}$ )

|                     | S50C, Dry Axial<br>depth of cut : 1.5 mm |
|---------------------|------------------------------------------|
| Random forest       | 8.5                                      |
| GBDT                | 7.6                                      |
| SVR                 | 4.2                                      |
| Deep learning       | 13.9                                     |
| LightGBM            | 11.9                                     |
| XGBoost             | 12.0                                     |
| One-class SVM       | 27.4                                     |
| One-class SVM (NEF) | 12.3                                     |

図2に教師ありおよび教師なしの各機械学習モデルによる予測結果を示す。また、表1に予測結果のRMSEを示す。教師なし学習であるOne-class SVMでも教師あり学習法と同等の予測が可能であることを確認した。

表2に工作物S50Cを加工した場合のドライ加工とMQL (Minimum Quantity Lubrication) 加工の比較 (工具摩耗予測結果のRMSE)を示す。ドライ加工においては他の教師あり学習と同等の精度で予測ができているが、MQL加工の場合は誤差が4倍近く大きくなっている。

表2 ドライ加工とMQL加工の予測結果 (RMSE:  $\mu\text{m}$ )

|                     | S50C, Dry<br>Axial depth<br>of cut : 3 mm | S50C, Dry<br>Axial depth<br>of cut : 1.5 mm | S50C, MQL<br>Axial depth<br>of cut : 3 mm |
|---------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Random forest       | 12.7                                      | 8.5                                         | 13.3                                      |
| GBDT                | 10.1                                      | 7.6                                         | 14.3                                      |
| SVR                 | 9                                         | 4.2                                         | 11.1                                      |
| Deep learning       | 10.9                                      | 13.9                                        | 11.4                                      |
| LightGBM            | 16.0                                      | 11.9                                        | 12.3                                      |
| XGBoost             | 12.8                                      | 12.0                                        | 13.6                                      |
| One-class SVM       | 27.5                                      | 27.4                                        | 33.3                                      |
| One-class SVM (NEF) | 19.7                                      | 12.3                                        | 43.8                                      |

表3 SKD11とNAK55の予測結果 (RMSE:  $\mu\text{m}$ )

|                     | SKD11, Dry Axial<br>depth of cut : 3 mm | NAK55, Dry Axial<br>depth of cut : 3 mm |
|---------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Random forest       | 27.5                                    | 24.4                                    |
| GBDT                | 27.9                                    | 20.9                                    |
| SVR                 | 36.7                                    | 21.8                                    |
| Deep learning       | 32.7                                    | 35.6                                    |
| LightGBM            | 27.4                                    | 18.2                                    |
| XGBoost             | 30.7                                    | 19.7                                    |
| One-class SVM       | 32.1                                    | 37                                      |
| One-class SVM (NEF) | 42.4                                    | 28.7                                    |

今後は工具摩耗の予測式を改良する等の対策を行いMQL加工の場合の予測精度を向上させる必要がある。参考までに特徴量重要度 (どのセンサが予測に寄与したかの指標) を算出したところ、軸駆動用モータ、加速度センサの順に重要度が高くなっていた。

One-class SVMを用いた教師なし学習手法においてはワークピース材料と工具の組み合わせが変わった場合は、最低1回加工実験を実施して、データを取得し係数を決定する必要がある。表2および表3より一度ワークピースと工具との間の係数を決めることができれば切削条件が変わっても適切に予測可能であることが確認できた。

次に図3に示すセンサビルトインスピンドルの製作を実施した。軸受には空気静圧軸受を使用し、エアータービンにより駆動する。主軸内部、タービン部、工具先端部に主軸内蔵型光ファイバ式AE (Acoustic Emission, アコースティックエミッション) センサ、光ファイバ式

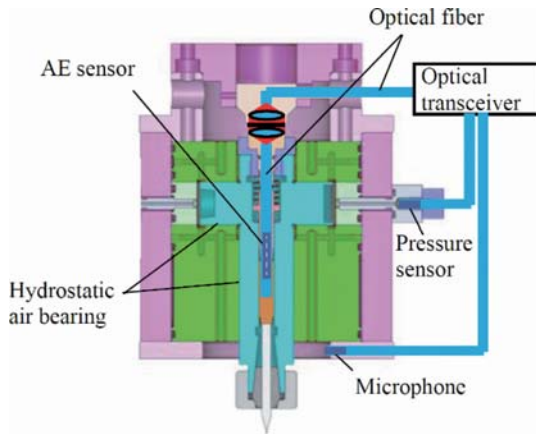


図3 センサビルトインスピンドルの概略図

圧力センサおよび光ファイバ式マイクロフォンの各センサを設置する。本研究では新たに小型で低ノイズの各種センサを作成するために、レーザによりファイバ端面の高精度加工に取り組んだ。図4に示すように加工に最適なレーザパワー、波長、使用するレンズNA、を決定するために加工実験を実施した。

加工実験の一例として、図5にパルスエネルギーと加工穴直径の関係および図6にパルスエネルギーと加工穴深さの関係を示す。

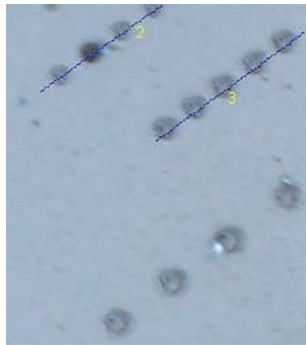


図4 レーザ加工痕の写真

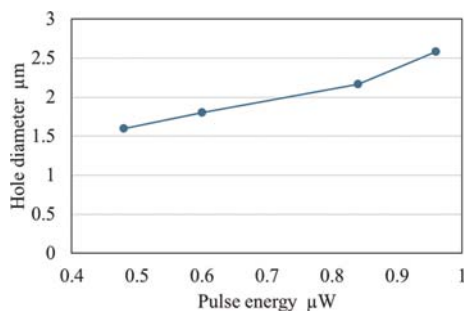


図5 パルスエネルギーと加工穴直径の関係

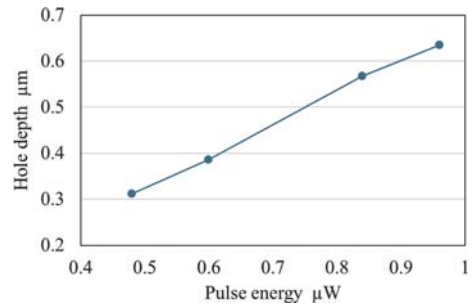


図6 パルスエネルギーと加工穴深さの関係

本研究では、複数のセンサ信号を用いて教師あり学習法 (Random forest, GBTD (Gradient boosting decision tree), SVR (Support vector regression), Deep learning, LightGBM (Light Gradient Boosting Machine), XGBoost (eXtreme Gradient Boosting)) と大量の教師データを必要としない教師なし学習 (One-class SVM) による新規摩耗予測法の性能について比較検討し、ワークピースの材料や切削条件が変わった場合でも工具逃げ面摩耗量を予測可能であることを確認した。また、教師なし学習手法 (One-class SVM) においても教師あり学習手法と同程度の精度で予測が可能であることを確認した。今後は工具摩耗の予測式を改良し、MQL加工の場合等、各種条件における予測精度向上に取り組む予定である。本研究は公益財団法人立石科学技術振興財団の研究助成を受けて行ったことを記し、謝意を表す。

#### [成果の発表、論文など]

- (1) 村上洋, 甲木昭雄, 佐島隆生, 松田智大, 岩下悠人, 吉積孝紘, “One-class support vector machineを用いた教師なし工具摩耗予測法の開発”, 2024年度精密工学会春季大会講演論文集, p.106, 2024.
- (2) 吉積孝紘, 村上洋, 甲木昭雄, 松田智大, “エンドミル加工における教師ありおよび教師なし工具摩耗予測法の開発”, 日本機械学会第15回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, p.75, 2024.

## [研究助成 (A)]

## 光弾性を利用した力覚変色表示ソフトアクチュエータの研究開発

2241030



研究代表者

法政大学

准教授

山 田 泰 之

## [研究の目的]

さらなる人間と機械の調和の促進を考えた場合、人と機械の共同作業、人がいる空間での機械の作業などのインタラクションを考えた場合、直感的に機械の状況を人間が認識できることが望ましい。例えば、多くのロボットや機械は、位置制御にもとづいた移動や作業を行うが、これは人間のパントマイムに近いものがある。つまり、そのロボットや機械の動きから、重いものを運んでいるのか、硬いものを掴んでいるのか、力をいれて動いているのかななどを視覚的に判断することは難しい。

このような場合、例えばロボットの状況をセンシングして、数値化して、アラートを出すことは技術的には容易であるが、そのような複雑システムによる方法が様々な環境下で効果的に活用できるかは疑問が残る。

そこで、本研究では、人間が人間に直感的に感じるように、例えば力こぶや、躍動感のようなもののように、ロボットや機械の外観的な要素からその状況が理解できるほうが、人間と機械の調和の促進をさらに飛躍させることができると考え、目的とする。そこで本研究ではロボットや機械の構造を、人が色に関して感じる軽重感などに合わせて変色するパッシブな機械要素の実現を目指す。その第一段階として、人と機械のインタラクションで着目されているソフトアクチュエータに対して、その状況を色で可視化する方法の実現を目指す。

## [研究の内容、成果]

## 研究の内容

本研究のサブゴール（本申請の研究成果目標）は、光弾性を利用した力覚変色表示ソフトアクチュエータの研究開発を実現するための具体的な取り組みについて説明する。技術的な課題は①ソフトアクチュエータと一体化された構造の実現（従来のソフトアクチュエータ、例えばマッキベン型や軸方向繊維強化型人工筋肉などと融合）と、②より可視光で判別しやすい色の発色である。③再現性のある製作と記録。研究概要と現在の知見や実験環境について説明したうえで、それぞれについて詳しく説明する。

本研究では、図1のように、ロボットや機械の色を人間が色に対して感じる軽重感等と一致させることで、人間と機械の調和（状況の直感的な伝達）を目指すものである。様々な環境でこのインタラクションを成立させるために、電気的なセンシングなどを用いずに、かつ安定的に発生するように、光学特性の1つである光弾性の応用を行う。光弾性は図2のように、高分子材料内の光の分光による色の変化である物理現象であるため可視光させれば様々な環境で

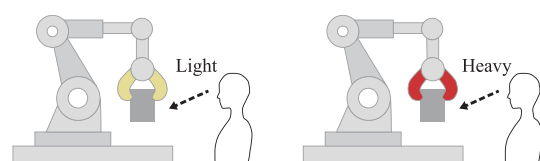


図1 外観色による状況伝達



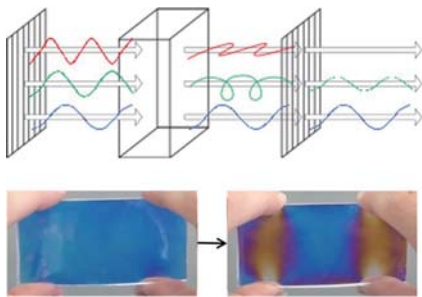


図2 光弾性の概念図

安定的に機能する。基本的原理は、光弾性を発生しやすい軟質塩化ビニルシート（以下PVCシート）等の透明素材（光造形，FDM造形含む）を偏向板で挟んで、透過した可視光から観察される。研究代表者らは、これまでの研究の成果から、この光弾性を応用して透明樹脂シートの厚みや重ね枚数，織，溝や切欠きなどが，構造体に対して加わる力と色変化，表面の模様変化に及ぼす特性を明らかにした。また，光弾性による色発生を機械やロボットなどの構造体として応用する方法として，例えば図3のようなロボットハンドとして試作した。さらに，色の発色と人の軽重感を一致させる機構開発図4



図3 把持対象によるハンドの色変化



図4 軽重感と一致させる機構

を研究開発してきた。しかし，アクチュエータ自体の色や模様を変化させたり，それを発生している荷重や，変形と関係させて変化させることも実現できない。そこで，1) ソフトアクチュエータと一体化された構造の実現と，2) 再現性のある製作と記録方法の確立を目指した。

#### 1) ソフトアクチュエータと一体化された構造の実現

これまでの研究では，PVC等の透明素材に力を加えた際の変色について検討してきた。一方で，これらをソフトアクチュエータとしてインテグレーションできていない。そこで，ソフトアクチュエータであるマッキベン型空気圧人工筋肉，ワルシャワ型人工筋肉，折り紙アクチュエータ，パウチモータと光弾性による変色や模様変化について融合を試みた。

#### 2) 再現性のある製作と記録

光弾性現象は可視光のように幅広い可視光範囲の波長を含む光の下によるPVC材料等の透明高分子素材に発生する現象である。そのため，材料や製作方法による素材自体あるいはソフトアクチュエータの個別のものづくりによる個体差と，撮影環境の違いによる色の変化が発生する。より具体的に説明する。提案方法でソフトアクチュエータを変色させると，偏向板により光量が半減するため，薄暗い色となる。人間の目は高い感度があるため，問題なく見えるが，実験として色を量的に比較する上では，照明が必要になる。この場合用いる照明や配置方法で，撮影される対象の色の量的な数値が変化してしまう。

そこで，なるべく個体差が出にくい作り方，つまり手作りではなく，機械化による再現性の確保を目指す。具体的にはカットマシンやレーザーカッターを用いて透明柔軟素材のサイズを一定にたもつ。

また，撮影環境も記録される数値が変化しないように，自然光の遮蔽と照明の管理を行い，撮影による色変化の誤差を抑制することを目指した。

## 研究の成果

ソフトアクチュエータは柔軟な材料を使用して構成されている場合が多い。そのため、透明な樹脂素材で構成できれば、光弾性による変色や模様変化を発生させられる可能性がある。ソフトアクチュエータには、空気圧や電気、ジャミングなど様々な駆動方式がある。その中でも内部構造が透明としやすい空気圧式アクチュエータに着目した。折り紙式アクチュエータ、マッキベン式人工筋肉、パウチモータ、ワルシャワ型人工筋肉を対象とした。

光学的特性は、光の伝播、屈折、反射、分散等の物理的現象によるもので、表1のような種類がある。本研究では力学特性である光弾性を利用する。

表1 光学現象の例

|   |            |          |
|---|------------|----------|
| 1 | 力学要素による変化  | 光弾性特性    |
| 2 |            | モアレ      |
| 3 | 光学要素による変化  | 二色性      |
| 4 |            | フォトクロミズム |
| 5 | 温度による変化    | サーモクロミズム |
| 6 | 機械的刺激による変化 | メカクロミズム  |

様々な種類や厚みの透明樹脂素材や、それらの重ね合わせの組み合わせを用いて、どのような光弾性特性を示すかを材料検討した。そえらの中で、同じ撮影環境において、より明るく発色する素材（の組み合わせ）や、加工性を考慮して材料を選定した。

選定した透明樹脂素材を用いて、図5～図8のように、折り紙アクチュエータ、パウチモータ、マッキベン式人工筋肉、およびワルシャワ型人工筋肉を作成した。それぞれの図は、無加圧状態と加圧（減圧）状態を併記した。

折り紙式アクチュエータは、視覚方向に関して各面の角度方向が変化することで、観察者からの色の見え方が変わることが分かる。

パウチモータは、基本的にのびにくいフィルム素材を用いて構成するインフレーションアクチュエータであるため、色というより模様の変化が観察された。

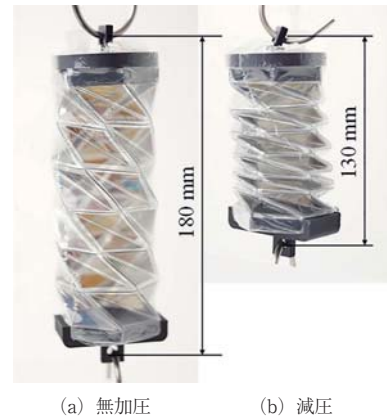


図5 光弾性を応用した折り紙アクチュエータ

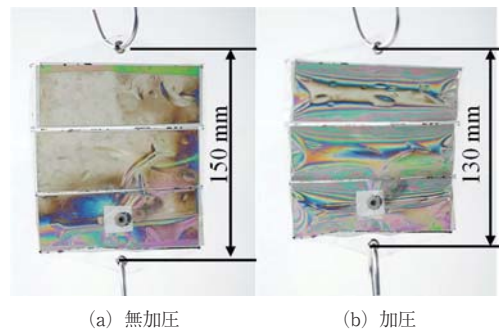


図6 偏光弾性を応用したパウチモータ



図7 偏光弾性を応用したマッキベン式人工筋肉



図8 偏光弾性を応用したワルシャワ型人工筋肉

マッキベン型アクチュエータは、透明素材を均一な角度で編み込むことに苦慮して、発色できている部分が少ない。今後は、光弾性素材で編み組チューブをつくる編み機もつくる予定である。

ワルシャワ側人工筋肉は、内部の透明樹脂チューブの変色を明確に確認できた。特に無加圧状態で色は見られず、加圧とともに、色が変化していき、最大変化時は写真のように赤い部分が増えるため、アクチュエータの変化（加圧）と視覚的な変化の関係を管理しやすい可能性が高いと考えられる。

本研究では、光弾性特性を応用してソフトアクチュエータの可視的な変色や模様の変化について実験的に検証した。素材や厚み、組み合わせや使い方などの基礎的な検討から、各アクチュエータでの光弾性特性の発生状態について

も、試作により確認した。今後は、それぞれのアクチュエータについて、さらにパラメトリックな実験を行い、物理的特性変化と、可視的な（色など）の変化を対応でけられるソフトアクチュエータを目指す。

#### 〔成果の発表，論文など〕

- ・ 松田潮音，財部真輝，山田泰之，光弾性特性を用いて変色するソフトアクチュエータ — マッキベン型人工筋肉/ワルシャワ型人工筋肉の変色の検討一，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025, 2A2-C04, 日本機械学会, (2025, 6)
- ・ 松田潮音，大塚 瞭，山田泰之，光弾性特性を用いて変色するソフトアクチュエータ — 非伸縮性フィルム素材を用いたソフトアクチュエータの検討一，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025, 1A2-N02, 日本機械学会, (2025, 6)

## [研究助成 (A)]

超低消費電力リアルタイム学習を可能にする  
二次元半導体光電子メモリの開発

研究代表者

関西大学

准教授

山 本 真 人

2241031

## [研究の目的]

近年の人工ニューラルネットワークに基づく深層学習の発展は、人間の認知機能を凌駕する情報処理を可能にした。一方で、深層学習は学習プロセスにおいてビッグデータの利用が必要不可欠であり、その電力コストと時間的コストの高さが課題となっていた。深層学習におけるエネルギーコストの高さは、ニューラルネットワークの中間層を構築するにあたり膨大な量の積和演算を繰り返す必要があることに由来する(図1a)。したがって、リアルタイムかつ低エネルギーコストでの学習を実現するためには、膨大な量の積和演算を必要としない機械学習手

法が必要となる。

近年、時系列データを用いて学習が可能なりザバーコンピューティングが注目を集めている。リザバーコンピューティングは、深層学習における中間層の代わりに短期記憶性と非線形性を有するリザバー層を置き、入力データを高次データに変換する。その結果、リザバーコンピューティングにおける学習はリザバー層と出力層の間のみで行えば良く、学習におけるコストを大幅に低減させることが出来る(図1b)。

リザバー層は、短期記憶性と非線形応答を示すデバイスによって物理実装が可能である。また、リザバーデバイスがセンサーの機能を有すれば、それ自体が入力層の役割も果たすこともでき、人間のように感知から学習までをリアルタイムかつ低消費電力で行えるAIエッジデバイスへの応用が期待できる。

本研究では、超低消費電力リザバーデバイスと超高感度光センサーとしての機能を併せ持つデバイスを創出することで、視覚情報からリアルタイム学習が可能なインセンサーリザバーコンピューティングの実現を目的とした。

## [研究の内容, 成果]

本研究では、原子レベルの薄さに由来して非常に表面敏感な性質を持つ二次元半導体の一種である黒リンを用いることでインセンサーリザバーデバイスの作製を試みた。黒リンは図2に示すように、リン原子から成る屈曲したシート

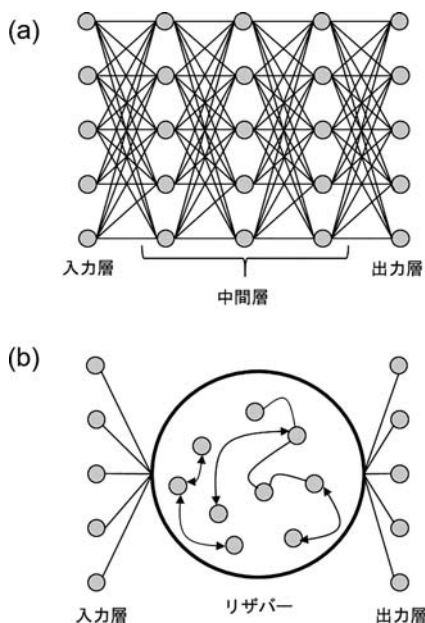


図1 (a) 深層学習と (b) リザバーコンピューティングの概念図



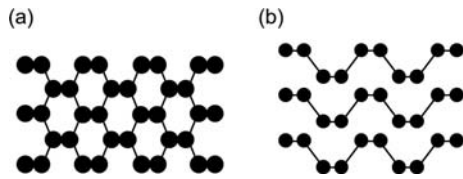


図2 黒リンの結晶構造の (a) 上面図と (b) 側面図

状の結晶がファンデルワールス力によって積み重なった、層状物質である。

黒リンは層数によってバンドギャップの大きさが 0.3 eV から 2.0 eV まで変化する直接遷移型の半導体である。また、黒リンは代表的な二次元半導体である遷移金属ダイカルコゲナイドを凌駕する高い移動度を示すことから、様々な波長の光に対して高感度かつ高速で応答するセンサーへの応用が期待されている。一方、リザーバーとしての機能は多値電荷トラップメモリ構造において実現可能である。電荷トラップメモリはトラップ層に電荷を蓄積させることで書き込みを行う不揮発性メモリであるが、トラップ準位が多岐に渡る場合は読み出し電流が非線形的かつ多値的に変化する。そこで本研究では、黒リン表面に自然酸化膜 ( $\text{PO}_x$ ) を形成し電荷トラップ層として利用することで多値電荷トラップメモリの作製を試みた。

まず、多層黒リンをバルク単結晶から Si/SiO<sub>2</sub> (90 nm) 基板上に機械剥離した。その後、フォトリソグラフィーと抵抗加熱蒸着によって黒リン上に Ni (20 nm)/Au (50 nm) 電極を形成し、Si をゲート、SiO<sub>2</sub> をゲート誘電体とするバックゲート型の電界効果トランジスタを作製した (図 3a)。その後、フォトリソグラフィーによって黒リンチャンネル上にウィンドウを形成し、室温でオゾン ( $\text{O}_3$ ) に曝露することで黒リン表面を酸化した (図 3b)。

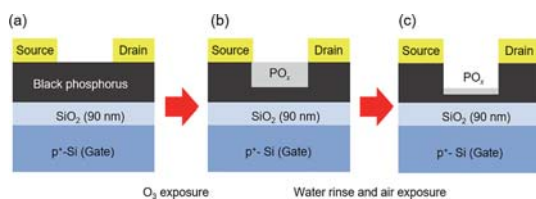


図3 黒リン電荷トラップメモリの作製プロセス

そして、黒リンを純水でリンスし表面酸化膜を除去することで、局所的に薄膜化した (図 3c)。その後、黒リンを大気に曝露することで電荷トラップ層となる表面酸化膜を形成した。黒リン FET の特性は室温、暗所、真空中 ( $\sim 10^{-2}$  Pa) 中で測定した。また、黒リンへの光照射はハロゲンランプを用いて行った。

図 4 は、オゾン酸化と純水リンスによる処理を行った前後の光学顕微鏡像である。処理前後で黒リンのコントラストが変化しており、黒リンがエッチングされていることが分かった。また、図 5 はエッチング前後での黒リン FET の伝達特性を示している。エッチング前は高いホール電流を示し、その値は  $-20$  V から  $20$  V のゲート掃引においておよそ 20% しか変化しなかった。一方、エッチング後は電流値が大幅に減少し、ゲート掃引に対してドレイン電流が 2 桁以上変化した。これらの実験結果は、エッチングによる薄膜化で黒リンのバンドギャップが増大したことを示唆している。

エッチング直後の黒リン FET はゲート掃引に対してヒステリシスを示し、そのヒステリシス幅は 1.5 V であった。黒リン FET の伝達特性におけるヒステリシスは、黒リン表面に形成

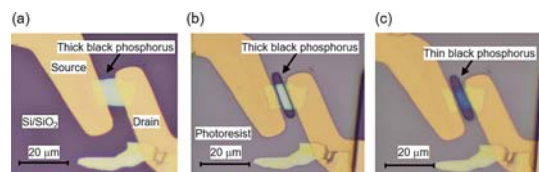


図4 黒リンのエッチング前後の光学顕微鏡像

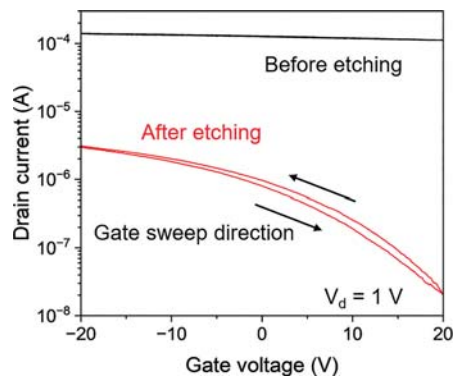


図5 黒リン FET のエッチング前後の伝達特性

された酸化膜が電子トラップとして機能していることによると考えられ、黒リン FET がリザーバードバイス応用に必要な電荷トラップメモリとして機能することが分かった。しかし、実際に黒リン電荷トラップメモリをリザーバードバイスとして応用するためには、より密度の高い電子トラップ層を形成し多値動作させる必要がある。そこで次は、黒リン FET を大気に曝露させることで更なる酸化膜形成を試みた。

図 6 に、エッチングした黒リン FET の大気曝露時間ごとの伝達特性を示す。10 分間の大気曝露によってドレイン電流値が減少し、オン・オフ比が  $10^4$  まで増大した。また、ヒステリシス幅も 8.1 V まで増加した。これらの結果は、大気曝露によって黒リン表面の酸化が進行したことを示唆している。その後、大気曝露時間を 40 分まで増やしても電流値とヒステリシス幅に大きな変化は見られなかった。これは、表面酸化膜が保護膜として機能し、黒リンの更なる酸化の進行が抑制されたためと考えられる。

次に、黒リン電荷トラップメモリの多値メモリ特性を評価した。図 7a に、大気曝露後の黒リン FET の伝達特性の最大ゲート電圧 ( $V_{g\_max}$ ) 依存性を示す。印加するゲート電圧の最大値を 0 V から 20 V まで増加させると、ヒステリシス幅も増加することが分かった。この結果は、黒リン表面酸化膜中には多数のトラップ準位が存在していることを意味している。図 7b にトラップ密度の最大ゲート電圧依存性を

示す。 $V_{g\_max}=20$  V のときのトラップ密度はおよそ  $1.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  と見積もられ、酸化膜中に多くの電子トラップが存在することも分かった。以上の結果より、表面酸化した黒リン FET が、多値電荷トラップメモリ動作することが分かった。

次は、黒リン電荷トラップメモリの保持特性の評価を行った。図 8 は、黒リン電荷トラップメモリに  $\pm 20$  V のゲート電圧を 4 s 印加し、書き込みと消去を行った際の保持特性を示している。書き込み後の電流は 10 s 後に 90% まで減少し、さらに 1000 s 後には 67% まで減少し

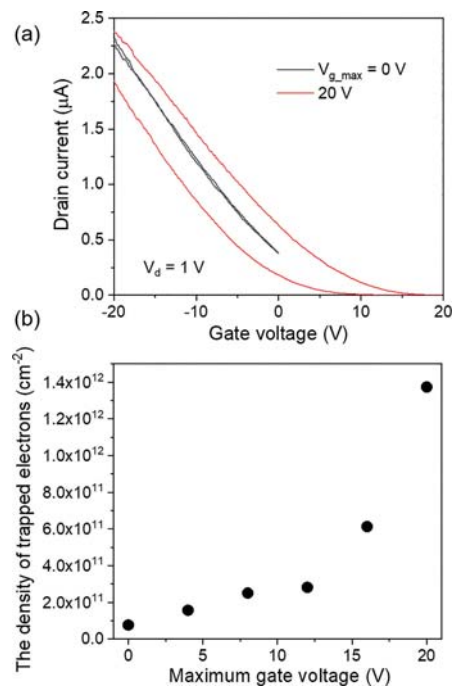


図 7 (a) 黒リン FET の伝達特性の最大ゲート電圧依存性 (b) トラップ電子密度の最大ゲート電圧依存性

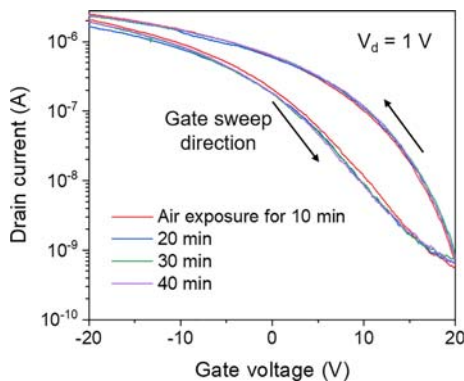


図 6 黒リン FET の伝達特性の大気曝露時間依存性

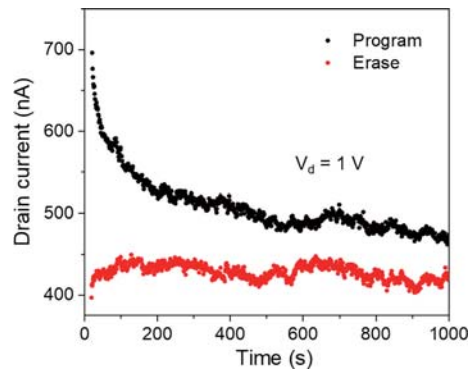


図 8 黒リン電荷トラップメモリの短期記憶特性

た。一方、消去後の電流は 1000 s で 5 % 増加した。これらの結果は、黒リン表面酸化膜中のトラップ準位は比較的浅く、トラップされた電子は室温においても簡単にデトラップされやすいことを意味している。以上の結果より、黒リン電荷トラップメモリがリザバーコンピューティングに必要な短期記憶性を有することが示された。

次は、黒リン電荷トラップメモリにゲートパルスを連続的に印加した際のドレイン電流値の変化を調べた。図 9 に示すように大きさ 20 V、パルス幅 100 ms のゲートパルスを印加すると、パルス数とともに電流値が非線形かつ可塑的に増加する様子が見られた（シナプス増強）。一方で、大きさ -5 V、パルス幅 100 ms のゲートパルスを印加すると電流値は可塑的に減少した（シナプス抑制）。したがって、黒リン電荷トラップメモリはリザバーコンピューティング応用において必要な非線形性も示すことが分かった。

最後に、黒リン電荷トラップメモリの光応答特性を調べた。図 10 に示すように、黒リン電荷トラップメモリにハロゲンランプ光を照射すると、ドレイン電流が時間とともに増大した。この光電流は、光照射によって黒リン中に生成された電子が表面酸化膜中でトラップされ、ゲートとして作用する光ゲート効果によるものと考えられる。100 s のハロゲン光照射による電流増加率は 3 倍以上であり、黒リン電荷トラップメモリが良好な光センサーとして機能す

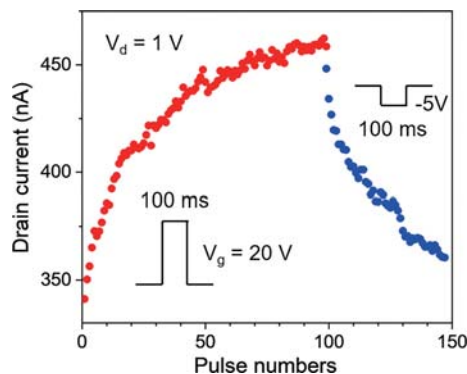


図 9 ゲートパルス印加によるドレイン電流の非線形変化

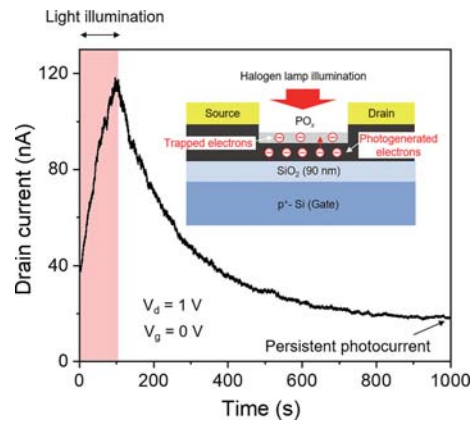


図 10 黒リン電荷トラップメモリの光応答特性

ることが示された。

ハロゲン光照射後、光電流は緩慢に減少し 1000 s 後も持続することが分かった。これは光照射によって生成され電子が酸化膜中にトラップされていることを示している。つまり、黒リン電荷トラップメモリが光照射に対しても短期記憶性を有する、不揮発性光メモリとして機能することが分かった。

次に、黒リン不揮発性メモリ光メモリの非線形性の評価を行った。図 11 は、黒リン FET に 100 s のハロゲン光照射を断続的に 4 回行った際のドレイン電流の変化を示している。ゲートパルスを印加した際と同様に、黒リン FET に光を照射した後の持続電流は、照射回数とともに非線形的に変化することが分かった。

以上より、本研究ではインセンサリザバーコンピューティングへの応用を視野に入れ、バ

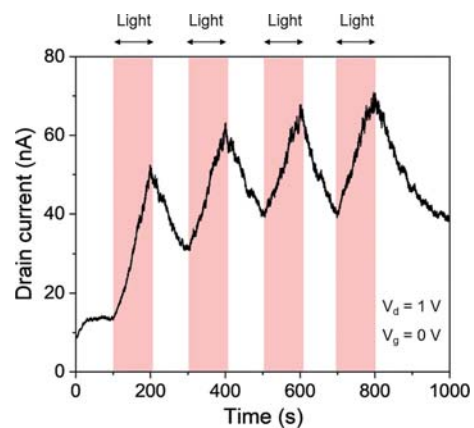


図 11 光照射によるドレイン電流の非線形変化

ンドギャップと表面状態をエンジニアリングした二次元半導体黒リンを用いて電荷トラップメモリを作製した。実際に作製した黒リン電荷トラップメモリは、インセンサーリザーバコンピュティング応用に必要不可欠な、短期記憶性、非線形性、高光感度性を有することが分かった。今後は、本研究で得られた実験データを元にリアルタイム学習における効率性をシミュレーションし、その AI エッジデバイスとしての実用性を評価する。

[成果の発表，論文など]

1. 長田庄平，小田太一，稲田貢，佐藤伸吾，山本真人，局所オゾン酸化による層数の異なる黒リン面内ホモ接合の形成，第 72 回応用物理学会春季学術講演会，東京理科大学，2025 年 3 月。
2. 山本健嗣，小田太一，稲田貢，山本真人，オゾン処理によって薄膜化した黒リンの電荷トラップ特性，第 72 回応用物理学会春季学術講演会，東京理科大学，2025 年 3 月。



## [研究助成 (A)]

## 微小針電極による超高密度脳波計測

—— 脊髄損傷者の手指動作を脳波から高精度に解読する ——

2241032

研究代表者  
(助成金受領者)

共同研究者

東京農工大学 大学院工学研究院  
先端健康科学部門

東京大学 大学院総合文化研究科

東京大学 医学部

東京農工大学 工学研究院

東京大学 総合文化研究科

マイアミ大学

准教授

教授

教授

准教授

助教

Assistant  
professor

横 山 光

中 澤 公 孝

緒 方 徹

倉 科 佑 太

金 子 直 嗣

Matija Milosevic

## [研究の目的]

直近の厚生労働省の大規模調査（平成 28 年）によると、本邦では脊髄損傷、脳卒中、脳性麻痺などにより、身体運動が障害されている人の数は約 200 万人と推計されている。障害された機能を補うための革新的な医療技術を開発し実用化することは、本人の日常生活の自立を助け、生活の質を高め、社会参加を促すだけでなく、社会全体の医療・介護に係わる負担を軽減するうえで重要な課題である。

Brain-Computer-Interface (BCI) は脳により外部機器を操作する技術のことであり、傷害された運動機能の代行・支援が可能な技術である。BCI 関連技術の革新は障害を持つ方々にとって大きな福音となりうる。現状の失われた運動機能を代行する BCI は、外科手術で電極を脳内に留置し高品質な脳信号が得られる侵襲型 BCI がほとんどである (Rapeaux et al, 2021)。もし、外科手術が不要でも高精度な運動意図の解読に基づき運動を支援する簡便な BCI が開発できれば、BCI 導入のハードルが格段に下がる。これにより BCI が特別なものではなく広く普及し、運動障害に苦しむ多くの患者

を助け、さらに福祉・介護など社会全体に大きく貢献できる。

非侵襲 BCI で頻用される脳波は空間解像度が低いため、従来の高密度測定では 2-3 cm 程度の電極間距離が使用され、それ以上短くしても意味がないとされてきた。しかし近年、電極間距離が 1 cm より短い超高密度化により得られる情報が増えることが理論的に示され (Glover et al, 2016)、実際に運動情報の解読に有用であることが実験的に示された (Lee et al, 2022)。しかし、現状の超高密度脳波計測には電極-皮膚の接触抵抗を下げるためにゲルの使用が必須であり、短い電極間距離で生じてしまうゲル同士の接触を防ぐためにウレタンシートに穴を空け、ゲルを注入し、髪を剃った頭皮に貼り付ける必要がある。剃髪は被験者への心理的負担が大きく、簡便な手法での超高密度脳波計測が技術的課題と言える。

そこで、本研究では簡便な手法での超高密度脳波計測という技術的課題を解決するために、本研究ではゲル無しで高品質な生体信号を計測できる微小針電極を応用し、革新的な超高密度脳波計測を目指す。

脳波計測では電気抵抗の高い角質層が原因と

なり信号の質が劣化する。そこで本研究では、微細な針で電気抵抗が高い角質層を貫くことで、前処理無しで低抵抗化を実現する微小針電極を製作し、簡便な超高密度脳波計測を実現する。なお微細な針（長さ  $600\ \mu\text{m}$ 、直径  $200\ \mu\text{m}$ ）はほとんど痛みを与えない。さらに、皮膚－電極の接触抵抗値を劇的に低減する導電性ポリマー（PEDOT: PSS）を針電極の上に成膜することで更なる低抵抗化を実現する。このような革新的な超高密度脳波計測を提案し、簡便であるが高精度に運動意図を汲み取れる脳情報解読技術を利用した BCI 開発に挑む。

本研究ではまず、PEDOT: PSS 被膜微小針電極の性能検証を行い、その後に超高密度計測への応用を目指す。

#### 〔研究の内容、成果〕

##### 〈微小針電極の製造方法〉

図 1 に微小針電極製作の流れを示す。

微小針電極は、柔軟性と強度、耐熱性を持ち電極の基盤となるポリイミド層（図 1A）、導電性を付与する金層（図 1B）、電気抵抗を劇的に下げる導電性ポリマーの PEDOT: PSS 層

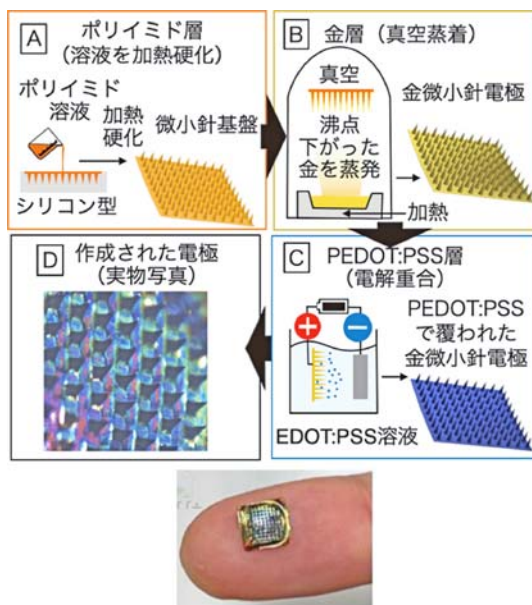


図 1 微小針電極の製作の流れ

（図 1C）の三層からなる。

シリコン型にポリアミク酸溶液（ポリイミド前駆体）を流し込む。ポリイミド溶液は粘度が非常に高く、シリコン型の針部分にまで浸透しないため。遠心分離器に 3000 rpm で 15 分かける。そしてホットプレートで 30 分  $100^{\circ}\text{C}$  で加熱し溶液の溶媒を蒸発させた。次に 30 分かけ徐々に  $200^{\circ}\text{C}$  まで温度を上昇させ、30 分  $200^{\circ}\text{C}$  で加熱しポリアミク酸溶液をイミド化をさせポリイミドとして硬化させた。

完成したポリイミド層の上に導電層として金を真空蒸着装置によって  $200\text{nm}$  の厚さで成膜した。なお直接金をポリイミドに蒸着すると接着性が悪い間 10 nm のクロム層を接着層として成膜した。

そして、電解重合法で金層の上に PEDOT: PSS 層を成膜した。PSS を 2.5 wt%, EDOT を 0.01 M で重合した。EDOT: PSS 溶液に陰極として Pt 電極棒、陽極として金層を蒸着した微小針電極を入れ電流を印加した。過大な電流の印加による急激な重合速度は PEDOT: PSS 層の欠けや密着性の弱さが生じるため、段階的に 50, 100, 150,  $200\ \mu\text{A}$  の電流の強さで 150 秒ずつ電解重合させ、最後に  $300\ \mu\text{A}$  で 600 秒重合した。電流の強さの制御ソフトウェアには Matlab を、定電流装置には NI-9265（National Instruments 社、アメリカ）を使用した。

図 2 に作成した微小針電極と従来の金カップ電極の例を示す。

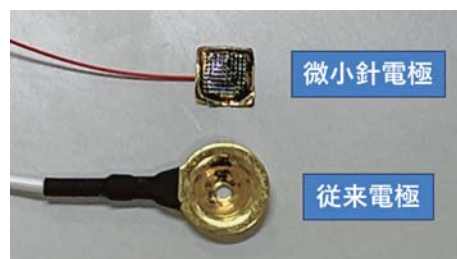


図 2 微小針電極と金カップ電極

##### 〈微小針電極の性能評価ーインピーダンス計測〉

腕部に 5 cm の距離で種類ごとの 2 つの電極

を配置し、2点の間を流れる電流の周波数ごとの抵抗値を計測した。電極を配置した位置は印をつけすべての電極で同じ位置になるようにした。

皮膚に接触する電極の面積によって抵抗値は変化するため、抵抗値に面積を乗算して正規化した。抵抗値が小さいほど高品質な信号や高い Signal-to-Noise ratio (SNR) が計測できることを示唆する。

図3に従来の湿式電極、ドライ電極、今回作成した微小針電極のインピーダンスを示す。微小針電極は生体電位の周波数帯である 1000 Hz 以下の帯域で低いインピーダンスであった。

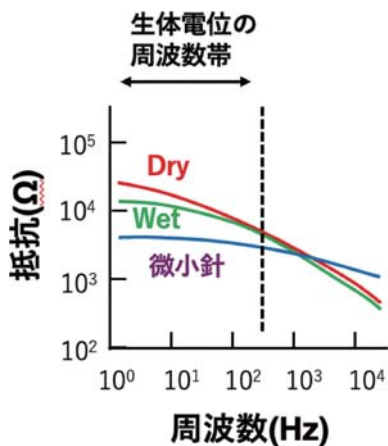


図3 各電極のインピーダンス

#### 〈微小針電極の性能評価－筋電図計測〉

微小針電極と従来電極（乾式電極、湿式電極）において、計測した筋電図の信号の質を評価した。肘関節の屈曲に働く上腕二頭筋を対象に、最大の力の 20% を出力してもらう課題時の筋電図を計測し、安静時の電位との比率で信号－ノイズ比 (Signal-to-Noise Ratio: SNR) を算出した。

筋電図の SNR は微小針電極では有意に他の従来電極より高かった。

#### 〈微小針電極の性能評価－脳波計測〉

微小針電極と従来電極（乾式電極、湿式電極）において、記録した脳波の質の評価を体性

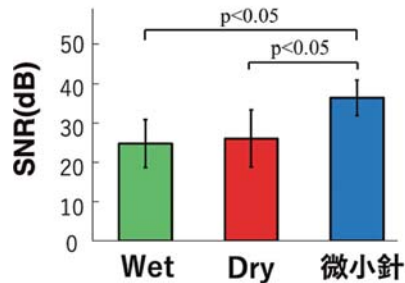
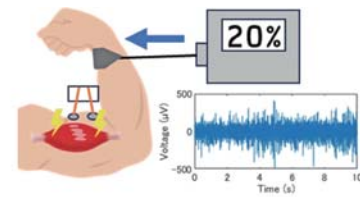


図4 筋電図実験の概要と結果

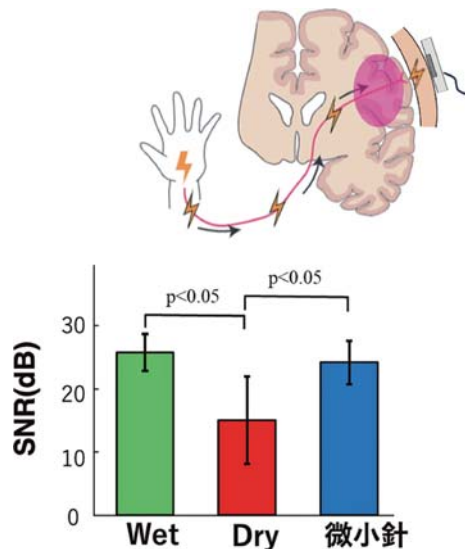


図5 脳波実験の概要と結果

感覚誘発電位の SNR を求めることで試みた。体性感覚誘発電位とは、図5上段のように手首の感覚神経に加える電気刺激への脳活動応答を調べるものである。電気刺激タイミング前後の信号を切り取り重ね合わせる加算平均法によってノイズを減らし、電気刺激由来の脳活動である刺激応答電位を抽出する。刺激応答電位と電気刺激前の信号の大きさの比を SNR として算出した。

結果として、湿式電極と微小針電極はドライ電極より SNR は高かったが、湿式と微小針電極では差がないという結果であった。筋電図とは以下の違いがあった：1) 微小針電極と湿式



が同等になった、2) ドライ電極と湿式電極で差が生じた。これらの要因として髪の毛の上からの計測となりジェルを使わない場合は抵抗値が増大し、信号の質が低下したと考えられる。それでも微小針電極はドライ状態での計測にも関わらず湿式電極と同等であったことは簡便性と信号の質という観点ではアドバンテージは大きい。

#### 〈高密度計測への応用〉

作成した微小針電極の高密度計測（電極間距離 10 mm）への応用を試した。図 6A の青丸の位置に微小針電極を配置し、体性感覚誘発電位を計測し、高密度計測が可能かどうかを試した。計測された電位の大きさは、電極位置に従い滑らかに変化していた。この変化は感覚情報が到達する部位からの電位の広がりを出すものと想定され、高密度に配置した電極から、意味のある信号を計測できたことを示すものである。

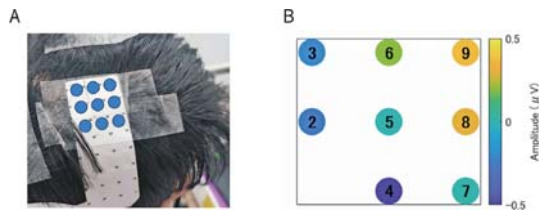


図 6 高密度計測による体性感覚誘発電位評価

#### 〈高密度脳波から手の開閉動作の解読〉

最後に高密度に配置した微小針電極から得られた脳波信号から手の開閉動作を解読できるか調べた。健常成人を対象に、被験者の C3 付近に電極間距離 10 mm でグリッド状に 20 ch の電極を配置し脳波を計測した（図 7）。被験者は 5 秒間の手を開く動作→5 秒間の安静→5 秒間の手を閉じる動作→5 秒間の安静、を 50 回繰り返した。脳波信号から課題 5 秒間のシータ帯（4-7 Hz）、アルファ帯（8-12 Hz）、ベータ帯（13-25 Hz）、ガンマ帯（26-40 Hz）のパワーを算出し、これらを目的変数とし、1) 開く動作、2) 閉じる動作、を目的変数とする判別モデルをナイーブベイズ分類器で作成した。精度

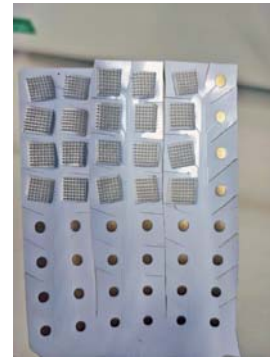


図 7 高密度に配置した微小針電極

の検証は 10 fold cross validation で行った。結果として、約 65% の判別精度であった。50% がチャンスレベルとするとそれよりは良好であるが、BMI への応用を考えると更なる精度の向上が望まれる。

#### 〈今後の課題〉

当初は脊髄損傷患者の運動意図解読を実施する予定であったが、電極製作やその精度検証に想定より時間がかかり、健常者での手の動作を脳波から解読することしかできなかった。またその精度は 65% と、更なる向上が BMI への応用には必要である。今回の実験では運動の回数が 50 回ずつと少なかったため、モデルの信頼性が低かった可能性がある。

また、電極の量産化に難があり、16 チャンネルでの計測にとどまってしまった。高密度に計測できるものの限定した範囲の脳情報した計測できていなかったため、高精度な運動情報解読に繋がらなかった可能性がある。

それでも、微小針電極での高密度配置で脳波を計測した例は世界にまだなく、剃毛なしでも高密度脳波計測が可能であることを示すことができたのは本研究の成果であり、さらなる電極製作の効率化により多チャンネル化を実現できれば、運動意図の高精度解読につながると想定される。



[成果の発表, 論文など]

〈国際学会〉

Yamaguchi T, Kurashina Y, Kaneko N, Nakazawa K, Yokoyama H. "Easy to use and High Quality EEG Measurement Using Conductive Polymer coated Microneedle Electrodes as Assessed by Somatosensory Evoked Potentials". IEEE EMBC 2024, Orlando, USA, July 2024.

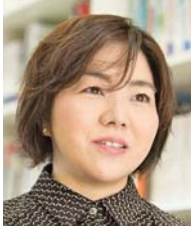
〈論文〉

Yamaguchi T, Kurashina Y, Kaneko N, Nakazawa K, Yokoyama H. "PEDOT: PSS-Coated Microneedle Electrodes for EEG and EMG recordings: Quantitative Assessment of Signal Quality and Usability". 投稿中.

## [研究助成 (A)]

## ロボットアーム錯覚は可能か

2241033



研究代表者

東京科学大学

准教授

葭 田 貴 子

## [研究の目的]

来る将来の人手不足への対策の一つとして、日本では産業場面や日常生活へのロボットの導入が求められている。しかし、実際のロボットの適用可能領域はまだ限られている。ロボットが環境を認識する自律制御にも様々な限界が見えてきており、想定外の状況などへの対応のために、人間が遠隔制御でロボットができない作業を補完することが有効なのではないかと期待されている。遠隔地からこのような対応を実施するには、既存の情報通信を介した対応も望まれている。そこで、インターネットで遅延や変動が発生する状況において、ユーザである人間が感じる遅延・変動の影響を抑え、安定したリアルタイム遠隔操作を可能とする通信システムの研究開発が始まっており、本研究室も名古屋や神戸との遠隔通信によるロボット操作の実証実験を始めている。このようにロボット・通信領域に加え、心理学や脳科学者といったエンドユーザ側の人間に関する研究者を交えて、より科学的・客観的に使いやすい遠隔制御のシステムを提供する研究開発体制は極めて限られている。本研究はこのようなロボットの社会展開に伴う問題に、脳科学/心理学者の立場から答えることを大目的とした。

## [研究の内容、成果]

ゴム（ラバー）の手のように自分自身の身体ではないものを、自分の手と同様に触覚刺激を与えられながら見たり、自分の手指と同期するゴムの手を見たりすると、やがて自分自身の手腕のように感じられる錯覚を「ラバーハンド錯視」と呼ぶ。この錯覚は、CGのアバターやロボットの義手など、生身の身体ではないものを、あたかも生身の身体の一部であるかのように錯覚させながら操作する技術の基盤とみなされ、脳科学の見地からは広く研究されている。しかし、実物のロボットアームや義手を用いた実証研究は多くはない。ここではインターネット越しに遠隔操作される産業用ロボットアームをゴムの手の代わりとし、これをバーチャルリアリティ技術によってロボットの一人称視点で観察しつつ、ロボットが接触するのと同様の触覚フィードバックをユーザの手に与えた場合に、ロボットアームがユーザの身体の一部のように感じられ（身体所有感, Ownership, 図1）、ユーザ自身がそれを操作しておりロボットが勝手に動いているわけではない感覚（操作主体感, Agency, 図1）が発生するか検証した。これら一連の研究により、ロボットアーム遠隔操作時に機械の手腕が「自分の身体の一部になる」ような操作感を生成すると同時に、最小限の練習や教示で誰でも直感的に自分自身の四肢のように使える遠隔ロボットアームの操作・設計方法の確立に寄与することを小目的とした。

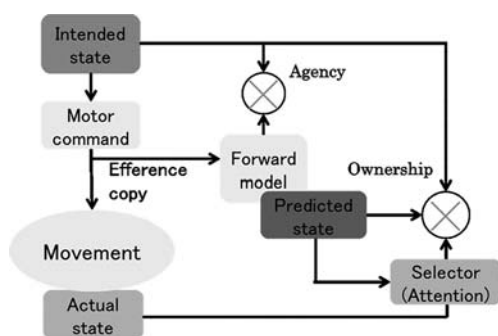


図1 Gallagher (2000) の哲学的考察による2種類の自己身体感覚に関するブロック線図

本研究提案で用いるような産業用ロボットは、図2左に示すようなティーチングペンダントと呼ばれる一種のキーボードで操作されるのが一般的である。しかし、ただでさえ初心者や一般人に3次元空間内でロボットを思うように動かすことは難しい作業であるのに、このように直感的ではないインターフェースを用いてロボットを操作することが今後も続くことは、ロボットの一般市場への普及への妨げとなりかねないと考えるのが、心理学や脳科学の立場である。また、身体所有感や操作主体感覚を伴いながらロボットを操作するとどのような利益が市場にもたらされるのかは謎のままである。最終的にはロボットの手腕が自分自身の手腕のように感じられたとして、その時市場にとって何が良いのか、操作精度が上がるのか、疲労感が軽減されるのか、達成感が上がるのか、等々といった副次的な問題にも取り組んだ。このような検証を大規模に試みた研究は前例をみない。

自己身体感覚に関するモデルは幾つか提案さ



図2 左：従来産業用ロボットの操作に用いられてきたティーチングペンダント。右：今回用いる産業用ロボットと、それをバーチャルリアリティを介して遠隔操作する操作者の概念図。

れているが、現在議論の中心となっているのは、哲学領域から提案された Gallagher (2000) のモデルである (図1)。このモデルをバーチャルリアリティのCGの身体に拡張した研究は、数多くあり、Slater らによる多数の報告例が知られている (例えば, Slater, 2009)。触覚を備えた高機能な義手を対象とした研究はごく近年少数ある (e.g., Zbinden & Ortiz-Catalan, 2021)。「ロボットハンド錯視」と名付けられた論文は過去に存在するが (Ismail & Shimada, 2016)、厳密にはロボットではなくロボットを模したCGを使った研究であり、さらに本研究提案のように通信遅延にジッタがある実物のインターネットや、実物のロボットを用いた研究ではない。実際のロボットの手首部分を用いた研究は少数存在するが (Vu HuynhI, et al., 2019, Casper, et al., 2015)、本研究のように遠隔操作を想定した実験ではなく、ラバーハンド錯視のラバーハンド部分をよく似せたロボットハンドに置き換えただけのものであった。本研究提案ではバーチャルリアリティによる視覚情報提示や、インターネットを通じた視覚や触覚情報の転送に伴うアーチファクトを含んだ状態でアーム型の産業用ロボットを用いるもので、必ずしもサイズや機能、見た目が人間とは同じとは限らないものを用いている点において先行研究とは異なる。

実際には、研究は以下のような項目に沿って実施された。

1. 研究室保有の産業用ロボットアームのCGモデルを、ヘッドマウントディスプレイを用いて、バーチャルリアリティ内で一人称視点で操作できるようなものを作成する。また、触覚デバイスを用いてアームの触力覚がユーザの手腕にフィードバックされるようなシステムを組む。ヘッドマウントディスプレイには全天周カメラから取得していると想定した360度映像をリアルタイム提示することで、被検者の頭部運動に同期して視覚映像が上下左右に回転するよう

にする。

2. 1で作成したものを用いて、バーチャルリアリティ内で実時間操作されるロボットアームに対して、ユーザが身体所有感や操作主体感が感じられるかどうかを、心理物理学的測定方法や質問紙法、アイトラッキングや心拍計測を用いて、多角的に検証する。この際、この後実施する実験3のために、無線のインターネット越しにこれらのシステムを操作する状況を模して、視覚や触覚の提示情報にジターを伴う時間遅延を挿入する。
3. 2と並行して、無線のインターネット越しに実物の産業用ロボットアームを遠隔操作するための研究室保有のシステムを用いて、ユーザにとって1で製作されたものと極力同様に感じられるシステムを組む。即ち、1で利用したカメラ映像と類似した位置に全天周カメラを設置し、1でロボットアームが観察されたのと同じ位置、同じサイズでロボットアームが観察されるように視覚映像を提示する。触覚デバイスも極力1で利用したものと同様のものを用いる。
4. 製作した実世界のロボットアームを用いて、操作者がバーチャルリアリティの視覚画像越しに一人称視点から触覚デバイスを用いながら実時間操作する際に、身体所有感や操作主体感が感じられるかどうかを、心理物理学的測定方法や質問紙法、アイトラッキングや心拍計測を用いて、多角的に検証する。

1と2に関して、制作したバーチャルリアリティ内のロボット操作システムの操作中の1場面を図3に示す。

市販のバーチャルリアリティ用のヘッドマウントディスプレイを用い（Meta Quest 3ヘッドセット，Meta社），被験者は頭部を自由に動かせる状態で、画面内のロボットアームの先端部を手にしたTouch Plusコントローラーで操作した。事前に被験者は、ロボットのアーム



図3 VR内で再現されたロボットアーム操作場面の一例

の位置が自分の肩から出ているような感覚になる位置に、自分の着座位置とバーチャル空間内の視覚映像位置をキャリブレーションした。アームを動かすと、3次元空間内に、線画が描画できる課題を用いて、様々な時間遅延の下で、操作者の操作感覚や身体感覚、操作精度等を検証した。結果は本報告書作成時においてまだ解析途中である。

遅延が最も短い条件、即ち、プログラム上では遅延ゼロの状態において、多くの体験者から、自分の腕がロボットそのものになっている臨場感があるという趣旨の主観報告が得られた。このことから、本研究で制作したバーチャルリアリティ用のシステムを用いて、操作者の身体の一部がロボットになったかのような身体感覚がある程度生成できていると考えられ、本研究の小目標である、ロボットアーム錯覚を検証するためのフィジビリティがある程度得られたと推察できる。

一方、いくつか技術的な問題が発覚したため、現在それらに対する対応を実施している。幾つかある問題の中で、大きなものの一つは、そもそも用いたバーチャルリアリティ用の視覚提示システムの画像描画に多少の遅延が備わっており、目視で確認した感触では、この種の身体感覚に関する研究の遅延量としては、看過できない量ありそうだという点である。これに関して、現在ハイスピードカメラを用いて、実際の遅延時間や、フレーム落ちの頻度などの細かい描画性能を計測している最中である。

他の大きな問題としては、被験者の肘の位置



とロボットの間接位置の位置合わせにインバースキネマティクス（IK: Inverse Kinematics）を用いたところ、被験者の姿勢によっては推定が安定しておらず、腕がびよこびよこと動きまわる不自然な映像が実験中にしばしば現れた点である。これを防ぐ目的で、現在被験者の肘位置に光学式のモーションキャプチャを設置し、インバースキネマティクスに頼らずに安定してロボットアームの映像が提示し続けられるよう、改変を行っている。

3に関して、この作業が完了していないため、4まで研究実施期間中に移行できていない。従来多くの類似研究の試みにおいて、カメラ位置が種々のシステムと干渉し、視覚提示画面がうまく一人称視点に合わない技術的な問題が認められてきたが、それに関しては本研究では天井から全天周カメラを固定することで回避できた。しかし、カメラから操作者への視覚情報の転送に、目視で明らかに操作性や操作感の支障となるとわかる大きな時間遅延が発生しており、これは様々なカメラやシステムを試したものの、いまだ解決に至っていない。今後、ドローンに設置されているカメラシステムを、これまで使用してきた全天周カメラに置き換えて、どの程度この問題が回避できるか検証する予定である。

なお、これらとは別途、研究室既存の設備や簡易的なロボット操作シミュレータを用い、操作主体感覚を伴いながらロボットを操作すると、操作精度や疲労感といった様々なヒューマンファクタに影響があるかどうかを、比較的大標本の被験者を対象に実験した。その際、眼球運動や心拍といった生理学的指標を同時記録したほか、被験者の疲労に関しては主観報告も採取した。結果はまだ解析途中であり、研究の途中経過を学会投稿して、採択結果待ちの状態である。途中経過としては、疲労に関する指標は、

主観報告、生理学的指標、どちらも操作主体感覚と目立った相関は認められなかった。一方、眼球運動は、操作主体感の強弱と、操作する対象の運動方向の先読みをする位置への固視の頻度に緩い相関が認められた、現在、このような結果が、操作主体感覚と、被験者が操作対象の将来の動きを予測する認知的過程の関係を示しているのかどうかという仮説に基づき、様々な追加解析と、追加実験を予定している。

このような研究を実施している期間中、本研究で使用したようなバーチャルリアリティ用のハンドヘルドデバイスで提示するための触覚情報の加工が飛躍的に容易になり、音の周波数を加工する感覚で触覚のデータを加工して提示できるようになった。今後はそのような技術を交えながら、ここで検討したような身体感覚の研究に様々な接触感覚を付加して、どのような触覚の付与が自分の身体のようなロボット操作に大きく寄与していくかも検証していきたいと考えている。



図4 VRのインターフェースを用いて、ロボットの操作をするために用いたモーションキャプチャシステムと、操作対象となった多関節ロボット

〔成果の発表、論文など〕

なし。

## [研究助成 (A)]

## AI を用いた顕微授精アシストシステムの開発

2241035



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

山梨大学  
発生工学研究センター

准教授

若 山 清 香

千葉工業大学 人工知能・ソフトウェア  
技術研究センター (STAIR Lab)

所長・教授

竹 内 彰 一

山梨大学  
発生工学研究センター

センター長・  
教 授

若 山 照 彦

千葉工業大学 STAIR Lab

主席研究員

新 保 仁

千葉工業大学 STAIR Lab

主席研究員

重 藤 優太郎

千葉工業大学 STAIR Lab

上級研究員

吉 川 友 也

山梨大学 大学院生命環境学専攻

博士課程

山 地 莞 梧

## [研究の目的]

現在日本は少子化の深刻な課題に直面しており、出産年齢の高齢化に伴い不妊の患者数が増加している。また、保険診療の適用により不妊治療の受診者数も急増してきた。実際の不妊治療の現場では、医師の診察に加えて、胚培養士と呼ばれる専門職員が患者の卵子や精子を取り扱っている。胚培養士の技術は、妊娠成績に大きく影響するため、高度な研修と経験が必要であり、特に、顕微授精という不妊治療法では、顕微鏡下で卵子の中に精子を直接注入するという非常に難しい操作を行う必要がある。この操作を行うことができる胚培養士は限られており、不妊治療の需要に対して供給が追いついていないのが現状である。

本研究では、顕微授精法における胚培養士の操作を AI・ソフトウェア技術により支援する新規のシステムを開発することを目的とした。

本研究において具体的にを行った項目は顕微授精の簡便化を目指したアシストシステムの構築である。

不妊治療の現場では、顕微授精を行う時、顕微鏡下で卵子の中に精子を直接注入することで受精をさせるが、卵子の核（母側核）を傷つけないように精子を注入する必要がある。なぜなら卵子の核を傷つけると、受精後の胚の発育に悪影響を及ぼす可能性が高まるからである。また、卵子の核の位置を見つけるには、卵子を回転させたり触ったりする必要があるが、これも卵子にストレスを与え、出産率の低下につながる。したがって、卵子の核の位置を素早く正確に把握することは、顕微授精法の効率化や安全性の向上に寄与すると考えられることから、本研究において卵子の核の位置を AI・ディープラーニング技術により自動的に検出し、画面上で提示できるアプリケーションソフトウェアを開発することにした。

このシステムは、マイクロマニピュレータという顕微授精法で使用される装置の操作を AI で補助することで、胚培養士の技術向上や作業効率化に貢献できると期待する。

## 〔研究の内容、成果〕

### 〈本研究の方法〉

セグメンテーションモデルに、マルチタスク学習を取り入れ、精度を向上させる。すなわち、卵子核検出モデルの訓練時に、同時に（より簡単かつ訓練データの準備が容易な）卵子検出タスクをサブタスクとして同時に解く。予備実験において、その効果は確認済みである。ヒト用モデルについては、訓練データ不足の影響軽減のため、マウス用モデルからの転移学習を活用する。また、下で説明する、訓練データを効率的・自動的に収集するアプローチを採用する。

■**学習データの収集方法** 山梨大の専門家が核位置を顕微鏡画像上にアノテーションした高品質な手動作成データに加え、以下の方法 i)、ii) によって自動的に訓練データを収集する。

- i) **蛍光染色による自動データ作成。** 蛍光タンパク質で核を染色し、紫外線照射して撮影した画像（＝核が光る）と、非照射時の通常画像をアラインすることで、自動的に核位置をアノテートした訓練データを収集する（図 1）。通常の顕微鏡では、紫外線照射画像と明視野画像の同時撮影ができないため画像間にずれがあり、蛍光輝度も撮影ごとにばらつきが生ずる。このため、これらを自動補正し、学習データ作成を完全自動化する技術を開発する。



図 1

- ii) **偏光顕微鏡による自動データ作成。** 蛍光染色による上述の手法は、染色・紫外線照射により卵子が損傷をうけるため、たとえばヒト人工授精には使えないという制限がある。このため、アプローチを発展させ、偏

光顕微鏡で撮影した画像（核位置が見える）と通常画像をアラインし、非侵襲的に核位置をアノテートした訓練画像を自動的に・効率的に収集する。

### 〈結果〉

本研究の目的は、卵子の核の位置を AI・ディープラーニング技術により自動的に検出し、画面上で提示できるアプリケーションソフトウェアを開発することである。このためには、卵子の核の位置を正確に判定できるマザーデータを収集することが必要となるが、卵子の核の位置は、顕微鏡写真の中に多くの“卵子以外のもの”が映りこんでいるため、容易に見つけることができず、さらに、卵子は球体であり、一方、核はラグビーボール状の形をしており、核の上下により形状が変わるため、卵子細胞質の枠の形で決定することは困難であるという点が卵子核を同定するためのハードルとなっていた。

そこで、image segmentation や anomaly detection などを用いて、卵子細胞質と透明体を見分けるセグメンテーションを行った。その結果、卵子細胞質を円とし、囲む手法をとることで、核が見えないときは真円に重なり、核があるときは細胞膜表面に丘のような盛り上がりが見られることが分かった（図 2 中）。しかしいくつかの卵は真円に見えるにも関わらず核が見えているものもあり（図 2 下）、結果。この手法だけでは核の位置を正確に検出することはできなかった。

次に、方法を変えて、顕微鏡操作者が核の位置を判断している“核の色の違い”をもとにディープラーニングにかけてみることにした。

“核の色”とは、未受精卵はヒアルロニダーゼで卵丘細胞を取り除いたのち、倒立顕微鏡下で観察すると、核が存在する箇所は少し周りの細胞質と色が薄く透明に見える。熟練した顕微鏡操作者は人の目でその微かな色の違いを瞬時に読み取り、核の位置を同定する。

そこで、その手法と全く同じ方法を AI に学



図2

習させるために、数百枚の卵子の手動作成データ、すなわち、専門家による核位置のアノテーションを卵子の顕微鏡画像に行ったものを供試データとしてAIに読み込ませることにした。

教師データには、卵子の元画像と、それに対応するセグメンテーションマスク（背景、細胞質、紡錘体）を使用した。セグメンテーションには、Segment Anything Model (SAM) を用い、円検出を基に各卵子を識別し、マスク画像を生成した。

作成した教師データセットを用いて分類モデルを訓練し、IoU スコアを指標として評価を行った。segmentation\_models\_pytorch ライブラリ内の複数のモデルを訓練し、その中で本モデルに最も適したものを選択した。

#### ○実証実験結果

初期のモデルでは、極体を紡錘体と誤認識する事例が確認されたが、モデルの改良を重ねた結果、すべての卵子において紡錘体を正確に識別できるようになった。さらに、映像取得から推論、結果の出力までの一連の処理を最適化することで、タイムラグを感じることなく、リアルタイムで紡錘体の位置を特定しながら ICSI を実施することが可能となった。また、ピントが大きくずれてしまわない限り、紡錘体の正確

な認識が可能であった。

また、AI が特定した紡錘体位置に基づいて実施した ICSI の生存率 (85%) および産仔率 (45%) は、熟練者が AI を用いずに実施した場合 (生存率 82%, 産仔率 50%) と同程度であり、AI の使用が卵子の生存および発生能に与える影響は認められなかった。

本研究では、マウス卵子の紡錘体を迅速かつ正確に識別する AI モデルを開発し、その実用性を検証した。実証実験の結果、初学者が本 AI モデルを用いることで、熟練者と同等の精度で紡錘体を識別し、ICSI の生存率や産仔率に悪影響を与えないことが確認された。

現在、生殖補助医療の ICSI 時における紡錘体の視認には PolScope を用いた偏光顕微鏡観察が主流となっている。しかし、PolScope は高価で導入可能な施設に限られるうえ、映像の判読には熟練を要する。これに対し本研究では、明視野画像のみを用いて紡錘体を識別する AI モデルを開発し、比較的安価な PC を導入するだけで実装可能なシステムを構築した。さらに、卵子の経時的な品質低下を最小限に抑えるため、リアルタイム推論を可能とした。

また、近年、生殖補助医療における AI 技術の応用例として、精子や胚の品質分類、胚盤胞の異数性診断などが報告されている。しかし、ICSI に特化したリアルタイム支援システムの開発は進んでいない。本研究は、AI を用いた安価なリアルタイム紡錘体識別を実現した点で、既存研究にはない新たなアプローチを提供できるだろう。

今後は、本研究を継続し、実際の倒立顕微鏡に搭載し、アシストシステムを構築することで、最終的に、新たに顕微授精を学ぶ初心者に、顕微授精の技術を学ぶ時間の短縮になるかの実証実験を行う。

現在はマウスの顕微授精における教師データ、並びにシステムの構築までであるが、今後はヒトの不妊治療クリニックの協力の元、ヒト



卵子の紡錘体検出のシステムの構築を目指したい。そして、不妊治療の現場において、高度な技術を学ぶための近道となることを希望する。

[成果の発表, 論文など]

2025 年 8 月 日本受精着床学会にて発表予定

## [研究助成 (B)]

## 超音波ゲルレンズの開発と高速光計測技術への展開

2231901

研究代表者  
(助成金受領者)

同志社大学 理工学部

教授

小 山 大 介

共同研究者

同志社大学 理工学部

教授

松 川 真 美

## [研究の目的]

将来的な車輛の自動運転技術の発展のためには、高速かつ広範囲に周囲情報を取得する技術が必須である。従来のカメラで画面奥行き方向に高速で移動する物体に常にピントを合わせて撮影する場合、アクチュエータを通じて連続的かつ高速にレンズを光軸方向へ移動させて、レンズの焦点を移動させなければならず、走査速度と走査範囲はアクチュエータの機械的性能によって決定づけられる。本研究では、音速で伝搬する超音波によって、透明ゲルの形状および屈折率を高速かつ大振幅で変化させることにより、従来手法の限界を超えた、光を空間的・時間的に高速制御可能な光デバイスと、これを利用した光計測技術について検討する。

我々人間の眼の水晶体は自身の形状を変形することにより焦点位置を制御している。本研究ではこれにヒントを得、第一段階として、超音波による透明ゲル材料の形状制御技術を検討すると共に、これを利用した高速光計測に適したゲル材料の選定を行う。第二段階として、本技術を利用した光学デバイスとして、焦点位置を3次元的に高速に制御可能な光学レンズを開発する。本レンズは従来技術の様に、焦点変化時にレンズの位置を動かすのではなく、超音波の放射力によって自身の形状を変化させ、その焦点位置を任意位置に高速に変化可能な可変焦点レンズである。また、レンズ内に非軸対称な圧力分布を発生することで、その焦点位置を軸上

のみならず径方向にも制御する。提案するレンズはレンズの役割を果たす透明ゲル材料と超音波を発生させる圧電素子のみで構成される機械的可動部を持たない簡素な構造であるため、小型・薄型化可能であり、車輛用デバイスに求められる耐震性にも優れる。また、レンズ中を音速で伝搬する超音波の放射力によりその形状が変化するため、従来技術の機械式レンズと比較して1桁程度短い時間応答が期待でき、応答時間 10 ms を目指す。

## [研究の内容、成果]

## 1. 超音波ゲルレンズの開発

本研究では、焦点位置を制御可能な超音波ゲルレンズを開発した(図1)。レンズは円形ガラス基板(直径 30 mm, 厚み 1.1 mm)、厚み方向に分極したアニユラ型圧電超音波振動子(内径 20 mm, 外径 30 mm, 厚み 1 mm, PZT, C-213, 富士セラミックス)、レンズの役割を果たす透明なゲル膜で構成される。レンズへの

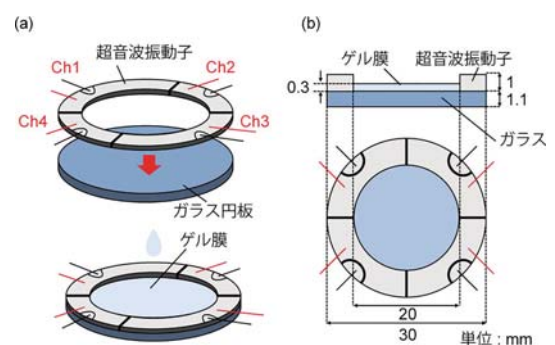


図1 超音波ゲルレンズ

入力信号によってレンズ形状を制御するため、超音波振動子は周方向 90° ごとに 4 分割されており、それぞれが電氣的に独立している (Ch 1~4 とする)。透明ゲルとして粘弾性体であるシリコーンゲル (KE-1052(A/B), 信越化学工業) を使用した。気泡を含まない様に主剤と硬化剤を 15 分間混合し、脱気後にガラス円板上の凹部に 250 ml のゲルを塗布し、24 時間乾燥を行った。レンズの姿勢によらずゲル膜表面 (すなわちレンズ表面) 形状は安定しており、重力による影響はほとんど受けない。

## 2. レンズ径調整機能の評価

機械的可動部を持たず有効レンズ径を調整可能な可変焦点レンズを開発した。本レンズは周波数 20~250 Hz の範囲において複数の共振モードを有し、本研究では節円のみが存在する軸対称な同心円状の共振モードを利用した。図 2 はこれらの振動モードを示しており、(a) 41, (b) 102, (c) 189 kHz の 4 つの振動子を同相駆動して発生する凸レンズモードと、(d) 26, (e) 66, (f) 148, (g) 233 kHz の各振動子の駆動位相差を 90° とした凹レンズモードを利用した。レンズのガラス円板にこれらの振動モードが励振されると、その上に塗布されたゲル膜の表面に超音波の静圧である音響放射力が作用することでゲルは静的に変形する。図 3 はゲルレンズ表面の変形形状断面図の一例であり、周波数 41 kHz の振動モードで駆動した場合の結果である (実際はゲル膜の付加質量の影響により 39 kHz で共振する)。同図より、非駆動時 (0 V) はゲルの表面張力によって凹形状であるが、

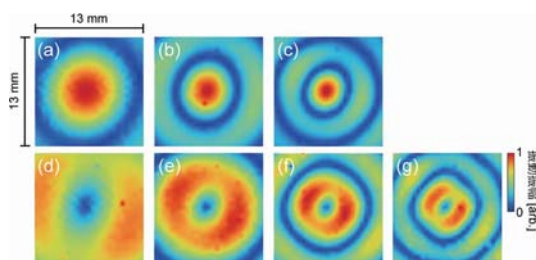


図 2 ゲルレンズの各振動モード

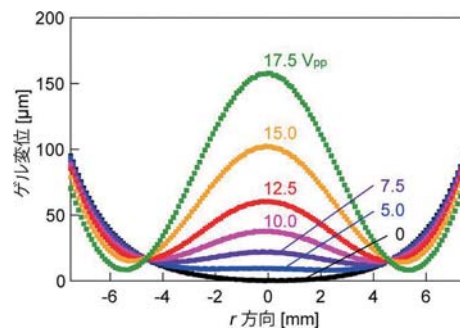


図 3 ゲルレンズの振動分布

超音波駆動によって図 2(a) の振動分布と同様にレンズ中心部分 ( $r=0$  mm) が凸状に変化することがわかる。入力電圧振幅と共に振動振幅が増加し、ゲル表面に作用する音響放射力も増加することから、それによってゲルの変位も非線形的に増加する。また共振周波数が高いほど (すなわちモード次数が大きいほど)、ガラス円板に発生する超音波たわみ振動の波長が短くなるため、ゲル表面に発生する凸レンズの有効径は小さくなる。すなわち、共振モードの切替によって離散的に可変焦点レンズの有効径を制御できる。

図 4 は超音波振動子への入力電圧振幅を変化させた時のゲルレンズの焦点距離の変化を表しており、ここでは図 2(a), (b), (c) に示した 3 つの凸レンズモードの結果を示している。いずれの共振モードにおいても入力電圧の増加と共に焦点距離は小さくなる。これは図 3 に示した通り、電圧の増加に伴い凸レンズの曲率半径が小さくなるためである。本結果より、いずれの共振モードにおいても入力電圧によって焦点距離を制御可能であることがわかる。また、光線

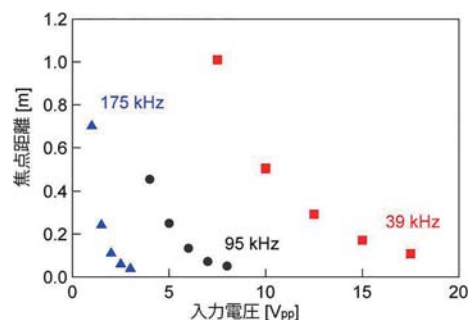


図 4 入力電圧と焦点距離の関係

追跡によってレンズの光学性能を定量的に評価した。球面収差はレンズの光学性能を表す最も重要な指標のひとつであり、レンズを透過する光線が1点に集束する度合いを表すパラメータである。この値が小さいほど凸レンズとしての光学性能は優れていることを意味する（0%の場合、レンズを透過する全ての光線が1点に集束する）。図5は各凸レンズモードにおける入力電圧とレンズの平均球面収差の関係を表している。同図に示す通り、いずれの共振モードにおいても入力電圧の増加と共に平均球面収差は減少する結果となった。

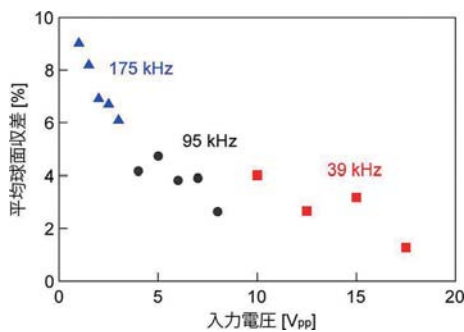


図5 入力電圧と平均球面収差の関係

### 3. 径方向焦点制御の評価

光軸方向（画面奥行き）のみならず、径方向（画面横方向）にも焦点制御可能なゲルレンズについて検討した。本機能はカメラの手振れ補正機能に活用することが可能である。図6はCh1~4への電圧振幅の和を  $36 V_{pp}$  一定とし、

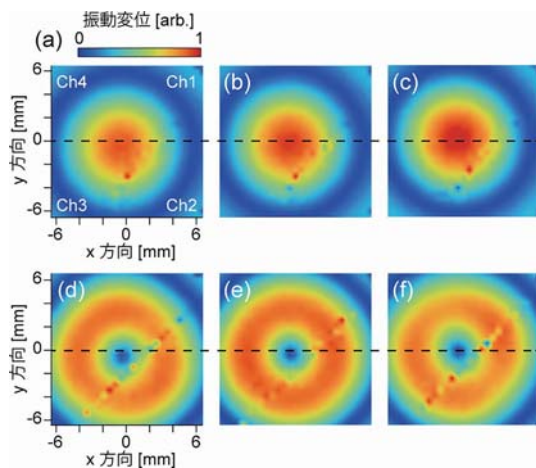


図6 ゲルレンズの振動分布

それらの比を変化した時の振動分布であり、同図(a)~(c)は各振動子を同相で駆動した凸レンズモードの場合の振動分布を、同図(d)~(f)は駆動位相差を  $90^\circ$  とした場合の凹レンズモードの結果を表している。全ての振動子を  $9 V$  で駆動した時  $((9, 9, 9, 9) V_{pp})$  において両駆動方式のいずれにおいても振動中心とレンズの中心が一致し、電圧比を変化させると振動腹部および振動節部は低電圧入力振動子側に近づく方向に移動する。これらの結果は、各振動子への入力電圧比を制御することによってゲルレンズの径方向形状制御が可能であることを意味している。

図7は実際にCh1~4への電圧振幅の和を一定とし、それらの比を変化した時の焦点位置であり、同図(a)は凸レンズモード時、同図(b)は凹レンズモード時の結果を表している。図6の振動分布と同じ様に、両駆動方式のいずれにおいても、電圧比を変化させると焦点位置は径方向（y方向）の低電圧入力振動子側に近づく方向に移動することがわかる。特に、焦点の径方向制御時において、光軸方向（z方向）には焦点距離はほとんど変化していないことから、焦点距離は径方向に水平移動していると理解出来る。これらの結果より、4つの各振動子への入力電圧比を制御することによってゲルレンズ

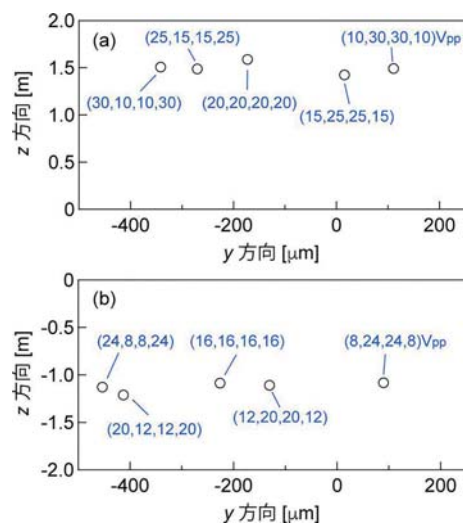


図7 径方向への焦点移動特性



の径方向焦点制御が可能であることがわかる。

#### 4. 応答時間の改善

焦点変化時のレンズの応答時間は可変焦点レンズの性能として極めて重要な指標である。ゲルレンズの応答時間はゲルの粘弾性に強く依存する。そのため本研究では、従来のゲル膜に加えてその内部に液体を有するゲル・液体のハイブリッドレンズを開発した。

図8はハイブリッドレンズの構造を表しており、円筒型の圧電超音波振動子の一端にガラス円板を接着し、振動子中央部に液体（水）で満たし、その上にゲル膜で蓋をした構造である。ゲル膜厚  $d$  に対する応答時間の変化を評価するため、本研究では厚さの異なる3つのハイブリッドレンズを試作した。

周波数 190 kHz において、ハイブリッドレンズのゲル膜部分に最低次のたわみ振動が励振された。これにより3つ全てのハイブリッドレンズが可変焦点凸レンズとして動作することが確認できた。図9(a)はゲル膜厚が異なる3つのハイブリッドレンズとゲルレンズ ( $d=2$  mm) の時間応答を表している。グラフ縦軸はレンズを通して観測した顕微鏡画像の画像輝度値示しており、 $t=0$  s においてそれぞれ超音波駆動を開始している。同図より、ゲル膜厚  $d$  が小さいほど画像輝度が定常状態に達するまでの時間が短い、すなわち応答速度が速いことがわかる。ここではこれらの応答曲線を指数関数

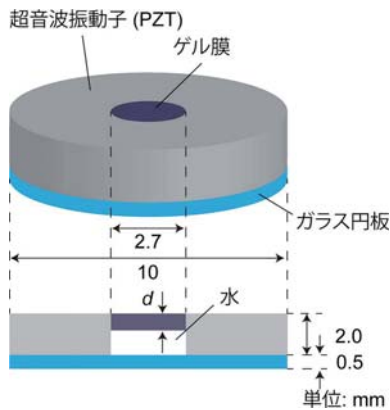


図8 ハイブリッドレンズの構造

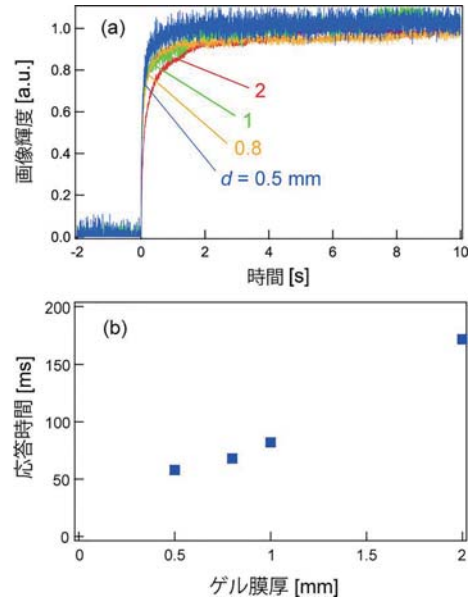


図9 (a) ハイブリッドレンズの時間応答と  
(b) ゲル膜厚と応答時間の関係

で近似し、その時定数を応答時間と定義した。図9(b)はハイブリッドレンズのゲル膜厚  $d$  と応答時間の関係を表している。ゲル膜厚  $d=1, 0.8, 0.5$  mm のレンズの時定数はそれぞれ 82, 68, 58 ms であり、ゲル膜厚が薄いほど応答時間は減少した（ゲルレンズ ( $d=2$  mm) と比較して  $d=0.5$  mm のレンズの応答時間は 34% 短縮された）。これらの結果より、ハイブリッド構造によって、ゲルレンズの問題点であった応答時間を改善できることが明らかとなった。

#### [謝 辞]

本研究の一部は立石科学技術振興財団による研究助成によって行われた。

#### [成果の発表、論文など]

##### 原著論文

- ・ K. Nakamura, Y. Harada, H. Miki, K. Tagashira, M. Matsukawa, D. Koyama: Ultrasonic aperture-tunable gel lens, Appl. Opt. Vol. 63, No. 21, pp. 5778-5784 (2024)
- ・ K. Tagashira, Y. Harada, K. Nakamura, H. Miki, M. Matsukawa, D. Koyama: Focus control of a concave-convex ultrasonic gel lens in the radial direction, J. Appl. Phys., Vol. 136, No. 11, p. 113101 (2024)

- ・ H. Miki, K. Nakamura, Y. Harada, M. Matsukawa, D. Koyama: Ultrasound liquid-gel hybrid lens using acoustic radiation forces, Appl. Opt. Vol. 64. No. 4, pp. 821-827 (2025)

国内学会発表

- ・ 三木陽斗, 原田裕生, 中村光佑, 松川真美, 小山大介: 粘弾性ゲル膜と音響放射力を用いた超音波液体レンズ, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2023.6)
- ・ 田頭幸吉, 中村光佑, 三木陽斗, 小山大介: 凹型超音波ゲルレンズの径方向制御, 日本音響学会第 150 回 (2023 年秋季) 研究発表会 (2023.9)
- ・ 中村光佑, 原田裕生, 三木陽斗, 黒田悠真, 小山大介: 超音波ゲルレンズの光学特性評価, 日本音響学会第 150 回 (2023 年秋季) 研究発表会 (2023.9)
- ・ 田頭幸吉, 中村光佑, 原田裕生, 小山大介: 凹凸両用超音波ゲルレンズの径方向焦点制御, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2023.12)
- ・ 三木陽斗, 原田裕生, 中村光佑, 小山大介: 粘弾性ゲル膜と音響放射力を用いた超音波液体レンズのフォーカシング特性, 日本音響学会第 151 回 (2024 年春季) 研究発表会 (2024.3)
- ・ 三木陽斗, 中村光佑, 原田裕生, 小山大介: 超音波ゲルレンズの透過光波面解析, 日本音響学会第 152 回 (2024 年秋季) 研究発表会 (2024.9)
- ・ 富田理紗子, 岩青葉, 小山大介: 円筒のたわみ進行

波によって発生する流体中の旋回流と光デバイスへの応用, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2024.12)

- ・ 小山大介: 超音波による可変焦点光学レンズ, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2025.2)

国際学会発表

- ・ H. Miki, Y. Harada, K. Nakamura, M. Matsukawa, D. Koyama: Ultrasound Liquid Lens Using a Viscoelastic Gel Film and Acoustic Radiation Force, IEEE International Ultrasonics Symposium 2023 (2023.9)
- ・ K. Tagashira, Y. Harada, K. Nakamura, D. Koyama: Focus control of a concave ultrasonic gel lens, 185th Meeting of the Acoustical Society of America (2023.12)
- ・ H. Miki, Y. Harada, K. Nakamura, D. Koyama: Focusing Characteristics of Ultrasound Liquid Lens Using a Viscoelastic Gel Film and Acoustic Radiation Force, 21st International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications (2024.7)
- ・ H. Miki, K. Nakamura, Y. Harada, M. Matsukawa, D. Koyama: Optical Characteristics of an Ultrasound Gel Lens, 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control joint Symposium (2024.9)

## [研究助成 (B)]

# 歌唱による嚥下機能保持・向上のための人工知能と 脳科学の融合システム基盤の開発

2221905



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

兵庫県立大学  
先端医療工学研究所  
関西医科大学  
リハビリテーション学部

准教授 八 木 直 美  
准教授 前 澤 仁 志

## [研究の目的]

肺炎は、超高齢化社会で大きな死亡原因になっている。肺炎の原因である誤嚥を歌唱によって防止したい。従来、医療従事者が咽頭運動の評価を行うため多大なコストを要す。また、嚥下機能保持・向上の方法もない。本研究では、喉周辺の AI による動画像処理で新規特徴量を発見し、嚥下機能評価の新指標・方法を解明することを目的とする。次に、脳磁図計測により嚥下運動の中枢制御機構から誤嚥誘発のメカニズムを解明して、歌唱による咽頭筋強化が中枢に与える可塑性変化を明確にし、歌唱が有効である医学的根拠を確立する。このように、歌唱による喉・脳の動態を機械により見える化して、嚥下機能の保持・向上システムを研究する。これが人間（歌唱）と機械の調和の促進である。

嚥下障害の評価・診断は、言語聴覚士や耳鼻咽喉科医、リハビリテーション科医等の主観的評価にゆだねられている。先行研究では、歌唱者は声帯健康状態が良いと報告されているが、嚥下能力への影響は一定の見解が得られていない。以前に、新型コロナウイルスの蔓延で、日本嚥下医学会は嚥下障害診断指針の中で詳細な感染予防策を作成しているが、解決可能な遠隔診断システムは存在しない。更に、いくつかの動態解析が試みられているが、患者と医療従事者双方の身体、心理的負担を軽減されたものは、未だ临床上広く使用されている現状にはない。

一方、歌と声のトレーニングは、咀嚼、嚥下、呼吸機能に大きな影響を与えている。歌唱者が嚥下反射の惹起性において統計的に優れているという医学的根拠立証することを研究デザインし、これを検証することを目指す。

## [研究の内容、成果]

## 1. 動態解析

歌唱経験者と非歌唱経験を分類し、反復唾液嚥下テスト (repetitive saliva swallowing test: RSST) を評価基準として、喉頭部の動態解析および動画像診断が嚥下評価に有効であることを解明する。次に、脳機能計測による大脳皮質運動野の可塑性を評価し、これによって歌唱が嚥下機能を保持・向上させることの根拠を調査する。

## 1.1 計測方法

歌唱経験と嚥下機能の関係を解明し、歌唱による影響を RSST で定量化する。誤嚥のスクリーニングとして最も簡便な方法である RSST を実施する。言語聴覚士が被験者の喉仏・舌骨に人差指と中指の腹を軽くあてた状態で 30 秒間唾液を飲み込む様子を確認する。1 種類のデバイス (可視光カメラ GoPro) を用いて、被験者の正面と側面から嚥下動作を計測する。

さらに、歌唱者と非歌唱者の臨床データを用いて、遠隔 AI 動画診断の有効性を評価する。ゴクンと飲みこむとき、甲状軟骨 (喉仏) は

前上方に移動する。近年、モーションキャプチャ技術の進歩により、身体にマーカを装着することなく、人間の行動を正確に計測することが可能である。しかしながら、例えば喉頭（皮膚表面）にマーカを装着したとしても、甲状軟骨の動態解析をすることは不可能である。そこで、本研究では動画画像からマーカーレスで位置推定、トラッキングすることができる人工知能技術 DeepLabCut を基本として、喉仏の動きを自動追跡する（図 1）。



（黄丸：喉仏の位置）

図 1 動画自動計測方法

嚥下時は喉仏が前上方に移動することが解剖学的に知られている。各対象者について、教師用データとして 20 フレーム程度のラベリングし、学習する。高齢者になるほど喉の動きが不明瞭で、正確に自動追跡ができないため、最新の AI、画像処理、信号処理等の方法を用いて、全ての動態に対して喉の状態を解析できるロバストな手法を研究開発する。言語聴覚士が実際に実施する RSST では、嚥下動態の様子、回数等を観察している。

本研究では、嚥下回数に加えて、喉頭の空間的な座標の変化、スピードなどの特徴量を取得する。嚥下評価の指標として新たな特徴量を発見し、嚥下機能評価の新しい指標・方法を解明する。

## 1.2 対象者および解析方法

40 歳以上の健常者を対象に臨床試験参加者を募集する。事前に RSST やスクリーニングテストである簡易嚥下評価ツール EAT-10 等を実施し、嚥下機能に大きな問題がないことを確認済である。対象者に、30 秒間にできるだけ多くの唾液嚥下をしてもらうように指示し、

2 回の実験を実施する。1 回目は言語聴覚士が触診で検査を行い、2 回目は可視光カメラ GoPro（GoPro 社）でその様子を撮影する。画像サイズは、1920×1440 pixels（内 6 データ 1920×1080 pixels）、フレームレート 60 fps（内 2 データ 30 fps）とする。

対象者は、それぞれの歌唱経験の程度により 3 群（非歌唱経験者グループ、一般歌唱経験者グループ、プロ歌唱経験者グループ）に分類する。一般歌唱経験者グループは歌唱レッスン等を受けて日常的に歌唱している人、プロ歌唱経験者グループは声楽家としてプロ活動を行っている人と定義する。非歌唱経験者グループおよび一般歌唱経験者グループの 2 群においては、統計解析ソフトウェア SPSS v29（IBM 社：International Business Machines Corporation）を用いて、傾向スコアマッチングにより各群の対象者の背景因子を揃える。対象者の詳細を表 1 に示す。

表 1 対象者の詳細

| 歌唱経験<br>グループ | 年齢<br>[歳] | 歌唱経験<br>年数 [年] | 対象者数<br>[名] | 嚥下回数<br>[回] |
|--------------|-----------|----------------|-------------|-------------|
| 非歌唱経験        | 60.6±14.0 | 0              | 27          | 105         |
| 一般歌唱経験       | 58.7±9.8  | 9.7±12.9       | 27          | 136         |
| プロ歌唱経験       | 58.2±9.8  | 42.8±10.3      | 6           | 33          |
| 合 計          | —         | —              | 60          | 274         |

本研究は、兵庫県立大学先端医療工学研究所倫理審査（承認番号 22-001）等の承認を得て実施している。

本研究には、i7 64-bit CPU（Windows 10 Home ベース）、GeForce RTX 2060/2080 Ti の GPU を搭載したコンピュータを使用して機械学習を行う。信号処理は、MATLAB R2024a（Signal Processing Toolbox, Statistics and Machine Learning Toolbox 等、MathWorks 社、USA）数値解析ソフトウェアを用いる。

## 1.3 解析結果

計測した嚥下動画に対して、マーカーレストラッキング技術 DeepLabcut を適用し、嚥下時の動態波形を抽出後、外れ値処理、固定部減算、



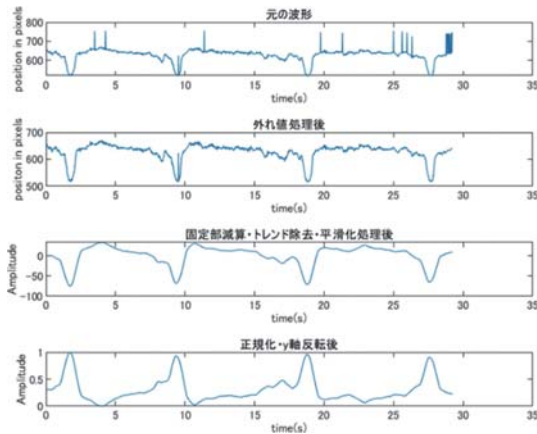


図2 嚥下波形の信号処理結果の一例

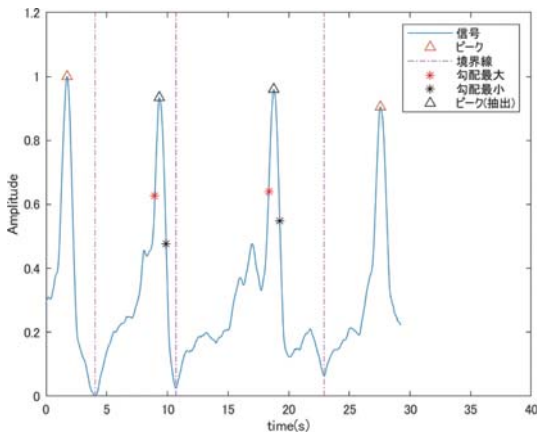


図3 嚥下波形解析の一例

トレンド除去，平滑化，正規化等の信号処理および特徴量抽出を行った。解析結果の一例を図2および3にそれぞれ示す。

3群全体において，RSST との相関を調査した結果，言語聴覚士の目視および動画解析において，それぞれ相関係数 0.752 および 0.749 と高い相関が得られた。この結果より，言語聴覚士の目視検査および動画解析は有用であると考えられる。RSST との相関関係および歌唱経験グループによる3群比較を行なった結果を表2に示す。非歌唱経験者グループに対して，一般

表2 嚥下回数の比較結果

| 計測方法         | 非歌唱経験者  | 一般歌唱経験者  | プロ歌唱経験者 |
|--------------|---------|----------|---------|
| RSST [回]     | 6.1±1.9 | 7.5±2.0* | 6.5±1.9 |
| 言語聴覚士の目視 [回] | 5.8±1.3 | 6.7±2.1  | 7.7±3.1 |
| 動画解析 [回]     | 5.9±1.4 | 7.0±1.9* | 7.5±2.1 |

\* p<0.05 (vs 非歌唱経験者)

歌唱経験者は RSST および動画解析結果に有意な差が認められた。

嚥下特徴量時間は，「①1回の嚥下波形の傾きが最大の時点から喉頭が最大位になる時点」，「②1回の嚥下波形の傾きが最大の時点から波形の傾きが最小の時点」，「③1回の嚥下波形の傾きが最大の時点から嚥下終了時点」，「④1回の嚥下開始時点から喉頭が最大位になる時点」とそれぞれ定義した。RMS (Root Mean Square：振幅を二乗した値の平均値の平方根)の値が大きいことは，喉仏を高い位置で保っていることを示唆している。波形の形状を表している。また，プロミネンス (他のピークに対して相対的に内部的な高さと場所によってどの程度顕著であるかを示す) において，非歌唱経験者と比較して一般歌唱経験者の方が優位に高値を示し，嚥下がスムーズに行われていることが考えられた。嚥下計測の特徴量の比較結果を表3に示す。

表3 嚥下計測の特徴量の比較結果

| 計測特徴量項目      | 非歌唱経験者    | 一般歌唱経験者                | プロ歌唱経験者                |
|--------------|-----------|------------------------|------------------------|
| 嚥下継続時間 [s]   | 3.64±1.83 | 3.15±1.84*             | 3.07±1.59              |
| 嚥下特徴量時間① [s] | 0.55±0.54 | 0.42±0.44              | 0.42±0.22              |
| 嚥下特徴量時間② [s] | 1.00±0.69 | 0.76±0.52 <sup>#</sup> | 0.80±0.33*             |
| 嚥下特徴量時間③ [s] | 1.96±1.21 | 1.84±1.31              | 1.50±0.92*             |
| 嚥下特徴量時間④ [s] | 2.22±1.15 | 1.75±0.96 <sup>#</sup> | 1.99±1.16              |
| RMS          | 0.47±0.11 | 0.45±0.10              | 0.56±0.10 <sup>#</sup> |
| プロミネンス       | 0.61±0.17 | 0.67±0.18**            | 0.57±0.22              |

\* p<0.05, \*\* p<0.01, <sup>#</sup> p<0.005, <sup>##</sup> p<0.001 (vs 非歌唱経験者)

## 2. 嚥下造影検査 (Video Fluorography: VF) との比較検証

嚥下機能評価においてゴールドスタンダードとされている検査はVFである。VF検査時に，可視光カメラ GoPro で嚥下の様子を同時撮影し，VF動画と可視光カメラ動画の解析結果を比較することで，可視光カメラでの解析の有効性を検証する。具体的には，GoPro とVFの同時撮影した動画の喉頭部の動きを DeepLabcut により追跡する。抽出した波形データを同期させて解析結果を確認する。さらに，数値計算ソ

フトウェア Matlab を使用して、嚥下波形のピーク、嚥下区間、喉頭の最大挙上のタイミング等を特定する。1 回の嚥下区間に対して、4 種類の時間特徴量を抽出し、範囲の相関関係を確認する。共同研究機関において、対象者 6 名（男性 3 名、女性 3 名）の臨床試験の結果、特徴量毎に高い相関が認められ、可視光カメラを用いた嚥下評価は有効な方法であることが示唆された。

### 3. 脳機能計測

圧センサーを用いて圧変動に伴うリズムと脳反応との脳反応 —— 圧コヒーレンス解析 (Cortico-force coherence, CFC) システムを構築した。従来の脳反応 —— 運動コヒーレンス解析 (Cortico-kinematic coherence, CKC) では、加速度計測装置 (ACC) を対象とする身体部位に設置し運動のリズムを評価している。しかし、臨床では、大きな反復運動を行うことが困難な患者も多く、微弱な力でも評価できる手法が求められている。そこで、われわれは、微弱なリズムミカルな圧変化を圧センサーで検出し、脳信号と圧とのコヒーレンス解析を行った。

#### 3.1 対象者および解析方法

健康成人 14 名（女性 7 名、年齢 22~40 歳）が参加した。被験者は、右人差し指または右つま先を用いて、能動的な条件（随意運動）と受動的な条件（検者による受動運動）の 2 つの異なる条件下で、リズムミカルな押圧課題を行うよう指示された。押圧は圧センサーで計測し、運動のダイナミクスを捉えるために、表面筋電図と加速度計による記録も追加された。脳波 (EEG) は国際 10-20 システムに準拠した 32 チャンネルキャップで記録された。コヒーレンス解析は脳波信号と対応する力、筋電図、または運動信号 (ACC) との間で施行した。

#### 3.2 解析結果

すべての被験者および条件において、コヒーレンススペクトルは、被験者の運動リズムと一致する周波数において、有意なピークを示した。

これらのピークは、EEG-圧力 (CFC) だけでなく、EEG-ACC (CKC) および EEG-EMG でも観察された。また、能動的な押圧条件と受動的な押圧条件において CFC ピークの振幅に統計的に有意な差が認められなかった。さらに、コヒーレンスの強度は指とつま先を押す課題間で差がなかったことから、CFC は身体部位を問わず臨床応用が可能なことが示唆された。親指と足の運動と脳反応とのコヒーレンスは左半球（対側半球）に認められた。本 CFC 手法は、大きな運動や強い力を必要とせず、四肢や口腔領域の感覚運動障害の患者に広く適応することが可能という利点がある。CFC は、従来の加速度計を用いた CKC 計測とは異なり大きな運動を行う必要がなく、微弱な圧での計測が可能のため、計測部位（脳）と距離の近い口腔領域の脳機能解析には特に有利である。今後は、CFC 計測を口腔領域に適応し、歌唱者のコヒーレンス値を解析することで、歌唱の口腔運動制御における影響を明らかにしたい。

### 4. まとめ

本研究では、深層学習を用いた動画解析による、簡易かつ定量的な嚥下の動態評価システムを構築した。ゴールドスタンダードとされる VF との同時計測および解析を行うことで、評価結果の同等性を示すことができた。さらに、脳機能計測において、脳信号と圧センサーで検出した圧変化とのコヒーレンス解析により、特定の周波数で有意な特徴量を捉えることができ、口腔領域の脳機能解析の有効性が示唆された。今後も嚥下リハビリテーション促進に貢献することを目指す。

〔謝 辞〕

本研究を実施するにあたり、多大なる御支援を頂きました立石科学技術振興財団に厚く御礼申し上げます。

【成果の発表，論文など】

- [1] 八木直美, “人工知能による嚥下ヘルスケアシステムの開発 (生体信号計測と解析),” 日本バイオリオロジー学会誌 (B&R), 37(2), 9-14, 2024. 4. 雑誌
- [2] N. Yagi, S. Nagami, H. Maezawa, Y. Hata, “Medical trends and developments in system of systems engineering for dysphagia,” Studies in Systems, Decision and Control, Springer Nature (in press) 書籍
- [3] N. Yagi, “Medical support system with bioinformation,” and “Healthcare monitoring by AI and signal processing,” Taichung Veterans General Hospital, 2023. 9. 16. 招待講演
- [4] 八木直美, “人工知能で嚥下を科学する,” 第44回バイオリオロジー・リサーチフォーラム, 2023. 6. 3. 招待講演
- [5] 八木直美, “人工知能によるリハビリテーション評価システムの開発,” はりま産学交流会 6 月創造例会, 2023. 6. 16. 招待講演
- [6] A. Yoshida, N. Yagi, Y. Fujii, H. Shibutani, Y. Kobayashi, Y. Saji, Y. Sakai, Y. Hata, “A Visible Camera Approach to Motion Tracking based Swallowing Evaluation,” ICMLC & ICWAPR 2024, 2024.
- [7] T. Ueyama, N. Yagi, Y. Fujii, H. Shibutani, Y. Kobayashi, Y. Saji, Y. Sakai, Y. Hata, “Aspiration Detection System with Video Fluoroscopic Examination of Swallowing Testing,” ICMLC & ICWAPR 2023, pp. 376-380, 2023.
- [8] 八木直美, 中村朱里, 川村直子, 前澤仁志, 酒井良忠, 柏岡秀紀, 平田雅之, 柳田敏雄, 畑豊, “DeepLabcut を用いた嚥下動態解析方法の検討,” 人工知能学会第二種研究会, 2024.
- [9] H. Maezawa, M. Wakida, M. Matsuhashi, “Cortico Force Coherence of the Finger and Toe with Slight Rhythmic Pressure on Force Sensors using Electroencephalography.” Scientific Reports, pp. 1-12, 2025.

## [研究助成 (C)]

## 高齢者の自然発話における特徴量を用いた認知機能推定手法の開発

2247005



研究代表者

東京大学 大学院  
新領域創成科学研究科

後期博士課程

五十嵐 俊 治

## [研究の目的]

近年、家具や室内など周辺環境に配置されたアンビエントセンサ等を活用したスマートハウス技術への意識が高まっている。人が居住する環境を電子化することによって、居住者の活動を記録して遠方に住む家族に共有し、電力消費量のマネジメントを行うことなどが可能になっている。また、場合によっては居住者に行動変容を促すなどの情報推薦を行うケースもある。本プロジェクトは、アンビエントセンサーを活用し、高齢者の生活支援および認知機能モニタリングを行うスマートハウスエージェントの開発を目的としている。

提案者らの研究では、世界的にも例を見ない9ヶ月間の長期介入研究を実施したが、会話内容を日毎に変えたとしても、次第に使用頻度が落ちていくことが確認された。

介入終了後に、研究参加者を集めたグループディスカッションを実施し、意見を集めたところ、「会話の内容がこちらの状況を把握したものではないため会話のモチベーションがあげられない」「適時適切な受け答えができない」といった意見が挙げられた。これは ChatGPT の API を活用した会話型エージェントでも同様であり、システム応答性の高い最新の対話エージェントである Cotomo を用いても超えられていない課題である。しかし、リザーブコンピューティングは、主に出力層でのみ学習が行われるため、大規模なデータセットに対しても

高速に学習を行うことができる。この特性を活かし、リアルタイムまたはリソース制限のある環境での応用が可能となると考えている。

## [研究の内容、成果]

本システムは、高齢者の聴覚・認知特性に最適化された対話を実現するため、複数の技術要素を統合した設計となっている。

本システムは、クラウド環境とローカルアプリケーションを組み合わせたハイブリッド構成を採用している。ユーザーの音声はローカルアプリケーションで処理され、Amazon API Gateway を経由して AWS クラウドに送信される。クラウド側では、AWS Lambda および Amazon ECS を活用し、音声データの解析と適応処理を実施する。解析結果は Amazon Simple Storage Service (S3) に格納され、管理画面 (Next.js 14 を用いた AWS Amplify ベース) を通じてモニタリングが可能となっている。更に、Echo State Network (ESN) は音声の高低・音量調整をリアルタイムに行い、適切な話速 (mora 単位) への調整を可能にする。また、音声から推定された感情ラベルをプロンプトに挿入し、LLM (Amazon Bedrock や Azure GPT) を通じて対話の自然さを向上させる。これにより、従来の固定的な音声合成と比較して、話者に応じたダイナミックな発話が可能となる。



## 1. 開発構想・計画

まず、要件定義のために、暗黙知化されている医療・介護現場での形式化を行った。現場で10年以上の経験を持つ言語聴覚士および看護師にインタビューを行い、現場の知見を活かして寄り添った応対に最適化できるように、会話の[速度][大きさ][周波数]、使用する言葉づかい、対話構成（傾聴/質問/情報提供）についての調整を行うようにした。

本システムは、高齢者との対話を支援し、より円滑なコミュニケーションを実現するために設計を行った。本システムはAWSを基盤とし、音声対話、センサデータの統合、およびクラウドベースの処理を組み合わせることで、リアルタイムな対話の最適化を目指している。機能としては下記の機能を持つシステムとして要件を作成した。

本プロジェクトの目的は、高齢者を含む様々なユーザーに適応可能な対話型エージェントシステムを開発することである。対話型エージェントは音声特性のリアルタイム調整により、話速・音量・周波数を適応的に調整し、高齢者にとって聞き取りやすい対話を実現する。また、認知特性に配慮した対話構成を取り入れることで、傾聴・質問・情報提供を組み合わせた自然な会話の流れを作り、対話の継続性を向上させる。さらに、センサーを活用し、室温や時間帯に応じた発話を生成することで、生活環境に適応した対話システムを実現することを目指す。

プロジェクトの目標を下記のように設定した。

### [1]. 家庭内での居住者の活動状況のモニタリング

温湿度、照度、電流、赤外線といった複数のセンサを包含したマルチセンサを開発し、自宅内のコンセントに設置したセンサーから居住者の活動情報を収集し、「ユーザーが今どういう状態であるか」を推定するシステムを開発する。

### [2]. エージェントのインタラクションシステムの開発

スマートスピーカーなどのような受動的なシステムではなく、リアルタイムで室内環境を反映した会話を行うリザーバー・エージェント・インタラクション・システムを開発する。

### [3]. 実証実験の実施

開発したシステムの応用・実用化にあたっては、協力の許可を得られている有料老人ホームやサービス付き高齢者向け住宅などに導入を行い、ユーザーや施設管理者からのフィードバックを得ることを最終目標とする。

## 2. センシングデータ、発話履歴のデータベース設計

センサデータおよび会話されたデータをサーバー内に取り込むためのバックエンドの開発とAWSでの設定を行った。本システムは、クラウド環境とローカルアプリケーションを組み合わせたハイブリッド構成を採用している。ユーザーの音声はローカルアプリケーションで処理され、Amazon API Gateway を経由してAWSクラウドに送信される。クラウド側では、AWS Lambda および Amazon ECS を活用し、音声データの解析と適応処理を実施する。解析結果はAmazon Simple Storage Service (S3) に格納され、管理画面（Next.js 14 を用いた AWS Amplify ベース）を通じてモニタリングが可能となっている。

さらに、データベースは管理画面で一覧として確認できるように設計を行った。

## 3. ユーザーの健康状態推定システムの開発

本研究では、広島市立大学感情音声コーパス(HCUIDB)を用い、音声データから抽出したMFCC 特徴量を入力として、ESN (Echo State Network) によるリザーバーコンピューティング手法で処理し、話者の発話感情とパラ言語（話速、音量）を検出し、応答で自動調律するシステムを構築した。

ユーザーの発話中に特定のフレーズが検出された場合、その結果に基づいて koeiromap のパラメーターを動的に調整する仕組みを実装している。LSM (Liquid State Machine) もリザーバーコンピューティングの一手法として知られており、生物学的神経回路の動的特性を模倣する点に特徴がある。しかし、LSM はスパイクニューロンなどを用いた複雑な内部ダイナミクスを持つため、実装やチューニングが困難である。一方、ESN は連続値を扱う単純なニューロンモデルを採用するため、実装の容易さと高速な学習、さらにリアルタイム処理への適性が高い。これらの理由から、本研究では LSM ではなく、ESN を採用した。

#### 4. 電流センシングデバイスの改良

センサ要件を下記のように設定し、基盤設計を行った。

- ・ 温湿度、照度の計測ができること
- ・ ESN が走るマイコンが実装できること
- ・ wifi connect されたら、確認できること

本システムでは、電流センサ、照度センサ、音声センサ、赤外線送受信機、リレースイッチを搭載したコンセント設置型のマルチセンサを用い、カメラを使用せずに居住者の活動を推定する。また、エージェントは単なるスマートスピーカーではなく、リアルタイムで居住環境を反映した対話を行うリザーバー・エージェント・インタラクション・システムとして設計されている。

プロジェクトの成果として、

(1) 居住者の活動状況のモニタリング可能なセンサの開発、(2) エージェントによるインタラクション・システムの開発、(3) 高齢者施設などでの実証実験の計画が挙げられる。特に、システムがユーザーの設定や入力を待つのではなく、エージェントから能動的な関与を可能にすることで、ユーザーに対する対話の質と継続性を向上させる点が特徴的である。高齢者の社会

的孤立を軽減し、認知機能のモニタリングを可能にすることで、医療機関との連携による認知症の早期発見・予防にも貢献できると考えられる。

本システムの Echo State Network (ESN) は音声の高低・音量調整をリアルタイムに行い、適切な話速 (mora 単位) への調整を可能にする。また、音声から推定された感情ラベルをプロンプトに挿入し、LLM (Amazon Bedrock や Azure GPT) を通じて対話の自然さを向上させる。これにより、従来の固定的な音声合成と比較して、話者に応じたダイナミックな発話が可能となった。

[成果の発表、論文など]

##### 【著書】

1. ○ Toshiharu Igarashi, Estimating Cognitive Function Using Spontaneous Speech in Older People Living in the Community, Pages: 105, Published: 2024-09-25, ISBN: 978-99993-2-042-9, ELIVAbooks.

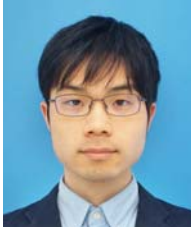
##### 【査読あり論文誌】

2. ○ Toshiharu Igarashi, Katsuya Iijima, Kunio Nitta, Yu Chen. Qualitative Analysis of Responses in Estimating Older Adults Cognitive Functioning in Spontaneous Speech: Comparison of questions asked by AI agents and humans. Healthcare. Vol. 10. No. 10. MDPI, 2024.
3. ○ Toshiharu Igarashi, Katsuya Iijima, Kunio Nitta, Yu Chen. Detailed Analysis of Responses by Interviewers in Estimating Cognitive Function of the Elderly through Natural Speech: Comparison of Questions by AI Agents and Humans. International Journal of Environmental Research and Public Health 2024.
4. ○ Toshiharu Igarashi, Yoichi Ochiai. Comparative Analysis of Wine Taste Augmentation: Artificial Climate Room Versus General Meeting Room in Evaluating Temperature and Humidity Effects. International Journal of Augmented Human 2024.
5. ○ Toshiharu Igarashi, Katsuya Iijima, Kunio Nitta, Yu Chen. Estimation of Cognitive Functioning of the Elderly by AI Agents: A Comparative Analysis of the Effects of Psychological Burden of Intervention. Healthcare. 2024.
6. ○ Toshiharu Igarashi, Yu Chen. Analysis of Intervention Effects of Prototyping Utilizing UI Stencils in Elementary School Students. Journal of Science Education and Technology 2024.

## [研究助成 (C)]

# 高次元空間における力覚フィードバックを用いた インタラクションに関する研究

2237001



研究代表者

早稲田大学  
大学院先進理工学研究科

博士後期課程

五十嵐 治 雄

## [研究の目的]

近年、ビッグデータ及び人工知能の普及や測定技術の発展によって、高次元データが至るところに現れるようになった。こうしたデータは次元削減によって可視化されるが、次元削減はデータの欠落やブラックボックス化を伴う。そこで、高次元データをより直接的かつ直感的に提示し観察するためのシステムに関する研究が盛んに進められている。

高次元データを直接提示する標準的な方法が、幾何学的投影による可視化である。3次元空間の情報を2次元の写真や映像に投影するメカニズムを高次元に適用することで、高次元データを、その幾何学的特徴を維持したまま3次元や2次元の映像として可視化できる。こうした投影図に幾何学的回転を加え様々な方向から観察することで、観察者は高次元データの幾何学的特徴を把握することができる。

幾何学的投影による可視化が抱える課題の一つは、投影図を理解することの困難さである。高次元データに幾何学的回転が加わると、投影図は幾何学的投影が定める法則に従って、自然現象や他の可視化手法には見られない変形を見せる。こうした映像をユーザに理解させるために、これまでインタラクティブなインタフェース構築やVR技術の活用といったアプローチが試みられてきた。

本研究では、ユーザが高次元空間に定義されたデータ構造との接触を力覚によって知覚でき

るマルチモーダルインタラクションシステムを構築し、システムを用いた実験によって人の高次元空間認知能力を検証することを目的とする。人は3次元の物体に対して、触れたり掴んだりして物体の輪郭をなぞり、反力を力覚で知覚することで物体の形状を把握している。そこで本システムでは、左右の手に一つの4次元座標を制御させることで4次元の力覚フィードバックを実現し、4次元データに手で触れるかのようなインタラクションによって4次元形状を知覚することを可能にする。本研究の活用によって、高次元データを扱う様々な分野における研究の加速が期待される。

## [研究の内容、成果]

## 1. システム概要

本システムの構成を図1に示す。ユーザはHMD (Meta Quest 2) を被り両手にハプティックインタフェース (Phantom Omni) のスタイルスを握って3次元VR空間に没入する。システムは4次元空間  $(x, y, z, w)$  をシミュレートし、

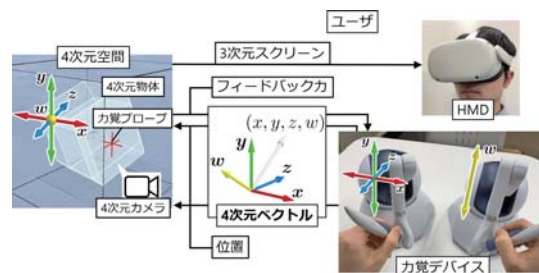


図1 システム構成

$w$  軸に沿った 3 次元空間  $(x, y, z)$  への投影によって 4 次元空間を 3 次元スクリーンに描画する。ユーザが 4 次元空間の 3 次元投影を観察しながら左手のスタイラスを動かすと、4 次元空間内の力覚プローブが追従して 4 次元空間の  $(x, y, z)$  部分空間を移動する。更に、ユーザが右手のスタイラスを上下に動かすと、プローブは投影によって隠れた  $w$  軸方向へ移動する。プローブと 4 次元オブジェクトとの接触によって生じる 4 次元フィードバック力  $(x, y, z, w)$  は、 $x, y, z$  成分と  $w$  成分に分解されそれぞれ左右のスタイラスに反映される。このようにして、ユーザは両手のスタイラスによって 4 次元プローブを制御する。

## 2. 4 次元空間の表現と可視化

まず、4 次元空間をシミュレートし描画する方法について述べる。4 次元座標は、3 次元空間を 2 次元空間に投影する標準的な透視投影の手法とほとんど同じやり方で 3 次元座標に変換できる。4 次元空間に設定する視点座標系  $x_e y_e z_e w_e$  において視点  $p_r$  から注視点  $p_a$  の方向、距離  $h$  の位置に 3 次元スクリーン座標系  $x_s y_s z_s w_s$  を定義すると、式 (1) により 4 次元ワールド座標系のデータ  $(x_w, y_w, z_w, w_w)$  を 3 次元スクリーン座標系のデータに変換することができる。

$$\begin{aligned} V_s &= [X_s \ Y_s \ Z_s \ W_s \ v_s] \\ &= [x_w \ y_w \ z_w \ w_w \ 1] T_v(p_f, p_a) T_p(k, h, f) \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、 $X_s = x_s v_s$ ,  $Y_s = y_s v_s$ ,  $Z_s = z_s v_s$ ,  $W_s = w_s v_s$ ,  $-1 \leq x_s, y_s, z_s \leq 1, 0 \leq w_s \leq 1$  であり、 $T_v$  は 4 次元視野変換行列、 $T_p$  は 4 次元透視変換行列である。

可視化対象となる高次元データの形式として、本システムでは 4 次元凸多胞体を扱う。多胞体は、2 次元の多角形、3 次元の多面体を任意の次元に一般化した概念である。図 2 に、それぞれの次元における多胞体の例を示す。可視化に



図2 多胞体の例

おいては、多胞体の各頂点を投影によって 3 次元空間座標に変換し、頂点情報から多胞体の辺及び面を描画する。

## 3. 力覚フィードバック提示

次に、触覚プローブを介した力覚フィードバックを伴う 4 次元物体との接触インタラクション手法について述べる。触覚プローブの制御に用いる 4 次元座標は、2 本のスタイラスの座標  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$  を統合した座標  $(x_1, y_1, z_1, y_2)$  として得られる。接触インタラクションによって生成される 4 次元フィードバック力ベクトル  $(x, y, z, w)$  は、逆変換によって 2 本のスタイラスの反力  $(x, y, z)$ ,  $(0, w, 0)$  に反映される。接触インタラクションの制御アルゴリズムは、従来の 3 次元インタラクションによる手法を任意の次元に拡張し、4 次元インタラクションに適用したものである。

### 3.1. 概要

ユーザの触覚インタフェースによって制御される入力座標は、4 次元空間内の仮想カーソルの座標に反映され、これらの座標は触覚プローブによって追跡される。カーソルの座標を  $p_c$ 、プローブの座標を  $p_p$  とする。カーソルが 4 次元空間内の多胞体の表面を通過しようとする時、プローブの挙動は多胞体表面に拘束され、フィードバック力が  $p_c - p_p$  として計算され、触覚インタフェースに提示される。

### 3.2. 点と多胞体の衝突検出

多胞体の胞集合を  $F$  とし、各胞  $f \in F$  に対応する法線と閾値をそれぞれ  $n_f$ ,  $t_f$  とする。ここで、法線は多胞体の外側を向いている。空間内の任意の点  $x$  について、点  $x$  が胞  $f$  と同じ側に



ある場合,

$$d_f(x) = n_f \cdot x - t_f \quad (2)$$

は負となる。したがって、最大値

$$d(x) = \max_{f \in F} d_f(x) \quad (3)$$

は、点 $x$ が多胞体の内側にある場合のみ負となる。図3に2次元空間において点 $x$ と三角形 $(n_1, t_1), (n_2, t_2), (n_3, t_3)$ の位置関係を、外側にある場合と内側にある場合計算する例を示す。 $O$ は空間の原点で、 $d_1 = d_1(x), d_2 = d_2(x), d_3 = d_3(x)$ である。

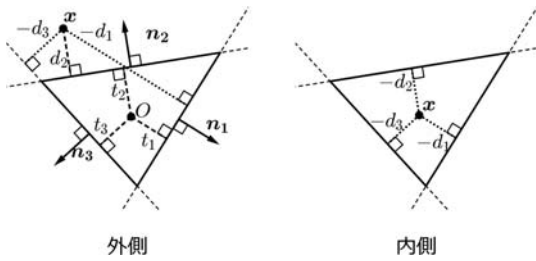


図3 点と多胞体の衝突検出

### 3.3. 線分と多胞体の衝突検出

胞 $f$ と、 $d(x) < 0 \wedge d(y) > 0$ となる2点 $x, y$ に対して、胞 $f$ を含む超平面が $x$ と $y$ を結ぶ線分と交差するとき、

$$s_f(x, y) = \frac{d_f(x)}{d_f(x) - d_f(y)} \quad (4)$$

は $0 < s_f(x, y) < 1$ を満たす。このとき、線分と超平面の交点は、

$$m(x, y, s_f) = s_f x + (1 - s_f)y \quad (5)$$

で与えられる。

線分全体が多胞体の外側にあるのは、ある胞 $f$ が存在し、 $d_f(x) > 0 \wedge d_f(y) > 0$ を満たす場合である。そうでない場合、

$$H(x, y) = \{f \in F | d(x) < 0 \wedge d(y) > 0\} \quad (6)$$

とし、

$$l = \begin{cases} \max_{f \in H(y, x)} s_f(x, y), & \text{if } H(y, x) \neq \emptyset \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$r = \begin{cases} \min_{f \in H(x, y)} s_f(x, y), & \text{if } H(x, y) \neq \emptyset \\ 1, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

とすると、 $l = m(x, y, l)$ と $r = m(x, y, r)$ を結ぶ線分は、 $l < r$ ならば多胞体と交差する。

図4に、4つの異なる位置関係のパターンを示す。

$l > r$ の場合、線分全体が多胞体の外側に位置する(ア)。 $l < r$ の場合、線分の一部が多胞体と交差しする(イ)。 $y$ が多胞体の内側にある場合、 $r = 1$ であり、このとき $r$ と $y$ は一致する(ウ)。 $x$ と $y$ が両方とも多胞体の内側にあるとき、 $l = 0$ かつ $r = 1$ であり、線分全体が多胞体の内側に位置する(エ)。

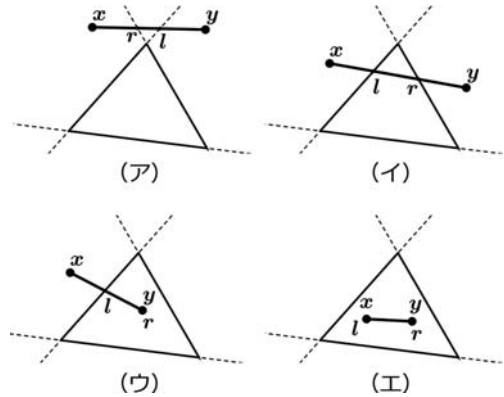


図4 線分と多胞体の衝突検出

### 3.4. 拘束の解決

毎フレーム、ごとにプローブとカーソルを結ぶ線分と多胞体との間で衝突検出が行われる。衝突が発生した場合、プローブの新たな座標は衝突した胞のすぐ外側に設定される。衝突が発生しない場合は、カーソルの座標がプローブの新たな座標となる。衝突した胞の法線および閾値をそれぞれ $n, t$ とすると、更新座標 $p'_p$ は

$$p'_p = p_c - (n \cdot x - t + \epsilon) \cdot n \quad (7)$$

で得られる。

図5に、カーソルの移動によってプローブの

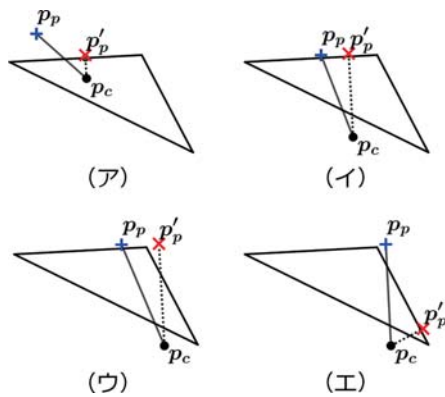


図5 拘束の解決

挙動が変化する一連の例を示す。(ア) カーソルが多胞体に入ると、プローブが胞に拘束され、フィードバック力が発生する。(イ) プローブが胞を離れない限り、フィードバック力は維持される。(ウ) プローブが胞から離れると、フィードバック力は変化する(エ)。

#### 4. 評価

力覚フィードバックが物体の形状を適切に表現できるか、評価実験を通して検証する。

##### 4.1. 手順

4次元空間やシステムに関する事前知識のない、21歳から24歳までの理系大学生10名の男性が本実験に参加した。被験者は4次元空間とシステムについて説明を受けた後、システムを用いて30分間、図6に示す6種類の正多胞体とのインタラクションを行い、それぞれの形状を把握した。この後、被験者はHMDを外し、

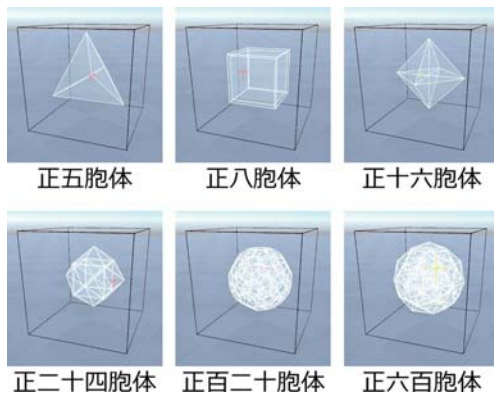


図6 6種類の正多胞体

視覚情報のない状態で、ランダムな姿勢で提示された多胞体とインタラクションし、その種類を識別した。提示は各被験者に対し30回ずつ行われ、6種類の多胞体がそれぞれ5回ずつ提示された。

##### 4.2. 結果

各多胞体との接触によって生じるフィードバック力は力覚デバイスに正確に反映され、被験者は4次元多胞体との接触インタラクションを体験することができた。図7に実験結果を示す。すべての多胞体について、平均正解率は7割を超え、ランダムな確率を大きく上回った。

| 提示した多胞体 |      |      |       |        |        |       | 正答率 |
|---------|------|------|-------|--------|--------|-------|-----|
|         | 正五胞体 | 正八胞体 | 正十六胞体 | 正二十四胞体 | 正百二十胞体 | 正六百胞体 |     |
|         | 45   | 2    | 3     | 0      | 0      | 0     | 90% |
|         | 2    | 39   | 6     | 3      | 0      | 0     | 78% |
|         | 4    | 7    | 37    | 2      | 0      | 0     | 74% |
|         | 0    | 2    | 4     | 43     | 1      | 0     | 86% |
| 被験者の回答  | 0    | 0    | 0     | 0      | 38     | 12    | 76% |
|         | 0    | 0    | 0     | 0      | 14     | 36    | 72% |

図7 実験結果

正八胞体と正十六胞体の組と、正百二十胞体と正六百胞体の組については、互いに間違っ逆を答える回答が多かった。これらの組はそれぞれ双対の関係にあり、形状の複雑度が似通っており、それが混同の原因と考えられる。

被験者間では成績にある程度差異が見られた。10名中3名が全問正解だった一方、最も成績の低い被験者の正解率は53.3%であった。こうした差異は、類似の実験と同様、4次元空間に対する理解度の違いが影響する他、各被験者の触覚情報の感受性の違いなども関係すると考えられる。一方、全員がランダム以上の正解率を達成していた。

実験後のインタビューによれば、多くの被験者は、デバイスを操作して触れている胞が別の

ものに移ったときに感じるフィードバック力の方向の変化に注目し、その頻度から大まかな形状を判定していた。

また、被験者は、フィードバック力の方向が1点を指す箇所を多胞体の頂点と判断して、頂点の配置や数を調べた。ほとんどの被験者は、練習でもタスク中でも、正五胞体にある5つの頂点を確認できたと答えた。一部の被験者は正十六胞体の8つの頂点を確認したと答えたが、正八胞体やそれより複雑なオブジェクトの頂点を確認できたと答えた被験者はいなかった。

体験全体の感想について、実際にオブジェクトに触れている感覚があったかという質問には被験者の全員が肯定的な回答をした。一方、4次元空間の物体に触れていると感じたかについては、10名中2名が肯定的な回答をした。否定的な回答をした被験者の一部は、単に右手を動かすことで左手に力が加わるシステムと捉えていた。

#### 4.3. 考察

実験結果の高い正解率は、被験者が接触インタラクションを通して4次元多胞体の形状を正しく認識できたことを示唆している。特に、一部の被験者が面や辺を辿ったと答えたことは重要である。辺や面はランダム回転によって $xyz$ 空間にも $w$ 軸上にもない斜め方向を向いているため、それらを辿るには左右の手でフィードバック力を感じながら力覚デバイスを同時に動かす必要がある。こうした操作を被験者がおこなったことは、彼らが4次元空間の探索を正しく身に付けることができたことを示唆している。こうした事実から、提案システムは4次元空間のオブジェクトとのハプティックインタラクションを想定通り実現していると結論付けられる。

一方で、正八胞体のような明確な構造を持つオブジェクトについても、タスクのランダムに回転されていた環境ではその全ての頂点を辿ることのできた被験者はいなかった。また、多胞体の胞の構造に関するコメントは被験者から挙

がらなかった。正多胞体は正多面体型の胞によって構成されており、正四面体以外の胞は対応する正多胞体を特定できる。一方で、胞は3次元構造をとるため、4次元空間をプローブの1点で探索しながらその構造を把握することは難しかったと考えられる。これらの限界の改善には、力覚デバイスの提示精度向上や接触点の増加が効果的と考えられる。

#### 5. 結論

本研究では、力覚提示を用いて接触感覚を表現する4次元空間マルチモーダルインタラクションシステムを構築した。本システムでは、2台の力覚フィードバックデバイスと、高次元に拡張した衝突判定アルゴリズムによって、高次元物体との力フィードバックを伴う接触インタラクションを実現した。

評価実験では、短い実験時間にもかかわらず4次元物体との接触感覚を感じたという回答が見られ、本システムが人の4次元空間認知能力獲得に貢献する可能性が示唆された。一方、獲得された認知能力の形態に関するより詳細な分析には至らなかった。今後の研究では、システムの力覚提示精度を向上させるとともに、より多様な手法で4次元空間を表現するシステムを構築することで、人の高次元空間認知能力をより詳細に調査することを目指す。

#### [成果の発表, 論文など]

- [1] H. Igarashi and H. Sawada, "4D Exploring System for Intuitive Understanding of 4D Space by Extending Familiar 3D Interfaces," Proc. of International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Eurographics Symposium on Virtual Environments, pp. 115-119, 2023.
- [2] 五十嵐治雄, 澤田秀之: 力覚による接触感覚提示を伴う4次元空間インタラクションシステムの構築, 情報処理学会 第86回全国大会, Vol. 4, pp. 5-6, 2024.
- [3] Haruo Igarashi, Daiki Kido, Yutaka Ishii, Yasuhiro Niwa, Atsushi Okamoto, and Masao Kimura. Visualization of four-dimensional X-ray ab-

sorption fine structure data using a virtual reality  
system. Journal of Synchrotron Radiation, Vol. 32,

No. 1, pp. 162-170, Jan 2025.



## [研究助成 (C)]

## 身体動作と感情の再現を目指すヒューマノイドロボットの開発

2227002



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

電気通信大学 大学院  
情報理工学研究科  
電気通信大学 大学院  
情報理工学研究科

博士後期課程  
教授

WANG YIWEI  
姜 銀 来

## [研究の目的]

本研究の目的は、人間らしい身体動作と感情表現の再現を目指し、ヒューマノイドロボットにおける体幹の動作表現に適した機構を設計・構築することである。体幹は、日常的な動作における姿勢制御や動作の滑らかさに寄与するだけでなく、前屈・後屈・側屈・ねじれといった豊かな動きにより、人間の感情や意図を視覚的に伝達する重要な部位である。にもかかわらず、従来のヒューマノイドロボットでは、四肢の動作に比べて体幹の表現力は限定的であり、その構造や設計には十分な検討の余地がある。

本研究では、ロボットの体幹を単なる関節の連結としてではなく、「身体表現の中心としての構造」として捉え、人間の体幹が持つ柔軟性・可動性・連続性に着目した機構の設計を行う。特に、感情や内面的状態を反映するような姿勢変化を再現可能とするために、従来の剛体的な関節構成に加え、柔軟構造やワイヤ駆動、干渉駆動、重力補償の導入も検討する。

具体的な研究項目としては、

- (1) 人間の体幹動作における構造的特徴の分析  
(関節配置、可動範囲、動作の滑らかさなど)、
- (2) これらの特徴を模倣するためのロボット体幹の機構構成および可動部の設計、
- (3) 開発したロボット体幹の性能評価および上半身動作の確認、

の3点を柱とし、人間らしい動作表現を可能に

する体幹の機構設計手法の確立を目指す。

本研究を通じて、ロボットにおける体幹動作の表現力を向上させ、将来的には人間との自然な非言語的コミュニケーションを支える身体的基盤技術の構築に貢献することを目的とする。

## [研究の内容、成果]

## 1. 人間の体幹動作における構造的特徴の分析

## 1.1. モデル解析に基づく脊椎関節の最適分割数

ヒューマノイドロボットの脊椎モデル設計において、関節の分割数が曲線の滑らかさおよび形状の一貫性に与える影響を分析し、最適な分割数の選定を目的とした。

脊椎構造の全長を 450 mm とし、これを 1～10 分割してモデル化した(図1)。各分割は等長・等角で回転し、全体の回転角度は 90° に統一した。各モデルにおける隣接する曲線間の類

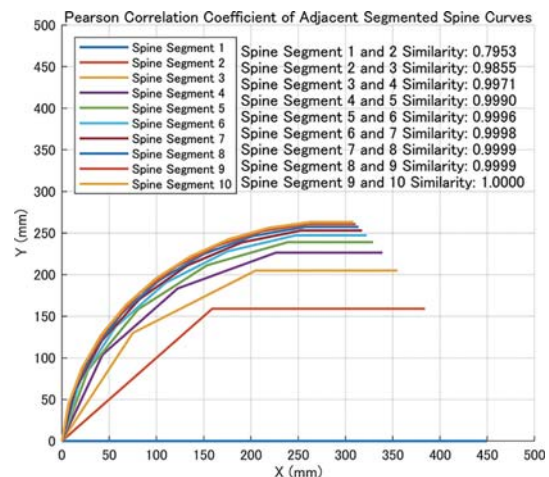


図1 隣接する脊椎セグメント間のピアソン相関係数

似度については、Pearson の相関係数を用いて定量的に評価を行った。

その結果、分割数が増加するほど曲線の滑らかさと一貫性が向上し、特に分割数が3以上では相関係数が0.99を超え、自然な曲線形状の再現が可能であることが確認された。さらに、分割数が8以上では相関係数が0.9999を超え、非常に高い精度が得られた一方で、それ以降の改善はごくわずかであった。

以上より、動作性能と構造の複雑性とのバランスを考慮すると、脊椎関節の分割数は3～7の範囲が最適であると判断される。

### 1.2. 体幹の自由度・可動域の設計

人間の体幹姿勢を参考に、ロボット体幹はPitch, Roll, Yawの3自由度で設計した。それぞれ、Pitchは屈曲・伸展、Rollは側屈、Yawは回旋動作に対応する。特にPitch方向については、脊椎関節の最適分割数に関する分析結果に基づき、3分割構造を採用したことで、自然な動作表現と構造・制御の単純化の両立が可能となり、さらに重力補償機構の適用にも適していることが確認された。本設計の概要を図2に示す。

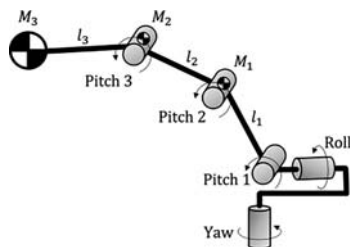


図2 ロボット体幹の自由度設計

可動域は構造と干渉の関係から制限されるため、人間に近い動作を実現しつつ、コンパクトな設計となるよう設定した。本研究では、Pitch方向は $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ （各関節は $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ）、Roll方向は $-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 、Yaw方向は $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ とした。この構成により、体幹の柔軟性と自然な動作表現を両立している。

## 2. ロボット体幹の機構構成および可動部の設計

### 2.1. 全体設計

図3に開発したロボット体幹の構造を示す。体幹は3つのPitch自由度、1つのRoll自由度、1つのYaw自由度を持ち、Pitch 1, Roll, Yawの回転軸は1点で交差する。寸法は $320 \times 188 \times 650.5$  mm（長さ×幅×高さ）、Pitch 1～3リンクはいずれも長さ150 mmで、可動部全体の長さは450 mmである。

本体幹は、3モータによるワイヤ干渉駆動機構、3リンクの連結機構、バネ・ワイヤー・プーリーによる重力補償機構の3要素で構成される。干渉駆動機構はPitch 1, Roll, Yawを相互に干渉させて駆動し、連結機構はPitch 1～3の動作をワイヤで連動させる。

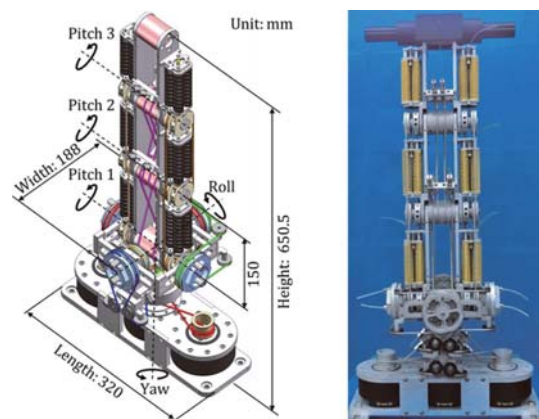


図3 ロボット体幹の全体設計

### 2.2. 3モータ3自由度ワイヤ干渉駆動機構

図4に示すように、設計した3モータ3自由度ワイヤ干渉駆動システムをロボット体幹に実装した。3つのモータはすべて基部に固定され、モータ3はYaw関節と同軸、モータ1・2はその両側に配置している。

モータプーリーと関節プーリーは、中間プーリーとワイヤを用いて接続されており、一部のプーリー径は25 mm、残りは50 mmである。中間プーリーには直径17 mmのステンレスベアリングを用い、ワイヤにはSUS304製のナイロン被覆付きステンレスワイヤ（線径2.0 mm、引張強度2840 N）を使用し、サーキュラースリーブで固

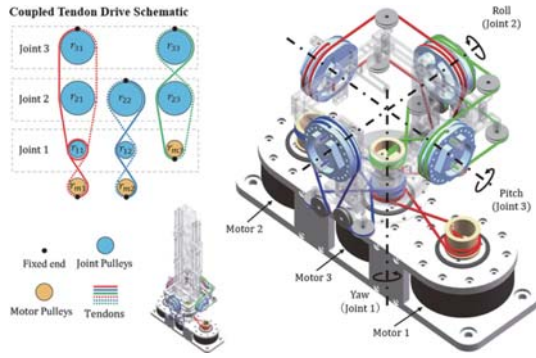


図4 3モータ3自由度ワイヤ干渉駆動構成

定した。モータはRMD-X8 Proを採用し、構造部品はアルミニウム合金7075製である。

### 2.3. 3リンク連結機構

ロボット体幹の動作をより人間に近づけるため、Pitch方向を3自由度（Pitch 1～3）に分割した。しかし、自由度の増加に伴い、モータ数の増加や構造の複雑化が課題となる。

そこで、人間の脊椎のように各関節が連動して動作する仕組みに着目し、3つのPitch関節をワイヤとプーリで連結する3リンク連結機構を設計した（図5）。この機構では、Pitch 1の回転がPitch 2, Pitch 3へと伝達され、3つの関節が同時に等角で回転するよう構成している。

プーリ半径はすべて同一とし、機構は体幹中央部に配置した。ワイヤ固定にはサーキュラースリーブPT-75-3を使用し、張力調整のために中空ボルトによる調整機構を組み込んでいる。

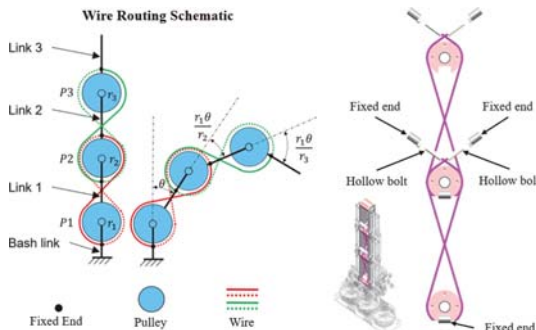


図5 3リンク連結機構の構成

## 2.4. バネ・ワイヤ・プーリー系重力補償機構

### 2.4.1. 新たな重力補償機構の提案

一般的な重力補償機構は、関節の回転をバネに伝達し、バネの反力によって重力を打ち消す構造を持つ。本研究では、ワイヤ、プーリ、バネを組み合わせた新たな重力補償機構を提案し、n-link-1-DOF（Pitch）ロボットだけでなく、n-link-2-DOF（Pitch-Roll）平行型ロボットにも適用可能であり、理論上は完全な重力補償が実現できることを示した（図6参照）。

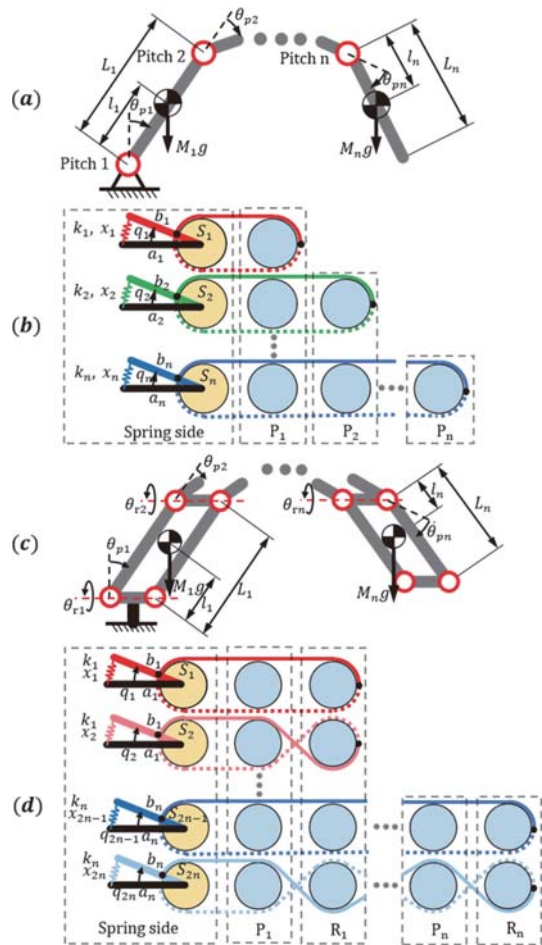


図6 (a) n-link-1-DOF ロボットシステム、と (b) その重力補償機構のワイヤ配線図；(c) n-link-2-DOF 平行型ロボットシステム、と (d) その重力補償機構のワイヤ配線図

この機構では、関節とバネをワイヤとプーリで特定のルーティング形式で連結し、関節の回転角とバネの変位との間に一定の関係を持たせることで、安定した補償動作を可能にしている。



$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{p1} \\ \theta_{p1} + \theta_{p2} \\ \vdots \\ \theta_{p1} + \dots + \theta_{pn} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_{2n-1} \\ q_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{p1} + \theta_{r1} \\ \theta_{p1} - \theta_{r1} \\ \vdots \\ \theta_{p1} + \theta_{r1} + \dots + \theta_{pn} + \theta_{rn} \\ \theta_{p1} - \theta_{r1} + \dots + \theta_{pn} - \theta_{rn} \end{bmatrix}$$

関節が異なる回転角にあるとき、ロボットシステムの総位置エネルギーが一定であれば、ロボットシステムの重力は完全に補償されていると考えられる。

$$V_T = V_g + V_k = \sum_{i=1}^n M_i g h_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i x_i^2 = \text{const.}$$

以上、ロボットシステムが完全に静的平衡を達成するために、全てのバネのバネ定数が算出できる。

#### 2.4.2. 重力補償機構のロボット体幹への適用

提案した重力補償モデルに基づき、図7に示すようなロボット体幹用の重力補償機構を設計した。本機構は、1つの Roll 自由度と3つの Pitch 自由度に対して同時に重力補償が可能である。補償バネは体幹方向に沿って左右対称に配置されており、重心位置の最適化とバランス性能の向上に寄与している。

ワイヤは Roll 関節から中間プーリを介して Pitch 方向に伝達され、各 Pitch 関節と連動するようにルーティングされている。バネ側では、ワイヤを複数のプーリに巻き付けて末端に固定し、中空ボルトによる張力調整機構を備えている。

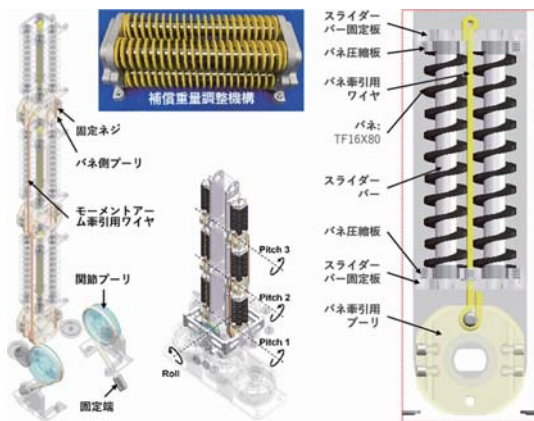


図7 重力補償機構の構成

また、バネモジュールはスライドバー付きの圧縮機構で構成され、バネの動作を軸方向に制限することで、安定したエネルギー伝達を実現している。バネの本数は動作条件に応じて調整可能であり、負荷に応じた柔軟な補償力の設定が可能である。

### 2.5. 性能評価および上半身動作の確認

#### 2.5.1. 重力補償率

ロボット体幹の重力補償性能を評価するため、外部トルクを直接測定し補償率を算出する手法を採用した。図8に示す実験装置では、Pitch 軸を中心とした半径 150 mm のガイドプーリを 3D プリンタで作製し、ワイヤの作用点を一定に保つことで正確なトルク計測を可能とした。駆動ワイヤはガイドプーリから中間プーリを経由して、引張圧縮試験機 (SVZ-200NB-100R3) に接続されており、体幹の動作中に張力をリアルタイムで測定できる構成とした。

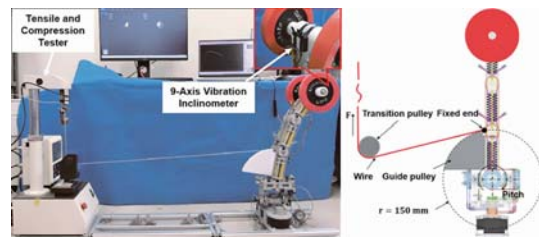


図8 重力補償測定実験の実験様子

実験では 5 kg の荷重を用い、Pitch 方向 ( $90^\circ \rightarrow 0^\circ$ ) および Roll 方向 ( $25^\circ \rightarrow 0^\circ$ ) の動作に対して、3つの条件 (① 補償なし, ② 重力補償のみ, ③ 重力補償+重量調整) で張力を測定した。得られた張力  $F$  とプーリ半径  $r$  を用いて関節トルク  $\tau = F \cdot r$  を算出し、補償率  $\sigma = ((\tau_0 - \tau_c) / \tau_0) \cdot 100\%$  で評価した。ここで、 $\tau_0$  は補償機構なしのトルク、 $\tau_c$  は補償機構ありのトルクである。

図9に示す通り、Pitch および Roll 関節のどちらにおいても、重力補償機構を動作させることで関節トルクが大幅に減少し、補償効果が確認された。さらに重量調整機構を併用することでトルクはさらに低減したが、摩擦の影響によ



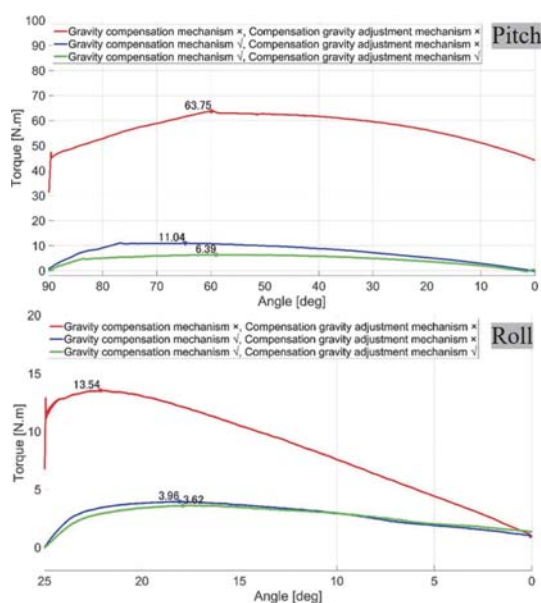


図9 重力補償率測定実験の実験結果

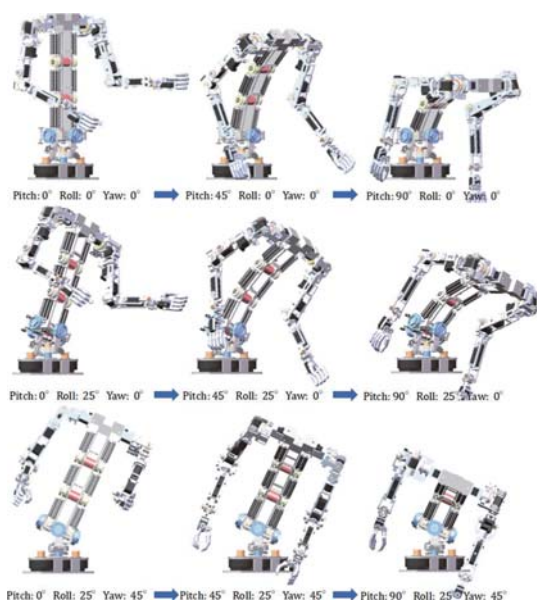


図10 体幹の姿勢変化における動作確認

りゼロには至らなかった。

補償率は、補償機構のみ動作時で Pitch 関節 82.7%, Roll 関節 70.8%, 重量調整併用時には全関節のトルクが 7 Nm 以下に抑えられ、特に Pitch 関節では 90.0% の補償率を達成した。

### 2.5.2. 上半身動作確認

図 10 に、SolidWorks 上で実施したロボット上半身の動作シミュレーション結果を示す。体幹は Pitch, Roll, Yaw の 3 自由度を有し、それぞれの関節に対して段階的に角度を変化させ

ることで、全 9 パターンの姿勢を再現している。

各自由度は目標角度に対して正確に追従しており、連続的な動作も滑らかに実現されていることが確認できた。本結果から、提案した多自由度体幹構造がシミュレーション上において正常に機能していることが示された。

### [今後の研究の方向、課題]

本研究では、ロボット体幹の多自由度構造と重力補償機構の有効性をシミュレーション上で確認した。今後は実機への動作実験を通じて、摩擦やワイヤのたるみなど、実環境での影響を評価する必要がある。

また、補償機構の他部位との連携動作の検討に加え、人との協調動作を見据えた自然な動作設計や印象評価も今後の課題である。

### [成果の発表、論文など]

- [1] **Wang Yiwei**, 李文揚, 東郷俊太, 横井浩史, 姜銀来: 3M3D ワイヤ干渉駆動に基づくヒューマノイド腰関節の開発, 日本ロボット学会誌, 42 巻 1 号, pp. 78-81, 2024.
- [2] **Wang Yiwei**, 東郷俊太, 横井浩史, 姜銀来: 汎用性の高いバネ・ワイヤー・プーリー系重力補償機構の提案, 第 42 回 日本ロボット学会学術講演会, 2024.

## [研究助成 (C)]

## 不確実複雑システムの見通しを向上させる設計モデルの構築

2227003



研究代表者

大阪大学 大学院工学研究科  
機械工学専攻 石川・南研究室 博士後期課程

萩 尾 優 吾

## [研究の目的]

制御工学の究極の目標は、さまざまなシステムのふるまいを自在に操ることである。システムを操るための手法はさまざまなものが存在するが、制御対象の数理モデルに基づく制御系設計は其中で最も用いられる手法の一つである。モデルベースの制御系設計では、制御対象のダイナミクスを数理モデルとして理解し、そのモデル情報を利用して制御器を設計することで、制御性能を達成することが可能である。

一般に、制御対象のダイナミクスを正確に理解して利用するために、さまざまな制御対象のふるまいを再現する詳細なモデルを構築することになる。しかし、制御系設計において重要なのは、制御対象のダイナミクスの再現ではなく、制御対象の制御なので、必ずしも詳細なモデルが必要でない場合も存在する。例えば、非線形な制御対象の平衡点周りの制御においては、平衡点周りの線形近似モデルで十分に制御でき、詳細な非線形モデルは必要ない。また、制御器設計のコストや計算時間が制約されている場合には、詳細なモデルを用いることができないことが多い。くわえて、詳細なモデルを構築できたとしても、そのモデルを制御系設計に用いることが難しい場合もある。例えば、ニューラルネットワーク (Neural Network: NN) モデルは高い表現能力を持つが、制御に必要な周波数特性や逆モデルの取得が困難である。

以上より、制御系設計においては常に詳細な

モデルが必要ではなく、制御目的や制御仕様に応じてモデル構築を工夫する必要がある。そこで、本研究では、「制御にとって必要十分なモデル構築とは何か」という問いに答えることを目的とする。すなわち、単に制御対象のダイナミクスを再現するのではなく、制御目的や制御仕様といった制御系の設計意図をモデルに反映させて、制御にとって都合の良いモデルを構築する手法を探る。この目的のため、本研究では、まず問題の定式化を行い、制御系設計問題をモデル探索問題に置き換えるという手法を提案する。そして、具体例として、動的量子化器の設計問題や、画像およびグラフ信号処理システムにおける量子化プロセスの設計に取り組み、提案手法の有用性を検証する。

## [研究の内容、成果]

前節で述べた通り、本研究では、制御系設計問題をモデル探索問題として捉え、設計意図をモデルに反映させることを目指す。この背景に基づき、本研究では、制御系設計のためのモデルチューニング手法を、モデルの最適化問題として取り扱う。具体的に本提案手法では、制御器設計の手順を固定し、制御器設計問題をモデル探索問題へと変換する。設計手順を固定することは、制御器を特定のモデルによって特徴付けることを意味する。本論文では、この制御器を特徴付けるモデルを「設計モデル」と定義し、設計仕様を満たす設計モデルを探索することで

制御器を設計する。すなわち、制御器設計問題を設計モデルの探索問題として定式化する。本手法において、制御器の設計手順は数学的に「モデルから制御器への写像」として表現される。この写像が与えられることで、探索対象は制御器空間ではなくモデル空間となり、モデルが決定されると制御器は自動的に設計される。

設計意図を反映したモデルを構築するシステム設計手法の先行研究の一つとして、北森によるPID制御器のモデルマッチング法が存在する。モデルマッチング法では、まず閉ループシステムモデルのパラメータから制御器のパラメータを決定するための変換式を導出する。次に、設計仕様を満たす閉ループシステムの参照モデルを設定し、制御特性を得る。このように、モデルマッチング法は、制御器の設計手順を課すことで、制御器探索問題をモデル探索問題へと変換する。

モデルマッチング法以外にも、制御器の設計手順に基づくモデルチューニング手法を用いた制御系設計に関する研究が存在する。例えば、Shikadaらはポリトープ型の不確かさを持つシステムに対するオブザーバ付きのロバストな状態フィードバック制御器の設計問題を扱い、モデルとその線形変換を最適化することで、従来のノミナルモデルよりも優れた性能を得られることを示した。また、Okajimaはポリトープ型の不確かさを持つシステムに対するモデル誤差抑制補償器の設計において、最尤推定モデルが必ずしもノミナルモデルとして適切ではないことを確認した。さらに、WadaとTsurushimaは、モデル予測制御によるサーボシステム設計において、目標信号への追従を達成するためにモデルへ積分器を追加する手法を提案した。MinamiとKashimaは、非最小位相系に対する量子化器の設計を行い、部分モデルを用いた動的量子化器のフィルタ設計により出力の発散を防ぐことができることを示した。この部分モデルは、制御対象を不安定零点と最小位相系に直列分解したときの最小位相系に当たる

モデルである。さらに、KusuiらはMinamiとKashimaの研究を拡張し、MIMOの非最小位相系に対する動的量子化器設計法を提案した。

これらの研究では、制御対象の特性を忠実に再現するモデルを用いるのではなく、制御器や量子化器の設計に合わせたモデル構築を行っている。本研究はこれらの研究を一般化したアプローチを採用する。このアプローチは、モデルベースではあるものの、従来のように、制御対象のダイナミクスの再現を目指した手法ではない。また、実際のモデルの構築では、データを用いた最適化問題としてモデルを探索するが、従来の直接制御器を決定するデータドリブンな手法とも異なる。したがって、提案手法は従来のモデルベースの手法とも、データから直接制御器を決定する手法とも異なり、モデルベースな手法とデータドリブンな手法の中間に位置する点に特徴がある。

本研究では、これまでの研究をより一般化した問題設定として再定義し、モデルチューニングに基づくシステム設計手法を提案する。本手法では、対象とする制御対象および制御器の設計手順が与えられた場合に、設計意図を反映した設計モデルを探索する問題として定式化する。ここで、設計モデルは必ずしも制御対象のふるまいを忠実に再現する必要はなく、制御系設計に必要な特性を有するモデルとしてチューニングによって得られる。

従来のモデルベース設計では、この問題を解決するため、まずモデルを構築し、その後に制御器を設計するという手順が取られた、モデル自体は、システム設計に必要な情報として既知であり、システム設計において重要なのは制御器設計であった。すなわち、モデルベース設計では、モデルが与えられた後に制御器設計方法を見つけるという手順になる。

一方で、本研究では、モデルチューニングに基づくシステム設計手法を提案する。この提案手法では、制御器の設計手順が与えられ、その上で設計モデルを見つけることを目的としてい

る、ここで注目すべき点は、制御器のパラメータがモデルのチューニングによって変化しなければならないということである。したがって、実際には、制御器設計の手順、すなわちモデルから制御器への写像が与えられている。この提案手法においては、モデルから制御器への写像が与えられるため、探索空間は制御器空間ではなくモデル空間となり、モデルが構築されれば制御器は自動的に設計される。

次に、制御器設計手順を固定する方法について説明する。1つの方法は、基本的な制御システム設計問題の解析結果を用いることである。例えば、制御理論においては、極配置やLQR制御などの解析的に最適な制御器が導出される場合がある。解析的に導出された方程式を設計手順として固定し、その方程式に与えられたモデルをチューニングすることができる。言い換えれば、制御器設計手順を設計者の知識として用い、モデルを探索するアプローチである。

提案されたモデル探索手法に加えて、システムのパラメータを直接探索する方法も存在する。しかし、モデル探索は制御器の構造を知識として利用するため、より効率的に有効な解を見つけることが可能であると考えられる。さらに、直接探索とは異なり、モデル探索はシステムの構造を知識として利用し、制御システムの設計モデルを得るため、システム設計における説明可能性が高いと考えられる。

以上の位置付けに基づき、本研究の一般的な問題の定式化について述べる。ここで、図1に示すように、システム $\Sigma_1$ および $\Sigma_2$ を考える。

システム $\Sigma_1$ は制御対象のシステムであり、システム $\Sigma_2$ は制御器や量子化器などの設計対象と

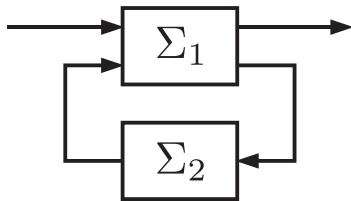


図1 提案手法の問題の定式化における一般的なブロック線図

なるシステムである。その他のパラメータは以下のように定義する。チューニングする設計モデルを $P$ 、モデルからシステムへの写像を $\mathcal{M}: P \mapsto \Sigma_2$ 、データなどのハイパーパラメータを $\theta$ 、評価関数を $J$ とする。本研究の提案手法では、システム設計手順 $\mathcal{M}$ を固定し、ある評価指標 $J$ に基づいて設計モデル $P$ を探索し、システム $\Sigma_2$ を構築する。まとめると、評価関数 $J$ に基づいてモデル $P$ を調整することで、最適なモデル $P^*$ を取得し、システム $\Sigma_2$ を設計することを目的とする。この関係は以下のように表される。

$$P^* = \underset{P}{\operatorname{argmin}} J(\mathcal{M}(P); \Sigma_1, \theta)$$

つぎに、提案手法を具体的な問題に適用した際の問題の定式化について述べる。本研究では4つのシステムに提案手法を適用し、それぞれの場合のブロック線図は図2に示している。

まず制御系設計の例題として、提案手法を連続時間システムのための離散時間量子化器の設計に適用した(図2(a), (b))。ここで、サブシステム $\Sigma_1$ は連続時間システム $G$ 、ホルダ $H$ 、およびサンプラから構成され、サブシステム $\Sigma_2$ は量子化器 $Q$ である。写像 $\mathcal{M}$ は動的量子化器の設計手順を表し、ゼロ次ホールドおよび離散時間システムの最適動的量子化器の設計式から構成される。提案手法では、設計手順 $\mathcal{M}$ を固定し、連続時間設計モデル $P$ を探索した。図2(a)では、連続時間システム $G$ は線形であり、

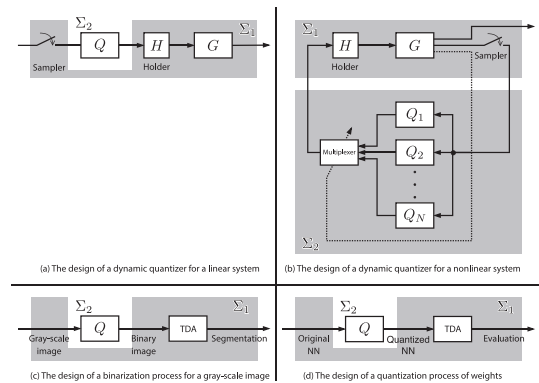


図2 提案手法を適用したそれぞれの具体的な問題のブロック線図



量子化器  $Q$  は線形フィルタを持つ動的量子化器である。図 2(b) では、連続時間システム  $G$  は非線形であり、量子化器  $Q$  は切り替え型の動的量子化器であり、線形量子化器  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$  から構成される。各サブ量子化器  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$  に対して、それぞれの設計モデル  $P_1, P_2, \dots, P_N$  を求めた。

図 2(c), (d) では、提案手法を TDA (Topological Data Analysis) と量子化処理からなるシステムに適用した。ここで、サブシステム  $\Sigma_1$  は TDA による処理プロセスであり、サブシステム  $\Sigma_2$  は量子化プロセスである。本研究では、量子化プロセスの設計手順が固定された条件のもとで、量子化プロセス  $\Sigma_2$  を設計することを目的とする。図 2(c) では、システム全体はグレースケール画像のセグメンテーションプロセスであり、 $\Sigma_1$  は二値画像のセグメンテーションのための TDA 処理プロセス、 $\Sigma_2$  はグレースケール画像を二値画像へ変換する二値化プロセス  $Q$  である。ここでは、二値化処理の設計手順  $\mathcal{M}$  を固定し、大津法やランダムディザリングなどの二値化アルゴリズム  $P$  を求めた。図 2(d) では、システム全体は量子化ニューラルネットワーク (Quantized Neural Network; QNN) の評価プロセスであり、 $\Sigma_1$  は QNN の TDA 処理、 $\Sigma_2$  はオリジナルの 32-bit の重みを持つ NN の重みを量子化する量子化プロセス  $Q$  である。ここでは、NN の重みの量子化プロセスの設計手順  $\mathcal{M}$  を固定し、量子化プロセスに必要な誤差拡散フィルタ  $P$  を求めた。

ここでは、図 2(b) の結果について、詳しく述べる。

この具体例では、図 3 のような倒立振子及び振り上げ安定化制御器を含むシステム  $G$  に対し、切り替え型の動的量子化器  $Q$  を設計する問題を考える。振り上げ制御器は  $K_1, K_2$  から構成され、それぞれ原点近傍での安定化のための状態フィードバック制御器とエネルギー法による振り上げ制御器である。同様に切り替え型動的量子化器も、サンプラ・ホルダ及びサブ量

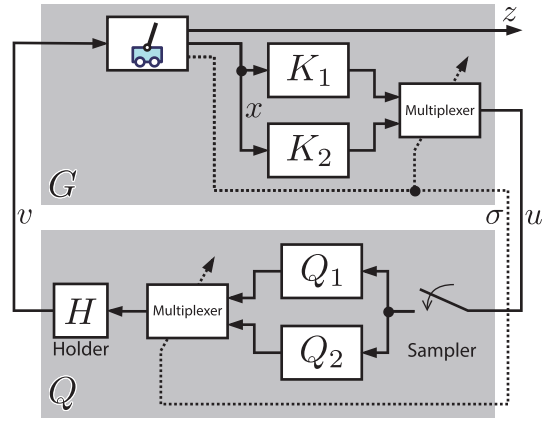


図 3 倒立振子の振り上げ安定化システム

子化器  $Q_1, Q_2$  から構成される。サブ量子化器  $Q_1$  は原点近傍で用いるので、与える設計モデルは原点近傍の線形近似モデルに固定し、振り上げフェーズで用いる量子化器  $Q_2$  の設計モデルを構築することを目指す。実際の設計には、以下の評価関数を最小化する設計モデルを求める。

$$J(Q) = \int_0^T \|z(t) - z_{\text{ref}}(t)\|_2 dt$$

ただし、 $z(t)$  は量子化器を含むシステムの、 $z_{\text{ref}}(t)$  は量子化器を含まない理想システムの出力である。

実際に最適化した設計モデルを用いて量子化器を設計した場合の結果は図 4 の赤線のようになり、理想システムの結果と同様に振り上げ安

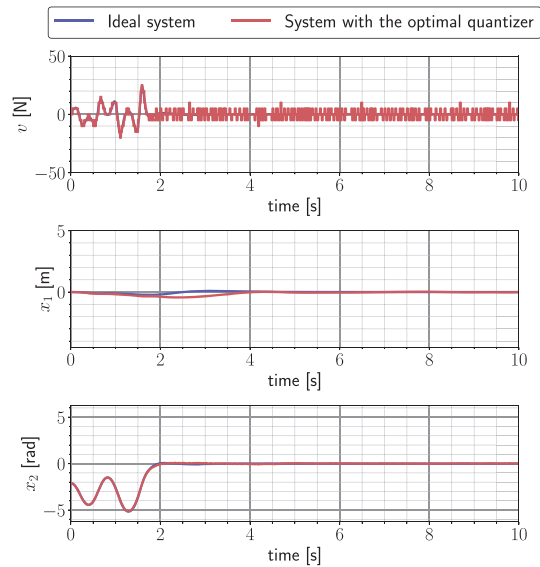


図 4 倒立振子の振り上げ安定化の結果

表1 直接探索と提案手法の比較

| 方 法  | 評価関数の値 |      |      |      |
|------|--------|------|------|------|
|      | 最小値    | 最大値  | 平 均  | 標準偏差 |
| 直接探索 | 0.318  | 56.6 | 9.32 | 13.3 |
| 提案手法 | 0.212  | 3.24 | 1.09 | 1.26 |

定化できている。

また、制御器の設計手順  $\mathcal{M}$  を経由して設計する提案手法と直接動的量子化器のパラメータを最適化する直接探索の最適化効率の比較を行うと、表1のように、提案手法の方が優れていることがわかった。

#### [成果の発表、論文など]

##### 学術雑誌掲載論文

荻尾，南，石川：モデル探索アプローチによるサンプル値駆動型動的量子化器の設計，計測自動制御学会論文集，Vol. 59, No. 12, pp. 542-549 (2023)

Y. Ogio, N. Tsubone, Y. Minami, and M. Ishikawa: A TDA-based performance analysis for neural networks with low-bit weights, Artif Life Robotics, Published, (2025)

Y. Ogio, Y. Minami, and M. Ishikawa: A model-tuning approach to switching-type dynamic quantizer design for nonlinear systems: Int. J. Control Autom. Syst. Vol. 23, pp. 714-724 (2025)

##### 国際会議（査読有り）

Y. Ogio, Y. Minami, and M. Ishikawa: A controller design method for continuous-time and discrete-valued systems, SICE Annual Conference (SICE AC 2022), Japan, Sep., (2022)

Y. Ogio, Y. Minami, and M. Ishikawa: Design of switching-type dynamic quantizers for continuous-time nonlinear systems, IFAC World Congress, Japan, Jul., (2023)

Y. Ogio, N. Tsubone, Y. Minami, and M. Ishikawa: A TDA-based performance analysis for quantized neural networks, AROB 29th 2024, Japan, Jan., (2024)

##### 国内会議（査読無し）

荻尾，南，石川：離散値係数制御器の設計のための設計モデル，第66回システム制御情報学会研究発表講演会（SCI'22），京都，2022年5月

##### 受賞

第66回システム制御情報学会研究発表講演会 SCI 学生発表賞受賞

2024年度計測自動制御学会関西支部 支部長賞 奨励賞受賞

## [研究助成 (C)]

## 実世界における直観に反した運動の予測と言語生成



2247010

研究代表者

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

黒 田 慧 莉

## [研究の目的]

過去 10 年の自然言語処理研究により、ヒトの活動や生活をサポートするような対話型ロボット（ヒトの発話を受け取り、内容に即して回答するロボット）の開発が進んだ。また、大規模言語モデル（LLM）の開発に伴い、今後の対話型ロボットはより自然に返答できるようになると期待される。しかし現在の LLM は、答えのない問いへの回答や、ヒトの会話のように曖昧な表現を含んだ返答が苦手である。また、ヒト同士の会話と、ヒトとロボットのコミュニケーションは決定的に異なる。会話においてヒトはただ相手の話を聞くだけでなく、相手の振る舞いから次の発言を予測しながら発話する。一方でロボットは、あくまでヒトからの一方的な指示に答えるに過ぎず、相手（ヒト）の言動を予測しているわけではない。ヒトからロボットへの一方的な命令という関係を越えて、今後ヒトと機械が共存していくには、ロボットが自律的に状況を判断できるようになる必要がある。さらに、判断した状況から様々な将来を予測することで、ヒトの言動を先回りしてサポートできるロボットの内部モデル構築を目指す。

たとえば、緑の円柱が青い立方体に近づいている状況があったとする。これらの物体は、この後どうなるだろうか。直観的には「緑の円柱が青い立方体にぶつかる」と想像できる。一方で、直観に反して「もし緑の円柱が止まった」とすると、「青い立方体と緑の円柱はぶつから

ない」と予測できる。このように直観に反した状況でも、ヒトは柔軟に推論を変更することで、その場面を画像として想像し、言語として発話できる。しかし予測研究の多くは、環境にある物体を視覚的（画像）もしくは物理的（物体の速さなど）にとらえ、直観に即した予測をするにとどまっている。また、直観に反した予測を扱う研究は、ほとんどの場合、物理シミュレーターで実世界を表し、物理情報を直接修正することで仮想環境を生成している。そのため、ヒトのように実世界からの情報をもとに柔軟に推論を修正し、起こりえない予測を生成できるモデルはまだない。

これまでの研究（例：Engelcke et al., 2020; Burgess et al., 2019）は、入力系列情報に対する決まった（直観に即した）予測のみを扱ってきた。それに対し本研究では、直観に即した従来の予測だけでなく、直観に反する条件が与えられたときに、これまでの推論を柔軟に変更することで、状況に即したもっともらしい環境を予測できる推論モデルを構築する。与えられた条件に適合するように推論を修正して、新し

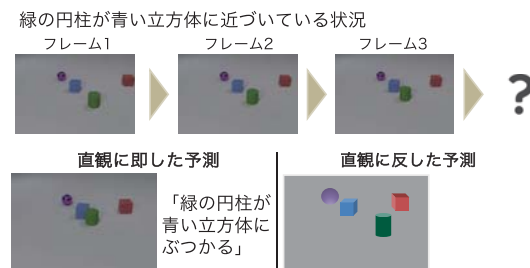


図1 本研究の概要図

い予測を生成するようなモデルはまだ提案されていない。

また、予測推論モデルから画像を生成する手法として、シーングラフから画像を生成する研究 (Johnson et al., 2018) がある。しかし、環境にある物体の速度や移動方向といった物理的な特徴や物体同士の位置関係を表したグラフ構造から画像を生成した先行研究はいまだ存在しない。

このように自身の研究に適した形で従来の研究を改善する方法を独自に考え、新たな予測モデルの構築や画像生成手法を提案することで課題を解決する。

## [研究の内容, 成果]

### 1. 提案手法

#### 1.1 物理特性を含んだ訓練データセット作成

本研究ではデータセットとして CLEVRER (Yi et al., 2019) をメインで用いた。CLEVRER は「画像内で 3 種類の物体が動き、物理的事象は衝突のみ」というシンプルなデータセットである。また、提案モデルの入力情報は画像だけでなく、画像から得られた物理情報 (位置や速度など) の 2 種を想定している。そのため、元となるデータセットから物理情報のデータセットも新たに作成する。作成の手順を図 2 に示す。

##### (1) 画像内の環境の獲得

CLEVRER に写っている物体の種類や位置情報を考慮したグラフベースの訓練データを作成するために、YOLACT を用いた。YOLACT を用いて物体検知をし、画像内の 2 次元位置情報と物体の形状・色を取得する。検知可能な種類数は物体の色 8 種類・形状 3 種類・素材 2 種類の組み合わせ 48 種類で行った。

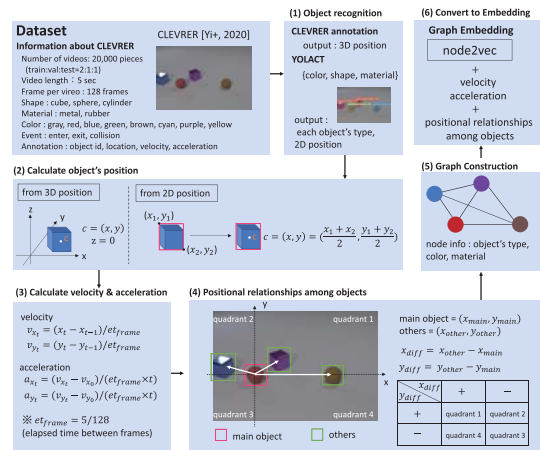


図2 訓練データセット作成の概要図

### (2) 物体の座標・環境を表現したグラフの構築

獲得したバウンディングボックスの座標から物体の 2 次元位置情報を決定し、グラフを作成した。本研究ではグラフを構築した後、それらのグラフを埋め込みベクトルに変換した。グラフの埋め込みベクトル作成においては word2vec の Skip-gram から着想を得た node2vec と doc2vec の PV-DBOW から着想を得た graph2vec の 2 種類の手法を用いた。node2vec を用いた埋め込みでは 1 フレーム内に写っている物体一つずつをノードとみなし、構築したグラフのノードをもとに埋め込みベクトルを作成した。一方で graph2vec では、観測環境 (CLEVRER 1 フレーム) を表したグラフ全体から埋め込みベクトルを作成した。

##### (3) 環境内の物体の速度と加速度の算出

環境に写っている各物体についての物理特性を捉えるために、物体の速度および加速度の算出を行った。時刻  $t_k$  における物体の位置を  $x_{tk}, y_{tk}$  とし、次の時刻  $t_{k+1}$  における物体の位置を  $x_{tk+1}, y_{tk+1}$  とする。また時刻  $t_k$  から次の時刻  $t_{k+1}$  の経過時間は、5 秒の動画を 128 フレームに分割しているので、5/128 秒となる。加速度算出における初速  $v_0$  は、環境における各物体は停止していると仮定するため  $v_0 = 0$  と設定した。



#### (4) 物体間の位置関係の表現

環境内の物体に関して、物体同士の位置関係も重要な情報である。ヒトを例に上げると、自分を中心にして他の物体がどの位置関係にあるかを瞬時に捉えている。ここでは全ての物体同士の位置関係について、各物体が中心となったときの他物体の位置方向を算出した。

#### 1.2 予測モデル構築

本研究では、PredNet に対して画像特徴量の変化から環境の移り変わりのタイミングを捉える研究である Variational Temporal Abstraction (VTA) の機能を組み合わせ、環境中の視覚情報と物理特性の両方の変化から環境の移り変わりを予測する予測モデルを構築した。VTA は系列情報から階層的な抽象度を見つける状態空間モデルであり、入力情報の変化点を抽出することができる。

モデルの構造は、物体の動きなどの物理特性を予測する機構と、環境の画像情報を予測する機構の二つの階層構造を並列にし、各モデルのそれぞれの機構に VTA の機構である変化点判別フラグ  $m$  を取り入れて構築した。

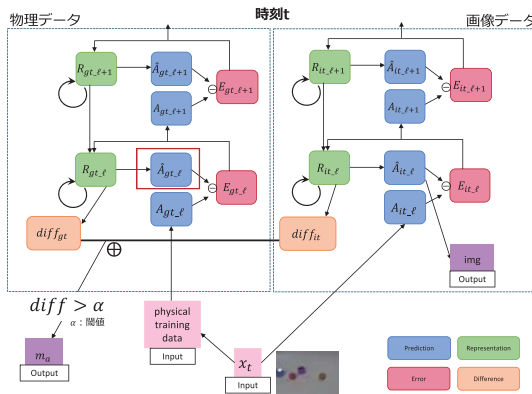


図3 提案する予測モデルの概要図

#### 1.3 言語データのレンプレート作成

変化点予測モデルを用いて予測した埋め込みベクトルから言語を生成するために、言語情報を新たに学習する必要がある。そのため言語データセットとして、物理特性を表すグラフ表現の埋め込みベクトルとそのときの状態を説明した文章のペアデータを作成した。グラフ表現

の埋め込みベクトルは、CLEVRER のアノテーションデータから作成した。またペアとなる文章は、3 (衝突前・衝突・衝突後) × 3 (文章の種類) の9種類のテンプレートに当てはまるように作成した。テンプレートの詳細を以下に示す。衝突した2つの物体は  $A \cdot B$  と表し、 $A$  と  $B$  はそれぞれ「灰, 赤, 青, 緑, 茶, 水, 紫, 黄」色の「球, 円柱, 立方体」の情報をもつ。また衝突のデータだけでなく、物体が衝突の前に近づくときと衝突後に離れるときをデータセットとして作成した。近づくときは衝突の5フレーム前, 離れるときは衝突の5フレーム後を対象とした。作成したペアデータの例は図4に示す。

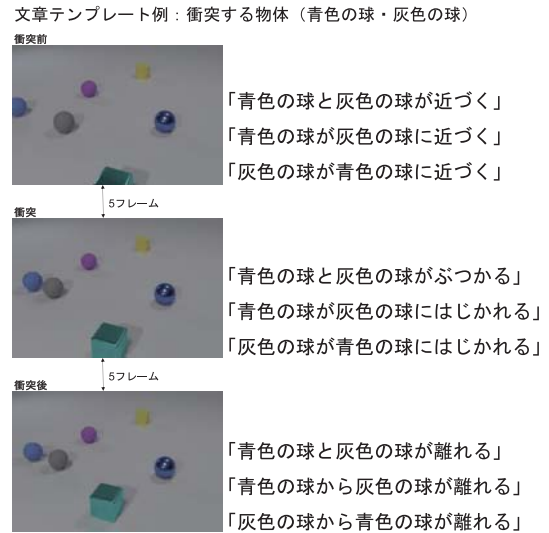


図4 言語データのテンプレート作成の例

#### 1.4 言語生成モデル

言語生成モデルは、Transformer の Decoder のみを用いた。図5に Decoder モデルを示す。従来の Transformer は Encoder-Decoder モデルで構築されているが、本研究では提案モデルの変化点予測モデルにおけるグラフの埋め込みベクトルの予測結果を Encoder における出力結果とみなし、この結果を Encoder から Decoder への入力とした。Decoder の学習は図4で作成したペアデータを用いた。学習データは219303個、テストデータは10965個とした。

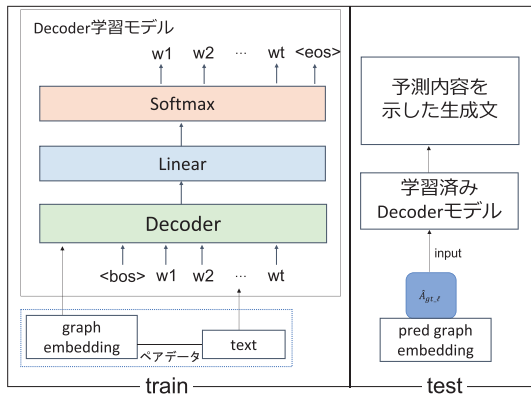


図5 言語モデル

## 2. 実験

実験では、予測して物理情報の変化点を言語情報として生成し、予測内容について解釈可能にすることを目的とする。

### 2.1 結果と考察

例1では、緑色の球と赤色の円柱がぶつかる状況に対して、赤色の円柱が反対方向に動いたときの動きを検証した。言語生成モデルを用いたときは「緑色の円柱が赤色の円柱からはなれる」という文章になり、予測画像は図6に示すものになった。これは想定する正解文に近い文

章が生成できたといえる。一方で、予測画像については物体の物理特性を表すグラフ構造から画像を作成したが、ノイズがかかり、また動きが大きく変わった画像を生成することはむずかしいことがわかった。

例2では、灰色の球と青色の円柱がぶつかる状況に対して、青色の円柱が反対に動いたときの動きを検証した。言語生成モデルを用いたときは「灰色の球と青色の立方体がはなれる」という文章になり、予測画像は図6に示すものになった。例1と同様に、生成文は正解文に近い文章が生成できたが、予測画像については想定していた画像とは異なるものが生成された。

### 2.2 文章生成の評価

次に各モデルで生成した文章を自動評価指標を用いて精度を算出した。生成した文を自動評価指標で評価した結果を表1に示す。自動評価指標には、言語生成タスクで用いられているBLEU, キャプション生成タスクで用いられるMETEOR, CIDErを使用した。生成文1文に対し正解データは3文用意したため、各スコアの平均を生成文のスコアとした。予測推論内容から生成した生成文と正解文のスコアは全体を通して約75程度であり、観測環境の状況を高い精度で生成することができたといえる。

表1 文章生成の評価結果

| モデル        | BLEU@2 | BLEU@3 | BLEU@4 | METEOR | CIDEr |
|------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| PredNetベース | 79.3   | 75.1   | 72.3   | 70.4   | 73.1  |

## 3. まとめと今後の課題

本研究では観測した環境を視覚的・物理的に予測できるモデルを構築し、状況を説明できるモデルを提案した。また環境の物理的な特徴を予測した結果を言語として生成し、モデルによる予測内容を解釈可能にした。現実には起こり得ない状況についての文章は高い精度で生成できたが、そのときの場面を鮮明に描写することには課題が残った。

また実験に使用したデータセットは、我々人

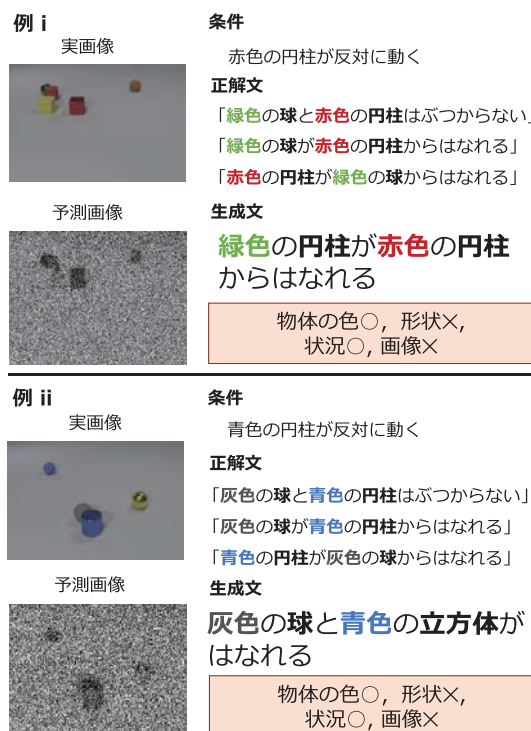


図6 実験結果

間が目にする実環境よりも簡単なデータになっているため、予測モデルとしても言語生成としてもまだ改善の余地はある。今後の課題としてより実世界に近いデータセットを利用した実験を考えている。

[成果の発表, 論文など]

1. Eri Kuroda & Ichiro Kobayashi: Predictive Inference Models for Real-world Physical Environments, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 29, No. 3, pp. 456-468 (2025).
2. Eri Kuroda, & Ichiro Kobayashi. Verbal Representation of Object Collision Prediction Based on Physical CommonSense Knowledge. 2025 17th International Conference on Machine Learning and Computing (ICMLC2025), Long Paper, Oral, Guangzhou, China, Feb 14th-17th, 2025.
3. Eri Kuroda, Yuki Taya & Ichiro Kobayashi. Verbal Description Focusing on Physical Properties of Real-World Environments. 2024 Joint 13th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 25th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2024), Long Paper, Oral, Hyogo, Japan, Nov 9th-12th, 2024.

## [研究助成 (C)]

# 片麻痺歩行に対する足関節ロボット治療における 適応者および非適応者の特徴分析

2227005



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

関西医科大学  
大学院医学研究科  
関西医科大学  
リハビリテーション学部  
国際電気通信基礎技術研究所  
(ATR)  
関西医科大学  
リハビリテーション医学講座

博士課程

桑原 嵩幸

助教

森 公彦

主任研究員

野田 智之

教授

長谷 公隆

## [研究の目的]

脳卒中後片麻痺患者では、下肢の麻痺により歩行中に十分な推進力（床反力前方成分）を得ることが困難となることで、歩行速度低下などの歩行障害ひいては生活範囲の狭小化に繋がることが報告されている。従って、片麻痺歩行に対する歩行再建では、麻痺側推進力を最大限高める治療が重要である。歩行中の足関節をアシスト出来る足関節ロボットは、麻痺側推進力を改善させる歩行介入エンジンとして近年注目が高まっている。

しかし、足関節ロボットによるアシストを加えても麻痺側推進力が十分に改善する症例（Responders）と改善しない症例（Non-Responders）が存在することが報告されている。しかし、従来の研究では、Responders と Non-Responders の特徴の違いを十分に解明した報告はない。従って、全ての患者に効果的な足関節ロボット治療を展開するためには、Responders と Non-Responders の特徴を同定し、さらに治療前に Non-Responders を Responders に近付ける事前介入を行うことにより、ロボットリハビリテーションの効果を最大化できる可能性がある。

本研究では、「足関節ロボットの治療効果を最大限引き出すためにはアシストだけでなく患

者の準備状態を最適化する必要がある」というアイデアに基づき、足関節ロボット治療における Responders と Non-Responders の歩行の特徴を人工知能も用いて解明し、ロボット治療効果を最大化するための事前介入法を構築することにより人間と機械の調和を目指すことを目的としている。

## [研究の内容、成果]

**第一研究：足関節ロボット治療における Responders と Non-Responders における歩行特徴の違いを同定**

## 1. 研究目的

足関節ロボット治療の Responders と Non-Responders における歩行の特徴の違いを教師なし学習によるクラスタリング手法を用いて同定すること。

## 2. 研究対象者

医師により脳卒中片麻痺と診断された 23 名（平均年齢 59.7 歳）を対象とした。除外基準は、脳卒中以外に歩行に障害を来すと考えられる疾患を合併している者や裸足で歩行困難な者とした。

## 3. 研究方法

対象者に対して、床反力内蔵トレッドミル（テック技販社製）上にて、空気圧人工筋肉付



き足関節ロボット（ATR 製）（図 1）による足関節底屈アシストを対象者ごとに正規化した 100% 歩行周期の 40-60%（麻痺側下肢が後ろに引けているタイミング）に 3 分間加え、アシストなし条件およびアシスト条件における麻痺側推進力を計測した。

対象者の平地歩行の特徴は、肩峰、上前腸骨棘、上後腸骨棘、大転子、大腿骨外側上顆、大腿骨内側上顆、外果、内果、第一中足骨、第五中足骨、踵骨に赤外線マーカーを対象者それぞれに貼付し（図 2）、3 次元動作解析装置（アニマ社製）および床反力計（アニマ社製）（図 3）を用いて、平地歩行における関節角度などの運動学的指標および関節モーメントなどの運動力学的指標をそれぞれ算出した。

算出された歩行データの内、麻痺側推進力と関連すると臨床上予想される歩行指標として、歩行中に麻痺側の爪先が離れるタイミング（TO）における股関節伸展角度および膝関節屈曲角度、足関節底屈角度を算出した。さらに麻痺側足関節底屈モーメントを加えた 4 項目を

それぞれ抽出した。

データ解析では、対象者においてそれぞれ抽出された歩行指標 4 項目を用いて K-means clustering を実装した。最適なクラスター数は先行研究を参考にシルエット法にて決定した。

統計解析では、両クラスター内における足関節アシストによる麻痺側推進力の変化を Wilcoxon 符号付順位検定を用いて検討した。加えて、両クラスター間における、足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量およびアシストなし条件における麻痺側推進力、抽出された歩行指標 4 項目と先行研究において麻痺側推進力と関連すると報告されている Trailing limb angle（TLA）（麻痺側下肢伸展角度）（図 4）との差を Mann-Whitney U 検定を用いて分析した。また各クラスター内において麻痺側推進力の変化量と歩行指標 4 項目および TLA との関連を Spearman 順位相関係数にて分析した。統計学的有意水準は 5 % 未満とした。



図 1 足関節ロボットによる歩行練習場面

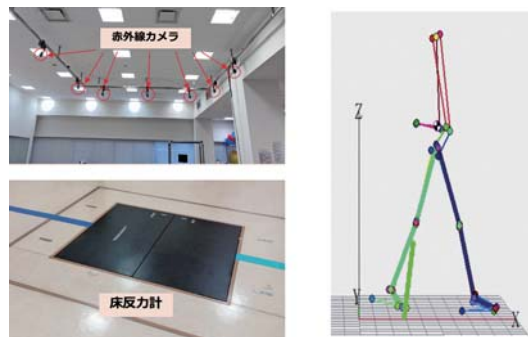


図 3 3次元動作解析



図 2 赤外線マーカー貼付位置

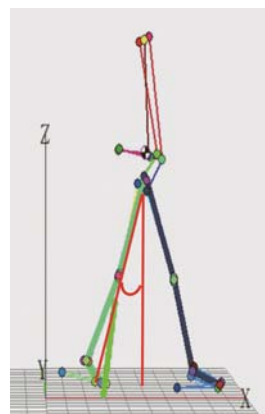


図 4 Trailing limb angle

#### 4. 研究結果

K-means クラスタリングにより対象者は Cluster A (10 例) と Cluster B (13 例) の 2 群に類型化された。

Cluster A および Cluster B における足関節アシストによる麻痺側推進力の変化を表 1 に示す。Cluster A では足関節アシストにより有意に麻痺側推進力の向上を認めたが、Cluster B では足関節アシストによる麻痺側推進力の有意な変化は認められなかった。

クラスター間における解析結果を表 2 に示す。Cluster B は Cluster A と比べて平地歩行時における TO 時の膝関節屈曲角度および足関節底屈モーメントと TLA が有意に大きかった。足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量および足関節アシストなし条件における麻痺側推進力、TO 時の股関節伸展、足関節底屈角度に群間差は認められなかった。Cluster A および Cluster B の代表的な患者の平地歩行を図 5 に示す。Cluster B の患者では Cluster A の患者と比べて麻痺側下肢伸展角度が大きい特徴があ

表 1 各クラスターにおける麻痺側推進力の変化

| Cluster A<br>(N=10) | 足関節<br>アシストなし <sup>1)</sup> | 足関節<br>アシスト <sup>1)</sup> | P 値 <sup>2)</sup> |
|---------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------|
| 麻痺側推進力<br>(N/BW)    | 0.54 [0.45, 0.88]           | 0.75 [0.61, 0.99]         | <b>0.027</b>      |
| Cluster B<br>(N=13) |                             |                           |                   |
| 麻痺側推進力<br>(N/BW)    | 0.74 [0.51, 1.20]           | 0.78 [0.57, 1.34]         | 0.146             |

1) 中央値 [四分位範囲]

2) Wilcoxon 符号付順位検定

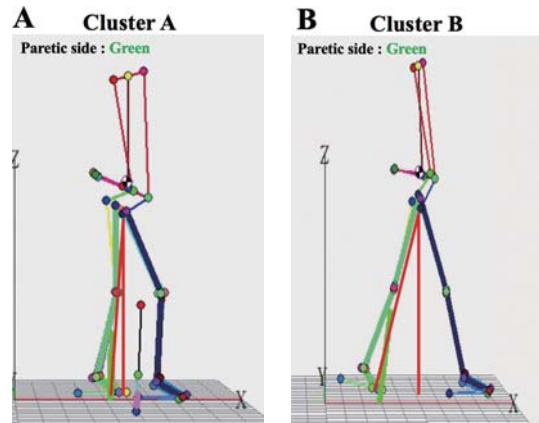


図 5 各クラスターにおける歩行の特徴

ることが分かる。

各クラスター内における足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量と平地歩行指標との関連性を表 3 に示す。Cluster A では足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量と TO 時の股関節伸展角度および TLA との間に有意な正

表 3 クラスターにおける麻痺側推進力の変化量と関連する歩行指標

| Cluster A (N=10) | 麻痺側推進力の変化量 <sup>1)</sup> | P 値          |
|------------------|--------------------------|--------------|
| TO 股関節伸展角度       | <b>0.661</b>             | <b>0.038</b> |
| TO 膝関節屈曲角度       | -0.042                   | 0.907        |
| TO 足関節底屈角度       | -0.333                   | 0.347        |
| 足関節底屈モーメント       | 0.515                    | 0.128        |
| TLA              | <b>0.685</b>             | <b>0.029</b> |
| Cluster B (N=13) | 麻痺側推進力の変化量 <sup>1)</sup> | P 値          |
| TO 股関節伸展角度       | 0.264                    | 0.383        |
| TO 膝関節屈曲角度       | 0.314                    | 0.297        |
| TO 足関節底屈角度       | 0.501                    | 0.081        |
| 足関節底屈モーメント       | <b>0.561</b>             | <b>0.046</b> |
| TLA              | 0.347                    | 0.246        |

1) Spearman 順位相関係数 ( $\rho$ )

表 2 クラスターにおける歩行特徴の違い

|                             | Cluster A (N=10) <sup>1)</sup> | Cluster B (N=13) <sup>1)</sup> | P 値 <sup>2)</sup> |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| アシストによる<br>麻痺側推進力変化量 (N/BW) | 0.11 [0.07, 0.24]              | 0.06 [0.01, 0.14]              | 0.182             |
| アシストなし条件の<br>麻痺側推進力 (N/BW)  | 0.54 [0.45, 0.88]              | 0.74 [0.51, 1.20]              | 0.277             |
| TO 股関節伸展角度 (degree)         | -6.18 [-11.99, -4.10]          | -8.83 [-12.00, -4.16]          | 0.828             |
| TO 膝関節屈曲角度 (degree)         | 23.70 [15.33, 26.93]           | 47.37 [40.69, 49.34]           | <b>&lt;0.001</b>  |
| TO 足関節底屈角度 (degree)         | 1.22 [0.20, 9.14]              | 3.71 [-5.97, 12.47]            | 0.925             |
| 足関節底屈モーメント<br>(Nm/HT*BW)    | 5.15 [4.17, 5.77]              | 6.29 [6.09, 6.82]              | <b>0.003</b>      |
| TLA (degree)                | 12.61 [8.10, 16.19]            | 19.71 [12.78, 22.11]           | <b>0.007</b>      |

1) 中央値 [四分位範囲]

2) Mann-Whitney U 検定

の相関関係を認めた。一方 Cluster B では、足関節底屈モーメントのみ麻痺側推進力の変化量との間に有意な正の相関関係を認めた。

## 5. 考察

足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量は、両クラスターで群間差は認めなかったが、Cluster A では足関節アシストにより有意に麻痺側推進力が増加した。一方で、Cluster B では麻痺側推進力に有意な変化は認められなかった。先行研究では、麻痺側推進力の変化における最小可検変化量 (MDC) は、0.078 N/BW であると報告されている (Kesar et al, 2011)。Cluster A および Cluster B における足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量の中央値は、それぞれ 0.11 N/BW, 0.06 N/BW であり、Cluster A のみ MDC を超える変化を認めたことも考慮すると Cluster A の患者群が Responders, Cluster B の患者群が Non-Responders である可能性が考えられた。

クラスター間の特徴に関する分析では、Non-Responders である Cluster B が Responders である Cluster A よりも平地歩行時における TO 時の膝関節屈曲角度および足関節底屈モーメント、TLA が有意に大きい特徴を示した。片麻痺歩行における麻痺側 TLA の拡大および足関節底屈モーメントの増加は、麻痺側推進力の改善に貢献する要因であることが報告されており (Hsiao et al, 2015)、我々の仮説では、平地歩行において TLA や足関節底屈モーメントが大きい患者群ほど足関節アシストが伝達されやすいと予想されるため、Responders になりやすいと考えていた。しかし、Responders の患者において Non-Responders の患者よりも TLA および足関節底屈モーメントが小さいことは我々の仮説に反する結果となった。加えて、我々は Responders の特徴に近付ける事前介入が足関節ロボット治療効果を最大化する上で重要であると考えていたが、平地歩行において推進力が伝達されやすい特徴を持つ Non-Responders を推進力が比較的伝達されにくい

特徴を持つ Responders に近付ける介入は臨床上現実的ではないと考えた。本研究の各クラスター内における麻痺側推進力の変化量と関連する平地歩行指標における解析では、Responders である Cluster A では麻痺側の爪先が離れるタイミングの股関節伸展角度と TLA が有意な正の相関関係を、Non-responders である Cluster B では足関節底屈モーメントが有意な正の相関関係を認めたことから、それぞれのクラスターにおいて足関節ロボット治療の麻痺側推進力の増加に寄与する平地歩行の指標は異なる可能性が考えられる。すなわち、足関節アシストの効果を最大限高めるためには、単に Non-Responder を Responders に近付ける介入ではなく、Responders と Non-responders のそれぞれに応じた事前介入が重要である可能性が本研究の結果から新たに示唆された。

本研究の結果より、足関節ロボット治療を最大化させるためには、Responders には歩行時の麻痺側下肢伸展角度を拡大する事前介入が効果的であり、Non-Responders には麻痺側足関節底屈モーメントを増加させ、蹴り出しを改善する事前介入が有効である可能性が推察された。

## 第二研究：Responders および Non-Responders に対する事前介入が足関節ロボット治療に与える効果

### 1. 研究目的

第一研究にて Responders 群および Non-Responder 群と同定された対象者それぞれに応じた事前介入が足関節ロボットの効果に与える影響を検証すること。

### 2. 研究対象者

第一研究にて、Responders である Cluster A と判断された 50 歳代の右片麻痺男性（第一研究における麻痺側推進力の変化：0.094 N/BW）と Non-Responders である Cluster B と判断された 40 歳代の右片麻痺男性（第一研究における麻痺側推進力の変化：0.011 N/BW）とした。

### 3. 研究方法

足関節ロボット治療前の事前介入として、Cluster A の対象者には、高速度でのトレッドミル歩行練習（図 6）により歩行中の麻痺側 TLA を増加させる治療介入を 1 度行った後、再度足関節ロボットによるアシストが麻痺側推進力に与える影響を検討した。Cluster B の対象者には、麻痺側下肢片脚立位での踵挙げや歩行中の蹴り出しを意識させ麻痺側足関節底屈モーメントの向上を目指した歩行練習を週 1-2 回の頻度で 1 ヶ月間行った後、足関節ロボット治療による効果を再検討した。事前介入による各歩行指標の変化は、Cluster A の対象者では、マーカーレス動作分析装置（アニマ社製）を用いて事前介入前後におけるトレッドミル歩行中の麻痺側 TLA の変化を評価した。加えて、Cluster B の対象者では、第一研究と同様に 3 次元動作解析装置を使用し、事前介入前後の平地歩行における麻痺側足関節底屈モーメントの変化を分析した。

足関節ロボット治療における計測項目は、第一研究と同様に、歩行中の麻痺側下肢に足関節底屈アシストを 40-60% 歩行周期のタイミングに加え、アシストなし条件および足関節アシスト条件における麻痺側推進力を対象者ごとにそれぞれ算出した。

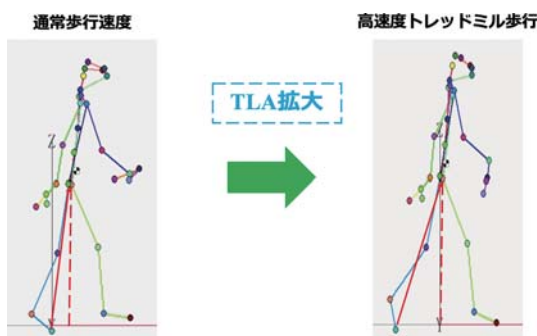


図 6 高速度トレッドミル歩行における麻痺側 TLA の変化

### 4. 研究結果

#### Cluster A の対象者

1 回の事前介入により対象者の麻痺側 TLA

は  $23.0^{\circ}$  から  $24.2^{\circ}$  まで拡大を認めた（図 7）。また足関節アシストにより麻痺側推進力は、 $1.183 \text{ N/BW}$  から  $1.354 \text{ N/BW}$  に増加した（表 4）。

Cluster B の対象者では、1 ヶ月間の事前介入により、歩行中の麻痺側足関節底屈モーメントは、 $5.52 \text{ Nm/HT*BW}$  から  $6.13 \text{ Nm/HT*BW}$  まで増加し（図 8）、足関節アシストにより麻痺側推進力は、 $0.510 \text{ N/BW}$  から  $0.638 \text{ N/BW}$  に改善を認めた（表 4）。

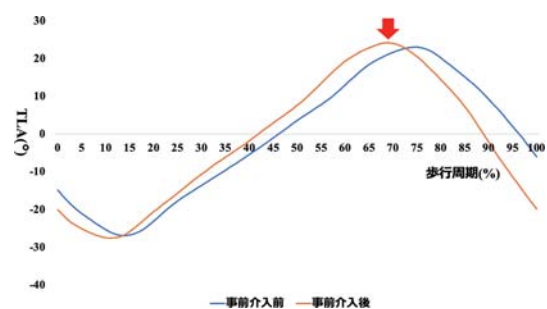


図 7 Cluster A の対象者における事前介入による TLA の変化

表 4 各対象者における足関節ロボット治療後の麻痺側推進力の変化

| Cluster A の対象者   | 足関節<br>アシストなし | 足関節<br>アシスト | 変化量   |
|------------------|---------------|-------------|-------|
| 麻痺側推進力<br>(N/BW) | 1.183         | 1.354       | 0.171 |
| Cluster B の対象者   | 足関節<br>アシストなし | 足関節<br>アシスト | 変化量   |
| 麻痺側推進力<br>(N/BW) | 0.510         | 0.638       | 0.128 |

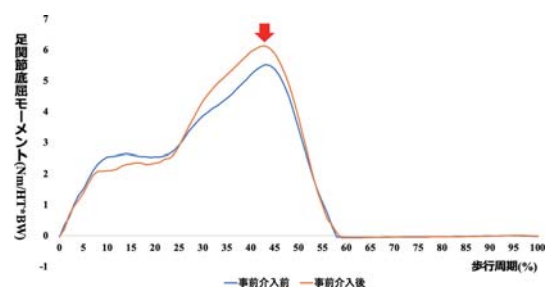


図 8 Cluster B の対象者における事前介入による足関節底屈モーメントの変化

### 5. 考察

Responders である Cluster A の対象者および Non-Responders である Cluster B の対象者に対して、それぞれのクラスターの特徴に応じた事前介入を行うことにより足関節アシスト



の効果を更に高められる可能性があることが本研究から示唆された。Cluster A の対象者および Cluster B の対象者に対する事前介入後の足関節アシストによる麻痺側推進力の変化は、いずれも第一研究における麻痺側推進力の変化よりも大きな向上を示し、MDC である 0.078 N/BW を超える変化を両者共に認めていることから、各クラスターの特徴に応じた事前介入は足関節ロボット治療において重要である可能性が示唆される。加えて、特に第一研究において、Non-Responders であった Cluster B の対象者が事前介入後のロボット治療では、MDC を越える麻痺側推進力の向上を示したことから、患者の特徴に応じた足関節アシスト歩行練習前の事前介入は、Non-Responders の患者を Responders に変化させる可能性があることも推察された。

麻痺側推進力は、TLA および足関節底屈モーメントで構成され (Hsiao et al, 2015)、脳卒中患者においてはその貢献率は、TLA が足関節底屈モーメントの約 4 倍であることが報告されている。従って、脳卒中片麻痺患者における麻痺側推進力の伝達には、歩行中の TLA の拡大を目指すことが重要となる。一方で、歩行速度の向上に伴う足関節底屈パワーの貢献度は、歩行機能が高い患者群でのみ高く、歩行機能が低い患者群では貢献しないことも報告されている (Jonkers et al)。これらから、片麻痺患者における麻痺側推進力の向上に伴う歩行機能改善には、歩行機能が低い患者では、TLA の拡大に着目し、歩行機能の高い患者では、TLA のみならず足関節底屈モーメントの改善を目指した介入も重要であることが示唆される。本研究において、Responders である Cluster A の患者群は、Non-Responders である Cluster B の患者群よりも歩行機能が低い特徴を持つ。従って、Cluster A においては、TLA の拡大を目的とした事前介入により足関節アシストが推進力として伝達されやすかったと考えられる。一方、歩行機能が比較的高い Cluster B では、

TLA ではなく、足関節底屈モーメントを高める事前介入が麻痺側推進力の改善に効果的であったと推察された。

本研究の結果から、足関節ロボット治療における Responders および Non-Responders の特徴に応じた事前介入によりその後の足関節アシストの効果をより高められる可能性が明らかになった。これらから、足関節アシスト歩行練習では、ロボット治療前の歩行状態を事前に調整することにより、Responders ではより治療効果を高めることができ、Non-Responders では、Responders に変化できる可能性が示唆された。

## 6. 今後の展望

本研究では、「足関節ロボットの治療効果を最大限引き出すためにはアシストだけでなく患者の準備状態を最適化する必要がある」というアイデアに基づき、第一研究および第二研究を行った。第一研究では、足関節ロボット治療の効果を最大限高めるためには、単に Non-Responders を Responders に近付ける介入ではなく、Responders および Non-Responders のそれぞれの特徴に応じた事前介入が重要であることが示された。また、第二研究では、実際に、Responders および Non-Responders に対する事前介入により足関節アシストの効果をさらに高められる可能性が示唆された。

今後は、さらに被験者数を増やし、Responder および Non-Responders に対する事前介入が足関節ロボット治療に与える効果を検証し、体系的な足関節ロボット治療アルゴリズムの構築を行っていく必要がある。

### [成果の発表、論文など]

桑原嵩幸, 森公彦, 久保鳴峰, 間野直人, 中條雄太, 野田智之, 長谷公隆: 片麻痺歩行の麻痺側推進力を増加させる高速度トレッドミルと併用した足関節アシスト歩行練習の効果, 第 59 回リハビリテーション医学会学術集会, 2022 年 6 月 22-25 日, 横浜  
桑原嵩幸, 森公彦, 久保鳴峰, 間野直人, 中條雄太, 寺前達也, 野田智之, 長谷公隆: 足関節ロボット歩行練習において麻痺側推進力を増加させる底屈アシ

ストタイミングの検討，第 20 回日本神経理学療法学会学術大会，2022 年 10 月 15-16 日，大阪  
Takayuki Kuwabara, Kimihiko Mori, Takanari Kubo, Naoto Mano, Yuta Chujo, Tatsuya Teramae, Tomoyuki Noda, Kimitaka Hase: Gait characteristics of patients with increased paretic propulsion during ankle-assisted gait training-Analysis using machine learning-, 第 20 回日本神経理学療法学会学術大会，2022 年 10 月 15-16 日，大阪  
桑原嵩幸，森公彦，久保鳴峰，間野直人，中條雄太，

脇田正徳，寺前達也，野田智之，長谷公隆：足関節ロボット歩行練習において麻痺側床反力の特徴を用いた底屈アシストタイミングの検討，第 48 回日本運動療法学会学術集会，2023 年 6 月 17 日，大阪  
桑原嵩幸，森公彦，久保鳴峰，間野直人，中條雄太，寺前達也，野田智之，長谷公隆：片麻痺歩行の立脚期後半における制動力が足関節ロボット底屈アシストのタイミング設定に及ぼす影響，第 60 回日本リハビリテーション医学会学術集会，2023 年 6 月 29-7 月 2 日，福岡

## [研究助成 (C)]

eスポーツ熟練者の情報処理能力を司る神経機構の解明と  
トレーニング法の開発

2237004

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 博士後期課程

鄭 仁 赫

共同研究者

東京大学 大学院総合文化研究科 教授

中 澤 公 孝

## [研究の目的]

eスポーツは「電子機器を用いて対戦する新しいスポーツ」と定義される（日本eスポーツ連合, 2018）。eスポーツ産業はパソコン普及率の向上と共に年々発展してきた。この産業規模の拡大により、認知的なスキルを競うeスポーツプレイヤーは認知アスリートとして注目されている。そのため、スポーツ科学の観点からその特徴を調べる研究が進んでいる。

特に、長年eスポーツをプレイすることは人間の注意力や問題解決能力を向上させることで知られている（Thillier et al., 2023）。また、eスポーツ熟練者は優れた状況把握能力やプレッシャーを感じる環境下でも高い競技力を発揮できる（Sharpe et al., 2024）。これらの先行研究の結果から、eスポーツ熟練者は優れた認知機能（主に注意力や問題解決能力）をもっていることに加え、優れた競技力を有するアスリートであると言える。

しかし、従来の先行研究には3つの主な疑問点が存在する。疑問点その1) eスポーツ熟練者の優れた認知スキルの中で一つである「情報処理能力」を司る神経機構は未だに不明である。疑問点その2) 従来の研究では、単純課題のみを用いてeスポーツ熟練者の能力を検証していたため、単純課題で観察されたeスポーツ熟練者の特徴が実際のeスポーツプレイ中にも観察されるかについては検証の余地が残る。疑問点その3) eスポーツ熟練者が優れた情報処理能

力を持っているとすれば、それらに関連する能力を高めることでeスポーツプレイヤーの競技力を向上させることができるか。

以上の3つの疑問点を解決するため、本助成研究では、実際のeスポーツ環境下で熟練者の情報処理能力を司る神経機構を解明し、それらの能力に基づいたトレーニング方法を開発することを研究目的とした。これらの研究を通じて、eスポーツアスリートの競技力を向上させることができ、人間（eスポーツアスリート）と機械（eスポーツ）の調和を最大に引き出すことができる。

## [研究の内容、成果]

本助成研究の目的を達成するため、計4つの研究を実施した。

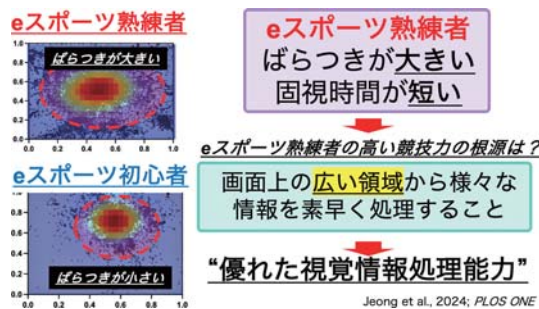
研究1 eスポーツ熟練者特有の視覚情報処理能力 (Jeong et al., 2024; *PLOS ONE*)

研究1では、Pupil-Labs社の視線測定装置を用いて、League of Legends (LoL) 熟練者と初心者が実際のLoLをプレイする際の視線の動きを調べた。

11名のLoL熟練者と9名のLoL初心者に協力してもらい、練習ゲーム中の視線のばらつきと固視時間を測定した。また、敵を倒した数を用いて行動指標を評価した。その結果、LoLの熟練者は初心者より有意に多くの敵を倒すことに成功した ( $p<.001$ )。この結果は、LoL熟

練者の方が初心者より高い競技力を持っていたことに加え、適切に熟練者と初心者を分けることができたことを示唆する。また、視線データにおいて、LoLの熟練者は練習ゲーム中に初心者より視線の横縦方向のばらつきが有意に大きく ( $p < .05$ )、固視時間が短かった ( $p < .01$ )。

eスポーツにおける大きい視線のばらつきと短い固視時間は優れた視覚情報処理能力を示す指標として用いられている (Jeong et al., 2022)。そのため、研究1の結果から、LoL熟練者は初心者より、画面上の広い領域から様々な視覚情報を素早く処理していることがわかった。また、eスポーツ熟練者が持つ特有の視覚情報処理能力が優れた競技力の根源であることが示された (図1)。研究1の結果は国際誌である *PLOS ONE* に受理された。



## 研究2 eスポーツ内での状況別の視線制御能力 (Jeong et al., 2024; GamiFIN)

研究1を通じて、eスポーツ熟練者は優れた視覚情報処理能力を持っていることがわかった。しかし、eスポーツ内での状況は様々であり、状況別に求められる視線制御能力が異なるのかについて調べていなかった。また、状況別に求められる視線制御能力を明らかにすることで、eスポーツ内での状況に応じたトレーニング方法を開発できると考えた。そこで、研究2では、LoL内での試合状況を5つのカテゴリーに分類し、視線制御能力を状況別に比較した。試合状況は以下の4つの状況に分類した。

状況1) キャラクターを移動させるシーン

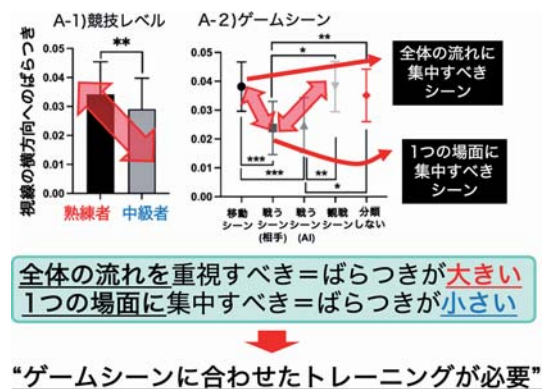
状況2) 敵と対戦を行うシーン

状況3) AIによって操作されるものと対戦するシーン

状況4) 相手のプレイを観察するシーン

また、LoLプレイ時の視線のばらつき、関心領域と固視時間を試合状況別に測定した。

その結果、LoL熟練者は中級者と比べて、プレイ状況に関わらず視線分布が大きく ( $p < .01$ )、固視時間が短かった ( $p < .01$ )。また、熟練度と中級者ともに、1つの情報に集中する場面 (状況2) より、全体の流れを掴む場面 (状況1と4) において、視線の分布が広がった ( $p < .001$ )。これらの結果から、広い視線分布でeスポーツプレイ中の全体の流れに注目することが、eスポーツにおける高い競技力の源泉となることが示された。また、複数の情報に同時に集中する必要がある場面では、熟練度に関わらず、他の場面よりも広い視線分布が観察されたことから、状況別に求められる視線制御能力が異なることが示された。これらの結果から、eスポーツプレイヤーのためのトレーニング方法を開発する際には、eスポーツ内でのシーンの特性を反映させる必要があると結論づけた (図2)。研究2の結果は国際誌である *GamiFIN* に受理された。





### 研究3 eスポーツ熟練者特有の神経機構について (Jeong et al., 2024; *Neuroscience Letters*)

研究3では、160ch脳波計を用いてeスポーツ種目の中で一つである一人称シューティングゲーム(FPS)のプレイヤーの脳活動を実際のeスポーツに類似した環境下で調べた。9名のFPSゲーム熟練者と8名の中級者を対象とし、eスポーツプレイ中における大脳皮質の活動を計測した。また、計測された皮質活動からパワースペクトル密度(PSD)を算出し、行動指標である反応時間と正確性との関連性を調べた。

研究3の結果、FPSゲームの熟練者は中級者と比べて、課題中の前頭葉におけるdelta(1-4 Hz)とtheta(4-8 Hz)のPSDが有意に低かった( $p < .05$ )。また、課題中の正確性が高いほど、deltaとthetaのPSDが低かった(Kendal's Tau:  $-0.33$ ,  $p < .05$ )。前頭葉の低いdeltaとthetaのPSDは優れた持続的注意を反映しているため(Palaus et al., 2017; He et al., 2021)、研究3の結果は、高い持続的注意はFPSゲーム熟練者の特徴であり、優れた競技力の根源であることが示された。

また、側頭葉のdelta波において、FPSゲームの熟練者の方が中級者より有意にPSDが低かった( $p < .001$ )。低い側頭葉のdelta波のパワーは高いターゲット探知能力を示していることから(Bledowski et al., 2004)、FPSゲームの熟練者は高いターゲット探知能力を持っていることがわかった。

これらの研究結果から、注意力やターゲット探知能力を向上させるトレーニングがeスポーツプレイヤーの競技力の向上に貢献できる可能性が示された(図3)。また、研究3の結果を国際誌であるNeuroscience Lettersに投稿し、受理された。

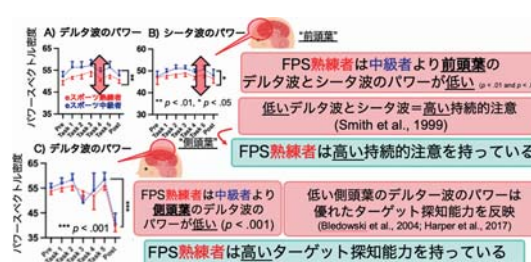


図3 研究3の結果の概要

### 研究4 eスポーツプレイヤーに特化したトレーニング方法の開発 (Jeong et al., 2024; *Computers in Human Behavior* 誌での査読中)

研究1-3を通じて、eスポーツ熟練者は優れた視覚情報処理能力と注意力を持っていることが明らかになった。そこで、視覚情報処理能力と注意力を向上させるトレーニングを通じて、eスポーツプレイヤーの競技力(主に反応速度や正確性)を向上させることができると考えた。

そこで、研究4では注意力(実験1)と視線制御能力(実験2)を強化するトレーニングを実施し、そのトレーニングがeスポーツプレイヤーの競技力向上に寄与するかを検証した。実験1の注意力トレーニングでは、トレーニング群は3ch脳波計を着用し、頭頂葉の活動に合わせた音フィードバックを受けた。注意力に関連する皮質活動が高いほど、低い周波数帯の音を提示した。実験参加者はランダムに振り分けられた10名のトレーニング群と11名のシャム群の参加者(計21名)に協力してもらった。実験1のシャム群には、皮質活動および視線の位置とは関係のない偽のフィードバックを提示した(図4の上段)。

実験2の周辺視トレーニングでは、トレーニング群には視線の位置が画面の中心から離れた際に警告音を提示し、周辺視で物を見る能力の向上を図った。また、実験2では、11名のトレーニング群と10名のシャム群の参加者に参加してもらった。実験2のシャム群にはフィードバックを提示しなかった(図4の下段)。



図4 研究4の実験様子

両実験の結果、トレーニング群はシャム群より反応時間が有意に短くなった（注意力トレーニング：Mdn = -27 ms, 範囲：-73.3 ms ~ +19.3 ms,  $p < .05$ ；周辺視トレーニング：Mdn = -49 ms, 範囲：-155.4 ms ~ -19.2,  $p < .01$ ）。シャム群の反応時間は有意に変化しなかった（全て  $p > .05$ ）。この結果は、科学的根拠に基づいたトレーニングがeスポーツプレイヤーの競技力を向上させる可能性を示した（図5）。

また、研究4の結果を論文としてまとめ、人間-コンピュータ相互作用（HCI）分野におけるトップレベルの国際誌である *Computers in Human Behavior* に投稿中である。

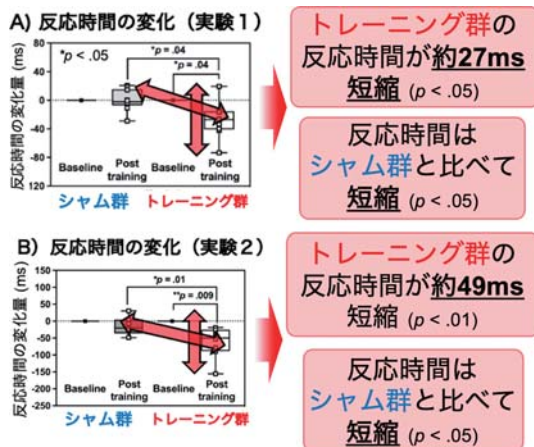


図5 研究4の結果のまとめ

## まとめ・総合議論

研究1-3を通じて、eスポーツ熟練者の優れた競技力を裏付ける特有の情報処理能力を観察できた。これらの特徴はeスポーツ内での競技力と有意な相関を示したことから、高い視覚情報処理能力と注意力がeスポーツにおける高い競技力を発揮するための鍵であると結論づけた。研究4では、視線制御能力と注意力を向上させるためのトレーニングを開発し、その効果検証を実施した。その結果、eスポーツ内での正確性を落とすことなく、反応時間を短縮させることができた。これらの研究成果を通じて、人間（eスポーツプレイヤー）と機械（eスポーツ）の調和を一層深めることができた。これらの研究成果は研究代表者が博士後期課程在学中に達成できた成果であり、大学からの高い評価を受け、首席に相当する一高記念賞の受賞に繋がった。また、本申請研究を通じて得られた知見は、今後eスポーツ現場でのトレーニングや一般の認知症予防に応用できる可能性を有しており、幅広い分野への波及効果が期待される。

## [成果の発表、論文など]

### 原著論文

1. **Jeong I**, Kudo K, Kaneko N, Nakazawa K (2024) Esports experts have a wide gaze distribution and short gaze fixation duration: A focus on League of Legends players. *PLoS One* 19(1): e0288770. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288770> (査読あり)
2. **Jeong I**, Kaneko N, Takahashi R, Nakazawa K (2024) High-skilled first-person shooting game players have specific frontal lobe activity: Power spectrum analysis in an electroencephalogram study. *Neuroscience Letters*. Vol 825: 137685. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neulet.2024.137685> (査読あり)
3. **Jeong I**, Kim D, Kaneko N, Nakazawa K (2024) Gaze control ability of League of Legends players in various game situations: perspectives from solo-ranked match. *GamiFIN*. Page 1-9. <https://ceur-ws.org/Vol-3669/paper1.pdf> (査読あり)

### 国際学会での発表

4. **Jeong I**, Kaneko N, Kim D, Takahashi R, Iwama

- S., Dohata M., Ushiba J., Nakazawa, K. "Does bio-feedback training improve the performance of esports players?; Development of training methods based on gaze movements and cortical theta-alpha activity" *Esports Research Network Conference (ERNC 2024)*, London, UK, November 2024 (採択済み, ポスター発表)
5. **Jeong I.** "Revealing the superior behavioral and neurological characteristics of high-skilled esports players and develop the training method for them" *8<sup>th</sup> Annual International GamiFIN Conference 2024*, Ruka, Finland, April 2024 (口頭発表)
  6. **Jeong I.** Kim D, Kaneko N, Nakazawa K, "Gaze control ability of League of Legends players in various game situations: perspectives from solo-ranked match" *8<sup>th</sup> Annual International GamiFIN Conference 2024*, Ruka, Finland, April 2024 (口頭発表)
  7. **Jeong I.** Kaneko N, Nakazawa K, "Proposal for a new training method in esports using EEG feedback" *The 53<sup>rd</sup> NIPS International Symposium*, Okazaki, Japan, February 2024 (ポスター発表)
- 国内学会で・セミナーでの発表
8. **Jeong Inhyeok.** 『eスポーツ選手のパフォーマンス向上を目指したトレーニング方法の開発』, 「第36回愛知・名古屋eスポーツ研究会 (一般社団法人 愛知eスポーツ連合主催)」, 名古屋, 2024年9月 (口頭発表, **招待あり**)
  9. **鄭仁赫**, 金子直嗣, Kim Donghyun, 高橋涼吾, 岩間清太郎, 堂畑茉由, 牛場潤一, 中澤公孝, 「バイオフィードバックトレーニングはesports選手のパフォーマンスを向上させるか? ~視線制御と大脳皮質の活動に着目したトレーニング法の開発~」, 『第18回 Motor Control 研究会』, 大阪, 2024年8月 (ポスター発表)
  10. **鄭仁赫**, 高橋涼吾, 金子直嗣, 堂畑茉由, 中澤公孝, 『eスポーツプレイヤーのパフォーマンスと筋活動の相関関係について』, 日本デジタルゲーム学会第14回年次大会, 大阪, 2024年2月 (ポスター発表)
  11. **鄭仁赫**, 延藤巧真, 金子直嗣, 加藤貴昭, 中澤公孝, 『実際のeスポーツプレイ場面におけるeスポーツ熟練者の視線制御能力について』, 2023年度運動神経科学研究会, 長野, 2023年8月 (口頭発表)
- 受賞
12. 令和7年度東京大学一高記念賞 (総合文化研究科)

## [研究助成 (C)]

ポストコロナ時代における商業・公共施設のための  
空間管理システムの基盤構築

2227006



研究代表者

北海道大学 大学院情報科学院 博士後期課程

須崎 太久弥

## [研究の目的]

本研究の目的は、ポストコロナ時代において施設内の安全を確保しつつ、日常生活や経済活動を円滑に維持・促進するための位置情報を取得する基盤技術を確立することである。新型コロナウイルスの感染拡大は、ショッピングモールなどの人が密集する施設に対し入場制限などの措置を強いることとなり、施設のサービスモデルは大きな転換を迫られた。

感染リスク軽減のため、政府や企業が推進するデジタルトランスフォーメーション（DX）の取り組みにより、施設内サービスの高速化・効率化を目的としてデジタル技術の積極的な活用が求められている。中でも施設内における人の位置情報は、混雑状況の把握、人流解析、購買行動促進などの行動分析に不可欠なデータであり、感染リスクを考慮した空間利用の最適化を図る上でも重要である。

このような位置情報に基づく管理システムを実現するためには、誤差 10 cm 以下の精度でありながら、低コストかつ簡便に運用可能な測位技術が必要となる。そこで本研究では、高精度が期待できる音響を利用した測位技術の開発に取り組む。音響測位は、Wi-Fi や Bluetooth などの電波による方法と比較して高精度な測位が期待できることで知られている。また、施設に既存のスピーカを送信機として活用し、利用者が所有するモバイル端末を受信機として活用することで、追加設備費用が抑えられる点でも

優れている。

一方で、音響測位にはいくつかの技術的課題がある。本研究では特に重要とされる3つの課題に着目し、それぞれの解決手法を提案することで、より頑健な音響測位システムの実現を目指す。

## [研究の内容、成果]

## 研究1：設置スピーカ数の削減

## ■背景

本研究では、測位に必要なスピーカの数削減する手法の開発を目的とした。通常、2次元測位には最低3台以上のスピーカからの信号を受信する必要がある。これはスピーカとモバイル端末間で高精度な時刻同期が困難であることに起因するため、時刻同期が不要な到来時刻差（TDoA：Time Difference of Arrival）を利用した測位アルゴリズムが一般的に用いられる。しかし実環境では、障害物などにより常に3台以上のスピーカからの信号を安定して受信できるとは限らないため、より少ないスピーカでの測位が求められている。

## ■手法

提案手法では、床面からの反射波に着目し、高精度な時刻同期を実現する方法を提案した。床からの反射波を鏡像法により仮想スピーカからの直接波としてモデル化することで、幾何学的に送信時刻を推定することが基本概念となる（図1）。受信機側では、推定された送信時刻が



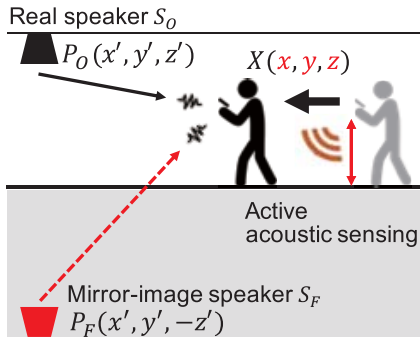


図1 時刻同期手法の概要

ら伝搬時間を求め、音速を乗じることでスピーカまでの距離を推定する。

受信信号はパルス圧縮技術を用いて受信時刻を検出しやすい波形に変換する。この際、床面以外の反射波も含まれるが、階層クラスタリングを用いて分類が可能であることを確認した。また、本手法に必要な床からの高さ情報についても、モバイル端末に搭載されたスピーカとマイクロフォンを利用したアクティブ音響センシングにより、高精度で測距可能であることを示した。

#### ■成果

評価実験の結果、提案手法による時刻同期誤差は平均 0.1072 ms となった。この同期誤差を音速に換算すると距離誤差は約 3.690 cm であり、目標精度の 10 cm 以内を達成できることを確認した。

さらに、本手法をロボットのトラッキング実験に適用した結果（図2）、測位誤差の90パーセンタイル値は 28.8 cm となった。この誤差は系統的な要因による影響が大きく、キャリブレーションなどの最適化により大幅な精度向上が可能であると考ええる。

### 研究2：測位領域の拡張

#### ■背景

本研究では、モバイル端末の測位可能領域を拡張するための研究を行った。施設内でのスピーカとモバイル端末は必ずしも正対しているとは限らず、相対的な角度やスピーカおよび受

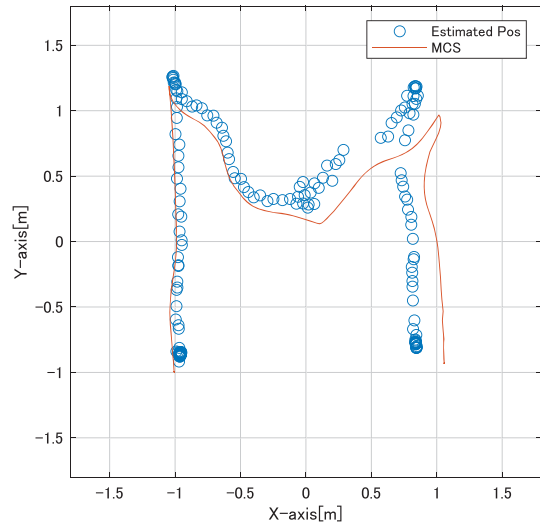


図2 ロボット移動時の軌跡

信機の指向性により受信信号が劣化し、測位精度が著しく低下することがある。そのため、実環境での運用を考慮し、指向性による影響を軽減して、安定して高精度測位が可能な領域を広げる必要がある。

#### ■手法

提案手法では送信方式に工夫を施し、図3に示すように各スピーカの送信帯域を動的に割り当てることで測位範囲を拡張した。本方式は、周波数分割多重（FDM：Frequency Division Multiplexing）と時間分割多重（TDM：Time Division Multiplexing）を組み合わせしており、一巡するまでの送信時間をフレームとし、そのフレーム内の各送信タイミングをタイムスロットとしている。各タイムスロットでは帯域干渉

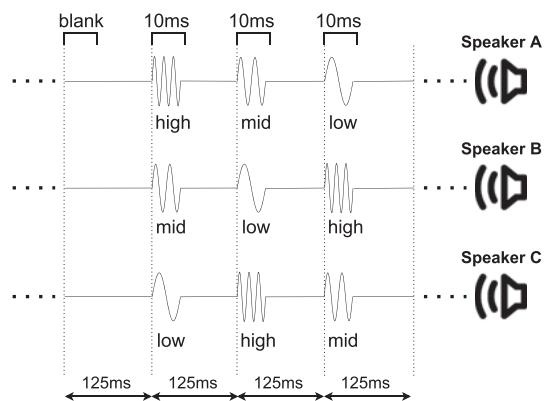


図3 提案する送信方式

を避けるよう設計されているため、効率的な信号伝送が可能である。

この送信方式の利点として、複数のタイムスロットを使用することで実質的な帯域が広がり、指向性に起因する信号の劣化を抑制できることが挙げられる。また、もともと十分な測位精度が確保されている領域では、単一のタイムスロットのみを使用することも可能であり、運用の柔軟性も高い。

#### ■成果

提案手法の評価実験を行った結果、誤差 1.0 m 以下の測位が実現する割合は従来手法の 78.77% から 100% へと大幅に改善されることを確認した。この結果により、本手法は音響測位システムの実環境への展開を促進する重要な基盤技術となることが期待される。

### 研究 3：BGM を用いた測位

#### ■背景

本研究では、ショッピングモールなど公共施設の BGM を用いた測位手法の開発を目的とした。一般的に広帯域信号を利用することで高精度な測位が可能となるが、モバイル端末のサンプリング周波数制限により非可聴帯域のみの使用は困難である。可聴域を用いる際には、利用者の不快感を抑える必要があり、BGM のような自然な音楽に信号を埋め込む手法が望まれている。

#### ■手法

提案手法では、人間が知覚しにくい微弱なエコーを BGM に埋め込む音響情報ハイディング技術を採用した (図 4)。具体的には、PN (擬似乱数) 系列をエコー拡散法で埋め込み、スピーカの ID 識別に用いる。また、ケプストラム解析を用いて埋め込まれた信号を分離し、これにより複数スピーカの到来時刻差を検出し、TDoA アルゴリズムにより位置推定を行う。

埋め込み信号のカーネル  $k$  を以下の式で表す。

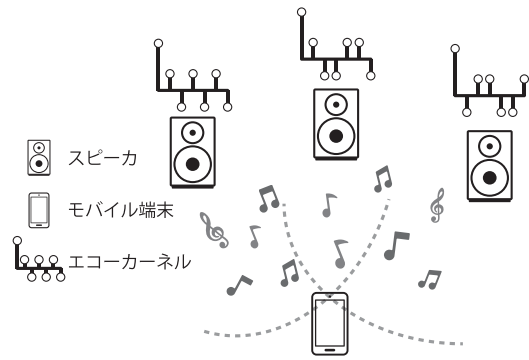


図 4 BGM を用いた測位手法の概要

$$k(t) = \delta(t) + \alpha p(t)$$

ここで  $\delta$  はディラックのデルタ、 $\alpha$  は PN の振幅、 $p$  は PN 系列である。音質と測位精度はトレードオフ関係にあり、PN 系列が長いほどエコー持続時間が延び、振幅が大きいほどエコーが顕著になる。一方で到来時刻差の検出には PN 系列の検出性能が高いことが重要であり、そのため系列が長く、かつ振幅が大きいほど有利になる。しかし、音質劣化を防ぐためには、適切なバランスでパラメータを調整することが必要である。

#### ■成果

客観的音質評価指標 ViSQOL を用いた評価では、系列長と振幅の調整により音質が許容範囲内であることを確認した (図 5)。

測位実験の結果、エコー拡散法を適用した BGM による高精度な測位が可能であることを示し、本手法が音響測位技術の新たな可能性を拓くものであることを確認した (図 6)。

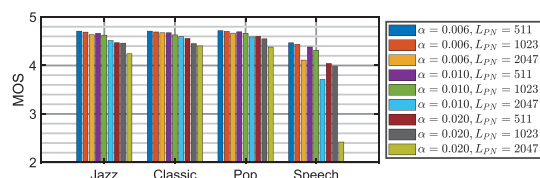


図 5 音質の評価実験

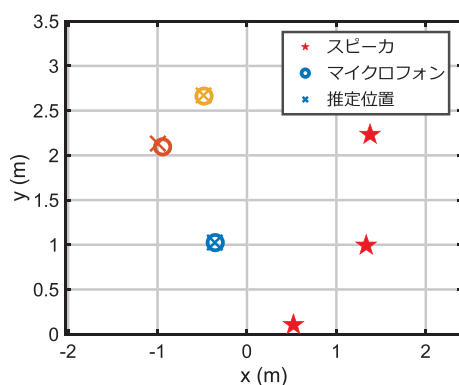


図6 測位実験の結果

### [まとめ、今後の展望]

研究1では、床面の反射波を利用した高精度な時刻同期手法を開発し、必要なスピーカ数の削減を実現した。研究2では、送信帯域の動的割り当てを通じて測位領域を拡張し、指向性による精度低下を克服した。研究3では、人間が知覚しにくいエコーをBGMに埋め込むことで、可聴帯域を利用した測位手法を提案し、高精度化を達成した。

これらの研究成果は、実際の施設運営において重要な基盤技術になることが期待される。今後の展望としては、提案した音響測位手法をWi-Fi, Bluetooth, UWBなど他の測位技術と統合したハイブリッド測位システムを構築し、各技術の長所を相互補完的に活用することで、より頑健で実用的な測位システムの実現を目指す。

### [成果の発表、論文など]

- Suzuki, T., Murakami, H., Nakamura, M., Watanabe, H., Hashizume, H., Sugimoto, M.: PT-Sync: COTS Speaker-based Pseudo Time Synchronization for Acoustic Indoor Positioning, In Proc. of IEEE IPIN 2022, pp. 1-8, 2022.
- 須崎, 中村, 村上, 渡邊, 橋爪, 杉本: 音響屋内測位におけるモバイルデバイスのための高精度測位領域の拡張手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 64, No. 11, pp. 1525-1536 (2023).
- 須崎, 中村, 村上, 橋爪, 杉本: エコー埋め込みを用いたBGMによる屋内測位, 情報処理学会 UBI 研究会, 2024.

## [研究助成 (C)]

## 脳下垂体腺腫の摘出手術のための三次元誘導技術の開発

2227007

研究代表者  
(助成金受領者)

埼玉医科大学 大学院医学研究科 博士課程

高 橋 優 太

共同研究者

埼玉医科大学 保健医療学部  
臨床工学科

教 授

若 山 俊 隆

## [研究の目的]

脳の下面中央に位置する脳下垂体およびその周辺領域に腫瘍が発生した場合、主な治療法として経鼻的内視鏡下手術が選択される。これは、鼻腔からアプローチし、頭蓋底を経由して腫瘍に到達する低侵襲手術であり、頭部を大きく開く必要がないという利点を有する。特に下垂体腺腫をはじめとする頭蓋底腫瘍に対して頻用されており、近年ではその安全性と有効性が広く認知されつつある。しかしながら、これらの腫瘍は時に周囲の重要構造物、すなわち海綿静脈洞や視神経、内頸動脈などと密接に接して浸潤することが多く、腫瘍の全摘出は容易ではない。わずかに腫瘍組織が残存した場合でも再発のリスクが高く、手術の成否は腫瘍の完全切除にかかっているといっても過言ではない。

現在、内視鏡技術の進歩に伴い、手術視野の拡大および術中操作の精緻化が進んでいる。特に三次元(3D)内視鏡の導入により、術者は奥行き感を得ながら手術を行うことが可能となった。しかし、現行の3D内視鏡は主にステレオ視方式に依存しており、その空間認識精度には限界がある。特に微細な解剖構造の識別や深部腫瘍へのアプローチにおいては、術者の経験と勘に頼る場面も多く、手術の安全性や正確性の向上にはさらなる技術革新が求められている。

そこで本研究では、同心円縞パターンの制御技術、内視鏡的三次元形状計測を高精度化する

キャリブレーション技術、三次元内視鏡の誘導システムの開発を目的とする。

## [研究の内容、成果]

## 1 年目：同心円縞パターンの制御

助成1年目はコロナ禍であり、申請者自身が臨床工学技士として総合病院で医療に従事しながらの研究開発であった。

申請者らはこれまでに光ファイバーのスキュー反射によって発生したコーンビームを用いた内視鏡的三次元形状計測手法について研究を進めてきた。しかし、この方法は機械的な走査を必要とするため、高速化に課題があった。そこで光ファイバーへ入射するレーザー光を空間的に制御することで同心円縞パターンを発生し、高速かつ高精度な手術野の三次元形状計測の実現を試みた。

まず光ファイバーを用いた細径の構造光発生装置を構築した。構造光は信号発生器によって周波数と位相を制御できる。構造光を評価するためにスクリーンに投影しCMOSカメラで観察した。このとき位相を90°ごとに変化させると構造光が変化した。位相の異なる4枚の画像を位相シフト法によって解析しアンラッピング処理を施した結果、アンラッピングによって±180°で折りたたまれた位相が滑らかに接続された。今回は平板をサンプルとしたが、試料に段差や凹凸が存在する場合にはその形状の変化から位相分布に変化がみられる。



この結果より同心円縞パターンの制御技術は確立できたが、この時点では十分な計測精度が見込めなかった。そこで本技術の基盤となるコーンビーム投影における内視鏡的三次元形状計測を高精度化するキャリブレーション法を開発することで、同心円縞パターンによる計測精度に生かそうと考えた。

本結果については特許化や論文化が完了していないため詳細は省略した。

## 2 年目：内視鏡的三次元形状計測を高精度化するキャリブレーション法の開発

申請者らがこれまでに提案しているコーンビーム投影による走査型の三次元内視鏡は、内視鏡内部にあるレンズの収差から計測精度に課題があった。そこで距離  $z$  に対するコーンビームの変化を 3 次関数でフィッティングして関数化し、精度の向上を図った。本キャリブレーションは、申請している三次元誘導技術の精度向上に繋がるものである。

図 1 に形状計測できる三次元内視鏡の実験装置を示す。三次元内視鏡の先端に搭載された光ファイバーから平板に対してコーンビームが投影される。三次元内視鏡を  $z$  方向に走査しながら光セクション面を CCD カメラで取得すると、図 2(a) のように距離によって同心円パターンが変化する。本来距離  $z$  に対してコーンビームは線形的に変化するはずだが、レンズ系の収差の影響で曲線を描く。試料板の距離  $z$  と半径  $\rho$  の関係は、角度  $\theta$  によって図 2(b) のような曲線を描くため、3 次関数で近似した。一方、3 次関数の係数  $a(\theta) \sim d(\theta)$  は図 2(c) に示すように変化するので、6 次関数で近似した。

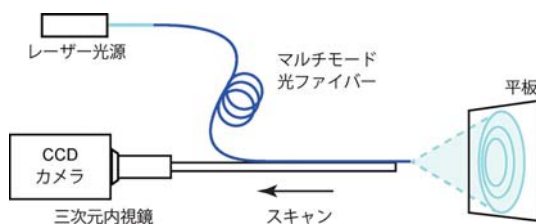


図1 形状計測できる三次元内視鏡の実験系

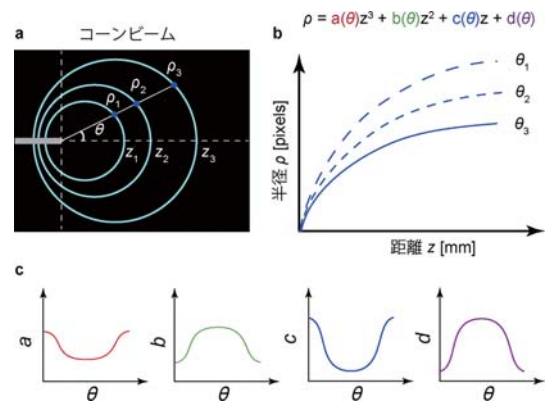


図2 (a) 平板に投影されたコーンビームの距離  $z$  に対する同心円パターンの変化。(b) 距離  $z$  に対するコーンビームの半径  $\rho$  の変化を 3 次関数でフィッティングする。(c) 3 次関数の係数  $a(\theta) \sim d(\theta)$  は角度  $\theta$  に対してさらに 6 次関数でフィッティングされる。

これらの関数化によって、撮像した光セクション画像から角度  $\theta$  毎に半径  $\rho$  を算出し、解の公式を解くことで距離  $z$  を決定することができる。さらに三次元形状計測の結果に残る設定値とのわずかな差を補正するために、角度  $\theta$  毎に距離  $z$  の設定値に対する実測値の関係も 6 次関数で近似した。6 次関数の係数  $a(\theta) \sim g(\theta)$  のルックアップテーブルを作成して形状計測の数値を補正した。

図 3(a) に精度検定のための平板の三次元形状計測結果を示す。全体的に緑色のマップになっており、ばらつきが小さいことがわかる。赤波線で示したエリアはキャリブレーション前の有効計測範囲であり、キャリブレーションによって計測範囲が拡大した。また、図 3(b) に距離  $z$  に対する点群のばらつきのヒストグラムを示す。距離  $z$  に対する正確度は 0.02 mm、精

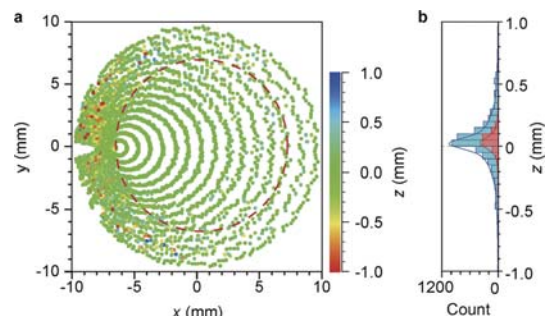


図3 (a) 平板を用いた精度検定の結果。カラーバーは距離  $z$  に対するばらつきを示している。(b) 距離に対するばらつきのヒストグラム。

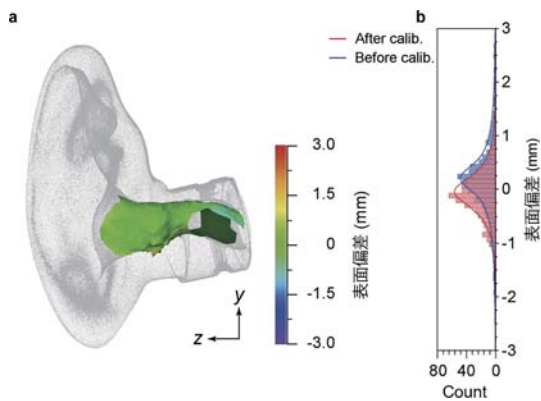


図4 (a) 医療応用としての外耳道の形状計測結果。グレーで示しているのはマイクロフォーカスX線CTデータ。またカラーマップは提案手法での計測結果であり、表面偏差をカラーで示している。(b) 表面偏差のヒストグラム。

度は  $\pm 0.06$  mm であった。この結果は、申請者らの先行研究と比較して 88% 改善されており、キャリブレーションによる精度の向上が実証された。

次に、臨床応用の一例として外耳道サンプルの形状計測を行い、本手法の妥当性を評価した。本手法による外耳道の形状計測は、危険性のある印象材を用いたオーダーメイド補聴器の型取りに代わるものである。図4(a)には申請者らの外耳道の測定結果を、X線CTで測定したデータとマッチングした結果を示す。ここでカラーマップは表面偏差を示している。図4(b)に示す表面偏差のヒストグラムのピークは、キャリブレーション前後でそれぞれ 0.2 mm と  $-0.05$  mm であり、キャリブレーションによって正確度が向上した。さらに、ヒストグラムの  $3\sigma$  における精度は、キャリブレーション前後でそれぞれ  $\pm 1.64$  mm と  $\pm 1.17$  mm であり、キャリブレーションによって精度は 28.7% 向上した。

助成2年目には、コーンビーム投影による形状計測が可能な三次元内視鏡のキャリブレーションを実証した。今後、本手法を同心円縞パターンによる三次元内視鏡に適用することで、高速かつ高精度な手術野の三次元形状計測が可能になると考えられる。

本成果については、2023年3月の精密工学

会春季大会にてベストプレゼンテーション賞を受賞した。また、2024年4月に米国の Applied optics 誌に掲載された。

### 3年目：三次元内視鏡の誘導システムの開発、および $\text{SpO}_2$ マッピングの基礎実験

2年目に開発した内視鏡的三次元形状計測を高精度化するキャリブレーション法によって、高精度な三次元形状計測が実証された。この手法を用いて脳下垂体腺腫の摘出手術のための三次元誘導技術を構築することを考えると、内視鏡の三次元姿勢計測が必要不可欠であった。そのため申請時の予定には含まれていなかったが、三次元姿勢計測技術の開発に注力した。三次元姿勢計測を行うために、ステレオカメラシステムを構築した。キャリブレーションボードにはドットパターンを使用し、実空間座標と計測座標とを変換行列を用いて補正するアルゴリズムを構築した。図5(a)～(d)には、距離  $z=400, 500, 600, 700$  mm にキャリブレーションボードが設置されたときの、計測されたドットパターンの距離に対する実空間座標からのばらつきを示す。カラーバーは  $\pm 50$  mm でばらつきを示しており、現状では内視鏡を誘導できるだけの精度は担保できていない。しかしながら、現状

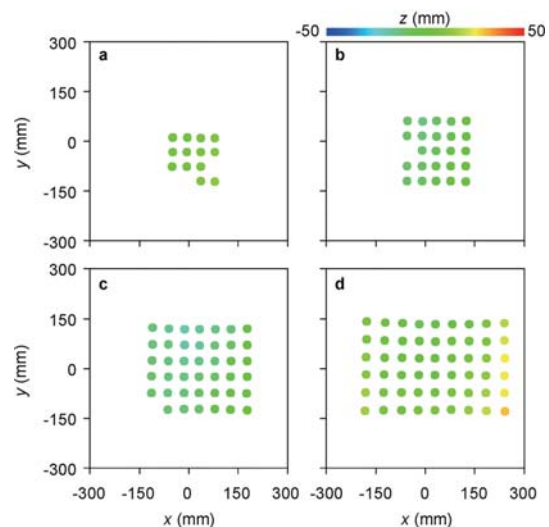


図5 (a)～(d) 距離  $z=400, 500, 600, 700$  mm のときの、計測されたドットパターンの距離に対する実空間座標からのばらつきを示す。

の精度で内視鏡の姿勢誘導のデモンストレーションを試みた。図6にはステレオカメラシステムによって撮影された3点マーカーのステレオペア画像を示す。これらの画像を解析することで、図7(a)～(d)に示すように実空間上でのマーカーの姿勢を取得することができている。今後、高精度に姿勢を推定可能なアルゴリズム

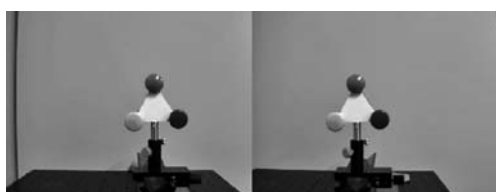


図6 ステレオカメラシステムによって撮影されたマーカーのペア画像

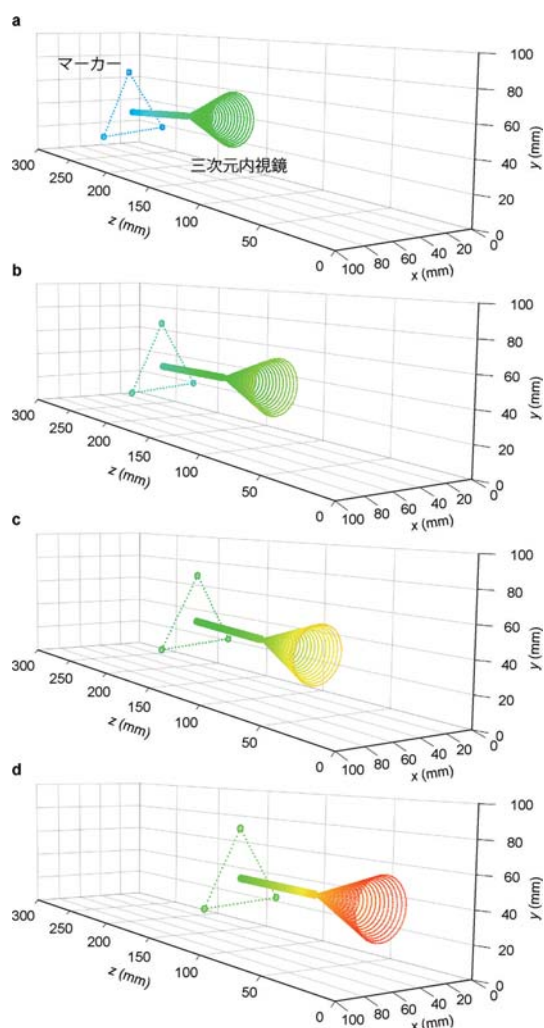


図7 解析によって得られた内視鏡誘導のデモンストレーション。(a)～(d)はそれぞれ $z=250, 200, 150, 100$  mmのときに計測された3点マーカーの位置座標。

の開発を目指す。

また、生体組織の $\text{SpO}_2$ マッピングについては、申請当初の予定からは遅れをとっているが異なる2波長のレーザー光源を使用することで、同時に2色の同心円縞パターンを制御することに成功している。こちらも特許と論文化前のため詳細は省略した。今後、適正な波長のレーザー光源を導入しながら $\text{SpO}_2$ マッピングを達成し、三次元内視鏡による形状計測との同時検出を行っていく。

### まとめ・今後の研究の方向

本研究では、鏡視下脳下垂体手術支援を目的とした三次元誘導技術の実現を目指し、光ファイバーによる同心円縞パターン制御、キャリブレーション手法の開発、三次元誘導システムの構築を段階的に実施した。特に、内視鏡内部のレンズ収差を補正するキャリブレーション手法が順調に進行したため注力した結果、論文化にも成功した。加えて、構築したステレオカメラシステムによる三次元姿勢計測、および2波長のレーザー光源を使用した2色の同心円縞パターンの同時投影も試行した。これらの進行度合いはまだ途中段階であり、今後、三次元内視鏡による $\text{SpO}_2$ と形状計測の同時検出を達成し、同心円縞パターン制御、キャリブレーション手法、三次元誘導システムと統合することで、脳下垂体腺腫の摘出手術のための三次元誘導技術の開発を目指していく。

### [謝 辞]

研究を遂行する上で埼玉医科大学大学院医学研究科の若山俊隆教授には多大なるご指導・ご鞭撻をいただいたので感謝申し上げます。また、本研究の中でも三次元内視鏡は、埼玉医科大学保健医療学部臨床工学科4年生の中井川剛氏にご協力いただいた。ステレオカメラによる姿勢誘導においては、東京工科大学医療保健学部臨床工学科の由居駿一氏にもご協力をいただいた。本研究は、COVID-19の感染拡大防止の緊急事態宣言下において、総合病院で臨床工学技士として臨床に従事する申請者にとって通常通りの研究時間を確保

することが不可能であったにもかかわらず、共同研究者の皆様の精力的な協力があって達成された。最後に本研究を支援して下さった立石科学技術振興財団には深く感謝いたします。

[成果の発表, 論文等]

○論文

- [1] **Yuta Takahashi**, Takeshi Higashiguchi, and Toshitaka Wakayama, "Calibration for endoscopic 3D shape measurement with cone beam projection," Applied Optics 63, 3058-3068 (2024).

○学会発表

- [2] **高橋優太**, 中沢優斗, 東口武史, 若山俊隆, 「コーンビーム投影による三次元内視鏡のキャリブレーション」, 精密工学会春季大会 (2023 年, 東京).  
[3] **高橋優太**, 中沢優斗, 東口武史, 若山俊隆, 「コーンビーム投影による三次元内視鏡」, OPJ2023 (2023 年, 札幌).

○受賞

**高橋優太**, 中沢優斗, 東口武史, 若山俊隆, 「コーンビーム投影による三次元内視鏡のキャリブレーション」, 精密工学会春季大会ベストプレゼンテーション賞 (2023 年, 東京).



## [研究助成 (C)]

iPS 細胞を用いた糸球体 MPS による高血糖, 脂質異常症,  
高血圧の相乗効果の評価

2247013



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

京都大学 大学院工学研究科  
理化学研究所  
生命機能科学研究センター

大学院生 田 渕 史  
チーム リーダー 高 里 実

## [研究の目的]

本研究は、生体外で糸球体濾過障壁の構造を模倣したデバイスを開発し、その機能の評価することを目的とする。糸球体はヒトの腎臓にある組織であり、血液を濾過し尿の元となる原尿を生成する機能を有する。この血液濾過の過程において、生体から余分な水分や老廃物、各種イオンなどを取り除くことによって、体内の恒常性維持を担っている。しかしながら、一部の薬物や生活習慣病などの病気によって糸球体を構成する細胞が障害され、その機能が低下することが知られている。そのため、新薬開発においては、新薬候補物質が対象とする病態に有効であることを確認するとともに、糸球体への毒性が抑えられていることを確かめる必要がある。しかしながら、現在の創薬プロセスにおいては主に動物実験によって糸球体への毒性を評価するが、ヒトと動物との種差が課題となり、正しく毒性が評価できない。そこで、本研究では、ヒト由来の細胞を用いたオンチップ糸球体を構築することによって、従来の種差という課題を解決可能なデバイスを開発することを目的とした。さらに、ヒト iPS 細胞の細胞ソースとしての有用性を検証するため、これまで広く糸球体研究に用いられてきたヒト不死化ポドサイトを用了。また、デバイスにおける濾過機能の評価を定量可能な手法の開発をおこなった。開発したデバイスにおいて、糸球体濾過機能の障害

性が知られている薬物の投与によってその機能が実際に低下するかどうかを評価することで、今後の創薬の過程において動物試験の大体手法として利用できる可能性を示すことを目的とした。

## [研究の内容、成果]

実験においては、まず CAD を用いてデバイス設計をおこない、微細加工技術によって PDMS 製のマイクロ流路をもつデバイスを作製した (図 1a, b)。次に、デバイス中のマイクロ流路に細胞や細胞外マトリクスを模倣した物質、培地などを導入することでデバイス中で細胞培養を可能とした。本実験においては、糸球体上皮細胞としてヒト iPS 細胞由来のポドサイ

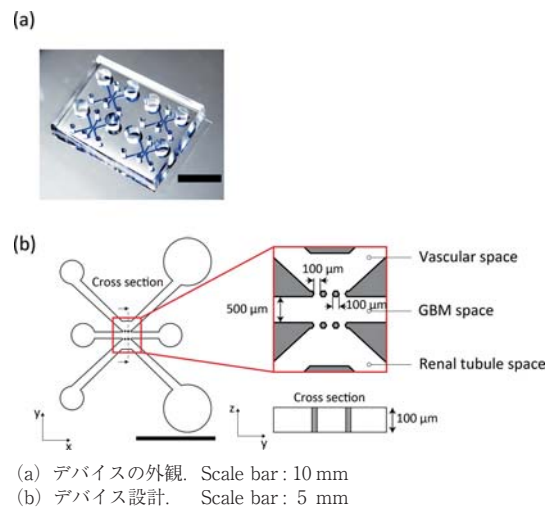
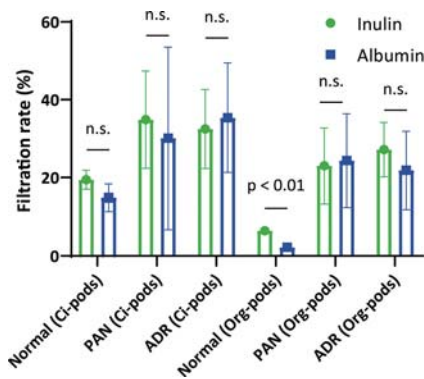


図1 デバイス概要



Ci-Pods : ヒト不死化ポドサイト  
Org-Pods : iPS 細胞由来ポドサイト

図2 濾過機能の評価実験の結果

ト、血管内皮細胞としてヒト臍帯静脈内皮細胞を用いた。これらの細胞を、実際の糸球体の濾過構造の様に層状となるようにデバイス内に配置し、糸球体濾過障壁の構造を模倣した。数日間の培養によってデバイスを安定させたのち、濾過機能の評価実験をおこなった。ヒト生体においては、分子量の大きな物質は濾過障壁を透過できない一方、比較的分子量の小さなものは透過できることが知られている。そこで本研究では、分子量の大きな血中タンパク質であるアルブミンと、濾過機能測定に使われるイヌリンを指標物質として用いた。これらの指標物質には蛍光タンパク質が付与されているため、デバイス中の透過の様子を蛍光顕微鏡下で観察した。さらに、実際の糸球体薬物障害をモデル化可能か検証するため、すでに糸球体への毒性が知られているピューロマイシンアミノヌクレオシド (PAN) とドキシソルビシン (ADR) を用いた。これらの薬物をデバイス中に投与し、数日間培養後、同様にアルブミンとイヌリンを用いて濾過機能の評価した。

さらに、以上の実験において iPS 細胞由来ポドサイトのコントロールとしてヒト不死化ポドサイトを用いた実験をおこなった。

作製したデバイスの機能評価実験において、通常の毒性薬物を加えていないデバイスにおい

ては、アルブミンとイヌリンの透過に違いがみられ、それらの透過には分子量依存的な差があることが確認できた。この結果は、構築した糸球体模倣デバイスが生体と同様の選択的濾過機能を持つことを示すと考えられる。また、PAN と ADR による薬物障害モデルでは、デバイスの濾過機能が低下するとともにアルブミンとイヌリンの濾過選択性もなくなる様子が観察された。この結果は、薬物障害による機能低下をデバイスを用いて表現できた結果であると考えられる。さらにヒト不死化ポドサイトにおいては、障害性物質を投与していない健常モデルにおいて、本来生体で見られるはずのアルブミンとイヌリンの間の選択性が見られないことが明らかとなった。以上の結果より、糸球体の濾過機能を模倣するデバイス構築には iPS 細胞由来ポドサイトが適することが示された。

本研究においては、微細加工技術と細胞培養技術を組み合わせ、生体の濾過機能を模倣するデバイスを開発してその実証をおこなった。デバイスの機能は濾過指標物質の透過を評価することで測定され、生体と同様の濾過選択性や、薬物による機能障害へ反応することを示した。一方で、その濾過機能は生体と同等とまでは至らなかった。これは、用いている細胞の成熟が低いことやデバイス中での培養期間の短さが一因として考えられる。今後は、これらの課題を工学的、生物学的両方の観点から解決へと取り組むことが必要であると思われる。

#### [成果の発表, 論文など]

**Ayumu Tabuchi,** Darryl Koh, Kensuke Yabuuchi, Yoshiaki Sahara, Minoru Takasato, Kazuya Fujimoto, and Ryuji Yokokawa. "Enhanced Glomerular Filtration and Podocyte Expression in Human iPSC-Derived On-Chip Glomerular Barriers with Spontaneous GBM Formation". The 19th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. May 2-5, 2024, Kyoto.

## [研究助成 (C)]

## 単語単位ラベルを考慮したテキストデータ拡張手法の研究

2237007

研究代表者  
(助成金受領者)同志社大学 大学院  
文化情報学研究科

博士後期課程

寺 本 優 香

共同研究者

同志社大学 文化情報学部

教 授

波多野 賢 治

名古屋大学 数理・データ科学  
教育研究センター

准教授

駒 水 孝 裕

## [研究の目的]

固有表現抽出とは、文中から人名や地名、組織名、日付表現、薬品名、遺伝子名といった特定の属性を持つ単語を抜き出す自然言語処理の基礎技術であり、医療・創薬分野での情報抽出やチャットボットなど様々な分野で利用されている。

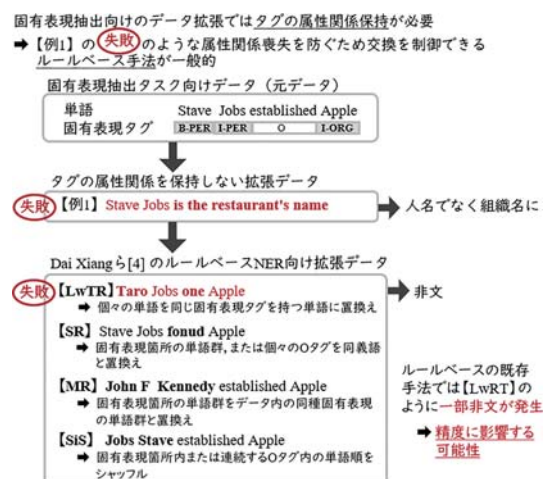
このタスクでは教師ありの機械学習モデルが頻繁に利用されており、近年は深層学習モデルが優れた性能を示している。しかし、その学習には大規模かつ高品質なデータが必要であり、特に分野固有の固有表現を扱う場合は、専門知識を持つアナوتاによるデータ作成が不可欠であり、人的コストが課題となっている。

固有表現抽出タスクで中心的役割を果たしてきたデータセットに CoNLL2003 があるが、その固有表現カテゴリ（人名・地名・組織名）は比較的粗い粒度であり、分野やアプリケーションによってはより細かい粒度が求められる。近年では、Ding らによって提案された FewNERD のように、政治家や作家など細粒なカテゴリに分けたデータセットも登場している。今後も使用目的に応じて多様な粒度・種類の固有表現カテゴリが求められることは自明である。

このようなデータ準備のコストを削減する方法の一つにデータ拡張がある。データ拡張は、小規模な学習データに対して加工や合成などの

処理を施し、新たなデータを生成して学習に用いる技術である。固有表現抽出タスクでは、単純なルールに基づく交換・挿入・削除といった手法が主流であり、これは系列ラベリングにおいて単語の並びの構造的整合性を保持する必要があるためである。本手法の目的は、既存手法のルールベースを発展させ、固有表現抽出のデータ拡張において新たな置換可能条件を明らかにすることである。

## [研究の内容、成果]



既存手法の交換対象は同種のトークン・単語境界範囲内か、同一文中に出現する他のセグメントに限定される。本研究では NLP で伝統的に用いられる構文木と格フレームを手掛かりと



し、より広範囲の境界線を探索する。前者の構文木は部分木ごとに文構造上のまとまりを取得でき、後者は固有表現と関連する規則性とみなされている。

#### 着眼点・目標

- ・Oタグの交換はより制約を追加して行われるべきという仮定
- ・文法上の機能が類似した単語同士での交換拡張により、拡張データの文法的規則上の破壊を抑制

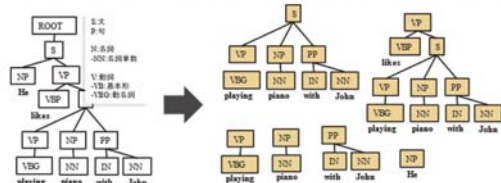
#### ① POSタグを用いた手法

ひとまとまりの固有表現箇所・またはOタグを持つ単語に対し、以下の交換規則を設定



#### ② SubTreeを用いた手法

- ・文法構造を表現する構文木より部分木 (SubTree) を取得
- ・同じ機能を持つ部分木同士を交換
- ⇒ 同じ深さと属性を持つ部分木の交換による拡張は構造・意味的に合理的[6-8]



構文木の検証では子ノードを二つ以上もつような部分木を交換対象とする。図の例では計3パタンの部分木が得られる。元データ全体の整合性を担保するため、そこから得られた用法の近い部分木、あるいは名詞同士を置換候補とした。これにより、固有表現箇所以外の交換についても実現が可能となる。上記の両手法について、既存の置換手法と置換候補の幅、データ品質を比較し検証する。

我々の実験において比較に採用する既存手法および提案手法の略字表記と簡単な説明を以下に記す。

**MR**：既存手法。固有表現を同種固有表現と交換

**MR+POS**：MRにおいて、交換条件にPOSタグが同じことを追加

**OLwTR**：Oタグを持つ個々の単語同士を交換

**OLwTR+POS**：において交換条件にPOSタグが同じことを追加

**MR+OLwTR**：MRとOLwTRを同時に適用

**MR+OLwTR+POS**：MR+OLwTRにおい

て交換条件にPOSタグが同じことを追加

**TreePos**：交換条件にTreePosの深さ属性を追加

なお、解析器の違いなどによるセグメントの差に関する取扱い、使用データ、使用ツール、データ拡張時の実験設定については、以下の図に記す。

#### 前処理

##### Case1. 2種類のタグ数不一致

Few-NERDにおける固有表現タグ  
Rolls-Royce  
product-car  
品詞解析器によるPOSタグ  
NNP HYPH NNP  
提案手法により付与されるタグ  
Rolls-Royce  
product-car  
NNP

##### Case2. トークンの抜け漏れ

over N 100 million  
product-car  
over 100 million  
IN CD CD  
over N 100 million  
IN CD CD CD

#### 実験設定

- ・使用データ：Few-NERD 解析ツール：Stanford CoreNLP
- ・元のデータセットと同じタグ比率の3/167スケールデータを作成
- ・単語・固有表現の交換発生確率0.7 元データ：拡張後データ=1:10

実験の結果、交換にPOSタグを考慮した手法群では、もともとのデータセットにおいて、複数のトークンから成立する固有表現が多く含まれるカテゴリのRecallが向上した。使用したデータセットでは、主に紛争名、災害名などのカテゴリがこれにあたる。一方で、Oタグにあたるトークンを変更した手法では、固有表現・一般名詞両方の用途がある単語に対する正答率が低下した。

具体的な例としては、「民主党」あるいは「民主的な(形容詞)」の両方の意味を持つDemocraticという固有名詞がこれに該当する。一般名詞として使用される場合には、特定の文脈のみに出現していたが、ルールを設定したランダムな交換によりその規則性が無くなり、文脈情報が失われたと考えられる。こうした傾向は、とりわけMR+OLwRT+POSを用いた場合に、Democraticのような複数の意味を持つ単語を含んだ固有表現箇所でも頻繁に発生した。以下の表は、本研究の結果、得られた成果である。

提案手法は、ごく少数のデータを使用するようなカテゴリの分類では、既存手法よりわずかに精度が向上した。一方、オリジナルのデータが数十件程度確保できる場合には、既存手法によるデータ拡張のほうがより高精度であった。



| method         | proposed | macro-AC | macro-F1 | macro-P | macro-R |
|----------------|----------|----------|----------|---------|---------|
| Original-small |          | 0.915    | 0.626    | 0.604   | 0.650   |
| MR             |          | 0.902    | 0.562    | 0.528   | 0.601   |
| MR+POS         | ✓        | 0.902    | 0.562    | 0.527   | 0.602   |
| OLwTR          |          | 0.902    | 0.570    | 0.545   | 0.597   |
| OLwTR+POS      | ✓        | 0.903    | 0.578    | 0.552   | 0.606   |
| MR+OLwTR       |          | 0.901    | 0.560    | 0.529   | 0.594   |
| MR+OLwTR+POS   | ✓        | 0.902    | 0.569    | 0.540   | 0.603   |
| SubTree        | ✓        | 0.900    | 0.536    | 0.540   | 0.593   |

また、100 件程度の正解データを確保できる場合、提案手法・既存手法ともにデータ拡張はかえって精度の低下につながるということが明らかになった。このことから、生成系モデルなどである程度のデータ量が確保できる一般的なドメインの固有表現抽出タスクでは、現時点では

データ拡張そのものがあまり現実的ではない可能性がある。一方で提案手法は、歴史的な書籍など少数のデータの利活用が必要なドメインにおいて有効である可能性が示唆される。

#### 〔成果の発表、論文など〕

寺本優香，駒水孝裕，波多野賢治：“固有表現タグおよび POS タグによる交換制約付きデータ拡張手法”，第 15 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム予稿集，No. 1b-6-4，March 2023.（学生プレゼンテーション賞 受賞）

寺本優香，駒水孝裕，波多野賢治：“POS タグおよび構文木の SubTree を用いた NER 向けデータ拡張手法”，東海関西データベースワークショップ 2023

## [研究助成 (C)]

サービス動的個人適応に向けた対話型  
ユーザニーズ外化システムの研究開発

2247014



研究代表者

神戸大学 大学院工学研究科 博士後期課程

中 田 匠 哉

## [研究の目的]

情報社会では、ユーザ個々のニーズに応じた適切なサービスの提供を目指す個人適応サービス技術が発展している。短期的・表層的なニーズへの適応は進んでいるが、真に求められるのは本質的なニーズである個人の指向への適応である。しかし、指向の明確な認知や言語化が困難であるため実現できていない。ユーザのあるがままの在り方を尊重する次世代の人間中心社会におけるサービスは、長期的・深層的な性質を持つ個人の指向に寄り添うべきである。

本研究の長期的な目的は、本質的な人間の指向を尊重することで内面から人々の生活を豊かにするサービス提供の実現である。そのための短期目標として、本研究課題ではAIエージェントとユーザ主導で対話を行うことで真の個人ニーズを外化する手法の実現に取り組む。将来研究におけるニーズ駆動の個人適応型サービス推薦・開発の足掛かりとする。

AI との対話を通じた人間と機械（情報技術）の調和によって人間主体で人間のニーズの本質に迫るといふ、人間と機械の共創における大きな課題に挑戦する。これにより、人間だけ機械だけでは見落としがちなマイノリティを含む誰もが快適なサービス社会の実現を目指す。

提案手法は、図1に示す(1)ニーズを外化する対話エージェント、(2)ニーズを表現するモデル、(3)ニーズ変化への動的適応、の3つの手法で構成される。

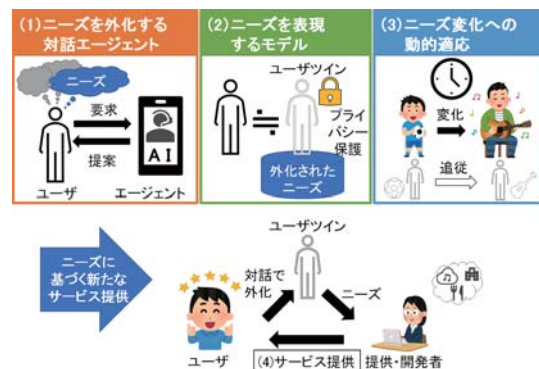


図1 真の個人ニーズ外化手法の全体図

## [研究の内容、成果]

1年間の研究助成期間において、提案手法で挙げた(1)～(3)の3つの手法に取り組みその成果を国内の多くの学会で発表した。さらに、長期目標である(4)ニーズを用いたサービス提供、にも取り組むことで将来課題の解決に大きく躍進した。以下で(1)～(4)に関する計9件の研究成果を順に報告する。

## (1) ニーズを外化する対話エージェント

## [1] ユーザニーズを自動抽出するチャットボット

サービス利用の増加に伴って、サービス利用形態もユーザごとに多様化している。エンドユーザのサービス要求の聞き取りは主にアンケートによって行われている。システムエンジニアのような専門家による個別の聞き取りは高コストであり行われていない。本研究では、特定のサービスに関するユーザニーズを手軽に

収集する手法の構築に取り組んだ。既存 Web アプリケーション上に追加実装するチャットボットとして対話型ニーズ抽出システムを再構築した。

図2に提案手法のアーキテクチャを示した。以下の2つのアプローチで既存 Web アプリケーションの一部としてニーズ抽出チャットボットを構築した。(A1) 特定サービスに関するニーズ抽出手法, (A2) 実装容易なニーズ抽出チャットボット。

図3は、実際に既存 Web アプリケーション上に追加実装した画面である。ユーザが入力フォームに要求を入力することでニーズ抽出できる。ニーズを解析する LLM のモデルには gpt-4o-mini-2024-07-18 を使用した。サービスの名称と概要を事前にデータベースに登録し、JSX コンポーネントを追加する簡単な作業工程によってチャットボットを実現した。

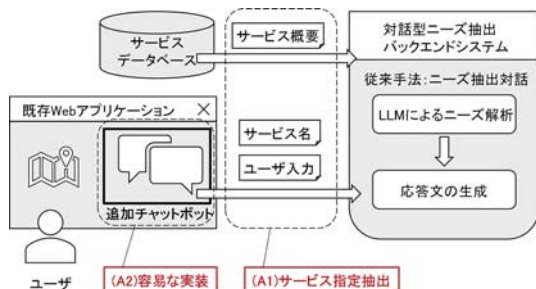


図2 ニーズ抽出チャットボットの設計



図3 ニーズ抽出チャットボットの実装

## [2] 画像認識と音声対話を用いたエージェントによる高齢者の忘れ物防止サービス

我々の研究グループでは仮想エージェントを用いて、在宅高齢者が日常生活の中で感じる不安や悩みを話すことで、心のケアを行う仮想

エージェント傾聴サービス（VA 傾聴サービス）を開発しており、VA 傾聴サービスでは、ユーザとの対話の中で多くのマイクロサービスを提供している。その中の予定リマインドサービスに着目し、従来は予定のみをリマインドしていたが、予定に必要な持ち物を追加でリマインドすることを目指す。

本研究では、一人暮らしの高齢者それぞれの予定に合わせた持ち物をリマインドすることで忘れ物を防ぐことができる「忘れ物防止サービス」の開発を行った。(A1) ユーザ登録及び予定に対する持ち物登録, (A2) 外出時, 帰宅時の画像を取得し, 持ち物判別, (A3) ユーザIDと予定名から忘れ物リストを取得, (A4) VA 傾聴サービスを通したリマインド, の4つの機能を提案した。

本研究によって、画像認識と音声対話を組み合わせた忘れ物に関するユーザの状態およびニーズの取得が可能となった。

### [3][4] 表情による感情認識を用いた体調推定手法

独居高齢者の日々の体調を把握することは病気やけがの早期発見の観点から重要である。しかしながら、既存の安否確認や見守りサービスでは高齢者が自ら体調不良を伝えるしかないという問題点が存在する。本研究では体調別の演技をした表情を撮影した画像の感情推論結果に主成分分析を適用し、得られた主成分得点を特徴量に機械学習で分類することで体調分類の精度が上がるかどうか評価する。

具体的には、(A1) 七つの感情値に対する主成分分析, (A2) 主成分分析結果から特徴量を選択, (A3) 個別モデルと全体モデルに分けて機械学習モデルを構築, (A4) happy のみか主成分分析結果を用いた個別モデルの比較, (A5) 個別モデルと全体モデルの比較, の5つのアプローチで研究に取り組んだ。また、体調分類モデルの構築を個人ごとに行う必要があるかを検討した。評価の結果、感情推論結果に個人ごとに主成分分析を適用することで図4に示す高精度モデルを構築できることが分かった。

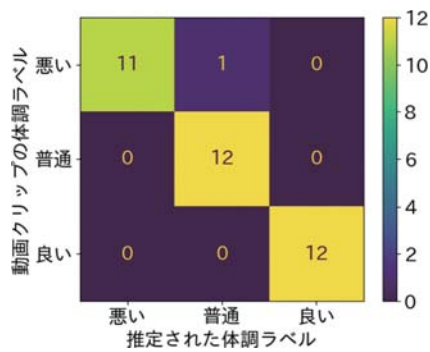


図4 個別モデルによる体調推定結果

本研究によって、ユーザニーズにおいて重要な表情というリアルタイムコンテキストをVAで取得することが可能となった。

## (2) ニーズを表現するモデル

### [5][6] 生成AIとの対話ログに基づく課題解決事例の蓄積・共有サービス

近年の生成AIの発達により、幅広い分野で問題解決の手法として生成AIとの対話が活用されている。しかし、その効果はユーザのプロンプト作成能力に大きく依存し、十分に生成AIの威力を発揮できていない場面が多々ある。また、生成AIとの対話によって問題を解決した際、その対話ログは価値が高いものであるが、そのまま放置され再度見られることはない。

そこで、生成AIとの対話ログを点数付けや質問背景を含めて蓄積・共有し、集合知を醸成することができるアプリケーションを開発することによってこの問題を解決する手法を提案した。具体的には、集合知を醸成するWebアプリケーション；ChatHubAI（以下、略称CHAI）の開発を行った。本研究のアプローチとして、CHAIの機能を以下のように分類した。（A1）チャットインターフェイス（A2）コンテキストを含めた対話ログの保存（A3）保存された対話ログの閲覧・検索。

また、その有用性を評価するために、研究室を一組織として一週間CHAIを配備し利用者の問題解決能力向上や組織内での知識共有の促進、生成AIとの対話内のハルシネーションに

対する対策の有効性に関するアンケートを行った。その結果、CHAIを利用することによって問題解決能力向上や組織内での知識共有の促進に寄与することが確認された。また、ハルシネーションに対する対策も有効であることが確認された。

本研究によって、ユーザの困りごとというニーズを入力としてLLMが出力したデータモデルを用いて集合知を醸成する手法を構築した。本成果はニーズによる個人ごとのニーズモデルの構築に大きく貢献した。

## (3) ニーズ変化への動的適応

### [7] 双方向対話による個人適応型スマートシステム

普及と複雑化が急速に進むスマートシステムにおいて、ユーザが要望通りに設定を構築することは容易ではない。我々の先行研究では、対話によってサービス設定を自動化することを目的として、対話型個人適応フレームワークSSIPの概念設計を行った。しかし、対話の技術的困難さから具体的なSSIPの実現には至っていなかった。

LLMの発展により対話技術が容易化されたことを受け、本研究ではSSIPの具体的な技術設計に取り組む。SSIPの主要な要素として双方向対話・ニーズ抽出・機能決定アルゴリズム・サービス自動設定を切り出し、特定の技術によらない汎用的なフレームワークとして実現した。図5にSSIPフレームワーク設計アーキ

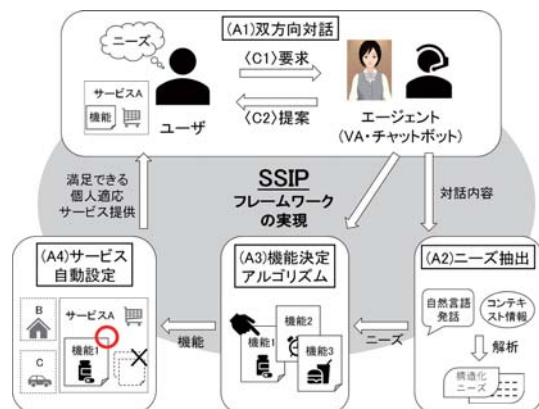


図5 SSIP フレームワーク設計アーキテクチャ



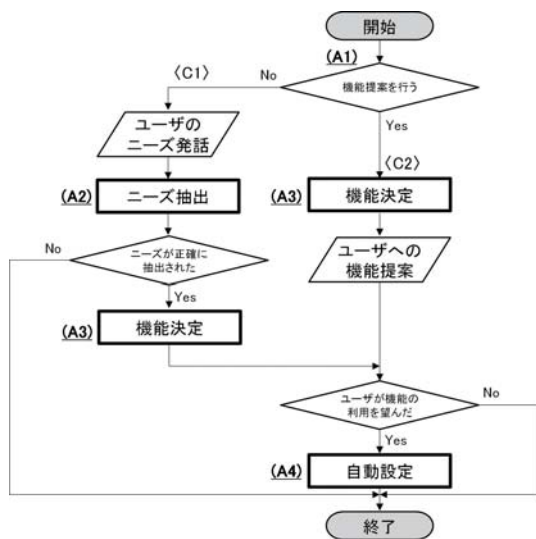


図6 SSIP 個人適応フロー

テクチャを示す。具体的には、(A1) 双方向対話、(A2) ニーズ抽出、(A3) 機能決定アルゴリズム、(A4) サービス自動設定、の4つのモジュールで構成される。

さらに、対話による個人適応の流れを図6に示すフロー図として具体化した。ケーススタディでは提案した設計手法に従ってSSIPを実装した。

本研究によって、対話の中で動的にユーザーニーズを取得するプロセスを具体的に設計した。特に、ユーザー主体の要求だけでなく、エージェント主体の提案型個人適応のフローを組み込んだ実用的なフレームワークとして実現したことが大きな貢献である。

#### (4) ニーズを用いたサービス提供

##### [8] ソフトウェアアップサイクル事例自動蓄積手法

ソフトウェアアップサイクルとは、既存のソフトウェア資源を再利用することでソフトウェア開発プロセスの効率化を目指す手法である。先行研究では、手入力でアップサイクルの実績を事例として共有するSUCCEEDシステムがある。共有された具体的なアップサイクルの実績を参考にして開発を行うことで、手軽にアップサイクルを行うことができるシステムである。

本研究では、Stack OverflowのQ&Aとアッ

プサイクル事例の類似性に着目し、大規模言語モデル(LLM)を活用した事例自動蓄積手法を提案した。Web APIを活用してデータ取得・変換・登録フローを全て自動化した。具体的には、以下の3つのアプローチで行った。(A1) Web APIによる開発知見の取得、(A2) LLMによるデータ形式の変換、(A3) SUCCEEDシステムへの事例登録。提案手法は定期実行スクリプトを用いて図7に示す通り具体的に実装した。

ユーザー個人のサービス開発コストの低減は、ニーズを用いたサービス提供に向けた解決すべき課題である。本研究は、自動蓄積によるアップサイクルの効率化によってサービス提供の効率化に貢献した。

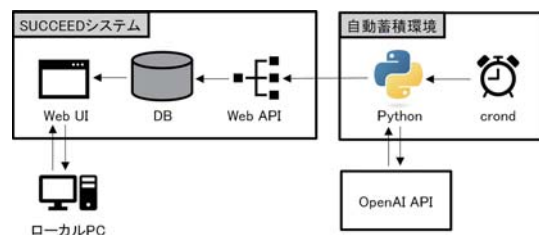


図7 自動蓄積手法の実装アーキテクチャ

##### [9] ニーズに基づくサービス開発の効率化手法

本研究では、ユーザーの具体的なニーズを理解し、それに基づいたサービス開発を可能にする技術の開発に注力した。先行研究で開発されたVAを用いた対話型ニーズ抽出システムとSUCCEEDシステムの活用により、ユーザーニーズの自動抽出と開発者への知見提供を実現した。新規未開発サービスに対する対話型ニーズ抽出手法とニーズに基づく開発事例取得手法を提案した。具体的には、以下の3つのアプローチで研究を進めた。(A1) 新規サービスニーズの抽出、(A2) ニーズの充足に役立つアップサイクル事例の取得、(A3) ニーズと開発アプローチの提示。提案手法の全体アーキテクチャを図8に示す。また、ニーズ抽出から事例の取得までの全体の流れを図9に示すアプリケーションとして具体的に実現した。本研究に

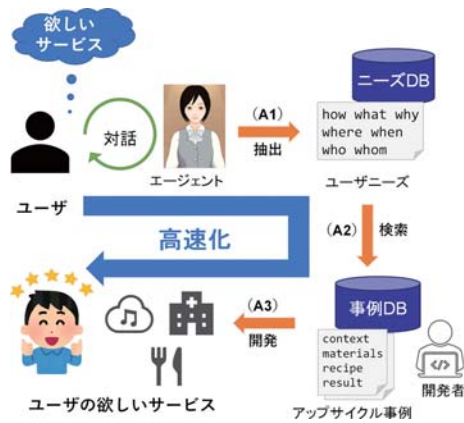


図8 ニーズベース開発アーキテクチャ



図9 ニーズ抽出対話の実装画面

よって、真のユーザーニーズに基づくサービス提供フローのプロトタイプを具体的に実現した。

これらの研究成果は、ユーザー一人ひとりが自身のニーズをサービスに反映させるための能動的な対話行動を可能にし、人間と機械の調和によるサービス社会の実現に大きく貢献するものである。

#### [成果の発表、論文など]

##### 査読有り

- [1] 中田匠哉, 佐伯幸郎, 中村匡秀: Web アプリケーション上でユーザーニーズを自動抽出するチャットボットの実装, ソフトウェア工学の基礎ワークショップ FOSE2024, pp.205-206, 2024

##### 査読なし

- [2] 神谷岳, 松川晃徳, 岡本大, 中田匠哉, 陳思楠, 安田清, 中村匡秀: 画像認識と音声対話を用いた高齢者の忘れ物防止サービスの提案, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 429: SS2024-64, pp. 121-127, 2025
- [3] 西山敦紀, 中田匠哉, 陳思楠, 佐伯幸郎, 中村匡秀: 表情による感情認識を用いた体調推定手法の開発と評価, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 444: LOIS2024-85, pp. 77-84, 2025
- [4] 西山敦紀, 中田匠哉, 陳思楠, 佐伯幸郎, 中村匡秀: 表情による感情認識を用いた体調推定手法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 245: SC2024-32, pp. 56-64, 2024
- [5] 日野翔天, 中田匠哉, 陳思楠, 佐伯幸郎, 中村匡秀: 生成 AI との対話ログに基づく課題解決事例の蓄積・共有サービスの評価, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 444: LOIS2024-89, pp. 109-115, 2025
- [6] 日野翔天, 中田匠哉, 陳思楠, 佐伯幸郎, 中村匡秀: 生成 AI との対話ログの蓄積・共有による組織内集合知の醸成, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 245: SC2024-23, pp. 1-6, 2024
- [7] 中田匠哉, 佐伯幸郎, 中村匡秀: 双方向対話を活用した個人適応型スマートシステムの設計と実現, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 245: SC2024-23, pp. 1-6, 2024
- [8] 中田匠哉, 陳思楠, 佐伯幸郎, 中村匡秀: ソフトウェアアップサイクル事例自動蓄積手法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 71: SC2024-12, pp. 65-70, 2024
- [9] 中田匠哉, 陳思楠, 佐伯幸郎, 中村匡秀: ニーズに基づくサービス開発の効率化に向けたソフトウェアアップサイクル手法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 123, no. 414: SS2023-50, pp. 7-12, 2024

## [研究助成 (C)]

## 機械学習を用いた低侵襲かつ汎用的な腎臓病診断支援モデルの構築

2237009

研究代表者  
(助成金受領者)

共同研究者

聖マリアンナ医科大学  
腎臓・高血圧内科聖マリアンナ医科大学  
腎臓・高血圧内科聖マリアンナ医科大学  
腎臓・高血圧内科大学院生/  
診療助手

准教授

主任教授

野田 竜之介

市川 大介

柴垣 有吾

## [研究の目的]

IgA 腎症は、世界で最も頻度の高い原発性糸球体腎炎の一つであり、診断後 20 年以内に 30-40% の患者が末期腎不全に至る。早期発見と治療が重要であるが、確定診断には侵襲的な腎生検が必要であり、合併症のリスクもある。本研究の目的は、以下の 2 点である。

1. 腎生検に頼らず、血液検査や尿検査などの一般的な臨床データを用いて IgA 腎症を非侵襲的に診断予測する機械学習モデルを開発し、検証すること。
2. 従来の統計モデル（ロジスティック回帰）と比較して、機械学習モデルが IgA 腎症の診断において高い精度と信頼性を持つことを示すこと。

## [研究の内容, 成果]

本研究は、聖マリアンナ医科大学病院で腎生検を受けた成人患者のレトロスペクティブなデータを用いたコホート研究である。2006 年 1 月から 2022 年 9 月までに腎生検を受けた患者を対象とし、診断が不確かな患者、複数の主要な診断がある患者は除外した。最終的に 1268 名の患者が解析対象となり、2006 年 1 月から 2019 年 12 月までのデータを開発コホート (n=1027)、2020 年 1 月から 2022 年 9 月まで

のデータを検証コホート (n=241) とした。

潜在的な予測変数として、人口統計学的特徴（年齢、性別、身長、体重、BMI）、血液検査項目（白血球数、ヘモグロビン、総蛋白、アルブミン、BUN、クレアチニン、尿酸、AST、ALT、ALP、LDH、CK、総コレステロール、グルコース、HbA1c、CRP、IgG、IgA、IgM、C3、C4、IgA/C3 比、抗核抗体）、尿検査項目（尿蛋白/クレアチニン比、尿中赤血球）を収集した。欠損値は k-最近傍法で補完し、4 つの変数選択手法（LASSO, Random Forest-Recursive Feature Elimination, Random Forest-Filtering, SelectFromModel with Extra Trees）を組み合わせ、最終的に 14 個の予測変数（年齢、ヘモグロビン、総蛋白、アルブミン、LDH、CK、CRP、IgG、IgA、C3、C4、IgA/C3 比、尿中赤血球、尿蛋白/クレアチニン比）を選択し、機械学習モデルに組み入れた。

モデル開発には、5 つの機械学習法（XGBoost, LightGBM, Random Forest, Artificial Neural Network, 1D-CNN）とロジスティック回帰を適用した。開発コホートで 5 回反復 5 分割交差検証とベイズ最適化を用いてハイパーパラメータを調整し、AUROC（Area Under the Receiver Operating Characteristic curve）と AUPRC（Area Under the Precision-Recall Curve）で識別能を評価した。また、95% 信頼区間は 1000 回のブートストラップ反

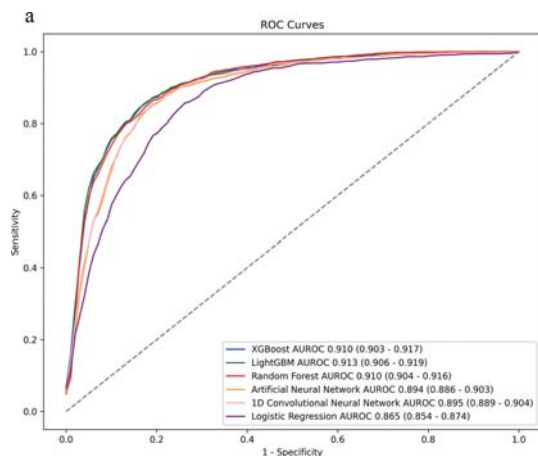
復で推定し、Deep ROC 解析で識別能を詳細に評価、キャリブレーションプロットと Brier スコアでモデルの較正能と総合性能を評価した。

結果、開発コホートでは LightGBM は 0.913 (95% CI 0.906-0.919) という最も高い AUROC を達成した。これは、ロジスティック回帰、Artificial Neural Network, 1D-CNN よりも有意に高く、XGBoost および Random Forest とは有意差はなかった (図 1a)。検証コホートでは、XGBoost が 0.894 (95% CI 0.850-0.935) という最も高い AUROC を示したが、他のモデルと有意差は認めなかった (図 1b)。

AUPRC も同様の傾向を示し、開発コホートにおいて、XGBoost の AUPRC は 0.779 (95%

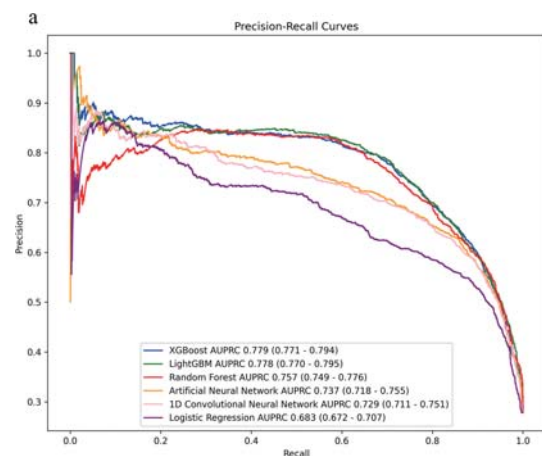
CI 0.771-0.794) であり、ロジスティック回帰、Artificial Neural Network, 1D-CNN よりも有意に高く、LightGBM および Random Forest とは有意差はなかった (図 2a)。検証コホートでは、XGBoost が同様に 0.748 (95% CI 0.630-0.846) という最も高い AUPRC を記録したが、他のモデルとの間に有意差は見られなかった (図 2b)。

キャリブレーションプロットは良好な較正能を示し、Brier スコアは 0.107 から 0.131 の範囲であった。Deep ROC 解析を用いて、開発コホートおよび検証コホートにおける各機械学習モデルのグループ正規化 AUROC を確認したところ、XGBoost と LightGBM は、偽陽性率



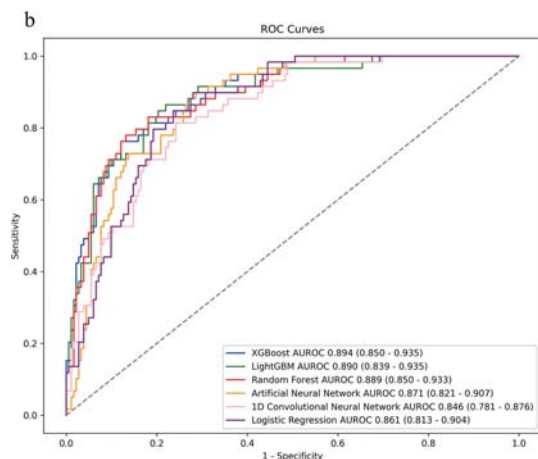
(文献 1 より引用)

図 1a 開発コホートにおける予測モデルの ROC 曲線



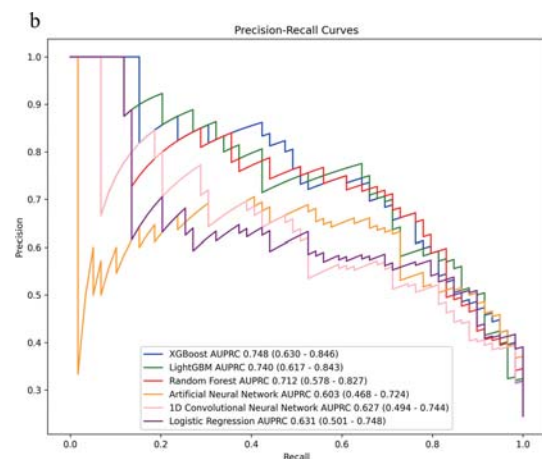
(文献 1 より引用)

図 2a 開発コホートにおける予測モデルの PR 曲線



(文献 1 より引用)

図 1b 検証コホートにおける予測モデルの ROC 曲線



(文献 1 より引用)

図 2b 検証コホートにおける予測モデルの PR 曲線



で分割された3つのグループすべてにおいて、良好なグループ正規化 AUROC を示した。

さらに、モデルの解釈のために SHAP (SHapley Additive exPlanations) 法を用い、予測に重要な変数を特定した。その結果、年齢、アルブミン、IgA/C3 比、尿中赤血球が、予測に重要な変数であることが明らかになった。感度分析として、データを分割せずに 10 分割交差検証を行った結果でも、LightGBM が最も高い AUROC を示し、XGBoost と Random Forest とは有意差がないことを確認した。

本研究では、IgA 腎症の診断における機械学習モデルの有用性を検証した。複数の機械学習モデルを評価した結果、XGBoost, LightGBM, Random Forest が従来のロジスティック回帰モデルよりも高い予測性能を示すことが明らかになった。これらのモデルは、年齢、血清アルブミン値、血清 IgA/C3 比、尿中赤血球といった既知の重要な予測因子を捉え、さらに予測因子と IgA 腎症の関連が非線形である可能性を示唆した。これは、機械学習が IgA 腎症の非侵襲的診断に有用である可能性を示唆している。

先行研究と比較して、本研究はより大規模なデータで複数のモデルを統計的に比較評価した点に強みがある。特に、ツリーベースの機械学習モデルである XGBoost, LightGBM, Random Forest の優れた性能は、他の疾患予測研究とも一致しており、これらのモデルが IgA 腎症の非侵襲的診断に有用である可能性を裏付けている。SHAP 分析によってモデルの予測根拠を解釈した結果、年齢、アルブミン、IgA/C3 比、尿中赤血球が重要な予測因子であ

ることが改めて確認され、これらの因子と IgA 腎症の複雑な関係性が示唆された。

本研究の臨床的意義として、簡便で正確な非侵襲的診断モデルが開発可能であること、日常臨床で得られるデータのみでモデルが利用できるため追加コストがかからないこと、重要な変数の特定と関係性の可視化が新たな臨床的視点を提供できることが挙げられる。一方で、単一施設データであること、サンプルサイズに限界があること、対象患者が広範であることなどが研究の限界として指摘され、今後の多施設共同研究による検証が求められる。結論として、機械学習モデルは IgA 腎症の診断予測に有用であり、特に XGBoost, LightGBM, Random Forest は、従来の統計モデルよりも高性能で、複雑なデータ構造も扱えることから、非侵襲的かつ信頼性の高い診断法として期待される。

本原稿で使用した図は全て文献 1 Sci Rep. 2024 May 30; 14(1): 12426. から引用した。

#### [成果の発表, 論文など]

1. Noda R, Ichikawa D, Shibagaki Y. Machine learning-based diagnostic prediction of IgA nephropathy: model development and validation study. Sci Rep. 2024 May 30; 14(1): 12426.
2. Ryunosuke Noda, Daisuke Ichikawa, Yugo Shibagaki. Machine Learning Models for IgA Nephropathy Diagnosis: A Retrospective Study on Predictive Performance and Influential Variables. ASN Kidney Week. Nov 2023.
3. 野田竜之介, 市川大介, 柴垣有吾. 機械学習による血液・尿検査を用いた IgA 腎症の診断予測. 第 53 回日本腎臓学会東部学術大会. 2023 年 9 月.

## [研究助成 (C)]

高 MHz 帯域の強力超音波を用いた小型光流体レンズの開発と  
マシンビジョンへの応用

2247015

研究代表者  
(助成金受領者)同志社大学  
(理工学部)

研究開発推進機構

日本学術振興会  
特別研究員 PD

原 田 裕 生

共同研究者

同志社大学 理工学部

教 授

小 山 大 介

桐蔭横浜大学 医用工学部

講 師

石 河 睦 生

## [研究の目的]

近年、スマートフォンやウェアラブルデバイス、医療用内視鏡などの様々な分野において、高性能かつ小型な光学システムの需要が急速に高まっている。従来の光学機器では、フォーカシング特性や光軸調整を機械的可動部（アクチュエータやギア機構）によって行っており、これに伴う応答速度と耐久性の低下、装置の大型化といった課題が存在する。これらの課題を克服するためには、非機械的かつ高速応答が可能な光制御技術の開発が不可欠である。光伝搬を制御する手段として、従来は可動式のガラスレンズやミラーが用いられてきたが、これらは小型・薄型化が困難であり、応答速度の制約も生じてしまう。そのような背景から近年、メタレンズや液晶レンズといった超薄型レンズ等の新技術が注目されているものの、これらは依然として構造の複雑さや製造工程の難易度、応答の遅さといった問題を抱えている。

一方で、超音波によって光路媒質中の屈折率を変化させる音響光学（AO）効果は、高速に光を制御できる有望な手法である。しかし、従来の AO デバイスは超音波の時間周期や空間波長に同期した屈折率変化を利用しており、従来のレンズやミラーのように光を静的に屈折・反射させることができず、さらに得られる屈折率変化（ $\Delta n=10^{-5}$  から  $10^{-4}$  オーダ）は非常に

小さい。他方で、我々の研究グループは高周波強力超音波を液体中に照射することで、巨大な屈折率変化を誘起できる新現象を発見した（図1）。同現象によって、従来の光制御手法では困難であった屈折率変化領域（ $\Delta n=10^{-2}$  オーダ）の形成が可能となり、光の伝搬方向や集光特性の制御性能が飛躍的に向上させることが期待できる。

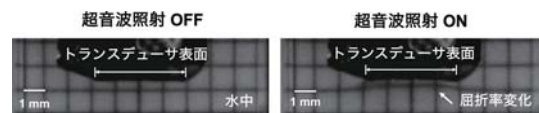


図1 高周波強力超音波照射によって誘起された屈折率変化領域（ $\Delta n$ ）を高速度カメラで撮影した画像

そこで本研究は、100 MHz 帯域の強力超音波により液体中に生じる屈折率変化を利用し、小型・薄型化を実現した可変焦点光流体レンズの開発を目的としている。さらにレンズ性能の制御性の観点から、高周波強力超音波照射によって、液体中に屈折率変化が生じる物理メカニズムを明らかにすることを重要な課題として位置付け、実験およびシミュレーションの両面から検討を行った。

## [研究の内容、成果]

本研究では、高周波強力超音波照射によって液体中に誘起される屈折率変化現象の物理メカ

ニズムの解明と小型光流体レンズの開発を目的として、以下の多角的な手法を用いて実験・解析を行った。

## 1. 屈折率勾配中の光線追跡シミュレーション

高周波強力超音波照射によって、誘起された屈折率勾配が光伝搬に与える影響を理論的に評価するため、光線追跡シミュレーションを実施した。これは超音波照射によって誘起される屈折率が空間的に不均一な領域において、入射光がどのように屈折・偏向されるかを定量的に理解するために重要である。

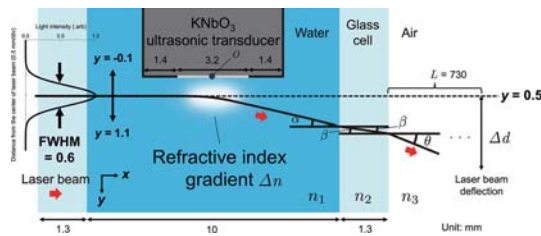


図2 高周波強力超音波照射により誘起された屈折率勾配に対し、入射位置を変化させたレーザー光の光強度分布のシミュレーション条件

超音波照射によって誘起される屈折率勾配は、実験で得られたデータを基に、2次元ガウス関数としてモデル化した。そして作成した屈折率勾配モデルをもとに、水・ガラス・空気の境界を考慮した光線追跡シミュレーションを行った(図2)。光線追跡シミュレーションでは、レーザー光が水中を通過し、ガラス壁を抜けて空气中に到達するまでの一連の光路を追跡し、スクリーン上に到達する位置のレーザー光の軌跡変化(レーザー光の偏向量:  $\Delta d$ )を算出した。その結果、屈折率勾配モデルの形状を最適化することで、レーザー光の偏向量が最大で約69 mmに達することが示され、これは実験で観測された偏向量とよく一致した(図3)。この光線追跡シミュレーションの結果は、構築した屈折率勾配モデルの妥当性を示すものであると同時に、本手法により超音波照射によって生じる屈折率勾配の空間的構造を視覚的・定量的に再現可能であることを意味している。すなわち、本モデル

を用いることで、従来は定性的な観察にとどまっていた超音波照射によって誘起される屈折率変化現象を、数値的に可視化・解析することが可能となった。

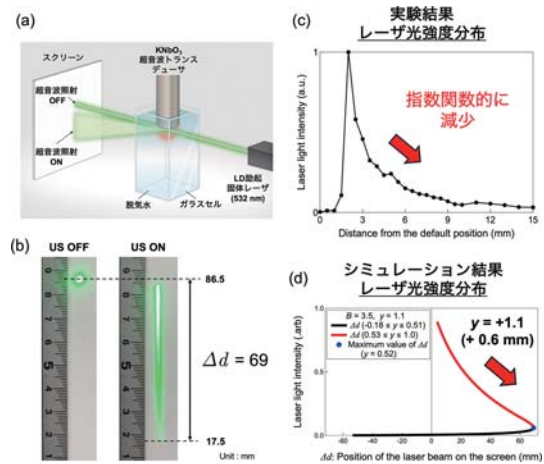


図3 (a) レーザ光の軌跡変化を評価するための実験系 (b) 高周波強力超音波照射の有無によるスクリーン上に投影されたレーザー光の変化 (c) 実験により得られた屈折率勾配を通過後のレーザー光の光強度分布の変化 (d) シミュレーションにより得られた屈折率勾配を透過後のレーザー光の光強度分布の変化

## 2. 超音波照射によって誘起される屈折率変化の物理メカニズム解明とナノバブルの特性評価

超音波照射により液体中にどのような物理的変化が生じ、それが屈折率変化とどのように関係しているのかを明らかにすることは、本研究の重要な課題である。そこで高速度カメラを用いて高コントラスト比での撮影を行い、屈折率変化現象の観測を行った。その結果、図4(a)より超音波照射によって誘起された屈折率変化領域と同じ位置で輝度変化が生じ、その後、超音波照射を継続した結果、図4(b)より超音波トランスデューサ表面付近で、多数のマイクロバブルが形成される様子が観測された。以上のことから、超音波照射によって誘起される屈折率変化には音響キャビテーション、特にナノバブルが関与していると考えた。そこで動的光散乱法(DLS)を用いて、高周波強力超音波照射によって超純水中で生成されたナノバブルの粒径分布を評価した。実験ではKNbO<sub>3</sub>圧電薄膜

を用いて作製した超音波トランスデューサによって高周波強力超音波を水中に照射した。測定サンプルとして、ガラスセル内に超純水を注入し、高周波強力超音波（周波数：160 MHz、入力電圧：101 V<sub>pp</sub>）を60秒間連続で照射した。そして超音波照射を合計50サイクル繰り返し行い、各サイクルにてガラスセル内で発生したナノバブルの粒径分布をDLSシステムで測定した。その結果、高周波強力超音波照射によって、平均粒径が100 nm程度のナノバブルの形成が確認できた。さらに超音波照射のサイクル数の増加に伴って、平均粒径が増大していく傾向が観測された（図4c）。以上より、高周波強力超音波照射のサイクル数の増加によって、より大きなナノバブルが生成される可能性が示唆された。

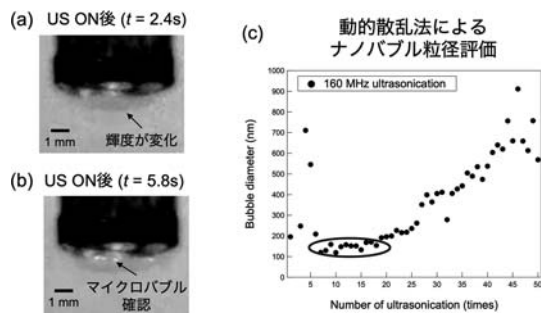


図4 高周波強力超音波照射後 ( $t=0$  s) に、超音波トランスデューサ表面付近にて観察された高周波キャビテーションの撮影写真 (a:  $t=2.4$  s, b:  $t=5.8$  s) (c) 高周波強力超音波照射（周波数：160 MHz、入力電圧：101 V<sub>pp</sub>）のサイクル数（50サイクル）と測定サンプル中のナノバブルの平均粒径の関係

こちらの理由としては、現時点では第2ビヤークネス力によるナノバブル間の凝集または合体が影響している可能性について考えている。

さらに超音波照射によって発生したナノバブルの安定性を評価するため、ゼータ電位、溶存酸素量（DO）等の測定を行った。これらの評価は、バブルの表面特性や周囲環境との相互作用を把握する上で重要である。まずゼータ電位の測定結果では、超音波照射後のサンプル内の微粒子（ナノバブル）のゼータ電位は  $-10$  から  $-30$  mV の範囲で分布し、またその平均値は  $-25.2$  mV であった（図5）。一般的にナノ

バブルは  $-10$  から  $-50$  mV 程度の負の電荷を帯び、液体中で安定的に存在していることが知られており、今回の測定値はその範囲内にあることから、本実験で発生したナノバブルが高い安定性を有している可能性が示唆された。

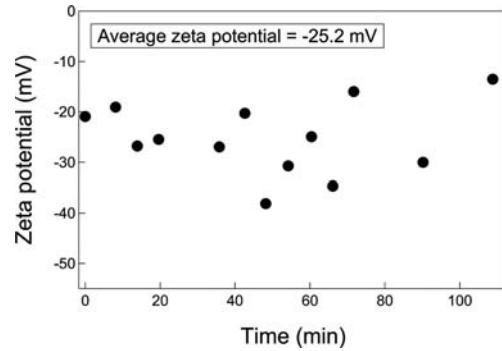


図5 超音波照射（超音波周波数：160 MHz、入力電圧：101 V<sub>pp</sub>）を50サイクル実施後に測定したサンプル内の微粒子（ナノバブル）のゼータ電位の経時変化

次に溶存酸素量（DO）の測定においては、超音波照射のサイクル数の増加に伴い、DO値が減少する傾向が確認された。この傾向は、上述の超音波照射の平均粒径の増大と同様に、生成されたナノバブルやマイクロバブルが凝集または合体によって、より大きなバブルとなり、それらが水面から大気中に放出されることで、DO値が減少したと考えている。

### 3. 有効媒質近似モデルによるナノバブル体積分率の算出

超音波トランスデューサ表面付近のナノバブル密度分布を求めるために、Bruggemanの有効媒質近似（EMA）モデルを適用して屈折率勾配モデルから見かけの体積分率を算出した。同モデルを用いることで光線追跡シミュレーションによって得られた屈折率勾配モデルから、超音波トランスデューサ表面付近に分布するナノバブルの体積分率を推定することが可能となる。具体的には、光線追跡シミュレーションにより得られた屈折率変化モデル  $n(x, y)$  を誘電率変化モデル  $\epsilon(x, y)$  へと変換し、その後、Bruggemanモデルを利用して、体積分率



モデル  $f_b(x, y)$  へと変換することで、各座標におけるナノバブルの局所的な体積分率を導出した。解析の結果、屈折率変化が最大となる位置 ( $\Delta n=0.04$ ) における見かけの体積分率は 0.12 であった。また算出したナノバブル体積分率分布の幅は、屈折率変化の観測結果と比較してやや狭いという結果が得られたが、これは用いた屈折率勾配モデルが 2 次元ガウス関数に基づいているためと考えられる。以上より、屈折率変化モデルと有効媒質近似モデルを用いることで体積分率を 2 次元モデル化し、屈折率変化分布とナノバブル密度分布の空間的対応関係を評価することができた。

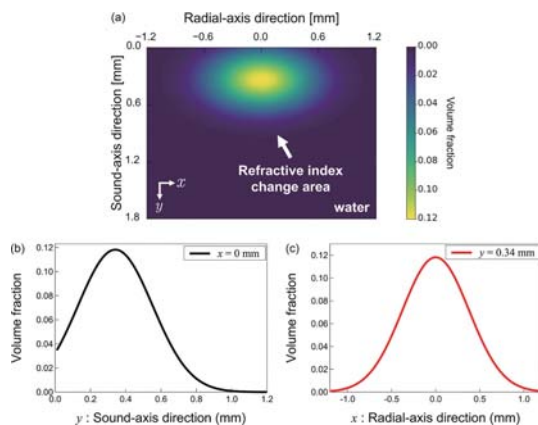


図6 (a) 有効媒質近似 (EMA) を用いて算出したナノバブルの見かけの体積分率分布 (b)  $x=0$  mm における超音波伝搬方向の見かけ体積分率の変化 (c)  $y=0.34$  mm における超音波トランスデューサの半径方向の見かけの体積分率の変化

#### 4. 円環形状の $\text{KNbO}_3$ 圧電材料の作製

小型可変焦点光流体レンズの開発に向けて、円環形状の圧電材料を作製した。圧電材料の成膜方法としては水熱合成法を採用した。オートクレーブ内に (100)c Nb-SrTiO<sub>3</sub> 基板を設置し、240℃で処理することで、厚さ数 10  $\mu\text{m}$  程度の  $\text{KNbO}_3$  圧電薄膜を基板上に成膜した。その後、UV レーザマーカを利用して成膜した  $\text{KNbO}_3$  圧電材料を円環形状に加工した。以上より、小型可変焦点光流体レンズの基盤となる円環形状圧電材料の作製に成功した。

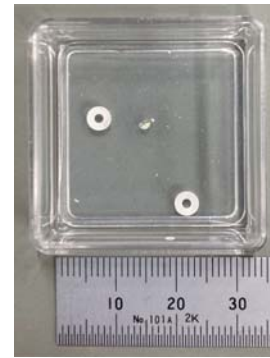


図7 水熱合成法で成膜した  $\text{KNbO}_3$  圧電薄膜を円環形状に加工した試料の写真

#### [まとめと今後の展望]

本研究では、高周波強力超音波照射によって液体中に生じる屈折率変化を小型光流体レンズとして応用するため、その物理メカニズムの解明とデバイス構築の基礎検討を行った。まず光線追跡シミュレーションにより、超音波照射によって誘起される屈折率勾配がレーザー光の偏向に与える影響を定量的に評価し、実験結果と良好な一致を示した。次にナノバブルの生成が屈折率変化と関係する可能性に着目し、動的光散乱法やゼータ電位・溶存酸素量の測定を通じて、ナノバブルの粒径やその安定性を評価した。さらに有効媒質近似モデルを適用することで、屈折率変化モデルからナノバブル体積分率分布を算出し、両者の空間的対応関係を明確に示した。加えて、小型光流体レンズの基盤となる円環形状の  $\text{KNbO}_3$  圧電材料を、水熱合成法および UV レーザ加工によって試作し、その加工に成功した。今後は、さらなるモデルの高度化、三次元的な屈折率制御、異なる液体媒体や周囲環境条件における性能評価を行う。そして将来的に開発する小型可変焦点光流体レンズは、機械的可動部を有しない光学デバイスとして、マシンビジョンをはじめとする広範な分野への展開が期待される。

[成果の発表, 論文など]

【学術雑誌 (査読あり)】

1. **Y. Harada**, M. Ishikawa, M. Matsukawa, D. Koyama, Ultrasonically induced microscopic refractive index gradient and the relationship with high-frequency ultrasonic cavitation, J. Appl. Phys., 137, Issue. 11, p. 113102 (2025).
2. **Y. Harada**, M. Ishikawa, Y. Kuroda, M. Matsukawa, D. Koyama, Simulation of light propagation in medium with an ultrasonically induced refractive index gradient, J. Appl. Phys., Vol. 135, Issue. 19, p. 193104 (2024).

【国際学会】

1. **Y. Harada**, M. Ishikawa, M. Matsukawa, D. Koyama, Refractive Index Change and Nanobubble Cluster Induced by 100-Megahertz-Range, High-Intensity Ultrasonic Irradiation, 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control joint Symposium (2024.9)
2. **Y. Harada**, M. Ishikawa, Y. Kuroda, M. Matsukawa, D. Koyama, Light Propagation in a Refractive Index Gradient Induced by High-Intensity Ultrasound in the

100-Megahertz Range, 21st International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications (2024.7)

【国内学会】

1. **原田裕生**, 石河睦生, 松川真美, 小山大介, 100 MHz 帯の高強度超音波によって誘起される不均一屈折率場中の光伝搬解析, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (2024.9)
2. **原田裕生**, 石河睦生, 松川真美, 小山大介, 高周波強力超音波照射によって誘起される屈折率変化とナノバブル密度分布の関係, 日本音響学会第 152 回 (2024 年秋季) 研究発表会 (2024.9)
3. **原田裕生**, 石河睦生, 松川真美, 小山大介, 高周波強力超音波による屈折率制御技術と超音波光デバイスへの展開, 弾性波素子技術コンソーシアム研究会 (2024.8)
4. **原田裕生**, 石河睦生, 松川真美, 小山大介, VHF 帯域の強力超音波照射によって誘起される屈折率勾配中の光伝搬シミュレーション, 電子情報通信学会超音波研究会 (2024.6)

## [研究助成 (C)]

## 対人間同期が走パフォーマンスに及ぼす影響とその影響範囲の解明



2227010

|                   |                      |         |
|-------------------|----------------------|---------|
| 研究代表者<br>(助成金受領者) | 東京大学 大学院総合文化研究科 博士課程 | 古 川 大 晃 |
| 共同研究者             | 東京大学 大学院総合文化研究科 教 授  | 工 藤 和 俊 |

## [研究の目的]

アスリートが発揮するパフォーマンスは、各個人の能力のみではなく、他者との相互作用（例：他の選手、観客）を含む環境条件にも依存する。例えば、陸上走種目では、60 m, 1500 m, 3000 m のタイムトライアルにおいて、1人で走るよりも2人で走ることでパフォーマンスが向上することが示されている（Takehata et al., 2022; Tomazini et al., 2015; Yamaji et al., 2019）。先行研究において、空気力学的影響（Hirata et al., 2012; Pugh, 1971）、覚醒水準の変化（Triplett, 1898; Zajonc et al., 1969）、注意の焦点の変化（Williams et al., 2015）やそれらに伴うペース方略の変化などの様々な要因がこのパフォーマンスの変化をもたらすことが示されている。さらに、その要因の1つとして、他者と動作テンポが近づく「対人間同期」も挙げられている。2009年にベルリンで開催された世界陸上100 m 決勝では、ウサイン・ボルトが世界新記録を樹立し、2位のタイソン・ゲイが世界歴代2位の記録を達成した。この2人のステップタイミングが分析された結果、別組を走った準決勝ではステップ頻度（単位時間あたりの歩数）が異なっていたものの、隣のレーンを走った決勝では一時的に接近し、同期の可能性が示唆された（Varlet & Richardson, 2015）。走動作が最適化されたトップアスリートにおいても、同期現象が生じる可能性が開かれたことから、同期とパフォーマンスの関係や、その発

生メカニズムについての研究が求められている。

本研究では、対人間同期が生じる知覚的条件と同期とパフォーマンスの関連を明らかにすることを目的とした。

## [研究の内容、成果]

## 方法

## 実験参加者

本研究では、大学の陸上競技部に所属する13名の健康な男子長距離ランナーを対象とした。

## 実験手順とセットアップ

参加者には「1人で走ったときと2人で走ったときのHRを調べる実験」が目的であることが示され、本来の目的は明らかにされなかった。胸部にHR計測センサー（HRM-Run, Garmin）を、体の背面のウェアのウエスト部分（仙骨付近）に加速度センサー（Running Dynamics Pod, GARMIN）を装着し、心拍数とステップ頻度のデータを5秒ごとに毎分拍数（bpm）と毎分ステップ数（spm）として取得した。2台のトレッドミルのうち1台（前方）で10分間のウォームアップ走を行った。5分間の休憩の後、実験の最初の試行が開始された。ウォームアップ走中に参加者が自己選択の快適なペースを規定し、その走速度で本実験における全ての試行を行った。

## 条件

参加者に対して、他走者からの視覚情報の有

無を操作する視覚条件と、他走者がSFを $-3$ spm,  $0$ spm,  $+3$ spmするテンポ条件の2つの被験者内要因を組み合わせた被験者内2要因計画とした。いずれの条件においても彼らは設定速度で5分30秒間、自由に走行するだけであった。一方、他走者は参加者と同じ速度で同じ時間走りながら、ステップ頻度を操作した。テンポ条件に関する各条件の手順は下記のとおりである。

#### 刺激

2台のトレッドミルは前後に整列させて配置し、2人のランナー間の距離は約1.6mであった。前方のランナーの頭部から約1.5m前方、約20cm下方に注視点を設けた。1試行あたりの走行時間は5分30秒と、走速度はウォームアップ時に規定された自己選択の快適なペース（以下「設定速度」）を設定した。同じ設定速度で計7回の試行を行った。以下7つの条件は無作為に設定され、1回ずつ、カウンターバランスをとった順序で実施された。試行と試行の間の休息時間は5分間であった。聴覚情報とランナーのステップ頻度の関連を示した研究（Van Dyck et al., 2015）を参考に、隣接走者のテンポの変化は $\pm 3$ bpm（約 $\pm 2\%$ に相当）とした。

#### テンポ条件

最初の3分間、他走者はワイヤレスイヤホンを通じて参加者のステップ頻度（1分間に両足の歩数）と同じテンポで鳴るメトロノーム音を聞き、その音を自分のステップと同期させた。メトロノーム音のテンポを調整するために、加速度計で測定した参加者のステップ頻度をmulti-functional watch（ForeAthlete245, GARMIN）に表示し、メトロノームのテンポをこの値に調整した。したがって、参加者は自分の足音と、それとほぼ同じテンポで鳴る他走者の足音の両方を聞くことになる。隣接走者は、2分40秒から3分までの参加者の平均ステップ頻度（「基準時間」）に基づき、各試験の開始3分後からステップ頻度を3spm増加（ $+3$

spm条件）/3spm減少（ $-3$ spm条件）/一定に維持（ $0$ spm条件）させた。それらを隣接走者が前方を走る場合（視聴覚条件）と後方を走る場合（聴覚のみ条件）で1回ずつ行った。これらの6条件に加え、1人で走る場合でもステップ頻度の変化が異常に大きい特性を持つ参加者がいないかを確認するため、参加者が前方のトレッドミルを単独で走る単独条件を加えた。したがって計7条件をランダム化しカウンターバランスをとった順序で行った。

#### 計測

##### ステップ頻度変化率

基準時刻のステップ頻度を“基準ステップ頻度”，基準時刻以降のステップ頻度を“変化後ステップ頻度”と定義した。参加者のステップのテンポ変化によるステップ頻度の増減の程度を確認するため、基準ステップ頻度の平均値に対する変化量の割合を「ステップ頻度変化率（step frequency change rate: SF change rate）」として算出した。

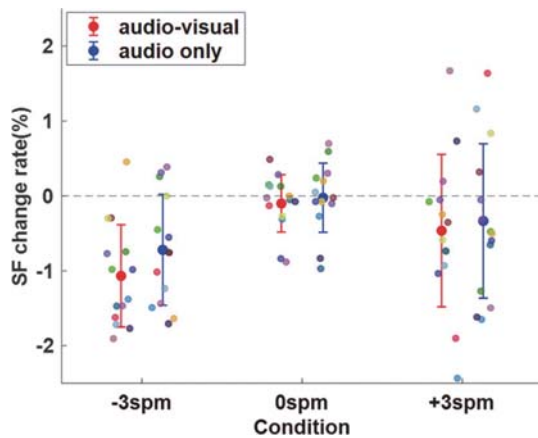
##### データ分析

統計データ分析は、IBM SPSS Statistics version 25.0（IBM Corp）を用いて行った。2要因反復測定分散分析は、ステップ頻度変化率、心拍数について、テンポ条件（ $+3$ spm,  $-3$ spm,  $0$ spm条件）と視覚条件（視聴覚、聴覚のみ条件）を因子として用いた。有意な主効果または交互作用が認められた場合、一対比較の評価にはボンフェローニ法を用いた多重比較検定を用いた。球面性に違反した場合にはGreenhouse-Geisser補正を適用した。有意水準は $5\%$ とした。すべての結果は平均値 $\pm$ SDで示した。

#### 結果

各試験開始3分後から終了までの平均ステップ頻度変化率をまとめたものを図1に示す。2要因分散分析（テンポ条件 $\times$ 視覚条件）の結果、テンポ条件と視覚条件の間に交互作用は見られなかった（ $F[2, 24] = 0.228$ ,  $p = 0.80$ ,  $\eta_p^2 =$





各プロットは1人の参加者のデータを示し、データは各試行開始3分後から終了までのステップ頻度変化率の平均である。同じ参加者のデータは同じ色でプロットされている。各条件の平均値は線で結ばれており、エラーバーは参加者間のSDを表す。0 spm 条件に対し、-3 spm 条件ではステップ頻度変化率が有意に低下した。

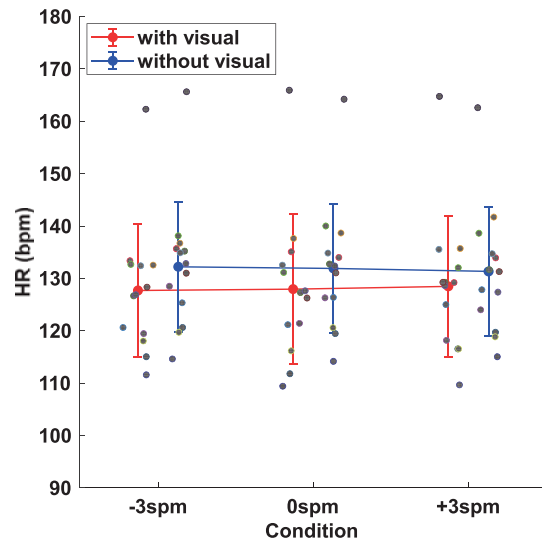
図1 各条件における平均ステップ頻度変化率

0.019)。テンポ条件はステップ頻度変化率に有意な主効果を示した ( $F[2, 24]=11.29, p<0.001, \eta_p^2=0.49$ )。Bonferonni 法を用いた多重比較の結果、-3 spm 条件と0 spm 条件の間に有意差が認められた ( $p<0.001$ )。視覚条件はステップ頻度変化率に有意な主効果を示さなかった ( $F[1, 12]=1.08, p=0.32, \eta_p^2=0.083$ )。心拍数

図2は、各条件における3分以降の平均心拍数を示している。心拍数について2要因分散分析(テンポ条件×視覚条件)を行った結果、交互作用は認められず ( $F[2, 24]=1.89, p=0.17, \eta_p^2=0.14$ )、心拍数に対するテンポ条件の主効果はなかった ( $F[2, 24]=0.048, p=0.95, \eta_p^2=0.004$ )。しかし、心拍数に対する視覚条件の主効果は有意であった ( $F[1, 12]=45.43, p<0.001, \eta_p^2=0.79$ )。

## 考察

本研究では走者間の知覚情報(視覚および聴覚)が走者のステップ頻度や生理的負荷(心拍数)に及ぼす影響について検討した。前後に並べた2台のトレッドミル上を2人が一定の速度で5分30秒間走行した。最初の3分間では、隣接走者は参加者とステップ頻度を合わせるよう



データは各試行開始3分後から終了までの心拍数の平均である。同じ参加者のデータは同じ色でプロットされている。各条件の平均値は線で結ばれており、エラーバーは参加者間のSDを表す。他者の視覚情報がある条件では、他者の視覚情報が無い条件と比べて心拍数が有意に低かった。

図2 各条件における平均心拍数

に走った。3分経過後、隣接走者はステップ頻度を3 spm 速く(+3 spm 条件)または3 spm 遅く(-3 spm 条件)した。その結果、テンポ条件において有意な主効果が見られ、特に-3 spm 条件ではステップ頻度が有意に低下することが確認された。また、心拍数に対して、視覚条件の有意な主効果があった。主観的運動強度に関してはテンポ条件も視覚条件も有意な主効果を示さなかった。

ステップ頻度に関し、0 spm 条件において、ステップ頻度は0%付近に局在しており、対照条件として機能していたことに留意したい。その0 spm 条件に対して、-3 spm 条件ではステップ頻度が有意に低下した。この結果は並走するランナーの足音テンポを操作することで、ステップ頻度が低下する方向に同期が生じるとという先行研究の結果を再現しており、隣接走者間に同期に生じるという仮説(Furukawa et al., 2024; Varlet & Richardson, 2015)を支持するものであった。

さらに隣接走者の視覚情報の影響を検討するため、我々は視覚と聴覚を組み合わせた条件(視聴覚条件)と聴覚のみで視覚なし(聴覚の

み条件)を設定した。その結果、視覚条件には主効果がみられず、視覚の追加効果があるとは言えなかった。すなわち、主走者は隣接走者のステップ頻度変化に影響を受けるものの、その影響は視覚というより主に聴覚情報に起因する可能性を示している。

これまで、視覚情報が運動の対人間同期を引き起こす主因の1つであることが示されてきた (Schmidt & O'Brien, 1997)。そのため、互いの視覚情報がランナー間の同期引き起こす可能性が提案されてきたものの (Varlet & Richardson, 2015)、実証的な研究は不足していた。これらの背景に対し、本研究はランナー間の同期における聴覚情報の重要性を強調し、視覚情報の追加効果が大きくないことを示した点で、新たな示唆を与えるものである。

心拍数に対するテンポ条件の主効果はみられなかった。これまでの研究において、ランナーのステップ頻度に対して同期的な聴覚情報は生理的負荷を軽減し (Terry et al., 2012)、パフォーマンスに好影響を与えることが示されている (Bood et al., 2013; Simpson & Karageorghis, 2006; Terry et al., 2012)。本研究においては、隣接走者のステップ頻度が同期的である 0 spm 条件と非同期的である  $\pm 3$  spm 条件の間に心拍数の差はみられなかった。今回、ステップ頻度に主に注目しており、疲労が生じにくい低強度の走行とした。本研究と実験状況が類似した我々の先行研究においても、隣接走者の足音と心拍数の関連は確認されておらず (Furukawa et al., 2023)、低強度走行中の心拍数に対する足音の効果は重要でないと考えられる。

一方、心拍数に対する視覚条件の主効果は有意であった。このことは、前の走者からの視覚情報を受けることにより、心拍数の低下が生じた可能性を示唆している。

## 参考文献

- ・ Bood, R. J., Nijssen, M., van der Kamp, J., & Roerdink, M. (2013). PLoS ONE, 8(8).
- ・ Borg, G. A. (1973). Med. Sci. Sports, 5(2), 90-93.
- ・ Borg, G. A. (1982). Med. Sci. Sports Exerc., 14 (5), 377-381.
- ・ Furukawa, H., Kudo, K., Kubo, K., Ding, J., & Saito, A. (2023). PLoS ONE, 1-19.
- ・ Furukawa, H., Miyata, K., Richardson, M. J., Varlet, M., & Kudo, K. (2024).
- ・ Hirata, K., Okayama, T., Teraoka, T., & Funaki, J. (2012). Procedia Eng., 34(1), 32-37.
- ・ Kakehata, G., Tsukamoto, H., Goto, Y., Iso, S., & Kanosue, K. (2022). Sci. J. Sport Perform., 1(2), 94-102.
- ・ Pugh, L. G. C. E. (1971). J. Physiol., 213, 255-276.
- ・ Schmidt, R. C., & O'Brien, B. (1997). Ecol. Psychol., 9(3), 189-206.
- ・ Simpson, S. D., & Karageorghis, C. I. (2006). J. Sports Sci., 24(10), 1095-1102.
- ・ Terry, P. C., Karageorghis, C. I., Saha, A. M., & D'Auria, S. (2012). J. Sci. Med. Sport, 15(1), 52-57.
- ・ Tomazini, F., Pasqua, L. A., Damasceno, M. V., Silva-Cavalcante, M. D., de Oliveira, F. R., Lima-Silva, A. E., & Bertuzzi, Rô. (2015). Physiol. Behav., 149, 39-44.
- ・ Triplett, N. (1898). Am. J. Psychol., 9(4), 507-533.
- ・ Van Dyck, E., Moens, B., Buhmann, J., Demey, M., Coorevits, E., Dalla Bella, S., & Leman, M. (2015). Sports Med. Open, 1(1).
- ・ Varlet, M., & Richardson, M. J. (2015). J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform., 41(1), 36-40.
- ・ Williams, E. L., Jones, H. S., Andy Sparks, S., Marchant, D. C., Midgley, A. W., & Mc Naughton, L. R. (2015). J. Sci. Med. Sport, 18(4), 486-491.
- ・ Yamaji, K., Kawai, K., & Nabekura, Y. (2019). Jpn. Soc. Sports Perform. Res., 11.
- ・ Zajonc, R. B., Heingartner, A., & Herman, E. M. (1969). J. Pers. Soc. Psychol., 13(2), 83-92.

## [成果の発表, 論文など]

### 学術誌等に発表した論文

1. Furukawa H., Kudo K., Kubo K., Ding J., Saito A. Auditory interaction between runners: Does foot-step sound affect step frequency of neighboring runners? PLOS ONE, 18(1), e0280147, 2023.
2. 古川大晃, 西川優, 斉藤篤司, 工藤和俊. 走者間にピッチの同期現象を生じさせる知覚情報の検討. ランニング学研究, 第36巻1号, 2024.

国際会議における発表

3. Furukawa H., Kudo K., Saito A. The footsteps of a neighboring runner affect the step frequency of the main runner. European College of Sport Science (ECSS), Sevilla, Spain, August, 2022. (ポスター)
4. Furukawa H., Miyata K., Richardson M. J., Varlet M., Kudo K. Interpersonal Synchronization between Sprinters: An Observational Study of the Japanese 100-m Record Racer. European College of Sport Science (ECSS), Paris, France, July, 2023. (ポスター)

5. Furukawa, H., Kudo, K. Interpersonal synchronization among top marathon runners. Symposium: Adaptive behavior and its ecological foundations, Kobe, Japan, March, 2025. (ポスター)

国内会議における発表

6. 古川大晃, 西川優, 斉藤篤司, 工藤和俊. 視聴覚を介したランナー間の協調. 科学研究費助成事業 学術変革領域研究 (A) 「階層的生物ナビ学」2024 年度領域会議, 名古屋, 愛知. 2024 年 6 月. (ポスター)

## [研究助成 (C)]

# 原子ビームとねじり振子による気体原子から 固体へのスピン移行の汎用的な検出

2237011



研究代表者  
(助成金受領者)

東京農工大学 大学院工学府 博士後期課程

安 田 瑠 奈

共同研究者

東京農工大学 大学院工学研究院 教 授

畠 山 温

## [研究の目的]

現在、量子コンピュータをはじめとした量子技術は我々の生活をより豊かにすると期待されている。量子技術において特に活躍するのがスピンである。スピンとは量子力学で記述される物理量で、量子技術で有用な二価性や磁性を持つとともに、古典力学における角運動量の性質も持ち合わせている。近年、スピントロニクスと呼ばれる分野では、スピンとエレクトロニクスを融合させた固体中のスピンのやりとりに着目して盛んに研究され、超省エネルギーな次世代デバイスの技術となることが期待されている。また、原子物理の分野ではスピン偏極気体原子を用いた周波数や磁場計測の精密計測に利がある。スピントロニクスを気体スピンにまで拡張できれば、スピン偏極気体原子を用いた実験の精密計測の強みをデバイス開発へ還元できる。そこで本研究が目指すのはスピントロニクス拡張のため、気体－固体間でのスピン移行過程を調べることである。気体－固体間でのスピン移行過程探索のため、まず、気体からの固体へのスピン移行の検出を行う。気体から固体へのスピン移行は2007年に限定的な範囲でIshikawaら[Phys. Rev. Lett. **98**, 183004 (2007)]によって実証されているが、本研究では一般的な固体、物質によって制限のない手法での観測を目指す。

## [研究の内容、成果]

固体に移行したスピンを（古典力学的な）古典回転による観測をすることで、あらゆる物質に対するスピン移行を観測する技術の開拓を見込んでいる。本研究では、気体原子から固体へのスピン移行に誘起された古典回転の検出を目指す。スピン移行量を定量的に測定するにはスピン移行前後の正味の角運動量の大きさを測定する必要がある。スピン移行前の正味のスピンの大きさの測定として気体原子のスピン偏極度、スピン移行後の角運動量の測定としてトルクの測定が必要である。そこで、本研究では以下の2つのサブテーマに取り組んだ。

- (1) 気体原子スピン（気体原子が蓄えるスピンの大きさ）の定量的な測定
- (2) 光の角運動量が固体へ移行することで誘起されるトルクの定量的な測定

## (1) 気体原子スピンの定量的な測定

気体原子のもつ正味のスピンの大きさの測定のため、気体原子全スピンの大きさ  $\langle F_z \rangle$  の測定方法の提案し、実際に測定を行った。

まず、原子全スピン  $\mathbf{F}$  の構成を図1に示す。閉殻の電子は角運動量を持たないので、本研究で用いたアルカリ金属原子では、1個の荷電子のみが電子の角運動量を担う。電子スピン  $\mathbf{S}$  と電子の軌道角運動量  $\mathbf{L}$  が合成されて  $\mathbf{J}$  に、核スピン  $\mathbf{I}$  と  $\mathbf{J}$  が合成されて、全スピン  $\mathbf{F}$  となる。



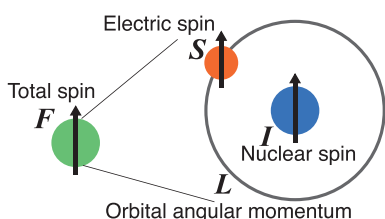


図1 原子スピンの構成の模式図

気体原子のスピンの1成分の大きさ（偏極度）を測定する方法はこれまでにいくつか提案されているが、本研究で重要な全スピンの大きさ $\langle F_z \rangle$ の測定方法は我々の知る限り存在しない。そこで本研究では、測定手法を提案し、実際に測定を行った。提案した方法は、Beerの法則が成り立つ気体に対して広く使える手法である。

図2のように、セルと呼ばれるガラス容器を真空中に引き、アルカリ金属原子のセシウム（Cs）を封入したものを用いて測定を行った。アルカリ金属原子は価電子が1個で理論との比較がしやすいこと、共鳴するレーザーの波長は赤外線で、比較的蒸気圧が高く信号を得やすいことから、原子物理の分野で広く利用されている。気体原子は円偏光の光を吸収することで、気体原子はスピン偏極をする。また偏極気体原子はガラス表面などに衝突することで、スピンを失う（スピン緩和）。

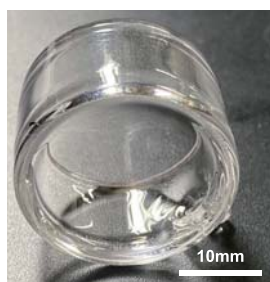


図2 セシウムセル

提案した手法は、基本的に原子が吸収する光のパワーが、原子が占有するエネルギー準位に依存する（図3、赤線の太さが光の吸収強度に比例）ことを利用している。レーザーの周波数をドップラー広がりよりも広く挿引することで、

原子のもつ速度によらず、全ての原子を観測する。また、 $\sigma^+$ と $\sigma^-$ 偏光でそれぞれ測定し、無偏極状態の時の吸収量で規格化することで様々な定数を取り除き、ゼーマン偏極度のみを取り出した。測定は、一般的なガラス製のセル（無コーティングセル）と、スピン緩和防止コーティングを施すことで高いスピン偏極が見込めるコーティングセルに対して行った。

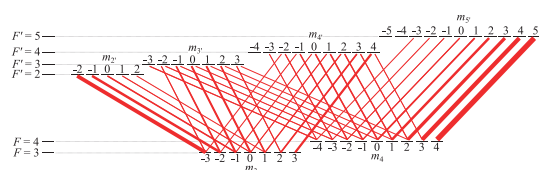


図3 Csのエネルギー準位と光の吸収強度

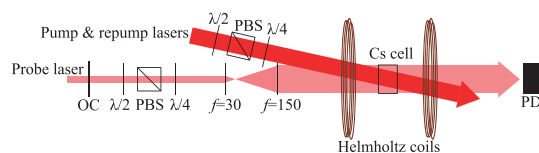


図4 スピン偏極度測定装置図

図4に測定システムを示す。ポンプ光でCsのスピン偏極を誘起し、プローブ光でスピン偏極度の測定を行った。プローブ光のセル透過後のパワーの変化をフォトダイオードで検出することで、原子によって吸収された光のパワーを測定した。組み合わせレンズを用いてプローブ光の直径を広げ、セル内の原子をより多くプローブした。また、光学チョッパーを利用してロックイン測定を行うことで透過光パワーの微小な変化も検出できる。量子化軸の定義のため、ヘルムホルツコイルで地磁気よりやや大きい磁場（0.3 mT 程度）を印加した。以下に結果の一部を示す。

図5に、ポンプ光パワーと $\langle F_z \rangle$ （左軸）、占有率（右軸）の関係を示す。ポンプ光パワーが強くなると、スピン偏極度が単調増加している様子が分かる。また、6 mW 程度で $\langle F_z \rangle$ が飽和していることが分かる。さらに、図6には、ポンプ光の偏光を変化させた時の $\langle F_z \rangle$ と占有率を示す。ポンプ光を直線偏光にしたとき横軸

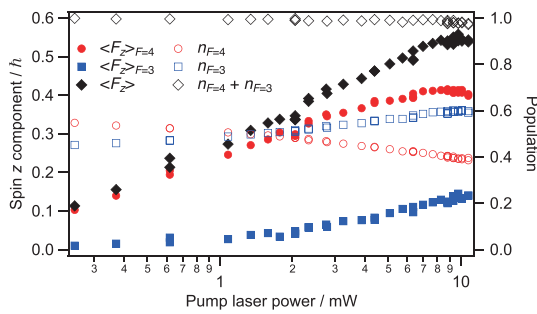


図5 ポンプ光パワー依存性

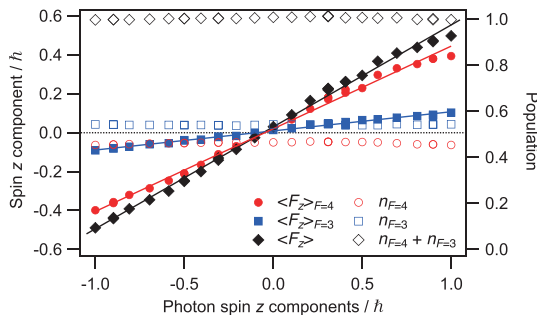


図6 ポンプ光偏光依存性

の値が0で、検出される  $\langle F_z \rangle$  も0となっている。一方で占有率はポンプ光の偏光に依存せず、一定の値をとっている。

これらは定性的に理論と一致し、適切に測定が行われていると考えられる。さらに測定の確からしさを評価するために、簡単なモデル(図7)を立ててスピン収支の見積もりを行った。

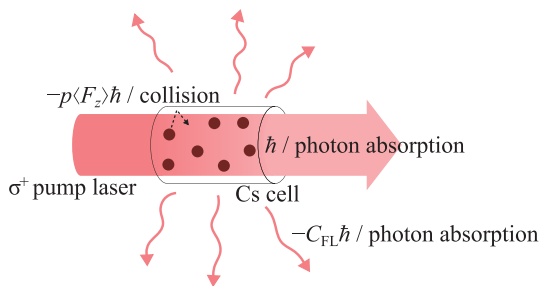


図7 スピン収支モデル

このモデルでは、気体原子が光を吸収することで気体原子がスピンを得る。また、気体原子がセル壁面に衝突することでスピンを失う。壁面との衝突によるスピンの損失は、気体原子のセル壁面との衝突頻度と  $\langle F_z \rangle$  から計算し、衝突頻度は気体原子の速度と原子密度、セルの形

状から計算することができる。

光の吸収によるスピン注入レートは  $4 \times 10^{15} \text{ h/s}$  であり、1回の衝突で100%スピンの崩れると仮定した場合の衝突による損失レートは  $2 \times 10^{15} \text{ h/s}$  である。蛍光による損失や不確かさを含めると今回の測定は妥当で、提案した手法は  $\langle F_z \rangle$  を正しく測定通りに測定出来ていると考えられる。

この成果は学術論文誌<sup>[1]</sup>、国内学会<sup>[2]</sup>にて発表済みである。

## (2) トルクの定量的な測定

ここでは、2重ねじり振り子を開発し、光の角運動量によって誘起されたトルクの測定を行うことで、開発したねじり振り子がトルクを正確に測定できるかどうか、を確認した。

光の角運動量が固体へ移行すると、結果として古典回転が誘起されることは、Bethの実験や近年盛んに行われている光のスピン角運動量や軌道角運動量を用いて微粒子を回転させる実験からよく知られている。しかし、誘起された回転のトルクを定量的に測った例は少ない。特に、光の軌道角運動量について直接かつ定量的に測った例はなく、Angular Doppler効果を利用して間接的な測定が行われたのみである。ここでは、光のスピン角運動量の誘起するトルクの測定をベンチマーク実験として行い、軌道角運動量が誘起するトルクの測定を行った。ねじり振り子の評価のための実験であるが、光の軌道角運動量の誘起するトルクの定量的な測定は個別の研究としても十分に意味がある。

開発した2重ねじり振り子(図8)は、1段目の共鳴周波数を小さく、2段目の共鳴周波数を大きくしている。振動特性から、1段目は外部からのノイズ振動を遮断するアイソレータとして働き、2段目がトルクセンサとして働くこと狙っている。また、空気による減衰や、擾乱などを除くため、ねじり振り子は真空チャンバー内に吊られており、その圧力は  $10^{-5} \text{ Pa}$  程度である。トルクを注入する光(緑)は振り子

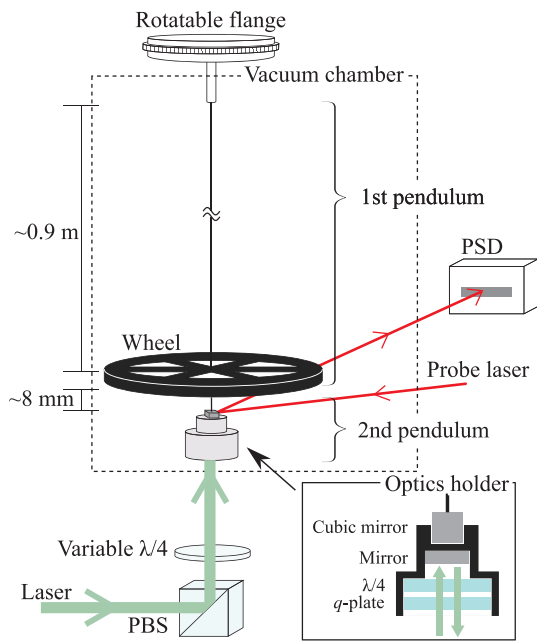


図8 開発した2重ねじり振り子

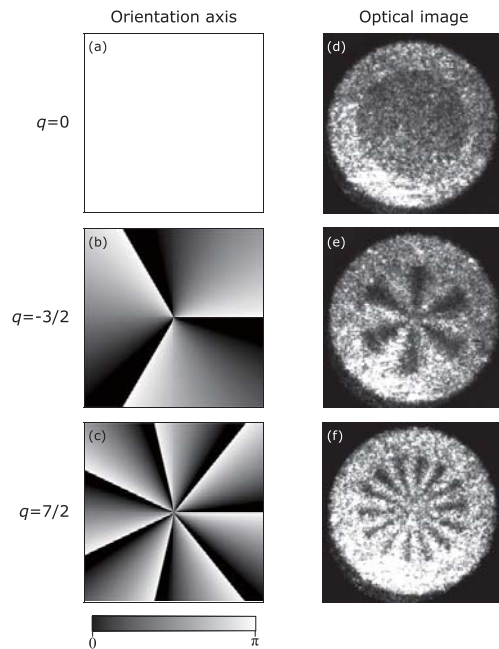
に対して下から入射し、光テコ（赤）によって振り子の回転角を測定した。入射する光の角運動量の向きを周期的に切り替えることで、強制振動によって回転振幅を増幅し、ロックイン検出によって小さな回転振幅を検出した。

本実験は今後論文に投稿予定のため、詳細は公開できないが、概要を以下に示す。

まず、1光子あたり  $2\hbar$  の角運動量移行が期待される  $1/4$  波長板を用いて測定をベンチマーク実験として行った。この時の測定によって得られたトルクの大きさは  $(9.0 \pm 1.4) \times 10^{-16}$  Nm である。入射光の波長とパワーと偏光から予想されるトルクの大きさは  $7.5 \times 10^{-16}$  Nm であるので、不確かさのなかに僅かに入らないが、矛盾がなく測定できている。次に入射光の波長とパワーをそのままに、偏光のみを変えて測定を行い、予想トルクと検出トルクは一致し、光のスピンの由来のトルクが測定できていることがわかった。

この装置を用いて、スピン角運動量を持つ光に軌道角運動量を付与する（スピン-軌道相互作用のある）光学素子が受けるトルクの測定を行った。用いた光学素子は  $q$ -plate と呼ばれるもので、 $1/2$  波長のリターダンスを持つが、光

学軸の向きが一樣でない（図9(a)-(c)）。これら3つの  $q$ -plate は共同研究先が作製した[Nature photonics 8, 610 (2014)]。図9(d)-(f) は直交する偏光板の間に  $q$ -plate を置き、透過光の撮影を行った写真である。光学素子によって付与される軌道角運動量が  $q$  の大きさに依存し、 $2q$  である。スピン角運動量の変化も含めると、円偏光の光が  $q$ -plate を透過することによって変化する角運動量の大きさは、 $2(q-1)\hbar/\text{photon}$  であるので、角運動量保存則から、光学素子が受け取る角運動量の大きさは  $2(1-q)\hbar/\text{photon}$  である。

図9  $q$ -plate の光学軸の空間分布と写真

$q=0$  の  $q$ -plate に生じたトルクの大きさは  $(7.9 \pm 0.8) \times 10^{-16}$  Nm である。入射光の波長とパワーと偏光からの予想トルクは  $7.2 \times 10^{-16}$  Nm で不確かさの範囲内で測定結果に一致する。

また、 $q=-3/2$  の  $q$ -plate に生じたトルクの大きさは  $(2.6 \pm 0.3) \times 10^{-15}$  Nm であった。入射光の波長とパワーと偏光からの予想トルクは  $2.9 \times 10^{-15}$  Nm で不確かさの範囲内で測定結果に一致する。

この成果に関しては、実験セットアップが難しい都合上実験に時間がかかり、 $q=7/2$  の  $q$ -

plate の測定はまだ行えていない。3つの素子に関する測定の完了後、論文にまとめて投稿予定である。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究で、気体原子スピンの正味の大きさ  $\langle F_z \rangle$  の測定が行えるようになった。また、開発したねじり振りが微小なトルクを正確に測れることもわかった。今後、原子スピンから固

体へのスピン移行量を測定するために、原子ビームを作製しビーム流量を評価する。その後、スピン偏極気体原子から固体へのスピン移行に誘起されたトルクの検出を行う。

[成果の発表, 論文など]

- [1] Phys. Rev. A **111**, 033111 (2025).
- [2] 安田瑠奈, 畠山温, “スピン偏極セシウム原子の全角運動量  $z$  成分の測定,” 日本物理学会 2023 年年度大会, 東北大学, 18aB204-1, 9 月, 2023 年.



## [研究助成 (C)]

# 荷重制御した周期的圧縮刺激を印加可能な 骨-癌共培養装置の開発

2247016



研究代表者

京都大学 医生物学研究所/  
京都大学 大学院生命科学研究所 博士後期課程

吉 本 昂 希

## [研究の目的]

日常生活において、歩行などの運動などにより、健康な人々の骨は周期的に圧縮刺激を受けている。このような刺激により骨は骨密度を調節しているだけではなく、他臓器の健康状態にも影響を及ぼすことが明らかになっている。その中で近年、運動により周期的圧縮刺激が負荷された骨組織では、人々の生活の質を著しく低下させるがんの骨転移が抑制されることが医学的経験則から着目されている。しかし、そのメカニズムは明らかになっておらず、骨転移が悪化した骨肉腫を治療する有効な方法がない。

そこで本研究では、生体内において生じる骨転移の抑制メカニズムを解明するために、3Dプリンター技術やマイクロ流体デバイス技術などの機械技術を用いて、骨組織と上皮間葉転換後のがん細胞を周期的圧縮刺激条件下共培養かつライブイメージングできる装置とその共培養法を開発する。

将来的に開発した装置を用いて、周期的圧縮刺激条件下で骨組織と共培養したがん細胞の遺伝子・タンパク質を網羅的に解析する。そして骨転移抑制因子の解明、抑制因子の機能的な実証を経て、医薬品開発による骨転移治療法を確立する(図1)。

本研究では、以下の2つの研究項目を実施した。

## 周期的圧縮刺激の条件検討

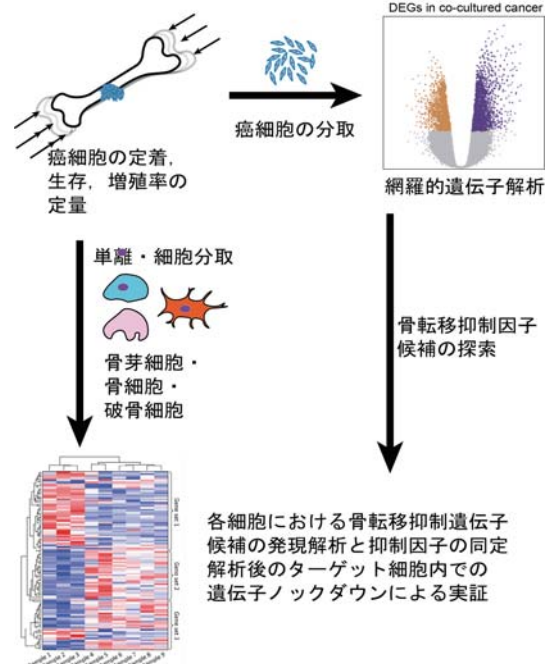


図1 開発した骨組織に周期的圧縮刺激を印加可能な装置

## 研究項目1：エアシリンダの原理を用いた圧縮刺激の動力システムの開発(図2)

従来のモーター駆動型の動力を用いて骨組織に周期的圧縮刺激を印加するシステムでは、モーターの発熱により、骨転移に必要な1週間以上の培養の間、適切な培養室の温度を保つことができない。また、リアルタイムで観察しながら骨に刺激を与えるために顕微鏡一体型培養室サイズに設計する必要があった。



図2 骨転移抑制因子候補探索・生成細胞同定から抑制因子の同定までの研究

## 研究項目2：生体由来の骨組織とがん細胞の共培養チップの開発（図3）

生体外で骨と転移能を持つがん細胞を圧縮刺激条件下で共培養した事例は確認されていない。そこで、3次元組織中の骨構成細胞と上皮間葉転換後の細胞の機能を保つことができる培養条件を構築する必要がある。そのために圧縮刺激の動力システムに設置可能で、適切な培地条件や灌流条件を検討できるように共培養チップを設計する。

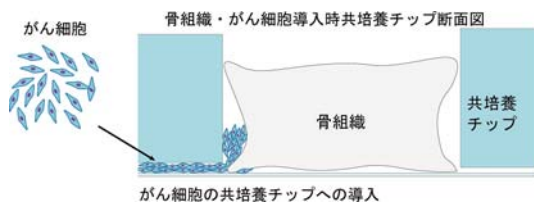


図3 骨組織・がん細胞共培養のための戦略

### 〔研究の内容、成果〕

#### 研究項目1

まず、本研究ではエアシリンダによる圧縮刺激動力システムを開発するために、CADソフトであるOpenSCADを用いて必要となる部品（押し子、キャップ、基盤）を設計した。設計したモデルをstlファイルに変換し、高精度3Dプリンター（AGILISTA 3000）で印刷した。印刷した部品の表面は99.5%エタノールにより処理し、細胞培養に使用可能にした。さらに市販のバネとシリンジを購入し、シリンジを適切な長さに切断した。

これらの部品を組み合わせることで、圧縮刺激動力システムを作製した（図4）。

次に、圧縮刺激動力システムに搭載するため

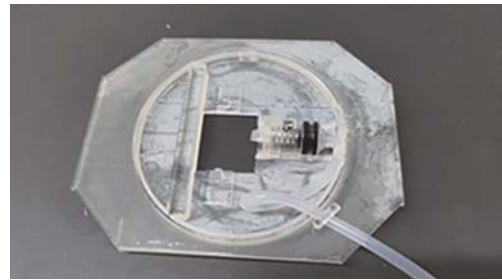


図4 作製した圧縮刺激動力システム

の骨組織とがん細胞を共培養するためのチップを開発した。本研究では、チップ作製のために3Dプリンターにより作製したモールドへPolydimethylsiloxane（PDMS）を流し込み固めるリソグラフィ法を用いた。圧縮刺激動力システム作製時と同様にOpenSCADを用いて2種類のモールドをデザインし、3Dプリンターにより印刷した（図5）。

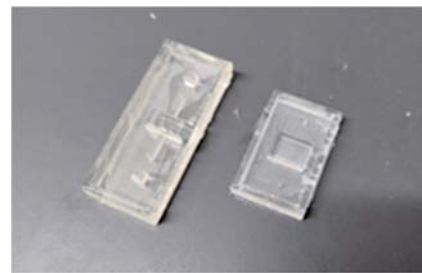


図5 チップ作製のモールド

チップにPDMSを流し込み、80℃のオーブンで4時間以上固めた。固めたPDMSをモールドから剥がした後、PDMS表面をプラズマ処理し、それぞれのパーツを組み合わせ貼り付け、80℃で24時間処理した。さらに、親水化したシリコンウェハー上にPDMSを垂らし、500 rpmで30秒間スピコートし、PDMS薄膜を作製した。このPDMS薄膜をシリコンウェハーから切り出し、PDMSパーツに貼り付けることで、骨組織に圧縮刺激を与えながら培養し、がん細胞も培養可能な構造に仕上げた（図6）。

作製した圧縮刺激動力システムに骨組織とがん細胞共培養チップを搭載した（図7）。

作製した本装置へ圧力を加え、変位テストを行った（図8）。

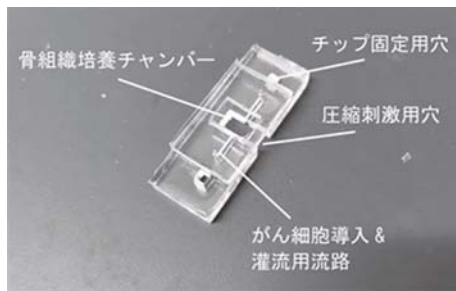


図6 骨組織とがん細胞共培養チップ

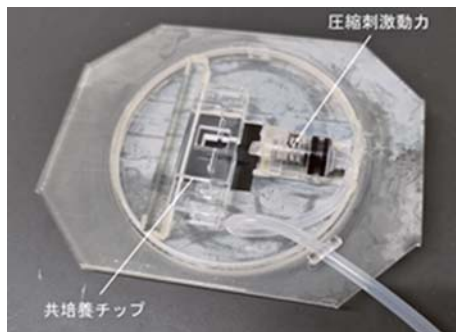


図7 動力システムに搭載した共培養チップ

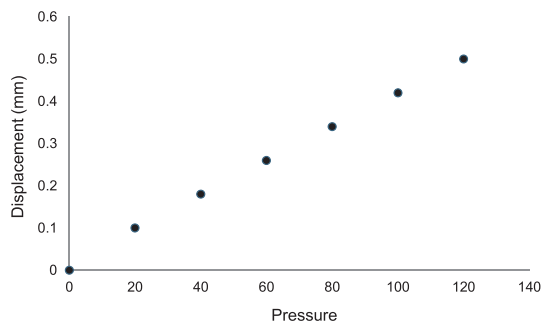


図8 動力システムにおける変位

## 研究項目 2

本項目では、チップでのがん細胞の培養条件を検討した。将来的に骨組織への圧縮刺激を付与した際に放出される因子ががん細胞へ与える影響を明らかにする。そのため、がん細胞培養に通常使用される Fetal Bovine Serum (FBS) には、ウシ胎児由来の骨に圧縮刺激が加わった際に放出された様々な因子が含まれており、FBS の使用は本研究には適さない。

そこで、本研究では FBS を用いない培養条件を検討した。培養にはマウス由来の上皮系乳がん細胞の EO771 を用いた。

まず、EO771 をチップ上で接着培養させる

ために、FBS 入りの培地を用いて培養した。チップ表面を細胞培養のための足場でコーティングしていない状態では、EO771 は接着しなかった。そこで、マウス肉腫細胞から抽出した細胞外基質マトリゲルによりチップ表面をコーティングした。その結果、EO771 はチップに底面に接着した。

次に、FBS を用いない培地条件を検討した。FBS を用いない iPS 細胞などの幹細胞の培地組成を参考とし、培地を作製した。本培地は Iscove's Modified Dulbecco's Medium を基礎培地として MEM 非必須アミノ酸溶液、グルタミン酸、Pipericolic Acid, Bovine serum albumin, monothioglycerol solution, Ascorbic acid, Dexamethasone, Insulin-Transferrin-Selenium-Ethanolamine (ITS-X) をそれぞれ加えて調整した。EO771 培養当初は FBS 入り DMEM 培地で培養し、徐々に FBS 非含有培地に毎日置き換えていった。最終的に、FBS 非含有培地で完全に培養することができた。また、EO771 の継代についても、Trypsin/EDTA を用いて細胞剥がした後、Trypsin inhibitor と FBS 非含有培地で回収し、マトリゲルコーティングしたディッシュ/デバイスに播種することで接着培養を引き続き達成することができた。

用いた EO771 細胞は上皮系のがん細胞であるため、骨組織へ転移させるために上皮間葉転換を誘導し、間葉系のがん細胞にする必要がある。そこで、先行研究に従いマウスリコンビナントの上皮細胞成長因子 (EGF) を用いたデバイス上で上皮間葉転換の誘導を実証した。上皮間葉転換を誘導した指標として細胞の遊走能を評価した。評価手法としてスクラッチによって作られたギャップを横切る細胞の遊走を観察するスクラッチアッセイを行った。細胞をそれぞれの条件で 24 時間培養した結果、EGF を加えた細胞では、明らかに遊走した距離が長くギャップの面積が小さくなっていた (図 9)。これにより、EGF を加えた本培養条件により

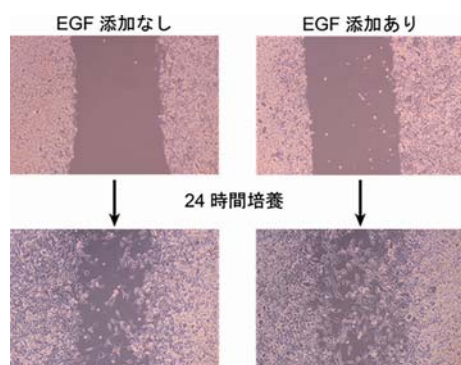


図9 本研究で行ったスクラッチアッセイ

上皮間葉転換を引き起こした状態に近い細胞を誘導できたと考えられる。今後はさらに遺伝子発現解析などを用いて詳細に解析する。

#### [今後の研究計画]

今年度までに開発したチップでがん細胞を培養し、上皮間葉転換に近い状態を誘導することが可能になった。次のステップとして、マウスから取り出した骨組織を取り出し、実際にチップ上で培養可能であることを実証する。そのために、チップ上で灌流を行い、細胞の生死染色や TRACP & ALP Assay Kit を用いて酸性ホスファターゼ（ACP）およびアルカリ性ホスファターゼ（ALP）の活性を調べ、骨細胞の機能を調べる。その後、実際にかん細胞と骨組織を共培養し、がん細胞が骨組織へ浸潤することを実証する。さらに、圧縮刺激を加えることで、刺激を付与した骨組織から放出された因子がかん細胞の浸潤に与える影響やそのメカニズムを解析する。



# 國際交流助成一覽



## 国 際 交 流 助 成 一 覧

[抄録は [https://www.tateisi-f.org/research\\_r/books/list.html](https://www.tateisi-f.org/research_r/books/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. 神 野 莉衣奈 東京大学 大学院 助 教 (2242005)  
国際会議名：International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO)  
発表論文名：Selective Area Growth of  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Sapphire Substrates by Mist-CVD and its Thermal Stability  
開催地（市・国）：ベルリン/ドイツ
2. 藤 崎 貴 也 島根大学 材料エネルギー学部 助 教 (2242009)  
国際会議名：The 2nd Annual CEMDI Symposium 2024  
発表論文名：Investigating Ni nanoparticles on CeO<sub>2</sub> for methane dissociation: a comparative study of theoretical calculations and experimental insights  
開催地（市・国）：モントリオール/カナダ
3. 市 川 修 平 大阪大学 大学院工学研究科 准教授 (2242101)  
国際会議名：12<sup>th</sup> International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2024)  
発表論文名：Surface Carrier Dynamics of Nitride Semiconductors Evaluated by Time-resolved Photoemission Spectroscopy  
開催地（市・国）：ホノルル/アメリカ合衆国
4. 岡 田 瞬 長岡技術科学大学 博士後期課程 (2242102)  
国際会議名：The 28<sup>th</sup> International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences - Micro-Total Analysis Systems  
発表論文名：Magnetically-driven Liposome Assemblies  
開催地（市・国）：モントリオール/カナダ
5. 倉 元 昭 季 東京科学大学 工学院システム制御系 助 教 (2242103)  
国際会議名：2025 IEEE/SICE Internaitonal Symposium on System Intergration (SII 2025)  
発表論文名：Development of the extraction method of LiDAR intensity map of road markings  
開催地（市・国）：ミュンヘン/ドイツ
6. 小 林 勇 斗 秋田工業高等専門学校 助 教 (2242104)  
国際会議名：50<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2024)  
発表論文名：Fine Sinusoidal Voltage Modulation Inverter Driven AC Motor System Implementing Extremely Few Influences on Common-Mode Noise and Switching Loss  
開催地（市・国）：シカゴ/アメリカ合衆国
7. 鄭 仁 赫 東京大学 大学院総合文化研究科 博士後期課程 (2242105)  
国際会議名：Esports Research Network Conference 2024  
発表論文名：Does biofeedback training improve the performance of esports players?; Development of training methods based on gaze movements and cortical theta-alpha activity  
開催地（市・国）：ロンドン/イギリス

8. 鈴木 玲和那 東京大学 大学院 博士後期課程 (2242106)  
国際会議名: PRiME 2024  
発表論文名: Stability investigation on NiFeO<sub>x</sub> electrocatalysts during on and off cycles in harsh alkaline conditions  
開催地 (市・国): ホノルル/アメリカ合衆国
9. 田野 直輝 東京科学大学 総合研究院 後期博士課程 (2242107)  
国際会議名: International Tissue Elasticity Conference (ITEC)  
発表論文名: 1. High-resolutional shear wave phase estimation within small ROI and its application in multi-layered elastic structures evaluation  
2. Adaptive filter for removal of subordinal shear waves in continuous shear wave elastography for liver imaging  
開催地 (市・国): Lyon/France
10. 田原 弘宣 長崎大学 助 教 (2242108)  
国際会議名: Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science 2024 (PRiME 2024)  
発表論文名: Electrochromism of Redox-Active Ionic Liquids and the Kinetics of the Colorations  
開催地 (市・国): ホノルル/アメリカ合衆国
11. PROMKING ARPHORN 奈良先端科学技術大学院大学 博士後期課程 (2242109)  
国際会議名: 2024 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)  
発表論文名: Effects of Excitation Light Polarization with Front-Light Structure on Lensless Fluorescence Imaging  
開催地 (市・国): 西安市/中国
12. 村松 淳平 慶應義塾大学 大学院 後期博士課程 (2242110)  
国際会議名: The 28<sup>th</sup> International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences  $\mu$ Total Analysis Systems ( $\mu$ TAS 2024)  
発表論文名: LIVE-CELL IMAGING SYSTEM FOR ECM-BASED BRANCHING VASCULAR MODEL IN PERFUSION AND STRETCHING CULTURE  
開催地 (市・国): モントリオール/カナダ
13. 龔 ハニ 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 助 教 (2242111)  
国際会議名: IEEE Sustainable Smart Lighting Conference (LS2024)  
発表論文名: The Effects of Natural Landscape Images Using Projector Display on Human Psychophysiology in a Rest Space  
開催地 (市・国): アイントフォーヘン/オランダ
14. Wang Xinfeng 山梨大学 大学院 後期博士課程 (2242112)  
国際会議名: The 2024 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)  
発表論文名: Enhancing High-order Interaction Awareness in LLM-based Recommender Model  
開催地 (市・国): マイアミ/アメリカ合衆国

#### [国際交流助成 (短期在外研究)]

1. 末満 堅人 長岡技術科学大学 5年一貫博士課程 (2246001)  
研究課題名: 運動学習補助に向けた人間-機械の相互作用神経メカニズムの解明  
在留地域: ロンドン/イギリス

[抄録は [https://www.tateisi-f.org/research\\_r/books/list.html](https://www.tateisi-f.org/research_r/books/list.html) からご覧いただけます]

2. Surantha Nico 東京都市大学 講師 (2246002)  
研究課題名: IoT ベースのヘルスケアシステムにおけるサイバーセキュリティの課題の緩和に関する研究  
在留地域: シドニー/オーストラリア
3. 加藤 萌 結 北海道大学 博士後期課程 (2246101)  
研究課題名: 新しい量子カゴメ反強磁性体の開発と単結晶育成  
在留地域: Stuttgart/ドイツ

#### [国際会議開催助成]

1. 伊達 央 Sponsorship and Exhibition Chair (筑波大学 准教授) (2235003)  
8<sup>th</sup> IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control (NMPC2024)  
会場: 京都大学百周年時計台記念館 開催期間: 2024 年 8 月 21 日～8 月 24 日
2. 淡野 公一 実行委員長 (宮崎大学 教授) (2235005)  
The International Conference on Machine Learning and Cybernetics & The International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition 2024 (ICMLC&ICWAPR2024)  
会場: 宮崎観光ホテル 開催期間: 2024 年 9 月 20 日～9 月 23 日
3. 仲地 孝之 組織委員長 (琉球大学情報基盤センター 教授) (2235006)  
The 39<sup>th</sup> International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2024)  
会場: 沖縄科学技術大学院大学 (OIST) 開催期間: 2024 年 7 月 2 日～7 月 5 日
4. 甲藤 二郎 IEEE VCIP 2024 組織委員会委員長 (早稲田大学 理工学術院 教授) (2245001)  
IEEE Visual Communications and Image Processing (IEEE VCIP 2024)  
会場: 早稲田大学国際会議場 開催期間: 2024 年 12 月 8 日～12 月 11 日
5. 小橋 昌司 現地実行委員長 (兵庫県立大学 教授) (2245002)  
Joint 13<sup>rd</sup> International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 25<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2024)  
会場: アクリエひめじ 開催期間: 2024 年 11 月 9 日～11 月 12 日
6. 志村 努 組織委員長 (東京大学 教授) (2245004)  
光メモリ・画像・計測国際シンポジウム 2024  
会場: 姫路市文化コンベンションセンター アクリエひめじ 開催期間: 2024 年 10 月 20 日～10 月 23 日
7. 本谷 秀堅 General Chair (名古屋工業大学 教授) (2245005)  
International Forum on Medical Imaging in Asia 2025 (IFMIA2025)  
会場: かがわ国際会議場 開催期間: 2025 年 3 月 20 日～3 月 21 日
8. 室屋 晃子 SRC&ポスター実行委員長 (国立情報学研究所 特任研究員) (2245006)  
The 22nd Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS 2024)  
会場: 京都大学医学部・芝蘭会館 開催期間: 2024 年 10 月 22 日～10 月 25 日



[抄録は [https://www.tateisi-f.org/research\\_r/books/list.html](https://www.tateisi-f.org/research_r/books/list.html) からご覧いただけます]

9. 柳 井 啓 司 実行責任者 (電気通信大学 教 授) (2245008)  
International Conference on Multimedia Modeling  
会場：奈良春日野国際フォーラム 薨～I・RA・KA～ 開催期間：2025 年 1 月 8 日～1 月 10 日
10. 山 田 繁 PVSEC-35 運営委員会 幹事 (岐阜大学 工学部電気電子・情報工学科 助 教) (2245009)  
35<sup>th</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference  
会場：プラザヴェルデ 開催期間：2024 年 11 月 10 日～11 月 15 日
11. 山 本 裕 紹 プログラム委員長 (宇都宮大学 教 授) (2245010)  
第 31 回ディスプレイ国際ワークショップ (IDW '24)  
会場：札幌コンベンションセンター 開催期間：2024 年 12 月 4 日～12 月 6 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 34 号  
2025 年（令和 7 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/>

印 刷 明文舎印刷株式会社  
〒 601-8316 京都市南区吉祥院池ノ内町 10  
TEL 075-681-2741



<https://www.tateisi-f.org/>

（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。）