

次世代半導体・センサ科学研究所 社会実装部門
人間・ロボット共生分野
Human-Robot Symbiosis Research Group

活動報告書

2024

豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology

目次

ご挨拶	1
構成員	2
研究概要	3
人とロボットによる共同物体探索 情報・知能工学系 三浦純	4
〈弱いロボット〉概念に基づく学習環境のデザインと社会実装 情報・知能工学系 岡田美智男, 長谷川孔明	6
音声駆動型顔アニメーションにおける発話多様性に関する研究 情報・知能工学系 顧淳祉, 栗山繁	8
単一入力による左右カメラの独立制御のバーチャル実装 情報・知能工学系 北崎充晃	11
手指の UCM 解析と筋シナジー解析による到達把持運動における自由度解析 情報・知能工学系 福村直博	13
行動認識における自己教師あり学習の不均衡データ問題に関する研究 情報・知能工学系 大村廉	15
落果収穫のための移動ロボットの動作経路生成 機械工学系 堀尾亮介, 石山拓矢, シナジー キャリー, 内山直樹	17
使いやすいロボット・メカトロニクスシステムに関する研究 機械工学系 佐藤海二, 武田洸晶	19
知能材料ロボティクス研究室 研究概要 2024 機械工学系 高木賢太郎	21
VGM 位置推定手法による実機複数ロボットのナビゲーションに関する研究 機械工学系 高橋淳二	23
教育と研究を融合したロボット応用システムに関する研究 次世代半導体・センサ科学研究所/情報・知能工学系 垣内洋平	25
研究業績	27
その他活動	31
オープンラボ2024 報告	32

ご挨拶

次世代半導体・センサ科学研究所 社会実装部門 人間・ロボット共生分野
分野リーダー 三浦 純

豊橋技術科学大学では、2023年4月より次世代半導体・センサ科学研究所（IRES²）社会実装部門の人間・ロボット共生分野において、次世代ロボット技術開発とロボット技術の社会実装を進めております。本分野には、12の研究室もしくは研究グループが所属しており、情報・知能工学系、機械工学系、IRES²にわたる幅広い研究領域から参加しています。

本分野ではあいち知の拠点重点研究プロジェクトなどの公的資金プロジェクト、本学と企業との組織間連携である共同研究講座、本学独自のマッチングファンド方式のイノベーション協働研究プロジェクトなどを通して企業との共同研究も多く行っております。また、本年度も昨年度に引き続き、本学のロボット関連技術全体を気軽に見ていただける機会として、研究室の一般公開（オープンラボ）を実施し、多くの方にご来場いただきました。

本報告書は各構成員による2024年度の研究および各種活動の成果をまとめたものです。ぜひご高覧頂き、また今後ともご指導ご支援のほどよろしくお願い申し上げます。

構成員

三浦純 教授

情報・知能工学系 行動知能システム学研究室

HP : <http://aisl.cs.tut.ac.jp/>

専門 : 知能ロボティクス, ロボットビジョン

岡田美智男 教授

情報・知能工学系 インタラクシオンデザイン研究室

HP : <http://icd.cs.tut.ac.jp/>

専門 : 社会的ロボティクス, HRI, 認知科学

栗山繁 教授

情報・知能工学系 グラフィックメディア研究室

HP : <http://val.cs.tut.ac.jp/>

専門 : モーション工学, 画像処理

北崎充晃 教授

情報・知能工学系 視覚心理物理学研究室

HP : <http://real.cs.tut.ac.jp/>

専門 : 心理物理学, バーチャルリアリティ

福村直博 准教授

情報・知能工学系 生体運動制御システム研究室

HP : <http://bmcs.cs.tut.ac.jp/>

専門 : 生体情報工学, ロボット工学

大村廉 准教授

情報・知能工学系 ユビキタスシステム研究室

HP : <http://usl.cs.tut.ac.jp/>

専門 : 情報工学, 空間知能化, 行動認識

内山直樹 教授

機械工学系 システム工学研究室

HP : <http://ise.me.tut.ac.jp/>

専門 : システム工学, 制御工学, メカトロニクス

佐藤海二 教授

機械工学系 ロボティクス・メカトロニクス工学研究室

HP : <http://rm.me.tut.ac.jp/>

専門 : 精密メカトロニクス, ロボティクス

高木賢太郎 教授

機械工学系 知能材料ロボティクス研究室

HP : <http://smr.me.tut.ac.jp/>

専門 : アクチュエータ, 制御工学

佐野滋則 准教授

機械工学系 ロボティクス・メカトロニクス工学研究室

HP : <http://rm.me.tut.ac.jp/>

専門 : 制御工学, システム同定

高橋淳二 准教授

機械工学系 システム工学研究室

HP : <http://ise.me.tut.ac.jp/>

専門 : ロボティクス, メカトロニクス, システム工学

垣内洋平 教授

次世代半導体・センサ科学研究所 情報・ロボットシステム研究室

HP : <http://irsl.eiiris.tut.ac.jp/>

専門 : ロボットシステム, ヒューマノイドロボット

研究概要

人とロボットによる共同物体探索

情報・知能工学系 三浦 純

1 はじめに

人同士が協力して探しものをするのと同じように、人と協力して探しものができるロボットの開発を目指して研究を行っている。効率的な探索のためには、探索場所をうまく分担することが必要である。複数のロボットの分散探索では、各ロボット間の情報交換は容易だが、人とロボットの場合は容易ではない。そこで、ロボットと人が互いの行動を観察し、また必要に応じて対話により明示的に情報を得ることが探索の効率化に必要となる。本稿では人とロボットによる共同探索におけるこれまでの取り組みを紹介する [1, 2]。SIGVerse [3] を用いて実験環境を構築し、人が VR ヘッドセットを用いて仮想空間にアバターとして参加し、ロボットとインタラクションする実験を行った。ロボットとして HSR [4] を用いた。図 1 に実験の様子を示す。

2 手法の概要

2.1 問題設定

1 台のロボットと 1 人の人が共同物体探索を行う。環境は未知であり、ロボットは何らかの SLAM 手法で地図を作りながら動作する。すべての探索対象物体は机の上にある。対象物体の合計数は既知であるが、どの机の上にあるかは未知である。ロボットは人が見えるときのみ、その位置を知ることができる。すべての対象物体を検出したときに共同物体探索は終了する。互いに質問をし、相手が探索した場所、これから探索しようとする場所に関する情報を取得できる。

2.2 処理の流れ

図 2 にロボットの処理の流れを示す。ロボットは環境をラベル付き 2 次元グリッド地図で表現し、各時間ステップにおけるセンサ入力から地図を更新する。

地図を更新後、人が見えた場合には、前回見えたときから今回までの人の探索行動（どこを探したか）を推定すると同時に、一定の未来の時刻までの人の探索行動も予測する。人が見えない場合には、前回の予測をそのまま延長する。行動の推定もしくは予測の結果、複数の可能性が残された場合には、人間に質問しあいまいさを解消した後、自身の行動を計画する。人からの質問も随時受け付けるため、繰り返しごとに人から質問されていない

いかなを確認する。

対話を通して人の過去および未来の行動が決定できたら、ロボットがこれから探索すべき候補領域を計算し、時間当たりの観測可能範囲を最大化する視点を選んで移動する。

3 ロボットと人の対話

3.1 ロボットから人への質問

人の行動の推定や予測のあいまいさが大きいときに、ロボットは人に対して問合せを行う。質問は、“どこを探しましたか?”、“どこを探しますか?”、“あそこを探しましたか?” の 3 種であり、3 つ目についてはジェスチャとともに質問する。人からの返答は、最初の 2 つについてはジェスチャで場所を示し、3 つ目は “yes” もしくは “No” で返答する。

3.2 人からロボットへの質問

人からロボットへも同じ 3 つの質問をすることができる。人は、ロボットが十分近い距離にいるときに、任意のタイミングで質問をすることが可能である。したがって、質問をするかしないか、どのタイミングで質問するかは、完全に被験者の判断に依存する。

3.3 双方向対話のためのインタフェース

人は Meta Quest2 VR ヘッドセットを装着し、そのコントローラを用いて情報ロボットに伝える。左右の手のコントローラは、ロボットの質問への返答とロボットへの質問に、それぞれ利用する。また、ジェスチャ（指さし）の入力にも用いる。図 3 に、人の視点から見た対話の様子を示す。図中、人がロボットへ質問している状況を上段に、ロボットが人へ質問している状況を下段に示す。

4 仮想空間での実験

被験者には仮想空間内で特定物体（りんご 3 個）を探るように、そしてロボットとの対話は必要であればいつでも行うように指示した。以下の 4 つの場合について実験を行った：(1) 対話なし。ロボットと人は互いの行動を観察して自身の行動を決定する。(2) ロボットから人への質問のみ可能。(3) 人からロボットへの質問のみ可能。(4) 双方向の質問が可能。また、評価は、(a) 探索タスク 1 回あたりの探索時間、(b) 重複探索した机の数、(c) ロボットと人の合計移動距離、の 3 つで行った。21 名の被験者に対して実験を行った。各評価指標の平均値での比較を行った結果を表 1 に示す。

重複探索量については、対話による顕著な効果が見られたが、探索時間と合計移動距離については顕著な効果は見られなかった。対話のためには互いにある程度近づいた上、対話のためのコントローラ操作が必要となり、そのための移動と操作時間が増加する。特に、ロボットから人への質問においては、あいまいさがあるときには必ず質問するという単純な判断を行っているため、必要以上に質問回数が増加し、探索時間の削減への寄与が少なかったと考えられる。一方、人からロボットへの質問

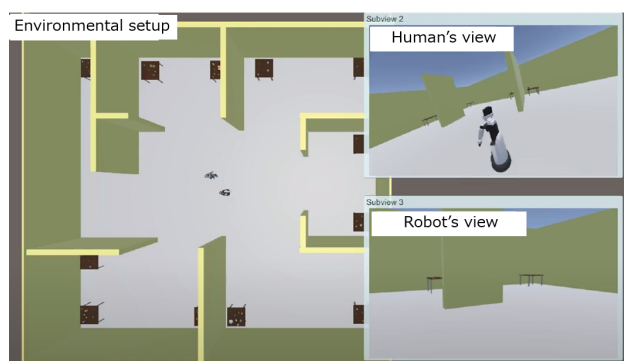


図 1 SIGVerse 実験環境

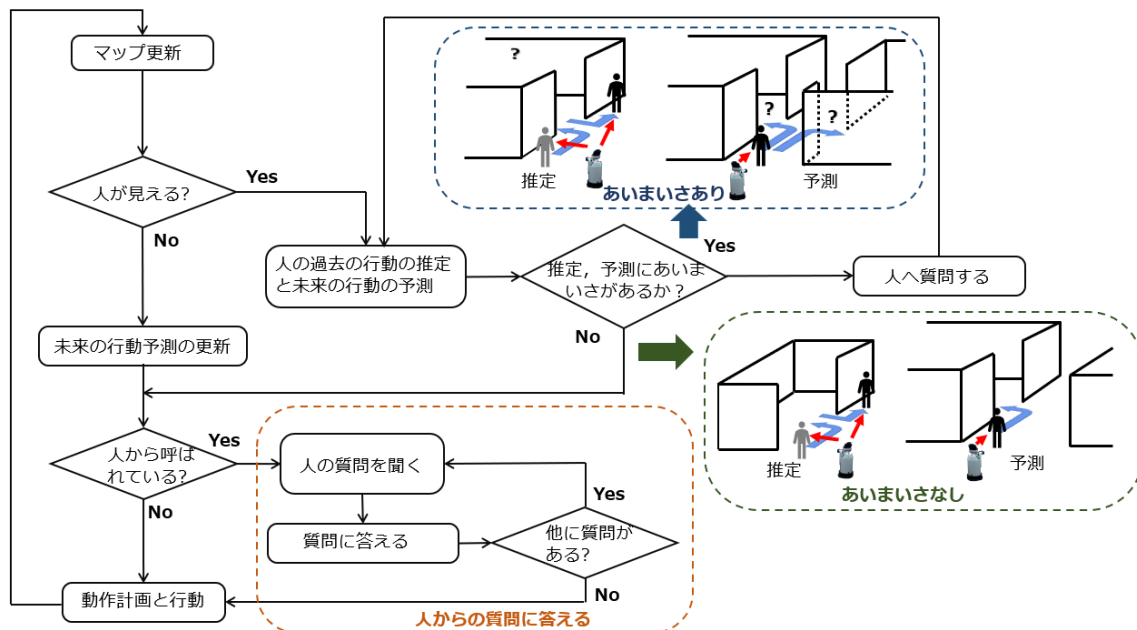


図2 ロボットの環境認識・対話制御・行動計画の処理の流れ

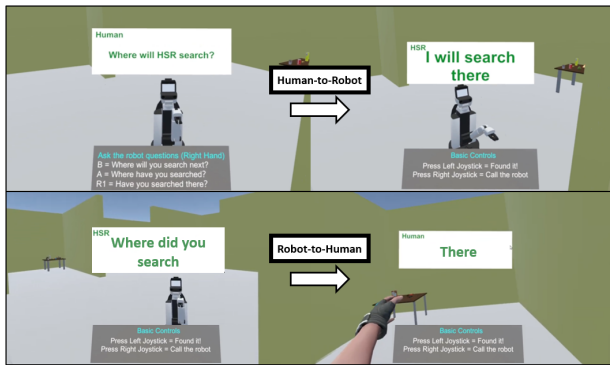


図3 人の視点から見た双方向対話の様子

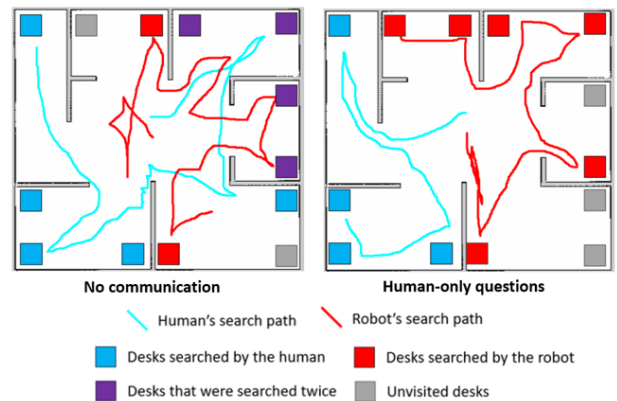


図4 対話なしおよび人からロボットへの質問のみ可能な2つの場合に対する共同物体探索軌跡の例

表1 3つの評価基準の平均値の比較

対話形態	探索 時間 [s]	重複 探索量	合計移動 距離 [m]
対話なし	156.33	2.95	126.33
ロボット→人のみ	148.00	1.43	114.14
人→ロボットのみ	146.81	0.86	101.13
双方向	159.14	1.48	106.96

のみの状況では、人に質問するかどうかの判断が委ねられており、ロボットよりは適切な判断を行った結果、対話による探問と移動量の増加が抑えられ、結果として各指標で評価が向上したと考える。以上のことから、質問の価値とコストを考慮した、より適切な判断アルゴリズムを開発し、ロボットに実装することが必要である。

なお、対話なしの場合と人からロボットへの質問のみ可能な場合について、ロボットと人の共同探索の軌跡の例を図4に示す。適切な対話により効率的な探索が行えていることがわかる。

5 おわりに

人とロボットの協調タスクの例題として、共同物体探索タスクを扱った。人とロボットが同じ空間に存在するため、暗黙的もしくは明示的な情報交換によって探索領

域を適切に分担することにより、探索を効率化させることができる。ロボットの質問開始の判断の改善、対話インタフェースの使い勝手向上が今後の課題である。将来的には実ロボットでの実験を行いたい。

参考文献

- [1] T. Ishii, J. Miura, K. Hayashi, “Enhancing Human-Robot Collaborative Object Search through Human Behavior Observation and Dialog,” ICCVW-2023/ACVR 2023.
- [2] N.L. Hong Da, J. Miura, K. Hayashi: “Enhancing Human-Robot Collaborative Search,” ECCVW-2024/ACVR 2024.
- [3] T. Inamura and Y. Mizuchi: “SIGVerse: A Cloud-based VR Platform for Research on Multimodal Human-Robot Intereaction”, *Frontiers in Robotics and AI: Human-Robot Interaction Section*, 2021.
- [4] T. Yamamoto et al.: “Development of human support robot as the research platform of a domestic mobile manipulator”, *ROBOMECH journal*, 2019.

〈弱いロボット〉概念に基づく学習環境のデザインと社会実装

情報・知能工学系 岡田美智男 長谷川孔明

1 はじめに

本研究室(ICD-LAB)では、自らではゴミを拾えないものの、まわりの子どもたちの手助けを上手に引き出しながら、結果としてゴミを拾い集めてしまう〈ゴミ箱ロボット〉など、関係論的な行為方略を備えた〈弱いロボット〉の研究を進めてきた。当初は他者の手助けを上手に引き出してしまふ〈弱いロボット〉たちの「社会的スキル」に焦点を当てていた。しかし様々なフィールドワークを重ねる中で、子どもたちの手助けを得ながら目的を果たしてしまふ〈弱いロボット〉は、そのかわりの中で子どもたちの優しさや強み、新たな工夫や学びを引き出したり、子どもたちのウェルビーイング(=自らの能力が十分に生かされ、生き生きとした幸せな状態)を向上させるなどの特徴が明らかになってきた。

こうした背景から、2022年度から2024年度に実施してきた、「知の拠点」あいち重点研究プロジェクト第IV期「〈弱いロボット〉概念に基づく学習環境のデザインと社会実装」(D6)では、これらの〈弱いロボット〉の特徴を生かし、経済産業省の「未来の教室ビジョン」で掲げている3つの柱である、(a)学びのSTEAM化、(b)学びの自立化・個別最適化、(c)新たな学習基盤づくりに資する、新たな学習環境のデザイン・構築とその検証を進めることとした。本報告では、このプロジェクトにおける主たる成果を紹介する。

2 3つの開発ターゲットと主な成果

本研究プロジェクトでは、以下の3つの開発ターゲットを設け、新たな学習環境のデザイン・構築を進めた。

2-1) 子どもたちと一緒に成長する共生型ロボット教材 〈Toi〉の開発

「未来の教室ビジョン」における「学びのSTEAM化」では、子ども一人ひとりがワクワクしながら「創る」「知る」を繰り返す中で、文理融合の学びの実現を目指している。ここでは小学生などが〈弱いロボット〉を作り上げ、プログラミングをすることに加え、教室の中で共生的にかかわりながら、ロボットの新たなふるまい等を工夫する中で、子どもたちのスキルにあわせて一緒に成長していく「共生型STEAM学習」のためのロボット教材〈Toi〉を開発した。また、公立小学校での長期実証実験やワークショップを実施した。



図1. 共生型STEAM学習のためのロボット〈Toi〉

その主な特徴としては、(a)人工木材MDFや小型のロボット制御ボード(micro:Bit)を利用して、小学生でも簡単に組み立てられ、ブロックプログラミング言語でふるまいをデザインできる。(b)ヨタヨタした生き物らしさを備え、ロボットへの愛着をもった共生的なかかわりを生み出

し、子どもたちのスキルアップにあわせ、ロボットを成長させることができる。

小中学校等の公教育、ロボット・プログラミング教室、高校生向けのプログラミング学習等に利用可能であることを確認した。今後は、子どもたちの創意・工夫をさらに引き出すために、ゴールの定まった組み立て教材ではなく、あり合わせの部材やプログラム素材を上手に組み合わせることの可能なブリコラージュ型の教材として展開したい。

2-2) 〈弱いロボット〉との間でお互いの知識を補完しあう 協働的な学習環境の構築

子どもたちの学びの自立化・個別最適化に向けて、多人数会話型コミュニケーションロボット〈PoKeBo〉をベースとして、子どもと一緒にお互いの知識を補完しながら、タブレット上の穴埋め問題に取り組む協働的な学習環境〈PoKeBo Cube〉、およびプログラミング言語Scratchや生成AIを用いて〈PoKeBo〉たちのおしゃべりや動作をデザインする共構築型学習環境〈PoKeBo Studio〉を構築した。また高齢者の福祉施設などでの利用可能な、多人数会話型で傾聴的なインタラクションスタイルを備えるコミュニケーションロボット〈Muu〉および〈Namida0 Home〉を開発した。



図2. 協働的な学習環境〈PoKeBo Cube〉



図3. 共構築型学習環境〈PoKeBo Studio〉

その主な特徴としては、(a)タブレット上の穴埋め問題を話題とした〈PoKeBo〉たちのおしゃべりを通して、子どもとロボットとがお互いの知識を補完しあうような、協働的な学びを生み出すことができる。(b)ロボットたちに教えてもらうだけでなく、子どもたちはロボットたちの手助けをしながら自らも学ぶことができ(=Protégé Effect)、有能感・達成感・つながり感に伴うウェルビーイングをアップさせることができる。(c)各教科や子どもの学齢に合わせて、穴埋め問題等を編集し、作成することができる。

今後は〈PoKeBo Cube〉や〈PoKeBo Studio〉の個別学習向けに学習コンテンツの拡充を図っていききたい。



図4. 傾聴のかかわりを生み出す〈Namida0 Home〉



図5. 写真を媒介にして会話を愉しむ〈Muu〉

2-3) 子どもと教師をつなぐ〈ソーシャルメディア型ロボット〉の開発

小学校の教室や療育の場における「新たな学習基盤」として、子どもと教師との間をつないだり、子どもたちの療育を支援するための〈ソーシャルメディア型ロボット〉を構築した。具体的には、子どもたちに昔話を語り聞かせようとするも、時々、大切な言葉を物忘れしてしまう〈トーキング・ボーンズ〉、子どもたちの問いかけに対して、言葉を補いながら説明してくれる〈ブリコロ〉、没入型ディスプレイにより遠隔操作可能な〈オズ・ボーンズ〉、子どもたちと一緒に絵本を眺めながらおしゃべりを楽しむ〈ポケッタブル・ボーンズ〉などである。

その主な特徴としては、(a)言葉を補いながら説明しよ



図5. ソーシャルメディア 〈Talking-Bones〉



図6. 一緒に絵本を愉しむ〈Pocketable-Bones〉

うとする〈ブリコロ〉や時々言葉を物忘れしてしまう〈トーキング・ボーンズ〉は、教室や療育の場におけるコミュニケーションデザインのための有用なツールとなる。(b)没入型ディスプレイにより遠隔操作可能な〈オズ・ボーンズ〉は、療育者などがロボットの中に入り込むようにして、子どもと間接的に関わるためのロボティック・インタフェースとして活用できる。(c)〈ポケッタブル・ボーンズ〉は、養育者や友達と一緒に絵本を眺めながら会話を楽しむような場を生み出すことができる。



図7. VRゴーグルを介して遠隔操作する
〈Oz-Bones〉

今後は、幼稚園や小学校、療育の場で活用していく。特に没入型ディスプレイにより遠隔操作可能な〈オズ・ボーンズ〉は、新たな療育支援ツールなど様々な応用療育への展開を図っていききたい。

3 本研究成果の公開など

2025年2月1日～2日に、日本科学未来館の交流施設にて、本プロジェクト主催の「弱いロボット展」を開催した。

「知の拠点」あいち重点研究プロジェクト第IV期「〈弱いロボット〉概念に基づく学習環境のデザインと社会実装」(2022-2024年度)の研究成果を中心に、黎明期から最新のプロトタイプまで30タイプを超える〈弱いロボット〉たちを展示した。また併設のトークセッションは、第一部：〈弱いロボット〉は、どこから来たの？、第二部：「共棲ロボット」研究開発の現在、第三部：〈弱いロボット〉は、どこに向かうの？の各テーマにそって、〈弱いロボット〉にまつわる裏話から最新研究までを総括する議論を行った。日本科学未来館未来館ホールで開かれた各トークセッションには200名を超える聴講者が参加し、展示会全体では延べ700名を超える参加者があり、盛況のうちに終了した。

謝辞

本研究は、愛知県が公益財団法人科学技術交流財団に委託し実施している「知の拠点あいち重点研究プロジェクト第IV期(第4次産業革命をもたらすデジタル・トランスメーション(DX)の加速)」により行われた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 岡田美智男：『〈弱いロボット〉から考える 人・社会・生きること』、岩波ジュニア新書(2024)。
- [2] 本所然、三宅将吾、長谷川孔明、岡田美智男：子どもたちと一緒に成長する共生型STEAM学習のためのロボット〈Toi〉、HAIシンポジウム2025、G-12 (2025)。
- [3] 関川泰地、西村駿、長谷川孔明、岡田美智男：子どもと気づきを分かち合う共働的な学習環境〈PoKeBo Cube〉の構築、HAIシンポジウム2025、G-13 (2025)。
- [4] 天野僚、西村駿、長谷川孔明、岡田美智男：共働的な関わりを生み出すブリコラージュ風発話様式(bricolage)の研究、HAIシンポジウム2025、D-2 (2025)。
- [5] 石川未彩、長谷川孔明、岡田美智男：PoKeBo Studio：物語の共創を志向する共働的なインタフェースの提案、ヒューマンインタフェースシンポジウムHIS2024、デモ発表、2T-D7 (2024)。

1 はじめに

音声駆動による顔生成とは、与えられたスピーチ音声に適した3次元CGの人物の顔動作を合成することであり、VRやゲーム産業、およびキャラクターアニメーション等の幅広い分野での応用が期待され、盛んに研究が行われている。

近年の深層学習の急速な発展により、深層ニューラルネットワークによって音声入力と顔のモーションとの複雑な対応関係を学習させることが主流になりつつある[1, 2]。しかし、顔の動きを決定論的に予測する上述の手法が開発されている一方で、顔生成を確率的な視点で扱う研究はほとんど提案されていない。条件付き生成モデリング(例: Diffusion に基づくアプローチ[3, 4])を用いた潜在空間からの複数回のサンプリングによる確率的な生成は1つの解決策として考えられるが、この生成方法ではほとんどの場合に顔の動きが非常に類似してしまう。このような問題は多様なオーディオビジュアルのペアデータを収集することの難しさに起因しており、学習データの主要なモードが生成モデルの解空間を占める一方、マイナーなモードの表現は困難となっている。さらに、一般的な尤度ベースのサンプリングは非常に単純である点も生成多様性の低下に繋がっている。多様性促進の一つの方法として、発話者のアイデンティティを象徴するトークンを学習中に導入し、推論時にトークンと対応するアイデンティティを切り替えることで、発話スタイルの異なる結果を生成できる。しかし、これは一人の話者が一種類の発話スタイルしか表現できないという仮定に基づくため、生成結果に差が生じにくい。

本研究では、多様化を促す損失関数によって、明示的に学習を多様な顔動作へと誘導する音声駆動型の顔アニメーション生成手法を提案する。提案手法の本質的なアイデアは、音声情報の条件下で、学習された顔の事前分布空間から複数の潜在コードを探索し、各コードと対応する顔の動きを多様に生成する。これを実現するために、ベクトル量子化変分オートエンコーダ(VQ-VAE)の離散的潜在空間を顔の動きの事前知識として作成する。また、学習されたCodebookから次のフレームに対応するコードを複数予測するようにモデルを設計し、それらの多様性を促進する。VQ-VAEが提供する豊富な表現力を利用することで、提案モデルの学習はデータセット内に含まれる学習サンプルのバリエーションの豊富さを必要とせず、自然かつ多様な顔の動きを生成できる。実験ではオーディオビジュアル学習におけるベンチマークデータセットを用いることで、先行のDiffusionベースの手法に対する本手法の有効性を定量的かつ定性的に示す。

顔のアニメーションを生成する際の更なる課題として、生成に対する可制御性が挙げられる。実応用の一例として、ユーザは意図的に同じリップの動きでありながら、顔の上部のみ異なる発話動作の生成を望む場合がある。提案手法では、顔のパーツに対する制御を実現する

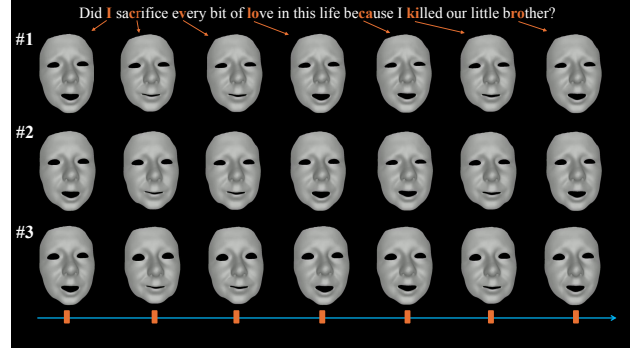


図1 提案手法による多様かつ制御可能な顔動作の生成結果. 同一の入力音声に対して、各行で同様なリップ動作であるが多様な表情動作が生成されている。

ためにリップと上顔を別々に扱うCodebookペアを用意し、各顔のパーツと対応するコードを逐次的に予測するようにモデルを構築する。この設計によって顔の動きを部分的に類似させ、その他の部分に多様な動作パターンを付与できる。これは、一部の顔パーツと対応するコードを固定し、他のパーツのコードを変化させることで実現される。図1にて提案手法の生成例を示す。提案手法は、同様にパーツに対するDiffusionベースの生成機構と同様な可制御性と、より高い多様性を有する。

2 提案手法

D^a 次元の音声特徴である $\mathbf{a}_t \in \mathbb{R}^{D^a}$ によって構成された T フレームの音声信号を $\mathbf{A} = (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_T)$ とする。本研究は、与えられた $\mathbf{A}$ とシンクロした顔モーション $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_T)$ の生成を目的とする。ここで、 $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^{3V}$ は V 個の頂点によって構成された3Dメッシュデータを表し、 $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{3V}$ は音声によって変形するテンプレートメッシュである。したがって、本課題は $\mathbf{f}$ に対して予測される移動量 $\mathbf{M} = (\mathbf{x}_1 - \mathbf{f}, \mathbf{x}_2 - \mathbf{f}, \dots, \mathbf{x}_T - \mathbf{f})$ で顔の動きを表現する。

2.1 顔動作に対する事前知識学習

Xing等[5]が指摘するように、顔の動きを直接的に生成することは、過度に滑らかもしくは静的な予測を招く恐れがある。そこで生成品質を高めるため、本研究ではVQ-VAEが成す有限なプロキシ空間を利用することで、顔動作の事前知識(prior)を学習する。

顔動作のCodebookペア。VQ-VAEは、エンコーダ $\mathcal{E}$ を用いて顔モーションである $\mathbf{X}$ を低次元の潜在変数 $\mathbf{Z}$ に変換する: $\mathbf{Z} = \mathcal{E}(\mathbf{M})$ 。ここで、 $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{T \times W \times C}$ は低次元表現 $\{\mathbf{z}_t\}_{t=1}^T$ の集合であり、個々の $\mathbf{z}_t$ はさらに W 個の C 次元の顔特徴によって表現される。一般的なVAEとは異なり、VQ-VAEにはCodebook $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_N\}$ が設けられ、各時刻の $\mathbf{x}_t$ をコード群 $\{\mathbf{b}_n | n \in \mathcal{O}\}$ で表現する。ただし、 $\mathcal{O}$ は選択されたコードのインデックスを意味する。同時に、VQ-VAEの符号化の際には量子化関数 Q_t を用いて任意の $\mathbf{z}_t$ をCodebook $\mathcal{B}$ における再近傍に置き換える:

$$\mathbf{Z}^q = Q_t(\mathbf{Z}) = \arg \min_{\mathbf{b}_n \in \mathcal{B}} \|\mathbf{z}_t - \mathbf{b}_n\|. \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{Z}^q$ は $\mathbf{Z}$ に対する量子化後の集合である。最終的に、デコーダ $\mathcal{D}$ によって $\mathbf{Z}^q$ を入力 $\mathbf{X}$ へと復元する。

上記の VQ-VAE による学習は強力な事前知識を提供できるが、音声駆動が条件である本研究では次の二つの課題が想定される：(i) 音声はリップ周辺の領域にのみ強く影響を与えるため、すべての顔のパーツを 1 つの事前知識に埋め込むことは、各パーツと音声との相関が不均一になる恐れがある。(ii) § 2.2 で説明するように、この学習方法は顔のパーツに対する制御ができない。柔軟な生成機構を達成するために、本研究では Codebook ペアを用意し、リップとその他の部分（顔の上部、アッパーフェイス）に対して、事前知識を分割的に学習する。リップ領域には $(\mathcal{E}^l, \mathcal{D}^l, \mathcal{B}^l)$ 、アッパーフェイスには $(\mathcal{E}^u, \mathcal{D}^u, \mathcal{B}^u)$ を用意し、VQ-VAE ペアによってリップコード (L-code) とアッパーフェイスコード (U-code) を各々学習させる。

学習方法. VQ-VAE ペアの学習は再構築項とベクトル量子化項による損失関数で最適化される*1：

$$\mathcal{L}_{vq}^* = \|\mathbf{X}^* - \hat{\mathbf{X}}^*\|^2 + \|\text{sg}(\mathbf{Z}^*) - \text{Qt}(\mathbf{Z}^{q*})\|^2 + \lambda \|\mathbf{Z}^* - \text{sg}(\text{Qt}(\mathbf{Z}^{q*}))\|^2. \quad (2)$$

ここで、 $\text{sg}(\cdot)$ は勾配停止 (stop-gradient) 演算を意味し、 λ は Codebook の更新率を調整するハイパーパラメータである。

2.2 逐次予測による多様な顔動作生成

顔動作の事前知識の表現力を利用するために、本研究ではモダリティが異なる入出力間の関連性を交差注意機構 (cross-attention) を用いてモデリングし、音声を顔の動きと対応するコード群に写像することで生成を図る。また、多様性と可制御性を同時に実現するために、提案手法では L-code と U-code を逐次的に予測するだけでなく、各段階におけるコード群を複数予測する。そこで、提案モデルは顔の各パーツを逐次的に組み合わせる。

具体的には、音声エンコーダ $\mathcal{E}^a$ によって埋め込まれた D^f 次元の音声特徴 $F^a = \mathcal{E}^a(\mathbf{A})$ 、および生成された複数組のリップ動作 $\{\hat{\mathbf{X}}_{1:t-1}^{l(p)}\}_{p=1}^{N^l}$ に対して、提案手法は交差注意機構を用いて両者の特徴を統合する。次に、MLP によって構築された写像ネットワークを用いて、統合された特徴をさらに N^l 個の L-code である $\{\mathbf{z}_t^{l(1)}, \dots, \mathbf{z}_t^{l(N^l)}\}$ へと写像する。デコーダを用いて L-code に対して $\mathcal{D}^l$ でデコードすることで、 t 時刻における予測リップ動作を複数パターン $\{\hat{\mathbf{x}}_t^{l(1)}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_t^{l(N^l)}\}$ を生成する。

多様性を促進するために、本研究では各時刻における複数の予測動作ペアから距離を計算し、すべての距離の最小値にペナルティを課す：

$$\mathcal{L}_{div}^l = - \sum_{t=1}^T \min_{i \neq j \in \{1, \dots, N^l\}} \|\hat{\mathbf{x}}_t^{l(i)} - \hat{\mathbf{x}}_t^{l(j)}\|^2. \quad (3)$$

式 (3) の斥力項を導入することで、提案モデルは全時刻において多様なリップ動作を生成できる。

ただし、この生成機構では多様性を重視するために学習時にすべての予測パターンを真値動作で近似できな

い。したがって、予測品質を保証する再構築誤差を以下のように設計する：

$$\mathcal{L}_{rec}^l = \sum_{t=1}^T \min_{i \in \{1, \dots, N^l\}} \|\mathbf{x}_t^l - \hat{\mathbf{x}}_t^{l(i)}\|^2. \quad (4)$$

すなわち式 (4) により、生成されたリップ動作の全パターンのうち少なくとも一つは、真値を十分に表現できる様にする。

次に、任意時刻 t における生成されたリップ動作 $\hat{\mathbf{x}}_t^{l(p)}$ に対して、それと対応するアッパーフェイス動作を予測することで顔全体の動作を合成する。リップの予測方式と同様に、交差注意機構を用いて N^u パターンの U-code $\{\mathbf{z}_t^{u(p,1)}, \dots, \mathbf{z}_t^{u(p,N^u)}\}$ を予測し、 $\mathcal{D}^u$ によって N^u パターンの生成結果に変換する $\{\hat{\mathbf{x}}_t^{u(p,1)}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_t^{u(p,N^u)}\}$ 。また、アッパーフェイスの損失関数の設計もリップ予測と同様であり、斥力項 $\mathcal{L}_{div}^u$ と再構築項 $\mathcal{L}_{rec}^u$ によって構成される。最終的な提案モデルの損失関数は

$$\mathcal{L} = w_{rec}^l \mathcal{L}_{rec}^l + w_{rec}^u \mathcal{L}_{rec}^u + w_{div}^l \mathcal{L}_{div}^l + w_{div}^u \mathcal{L}_{div}^u + \mathcal{L}_{reg} \quad (5)$$

によって与えられる。ただし、 $w_{rec}^l, w_{rec}^u, w_{div}^l, w_{div}^u$ は各項の重みを調整するパラメータであり、 $\mathcal{L}_{reg}$ は予測されたコードに対する正則化項である。

3 実験

データセット. 本実験では、感情的な発話と顔表情の 3D 視聴覚学習におけるベンチマークデータセット BIWI[6] を用いて提案手法を評価する。BIWI には、25fps で記録された男女計 14 人のオーディオビジュアルデータが 40 セット収録されており、各センテンスの平均朗読時間は 4.67 秒である。また、顔メッシュの頂点数 V は 23370 である。文献 [2] のデータ分割方式に従い、192 セットのトレーニングデータ、および 24 セットのテストデータを用意する。

実験設定. 以後の実験ではハイパーパラメータ $(\lambda, w_{rec}^l, w_{rec}^u, w_{div}^l, w_{div}^u)$ を、各々 $(1.0, 10, 10, 0.03, 0.05)$ に設定し、VQ-VAE の学習は 200 エポック、逐次的予測機構の学習は 100 エポック計算する。また、比較手法には確率的な生成手法である FaceDiffuser [3] を用いる。

評価方法. 各手法は、任意の音声に対して計 H 個の顔動作 $\{\hat{\mathbf{X}}^{(h)}\}_{h=1}^H$ を生成し、以下の評価指標で計算する：

- 平均頂点誤差 (MVE): $\frac{1}{T} \|\hat{\mathbf{X}} - \mathbf{X}\|$
- リップ頂点誤差 (LVE): $\frac{1}{T} \|\hat{\mathbf{X}}^l - \mathbf{X}^l\|$
- アッパーフェイス頂点偏差 (FDD): $(\text{std}(\hat{\mathbf{X}}^u) - \text{std}(\mathbf{X}^u))/T$
- 平均生成ペア距離 (MePD): $\frac{2}{H(H-1)} \sum_{h=1}^H \sum_{g=h+1}^H \|\hat{\mathbf{X}}^{(h)} - \hat{\mathbf{X}}^{(g)}\|$
- 最小生成ペア距離 (MinPD): $\min_{h,g=1, \dots, H, h \neq g} \|\hat{\mathbf{X}}^{(h)} - \hat{\mathbf{X}}^{(g)}\|$

ここで、 $\text{std}(\cdot)$ は時系列での標準偏差であり、FDD は生成結果と真値動作との相関を表す。MVE と LVE は、予測結果と真値の誤差を表す。MePD と MinPD は多様性を評価し、生成ペア間の平均および最小距離を表す。本実験では、MVE, LVE, FDD を用いた精度評価を行

*1 *リップとアッパーフェイスのどちらかを指す。

表 1 音声駆動型顔動作生成の性能比較.

	MVE↓ $\times 10^{-4}$	LVE↓ $\times 10^{-4}$	FDD↓ $\times 10^{-5}$	MePD↑	MinPD ↑
FaceDiffuser [3]	6.89	4.28	4.04	5.19×10^{-3}	4.75×10^{-3}
Ours	7.57	4.50	3.23	20.3	10.1

う際, (N^l, N^u) を $(1, 1)$ に設定し提案モデルの学習を行い, 決定論的に予測結果を生成する. また, MePD と MinPD を評価する際, (N^l, N^u) は $(5, 3)$ に設定し再度提案モデルを学習させ, 全 5 パターンのリップ動作に対して, それぞれに対応するアップフェイス動作を 3 パターンのうち 1 種類ランダムに選択し, 顔の全体動作を $H = 5$ 個生成する. 一方で, 比較手法である FaceDiffuser は, MVE, LVE, FDD の評価時には 1 回, MePD と MinPD の評価時には 5 回正規分布からランダムに潜在変数をサンプリングして生成する.

3.1 数値評価

表 1 に生成の定量的な結果を示す. 各評価指数の列において, 最も良い結果を太字で示す. 予測精度について, 提案手法は FDD の評価指標において, Diffusion ベースの先行研究である FaceDiffuser より高い精度であることがわかる. この点を踏まえて, 提案手法はアップフェイス動作において, FaceDiffuser より音声条件に対してより忠実であることがわかる. また, 同レベルのリップ予測精度 (LVE) に対して, 生成の多様性 (MePD, MinPD) が顕著に高いことが確認できる. さらに, MinPD の高さから, 提案手法は式 (3) によって, 任意の生成ペアの重複性が低い方向へ多様性を促進していると考えられる. このことから, Diffusion ベースの生成機構は高品質な顔動作を生成できるが, ランダムサンプリングに依存するために生成多様性が著しく低い. 一方で, 多様性を重視するには, 別途特殊なサンプリング機構を追加で学習することが考えられるが, 多様性, 可制御性, 生成品質の三者を同時に扱うことは容易ではない. それに対して, 提案手法は VQ-VAE の離散コードによって提供された豊富な顔動作の事前知識を利用することで, リップ動作精度を大きく犠牲にすることなく, 予測サンプル数 (N^l, N^u) を変更し, 再学習することで極めて高い多様性を獲得できる.

4 まとめ

本研究では, 多様性を重視した音声駆動による顔動作生成機構を提案した. 提案手法は顔のパーツを逐次的に生成することで, 多様性を促進していると同時に, 顔パーツの動作に対する制御が可能である. また, 生成品質を保証するために, VQ-VAE が提供する豊富な表現力を有する顔の事前知識を利用し, 最適なコードを離散潜在空間から探索することで顔の動作シーケンスを予測する. 評価実験により, 提案手法は先行研究と比較して著しく高い多様性を有することが確認できた.

しかし, 顔の異なるパーツのコードを個別で予測しているため, パーツ間が自然に整合されていない生成例も存在する. 今後の改良策として, Codebook ペアの依存性を学習時に導入し, さらに自然な顔動作の生成を目指す.

参考文献

[1] D. Cudeiro, T. Bolkart, C. Laidlaw, A. Ranjan, and M. J. Black, “Capture, learning, and syn-

thesis of 3d speaking styles,” in *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019, pp. 10 101–10 111.

- [2] Y. Fan, Z. Lin, J. Saito, W. Wang, and T. Komura, “Faceformer: Speech-driven 3d facial animation with transformers,” in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022, pp. 18 770–18 780.
- [3] S. Stan, K. I. Haque, and Z. Yumak, “Facediffuser: Speech-driven 3d facial animation synthesis using diffusion,” in *Proceedings of the 16th ACM SIGGRAPH Conference on Motion, Interaction and Games*, 2023, pp. 1–11.
- [4] B. Thambiraja, S. Aliakbarian, D. Cosker, and J. Thies, “3diface: Diffusion-based speech-driven 3d facial animation and editing,” *arXiv preprint arXiv:2312.00870*, 2023.
- [5] J. Xing, M. Xia, Y. Zhang, X. Cun, J. Wang, and T.-T. Wong, “Codetalker: Speech-driven 3d facial animation with discrete motion prior,” in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2023, pp. 12 780–12 790.
- [6] G. Fanelli, J. Gall, H. Romsdorfer, T. Weise, and L. Van Gool, “A 3-d audio-visual corpus of affective communication,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 12, no. 6, pp. 591–598, 2010.

研究業績

1. Consistency-Preserving Text-Based One-Shot Video Tuning with Segmentation Mask Guidance, Yue Zhuo, Chunzhi Gu, Shigeru Kuriyama, 11th International Conference on Advanced Informatics: Concept, Theory and Application (ICAICTA), 1, 6
2. Summarizing Video Content with a Single Image Using Large Language Models, Shutaro Tamada, Chunzhi Gu, Shigeru Kuriyama, 11th International Conference on Advanced Informatics: Concept, Theory and Application (ICAICTA), 1, 6
3. Text2Layout: Layout Generation From Text Representation Using Transformer, Haruka Takahashi, Shigeru Kuriyama, IEEE Access, 12, 136319-136328
4. Separable Facial Image Editing via Warping with Displacement Vectors, Ryusei Nishikawa, Chunzhi Gu, Haruka Takahashi, Shigeru Kuriyama, IEEE Access, 12, 127224 - 127234
5. 離散潜在空間探索による多様かつ制御可能な音声駆動型顔アニメーション生成, 顧 淳祉, 栗山 繁, 堀田 克哉, Visual Computing 2024
6. 音声と動作の異種マッチングによる発話アニメーション生成”, 栗山 繁, Visual Computing 2024

単一入力による左右カメラの独立制御のバーチャル実装

情報・知能工学系 北崎 充晃

1 はじめに

人の視覚は、両眼融合による立体視を通じて奥行きや距離を認識する。しかし、両眼を独立に制御することはできず、視野範囲には制約がある。一方、カメレオンは左右の目を独立に回転させることで、広範囲な視野を確保している。

このような特性に着目した先行研究では、任意の方向に独立した視野を両眼に提示するシステムが提案され[1]、視野への適応や視覚能力の変化が検討されている[2]。また、小野寺ら(2022)は、バーチャル空間内で眼を頭部から独立させ、位置や方位を操作可能なシステムを提案している[3]。これらのシステムでは、両眼に独立した視野を提示することが可能であるものの、視野の操作には手やコントローラを用いる必要があり、作業を伴う場面では効率性に課題がある。

従来のコントローラに代わる3D空間におけるカメラ操作手法として、視線を用いてドローン(UAV)に搭載されたカメラを制御する方法が提案されており、より直感的な操作の可能性が示されている[4]。

本研究では、視線運動のみを用いてカメラの向きを制御することにより、先行研究の限界を克服し、両眼に独立した視野を提示できるシステムの構築を目指す。

2 将来に想定するシステム概要

本研究で提案するシステムでは、図1に示すように、人の両眼に相当する位置にカメラを搭載し、1人称視点の映像を取得可能なアバターロボットを想定する。このシステムは、著者らが先行研究で提案した2人3眼式テレプレゼンスシステム[5]を基盤としている。

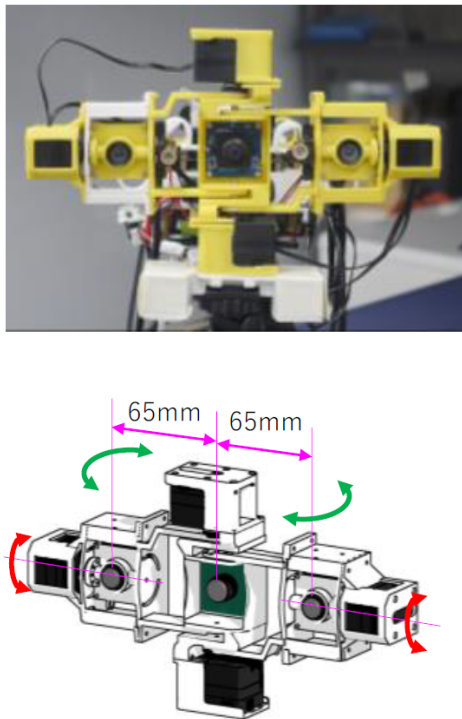


図1 システムの外観

左右の側方カメラは、中央カメラの光学中心を基準

に、半径65mmのYaw軸(水平回転軸)を基点として、左右それぞれ独立に回転可能である。また、視野の上下方向に対応するPitch軸(垂直回転軸)については、各眼の中心を回転軸とし、左右のカメラが同期して回転する仕組みを採用している。本システムの目的は、通常の視線運動を用いて左右の目の視野を独立に制御することである。

3 システムの制御モデル

提案するシステムでは、頭部搭載型ディスプレイ(HMD)に内蔵された眼球運動計測装置を使用し、リアルタイムで頭部中心座標系における視線方向データを取得する。このデータをもとに、両眼のカメラ視野を以下のルールに従って制御する。

通常視野の提示

視線方向が視野中心から一定範囲内の閾値(例: $FoV < 30^\circ$)に留まる場合、左右カメラは初期姿勢における通常の両眼視映像を提示する(図2a)。

横方向の視線逸脱時の制御

視線が左右いずれかの横方向で閾値を超えた場合、超えた方向に対応するカメラは、視線の逸脱量および滞在時間に比例したゲインでYaw軸(水平軸)方向の外転運動を行う。一方、もう片方のカメラは現在の姿勢を維持する(図2b)。

視線の中心復帰と初期姿勢への回帰

視線が再び視野中心の閾値内に収まると、カメラの運動は停止し、その時点での姿勢を維持する。この状態が一定時間(例: 3秒)続くと、カメラは一定の時定数(例: 0.5秒)で初期姿勢の正面方向に回帰する。

上下方向の視線逸脱時の制御

上下方向(Pitch軸)についても、視線の逸脱量に応じてカメラが上転または下転運動を行う。ただし、この際、左右カメラのPitch軸方向の姿勢は常に同期して動作する。

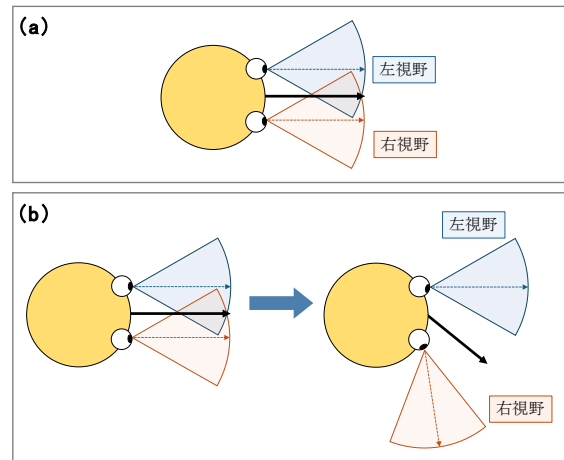


図2 制御手法の模式図

4 バーチャルな実装方法

提案手法をバーチャル空間で検証するために、バーチャル空間内でシミュレーションを実装した(図3)。Unityを用いて構築したバーチャル空間を、HMD (HTC

VIVE Pro Eye, 片眼1440×1600ピクセル、視野90×110度、リフレッシュレート90Hz) に提示した。

このバーチャルシステムを日本バーチャルリアリティ学会第29回大会で展示し、さまざまな意見を得た。

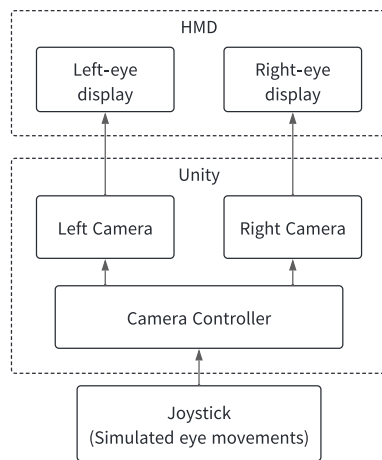


図3. 試作システムの構成図

5 結論と今後の展望

本研究では、視線による左右眼独立制御システムを提案し、単一入力で操作可能な試作システムを実装した。本システムを用いることで、両眼融合による立体視と両眼視野闘争による独立した視覚のスムーズな切り替えが可能であることを確認した。

今後は、ユーザビリティ評価を通じてシステムの有効性を検証し、改良を進める予定である。また、視線を利用した2眼カメラによる両眼視野制御システムのさらなる開発を目指す。加えて、この技術を用いて視野を拡張した際に、利用者の知覚特性や運動特性がどのように変化するかについても詳細に調査する計画である。

謝辞

本研究の一部は、科研費（JP23K18492）および豊橋技術科学大学MILLA高専連携教育研究支援プログラムの補助を受けて実施された。なお、本研究内容は、国内学会会議で発表された[6]。

参考文献

- [1] Mizuno, Fumio, Tomoaki Hayasaka, Takami Yamaguchi, Virtual Chameleon - A System to Provide Different Views to Both Eyes, IFMBE Proceedings, Vol. 25, pp.169-172, 2009.
- [2] Mizuno, Fumio, Tomoaki Hayasaka, Takami Yamaguchi, A Fundamental Evaluation of Human Performance with Use of a Device to Present Different Two-Eyesight Both Eyes, IFMBE Proceedings, Vol. 37, pp. 1176-1179, 2011.
- [3] 小野寺琉, 三村龍矢, 廣瀬修也, 井上康之, 北崎充晃, 逃走する眼：身体と視覚の関係の解体, 日本バーチャルリアリティ学会大会 論文集, Vol. 27, 1G-01, 2022.
- [4] B. N., Pavan Kumar, Adithya Balasubramanyam, Ashok Kumar Patil, Chethana B., Young Ho Chai, GazeGuide:

An eye-gaze-guided active immersive UAV camera, Appl. Sci. (Basel), Vol. 10, No. 5, 1668, 2020.

- [5] 井上康之, 北崎充晃, 3眼アバターロボット：ユーザーの視野を相互共有するテレプレゼンスシステム, 日本バーチャルリアリティ学会大会 論文集, Vol. 27, 3D1-4, 2022.
- [6] 勝俣安伸, 井上康之, 鳥海智志, 萩原隆義, 北崎充晃(2024). カメレオンアイズ 左右眼独立制御による両眼視の拡張：視線制御モデルの検討, 2E2-11, 日本バーチャルリアリティ学会第29回大会, 名古屋, 愛知

手指の UCM 解析と筋シナジー解析による到達把持運動における自由度解析

情報・知能工学系 福村直博

1 はじめに

本研究室では、画像認識技術を併用した筋電義手システムの研究を進めている [1]。その目標は、義手として使うロボットハンドが本当の人の手のように巧みに様々な物体を操作でき、さらに滑らかに運動ができることである。したがって、ユーザーはもちろん、見た目からでも違和感がなく物体把持などの運動ができることが望ましい。そのためには、人の手指の制御メカニズムの解明も重要な研究テーマである。しかし、人の手指は小さい空間にたくさんの筋肉や関節を有する複雑な構造を持つ。そのため、定量的な運動の計測、解析は困難であり、その制御の方策などは十分に明らかでない。

手指に限らず、人の身体は多くの関節があり、運動を実現するために必要以上の自由度を持っていることが巧みな運動を実現する上で重要である。しかし、この冗長自由度のために、ある運動目標の姿勢を達成するための身体関節角の組み合わせは多様になる。さらに一つの関節に複数の筋が関与するため、筋レベルにおいてもある姿勢を実現する無数の筋張力のパターンが存在し、その上、その最終姿勢を実現するための運動軌道まで考えると、これも無数に存在する。したがって、運動を実現する運動指令を一意に定めるのは非常に難しい問題である。実際に人にある運動タスクを繰り返し行わせると、熟練運動であってもその軌道は必ずばらつく。それでも運動目標は達成できることを考えると、人は何らかの方策で運動の目標を達成させるために、身体自由度を制御していると考えられている。この問題は Bernstein 問題として知られており、Bernstein 自身はこの冗長性を解決するために中枢神経系はシナジーと呼ばれる構造単位で多要素を制御していると提唱した。人はこのシナジーの利用により各部位での協調運動を行い、運動を実現していると考えられており、この協調のことを関節群では関節間シナジー、筋肉群では筋シナジーと呼ぶ。

それぞれのシナジーの定量的な解析手法として、関節間シナジーについては UCM (UnControlled Manifold) 解析がよく使われている。UCM 解析とは、関節角など、人の姿勢などの状態を表す状態変数と、性能変数と言われる運動タスクを評価するための変数を考え、状態変数である姿勢がばらついたときに、性能変数に影響を与えるばらつきと冗長自由度のために性能変数に影響を与えないはらつきの成分に分け、その比率から協調度と呼ばれる値を求めて評価する。一方、筋シナジーに関しては、複数の筋活動パターンを非負値行列因子分解 (Non-negative matrix factorization: NMF) することで低次元に圧縮し、筋活動の割合に関する空間成分とその時系列成分を定量化する手法がよく使われる。どちらの解析手法も、動作特性の理解、リハビリテーションの指標やパフォーマンス評価等に利用されている。

また、手指の到達把持運動においては、手がモノに到達する前に予め手形状を対象物の形に合わせる Preshaping と呼ばれる特徴が観測されているが、本研究室

での先行研究により、到達把持運動の UCM 解析からの Preshaping とされるタイミング付近で、手指の関節間協調が高くなることが示されている。

本研究では、到達把持運動中の手指の運動に加えて筋電を同時計測し、UCM 解析と NMF 解析を行うことで、人が冗長自由度をどのように解決しているかを調べる。

2 実験

被験者は右利きで健常な成人男性 16 名で行った。年齢は 20 歳から 24 歳であった。本実験は豊橋技術科学大学、人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を受け、実施した。また、実験前に全被験者に対して実験手順の説明を行い、書面に同意を受けた。

手指運動を計測するためにモーションキャプチャシステム (OptiTrack Flex3) を使用し、10 台のカメラの制御には Motive2.3.1 Final を使用して 100[Hz] で撮影した。マークは各手指関節と手首位置に計 21 個を貼付した。筋電センサには MyoScan (ALTs 社) を 5 個使用し、1. 腕橈骨筋、2. 橈側手根屈筋、3. 長掌筋、4. 尺側手根伸筋、5. 総指伸筋の 5 つの筋を 500[Hz] で計測した。筋電センサのデータ取得とモーションキャプチャとの同期に、Arduino MKR Wifi 1010 を使用した。把持物体は、直径 60[mm]、高さ 100[mm]、重さ 55[g] (軽)、重さ 420[g] (重) の 2 種類の円柱を使用し、位置データを取得するために上面の 3 箇所にマークを貼付した。実験タスクは、到達把持運動を軽い対象物で 50 回、その後に重い対象物で 50 回、合計で 100 回の試行を行った。また、開始や把持タイミングなどタスクの重要なポイントで音を鳴らし、運動時間が約 1[sec] になるように統制した。

UCM 解析ではモーションキャプチャデータの欠損値を線形補間したのち、カットオフ周波数 12[Hz] のローパスフィルタで平滑化を行った。解析対象となる区間は手の動き出しから把持物体を持ち上げ始めた瞬間までとした。また、各試行データ内でマークのうち 1 つでもデータ長の 5% 以上の欠損が続いた場合、その試行は除外し、さらに全被験者全条件の試行データ数を揃えるため、試行間のデータ長の平均を計算し、その平均データ長から最も逸脱している試行データから順に除外していき、データ数を 30 に揃えた。解析に用いるデータはスプライン補完を用いてデータ長を 100 にし、関節位置からリンク長や各関節角を算出した。性能変数は母指先と対向する指先との距離とした。小指の関節角の計算の挙

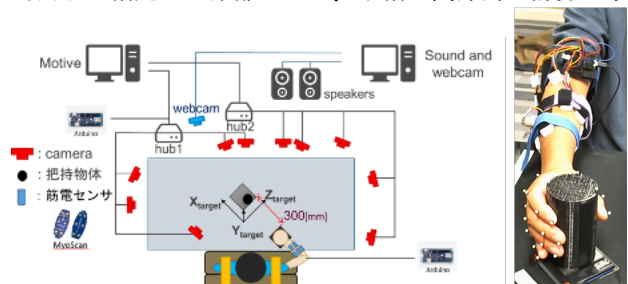


図 1 実験環境

動が不安定だったため、小指を除いた3つを性能変数とし、状態変数は指の関節角、手首関節角を用いた。

NMF解析では、筋電信号を遮断周波数10[Hz]の二次バタワースハイパスフィルタにより直流成分を除去し、全波整流化、5[Hz]の二次バタワースローパスフィルタで平滑化を行った。筋電データも多欠損なデータ(運動時間の2%以上)は除外し、1試行のデータ長を100に統一した。その後、被験者ごとかつ軽・重ごとにデータを統合し、NMF解析を行った。計算を50回繰り返し、二乗平均平方根誤差が最小のものを採用した。計算後、試行ごとに分割し、平均と標準偏差を求めて比較した。

3 結果

3.1 UCM 解析

全被験者(16名)のUCM解析による協調度の運動時間中の平均と標準偏差を図2(a)に示す。上は軽い場合、下は重い場合である。どちらの場合でも協調度の極大点(赤の破線)が時刻60%付近で現れており、改めてPreshapingとされるタイミング付近で協調度が高くなっていることが確認できた。また、軽い場合と重い場合を比較すると、重たい場合のほうが極大点のタイミングが早まっていた。被験者ごとに比較した場合、極大点が見えなかった2名のデータを除いて調べた結果、平均で6.7%早く極大点が見えていた(図3(a))。

3.2 NMF 解析

NMF解析では、被験者16名のうち2名のデータに筋電の取得ミスが疑われたため、14名で解析を行った。筋シナジー数の決定はVAF(variance accounted for)を基に、 $VAF > 0.90$ を満たす時点で決定した。筋シナジーを見たところ、主に前半、中間、後半の3つのタイミングで協調度のピークが現れることが多かった。その中でも、把持の準備期間にあたるであろう中間部分に着目し、被験者、軽重ごとの筋シナジーの中で、運動時間25%から70%の範囲で極大点が見れるシナジーを比較した。この区間の中で複数のシナジーでピークが現れる場合は値が最も大きいピークを含むシナジーを採用した。こうして選択された各被験者のシナジーを全被験者で平均したものを図2(b)に示す。極大値を見ると、軽い場合は48%付近で、重たい場合は40%付近で現れている。すなわち、関節レベルの協調度より早いタイミングでピークになり、かつ重い場合のほうが極大点のタイミングが早いという特徴がわかる。被験者ごとに比較しても平均で5.6%早く極大点が見れていた(図3(b))。

また、極大点が見れたシナジーを相互相関関数で類似性評価した所、軽いときの被験者間、重いときの被験者間、各被験者の条件間、それぞれ類似したシナジーであることが確認できた。さらに、各被験者の条件間のLag(位相のズレ)を求めたところ、軽い場合に対して重い場合の協調パターンに進みがある結果となった。

4 考察

関節間シナジー、筋シナジーのどちらでも協調度が到達運動中に高くなることが確認でき、さらに筋シナジーの協調度ピークが関節間シナジーのピークに先行して現れることを確認した。筋レベルでの制御が関節レベルの制御に関係するので、これは予想通りの結果である。また、重量が重い対象物の方がより早く協調度が高まった

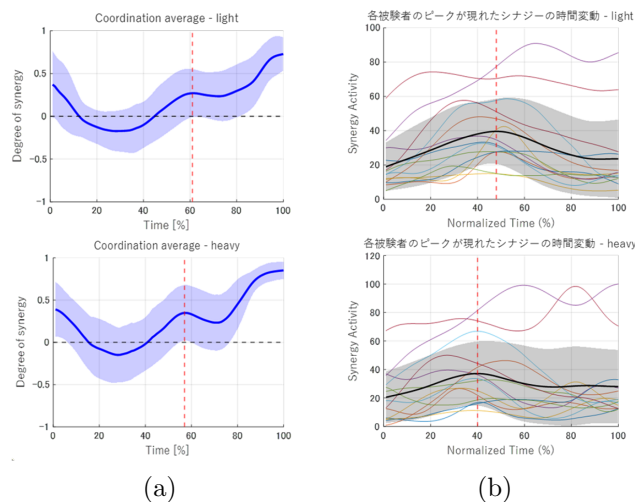


図2 (a) 関節角情報のUCM解析による協調度変化, (b) 筋電信号のNMF解析による協調度の変化

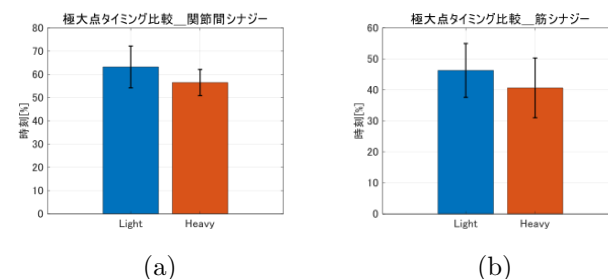


図3 協調度のピークタイミング, (a) 関節角, (b) 筋電信号

が、これも、重い物体の方がより早いタイミングで開き幅が最大になり、Preshapingのタイミングが早まるとされていることと一致している。従来、Preshapingのタイミングを表す指標として、到達把持運動中の母指と示指の指先間の最大開き幅が用いられることが多かったが、この協調度ピークがそれに変わる指標として扱えると考えられ、同時に、この協調度ピークが到達把持運動制御における重要なポイントであることが示唆される。また、他の人の冗長自由度の問題を伴う運動においても、この協調度が運動制御において重要な制御の目標になっていると考えられる。

ほとんどの義手ロボット研究では対象物を把持する最終の把持姿勢を計算することにとどまっているが、到達運動と把持運動のタイミングが適切に調整されていないと運動は成功しない。本研究の結果により、筋シナジー解析からこの協調度ピークタイミングが推定できるならば、筋電信号から手指が最大に開くタイミングの推定も可能であり、到達運動中の滑らかな手指運動パターンの生成が可能になる上に、より成功率の高い義手制御が可能になると期待できる。また、低次元化した筋シナジーにより筋電義手のための精度のよい動作識別が可能になるとともにリハビリの効果の定量化などにも期待できる。

参考文献

- [1] 福村直博, “画像処理を併用した筋電義手システムに関する研究,” 豊橋技術科学大学 次世代半導体・センサ科学研究所 社会実装部門ロボットセンター 2023 年度活動報告書
- [2] 磯崎竜一, 福村直博, “重量の異なる対象物への到達把持運動における手指の UCM 解析と筋シナジー解析,” 第 37 回自立分散システム・シンポジウム, 2025

行動認識における自己教師あり学習の不均衡データ問題に関する研究

情報・知能工学系 大村 廉

1 はじめに

ウェアラブルデバイスを用いた行動認識技術により個人の行動を取得することが可能である。人の行動を計算機に取り込むことは非常に重要であり、人とロボットの共生において活用が期待されている技術の一つである。しかし、行動認識を高精度で行うためには、膨大な量のラベル付きデータが必要となる。また、ラベル付きデータの収集には高いコストが伴うという問題がある。この問題に対し、近年、自己教師あり学習 (Self-Supervised Learning: SSL) が注目されている。

自己教師あり学習は、ラベルなしデータと少量のラベル付きデータからラベルなしデータに含まれる隠れた構造を学習する手法である。この方法は、従来の教師あり学習より必要となるラベル付きデータ量を大幅に減少させることができる」と期待されている。

実際に現場で取得される行動データはしばしば不均衡な分布を示すことがあり、ある特定の行動が生じることは極めて少ない一方で、他の行動は大量に収集される、といったことが多い。しかし、行動認識分野における自己教師あり学習において、不均衡なデータセットが用いられた場合の影響や適応力は明らかにされていない。このようなデータの不均衡性は通常の教師あり学習では性能を低下させる一つの要因となっており、その対応のための研究が多く行なわれている。しかし、自己教師あり学習の識別精度に対する影響は十分な研究が行われていないのが現状である。

そこで本研究では、不均衡な人間行動データに対する自己教師あり学習の影響を調査した。具体的には、自己教師あり学習における事前学習、および、Fine-tuningそれぞれに使用するデータについて、不均衡が生じた場合（不均衡データ）と不均衡が生じない場合（バランスデータ）について認識精度を比較し、その影響を明らかにすることを試みた。

2 関連研究

[1]では、コンピュータビジョンの分野において自己教師あり学習における不均衡データの影響が調査されている。この研究では、通常の教師あり学習に比べて自己教師あり学習は不均衡データの影響は小さいとしているものの、自己教師あり学習でも性能低下が起こることが確認されている。

また、[2]の研究では、ベアリングの故障診断アプリケーションについて、データセットにおける不均衡が原因で生じる精度低下が起こることを指摘している。そして、不均衡度1:1(正例:負例)で99.95%、6:1で84.83%、60:1で55.11%の精度となったことを報告している。

しかしながら、人間行動の認識を目的とした自己教師あり学習の研究ではこのようなデータの不均衡性に関する研究はほとんど行われていない。

3 実験

3.1 実験概要

本研究では、行動認識で実績のある自己教師あり学習の手法であるCOCOAA[3]とSimCLR[4]について、事前学習およびFine-tuningに使用するデータがそれぞれ不均衡/バランスデータである場合の識別精度を比較する。データセットはパブリックデータセットであるPAMAP2、および、独自のデータセットである保育士データを用いた。なお、不均衡デ

ータについては、既存研究で提案されている不均衡度 (ID; Imbalanced Degree) [5]によって、その不均衡の度合いを示し、それぞれ軽度、中程度、高度の不均衡データを用いた。尚、IDは[5]の研究において認識精度と最も相関の高かったヘリンジャー距離を用いて算出している。

3.1 対象とするデータセット

本研究では、公開されているデータセットであるPAMAP2、および、独自に取得した保育士データセットを用いて評価を行う。

PAMAP2[6]のデータセットでは、男性8名と女性1合計9名の被験者に対し、23種類の行動データが収集されている。この内十分な不均衡データとバランスデータを生成するため、行動ラベルのデータ量が最も多い10種類の行動を使用した。表1に認識対象の行動ラベルを示す。PAMAP2では被験者の右手首、胸と足首の3部位に装着したウェアラブルIMUセンサが用いられている。サンプリングレートは100Hzで3軸の加速度データが-16g~+16gの範囲、3軸の加速度データが-6g~+6gの範囲と3軸の角速度データが取得されている。

本研究では、-6g~+6gの3軸の加速度データのみを使用した。センサデータに対して、スライディングウィンドウを重なり50%、ウィンドウサイズ5.12秒で適用し、インスタンスとなる部分系列を抽出した。表1の各ラベルに付随する括弧内の数字は各行動のインスタンス数を表す。

表1 PAMAP2データセットの認識対象行動

Lying(375)	Sitting(359)
Standing(371)	Walking(466)
Cycling(322)	Nordic walking(368)
computer work(605)	vacuum cleaning(341)
Ironing(469)	house cleaning(366)

また、本研究では[7]で取得された保育士行動データセットを用いた。このデータセットは保育士1名の被験者に対して、実際の現場で業務中に行われた39種類の行動ラベルのデータが取得されている。このうち、十分な不均衡データとバランスデータを生成するために、行動ラベルのデータ量が最も多い13種類の行動を使用した。また、被験者の両手首、両足首、腰、背中の6部位に付与された加速度データ (サンプリングレート100Hz) について、スライディングウィンドウを重なり50%、ウィンドウサイズ1秒で適用し、インスタンスとなる部分系列を抽出した。表2に認識対象の行動ラベルとインスタンス数 (括弧内数字) を示す。

表2 保育士行動データセットの認識対象行動

座って話している(2153)	物を出し入れている(670)
歩いている(928)	物を受け渡している(223)
前かがみで話している(716)	立って話している(4894)
物を持って歩いている(1146)	子供に触れている(200)
立っている(424)	じゃがんで話している(210)
座っている(217)	物を持っている(503)
紙を折っている(226)	

3.3 実験方法

識別器の評価はStratified K-fold Cross-validationをK=5で実施する。これら不均衡データ/バランスデータの生成は、各fold毎に学習データとして使用するデータの中で行った。

この時、学習データは、PAMAP2ではインスタンス数を2000に固定した上で、各ラベルのデータ数が均等（ID=0、バランスデータ）となるデータ、および、IDが1.42（軽度）、3.37（中程度）、5.42（高度）となるようランダムベースでデータ数を調整した不均衡データをそれぞれのID毎に10種類作成した。保育士データでは、インスタンス数を1872に固定した上で、各ラベルのデータ数が均等（ID=0、バランスデータ）となるデータ、および、IDが2.65（軽度）、4.58（中程度）、9.54（高度）となるようランダムベースでデータ数を調整した不均衡データをそれぞれのID毎に10種類作成した。

そして、事前学習、および、Fine-tuningにそれぞれのデータを使用した際の識別精度（F1-Score）を評価した。

4 実験結果

4.1 PAMAP2データセット

図1および図2にそれぞれCOCOAおよびSimCLRで実験をおこなった結果を示す。図中の表の「不均衡／不均衡」などは前者が事前学習のデータ、後者がFine-tuningに用いたデータの不均衡／バランスの別を示す。また、不均衡データについては、表の上部(ID)が不均衡度を表す。

図1、2とも、事前学習に不均衡データ／バランスデータいずれを用いるかにかかわらず、Fine-tuningに不均衡データを用いたときは、バランスデータを用いた場合よりも識別精度が低下した。また、Fine-tuningの不均衡度（ID）が増加するにつれて、識別精度が低下した。一方、事前学習の不均衡度（ID）についてはほとんど影響がなかった。

なお、図1と図2を比べると、SimCLRよりもCOCOAの方が影響が大きかった。

4.2 保育士データセット

保育士行動データセットについて、COCOAを用いて実験を行った結果を図3に示す。

図3では、PAMAP2の結果と同様に、事前学習に不均衡データ／バランスデータいずれを用いるかにかかわらず、Fine-tuningに不均衡データを用いたときは、バランスデータを用いた場合よりも識別精度が低下した。また、Fine-tuningの不均衡度（ID）が増加するにつれて、識別精度が低下した。一方、事前学習の不均衡度（ID）についてはほとんど影響がなかった。

5 まとめ

本研究では、行動認識における自己教師あり学習の利用において、不均衡データの影響調査を行った。自己教師あり学習には行動認識研究で実績のあるCOCOAとSimCLRを使用した。データセットにはPAMAP2と保育士行動データセットを使用し、不均衡データとバランスデータを作成してそれぞれ事前学習、および、Fine-tuningに使用し識別精度を評価した。

結果より、事前学習におけるデータの不均衡／バランスは認識精度にはほとんど影響しないのに対し、Fine-tuningにおけるデータの不均衡／バランスは認識精度に影響を及ぼすことがわかった。また、Fine-tuningの不均衡度（ID）が増すにつれ識別性能が低下することがわかった。

これらのことから、行動認識における自己教師あり学習において、事前学習におけるデータについて均衡性は特に考慮する必要は無いが、Fine-tuningに用いるデータは各行動に対して均等にラベルづけを行う事が適切であると考えられる。

今後は、不均衡度と性能低下の関係をより細かく調査することを考えている。

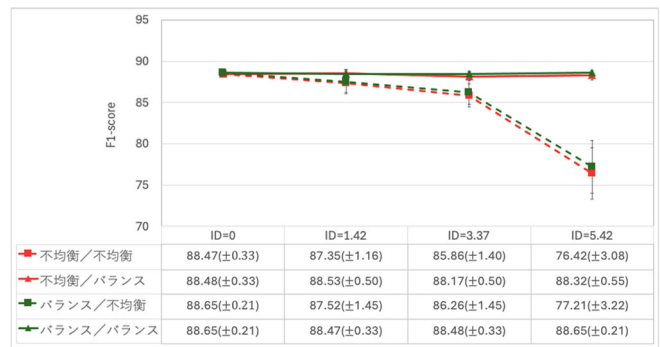


図 1 PAMAP2の結果:COCOA

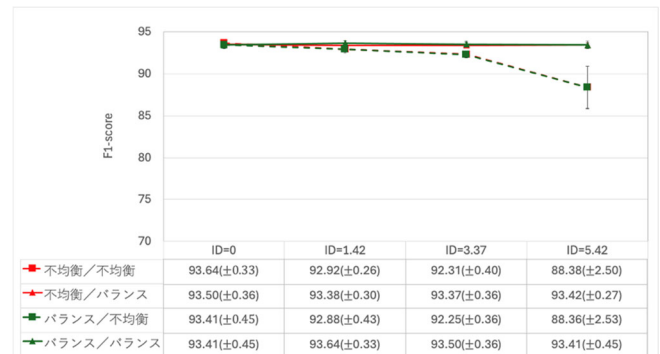


図 2 PAMAP2の結果:SimCLR

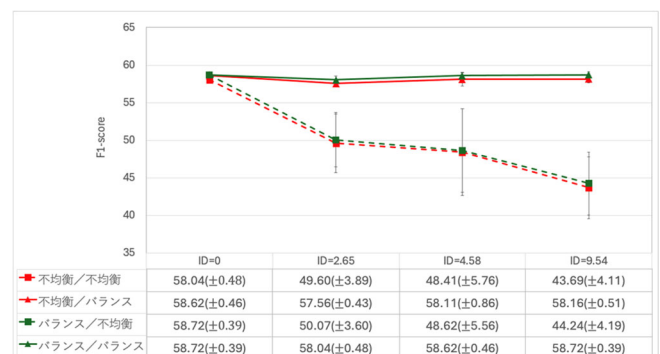


図 3 保育士データの結果:COCOA

参考文献

- [1] Hong Liu, Jeff Z. HaoChen, Adrien Gaidon, Tengyu Ma, Self-supervised Learning is More Robust to Dataset Imbalance, International Conference on Learning Representations, 2022.
- [2] Shi Jia, Houliang Wang, Yunglong Yan, Pengfei Zhang, Rui Yang and Zenghui An.: A Standard Self-Learning Unsupervised Contrastive Learning Model for Bearing Fault Diagnosis in Imbalanced Datasets, 2023 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference (PHM-Hangzhou, Hangzhou, China, pp. 1-7, 2023.
- [3] Shohreh Deldari, Hao Xue, Aaqib saeed, Daniel V.Smith, Flora D.Salim, COCOA: Cross Modality Contrastive Learning for Sensor Data, Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, Vol. 6, Issue 3, pp 1-28, 2022.
- [4] Chi Ian Tang, Ignacio Perez-Pozuelo, Dimitris Spathis, Cecilia Mascolo, Exploring Contrastive Learning in Human Activity Recognition for Healthcare, Machine Learning for Mobile Health Workshop at NeurIPS, 2020.
- [5] Jonathan Ortigosa-Hernandez, Inaki Inza, and Jose A. Lozano, Measuring the class-imbalance extent of multi-class problems, Pattern Recognition Letter, vol. 98, pp32-38, 2017.
- [6] Attila Reiss, Didier Stricker.: Introducing a New Benchmarked Dataset for Activity Monitoring, In 2012 16th International Symposium on Wearable Computers, pp. 108-109, 2012.
- [7] Kenshi Fujiwara and Akira Omi and Naoko Ishibashi and Ren Ohmura.: Exploring Deep Learning Models and Training Data Amount for Nursery Activity Recognition, The 4th International Conference on Activity and Behavior Computing, 2023.

落果収穫のための移動ロボットの動作経路生成

機械工学系 堀尾 亮介, 石山 拓矢, シナジー キャリー, 内山 直樹

1. はじめに

農産物の収穫ロボットでは、果樹に実った果実をマニピュレータ等により取得する構造が多いが、地表に落下した果実を対象とする形態もある。例えば、椿油の原料となる椿の種子では、熟して地表に落下したものを収穫する。このような形態においては、果樹周辺に散在する果実を効率よく収穫するロボットが望まれるが、著者らの知る限りでは研究事例は多くない。

著者らのグループの前年度の報告では主に落果収穫機構について述べたが、今回は移動ロボットの制御方法について紹介する。なお本報告は、文献[1]での発表内容をまとめたものである。

本研究では、地表に落下した果実の収穫ロボットの開発に資する、農園内を巡回しながら果樹の周囲を周回する効率的な軌道の生成手法を提案する。農園内に多数存在する果樹を効率よく巡回するため、巡回セールスマン問題に基づいて果樹の巡回順序を決定し、収穫動作として果樹の配置や半径から螺旋状の軌道を生成する手法を提案する。また、果樹の周囲を周回する動作を実現するために樹幹を検出する手法を導入し、実験により提案手法による移動ロボットの動作を確認する。

2. 移動ロボット装置

本研究で用いる実験装置の外観をFig. 1に示す。実験装置は電動車椅子を活用した移動装置、樹幹検出用RGB-Dカメラ、制御用PCからなる。樹幹検出用として正面と左側面用のRGB-Dカメラ2台を搭載する。移動装置の車輪は制御用PCにより速度制御され、フィードフォワード制御及びPI制御を用いた。

果樹の周囲を周回するため、実験装置に搭載されたRGB-Dカメラの画像から樹幹の検出を行い、果樹の位置を推定する。樹幹の検出手法は文献[2]を参考にした。樹幹の検出結果の例をFig. 2に示す。

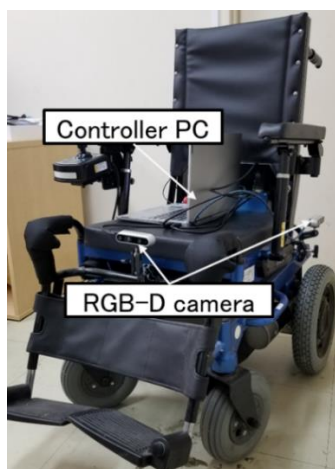


Fig. 1 Experimental robot

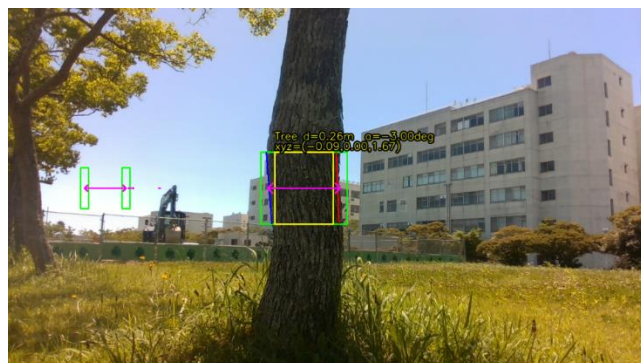


Fig. 2 Example of trunk detection

3. 収穫経路の生成

農園では多数の果樹が存在しているため、ロボットが果樹を巡回する順序と収穫動作軌道を決定する必要がある。本研究では農園内の果樹の配置及び果樹周辺の収穫範囲は既知とし、収穫動作開始前に果樹の巡回順序と収穫動作軌道を生成するものとする。Fig. 3に本研究で対象とした実験環境の様子を、Fig. 4に樹木の配置を示す。図中の数字1～4は樹木の番号であり、0はロボットの初期位置を示す。また、樹木を表す各点の直径は樹幹の直径を表す。果樹を中心に円形に収穫範囲を設定し、この領域を被覆するようにロボットを移動することで果実を収穫する。本研究では収穫範囲を果樹から半径1.5[m]と仮定した。



Fig. 3 Experimental environment

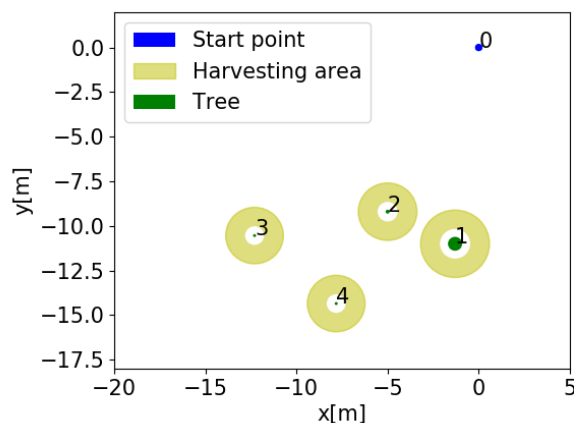


Fig. 4 Tree locations in a test case

3-1. 果樹の巡回順序

効率よく果実を収穫するためには、全ての果樹を一度だけ周り元の位置に戻る最短経路が必要である。この問題は「巡回セールスマン問題」であり、一般に巡回すべき地点が多くなると厳密解の導出が困難である。本研究では焼きなまし法による近似解を用いて巡回順序を決定するものとし、文献[3]を活用してアルゴリズムを実装した。巡回セールスマンの近似解によって決定された巡回順序をFig. 5に示す。

3-2. 動作軌道の生成

果樹周辺の収穫領域を被覆する等間隔の螺旋状軌道を生成し、その始点と終点を巡回ルート上に設定することで全体の軌道を生成する。収穫領域を被覆する軌道としてアルキメデスの螺旋を用いる。アルキメデスの螺旋によりそれぞれの間隔が等しくなり、間隔をロボットの幅とすることで円形領域を効率よく被覆することができる。Fig. 6に生成された動作軌道を示す。

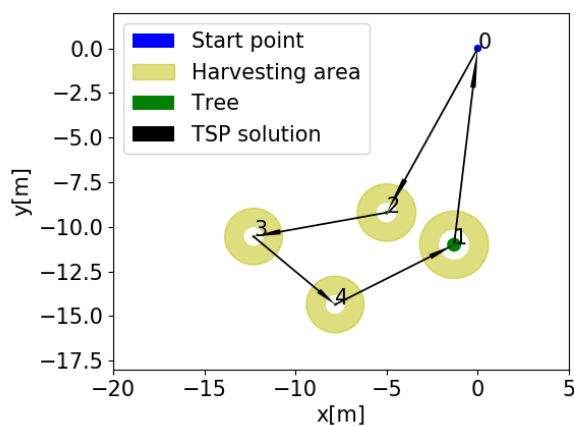


Fig. 5 Traveling order of trees

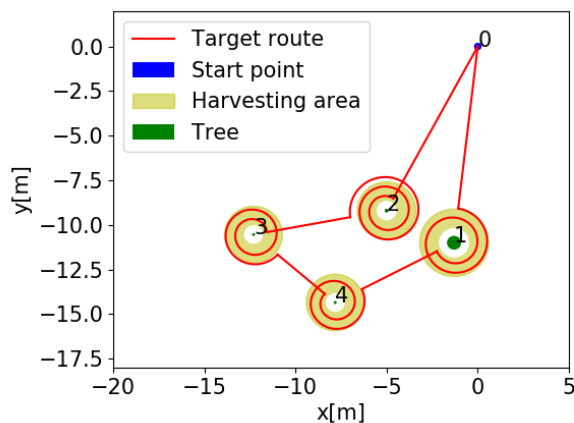


Fig. 6 Generated trajectory for harvesting

4. 実験

画像処理による樹幹検出及び生成された経路による収穫動作を確認するため、動作実験を屋外で行った。目標軌道としてFig. 6を用い、Visual Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM)によりロボットの実際の軌道を記録する。実験は条件を変えず3回連続で実施した。VSLAMのアルゴリズムは文献[4]を参考に実装した。実験の様子をFig. 7に、実験結果の一例をFig. 8に示す。



Fig. 7 Experimental photos of robot motion

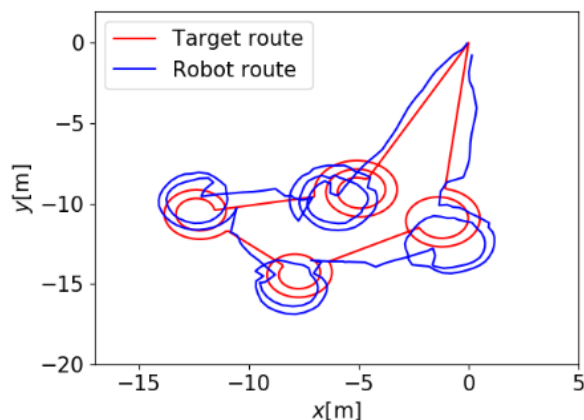


Fig. 8 Experimental results

目標軌道と実際の軌道に誤差が確認されるが、これはVSLAMによるロボットの推定位置誤差によるものと考えられる。一方で、樹木を周回動作中の目標軌道と実際の軌道の半径の平均絶対誤差は0.157[m]であり、樹木との相対位置は実用的な範囲である。

5. おわりに

本研究では、果樹の配置から果実を収穫するための移動ロボットの経路を生成する手法を提案し、画像処理による樹幹の検出、巡回セールスマン問題による果樹の巡回順序の決定、螺旋軌道による周回軌道の生成を組み合わせた移動ロボットの動作を確認した。

提案手法の社会実装にあたっては、農園地図の自動生成や果樹の識別が課題となる。このためには、RTK-GNSSや地磁気センサによる正確な位置情報を組み合わせることが有効である。

参考文献

- [1] 堀尾ほか, 果樹周辺に散在する果実収穫のための移動ロボットの巡回経路生成, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会, 209, 2025
- [2] N. Shalal, et al., Orchard mapping and mobile robot localization using on-board camera and laser scanner data fusion - Part A: Tree detection, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 119, pp. 254-266, 2015
- [3] GitHub-fillipe-gsm/python-tsp, <https://github.com/fillipe-gsm/python-tsp> (2024.1.26 アクセス)
- [4] M. Labbé and F. Michaud, RTAB-Map as an Open-Source Lidar and Visual SLAM Library for Large-Scale and Long-Term Online Operation, Journal of Field Robotics, Vol.36, No.2, pp. 416-446, 2018

1 はじめに

日本をはじめとして、世界的に少子高齢化が問題となっている。少子高齢化により労働人口が減少しているだけでなく、支援を必要とする人口の増大によるさらなる労働力不足も招いている。このような労働力不足問題に対し、人の労力の低減や、代替となる労働力としてロボットの需要が増大している。

ロボットには高性能であることが重要であるとともに、使いやすく長期間使用できること求められるが、導入や維持管理の容易さが、広い分野で長期にわたり活用されるためには必要である。ICT、IoT技術の発達により、ビッグデータを利用し、効率化や省人化を図る取り組みが進んでいる。しかし、システムの個体差や環境変化に対応するためには、自ら情報収集・学習し、自律して必要な機能を実現することも重要である。

我々の研究グループでは、ロボット・メカトロニクスシステムに標準搭載されるセンサを使用して、専門的な知識のない人でも簡単に、あるいはシステム自身が自律的に、システムの特徴の把握や制御系の設計・調整を実現する方法を研究している。また、簡単な構成のロボットで、高齢者の日常生活動作を支援する研究にも取り組んでいる。

2 精密制御系の簡単設計・調整

ロボットなどの運動システムは、構成要素であるアクチュエータを含む機構とセンサ、コントローラにより、総合的に性能が決まる。コントローラにより機構の性能が引き出されるため、コントローラは要求仕様を満たすために重要な要素である。通常は、高い性能のためには正確な力学モデルや、制御系設計の豊富な知識が必要である。しかし、そのためには専門の技術者がいなければ利用が難しく、時間や労力もかかってしまい扱いづらい。

この課題の解決のために、Nominal Characteristic Trajectory Following (NCTF) 制御法を提案している。コントローラは、位相面上に表される目標値に近づく際の望ましい減速応答曲線である規範特性軌跡(NCT)と、機構の挙動をNCTに倣わせるための補償器で構成される。NCTは、実機の減速応答を利用して決定するため、力学モデルを必要としない。補償器も図1のようにPI補償器であれば、調整は簡単である。実際に様々な精密機構にこの制御系を適用し、有効性を実証している[1, 2]。また、人による試行錯誤が必要だったNCTの決定手順を改良し、手続き的に決定する方法も評価している[3]。

倣い補償器としてPI補償器を用いる場合、調整が容易と言っても人による試行錯誤を必要とするため、さらなる単純化が求められる。学習制御器を用いてフィードフォワード(FF)要素を設計する制御系では、学習遅延を避けるため、倣い補償器はP要素のみを持つ。これに積分要素を持つ外乱オブザーバを組み合わせて、2つの要素を分離でき、設計が容易になる。しかし、オブザーバには通常は力学モデルやモデルパラメータが必要である。そこで、学習制御器を用いて得られるFF要素の一部を用いて外乱推定器を作成、積分器に変えて制御系を構成することで、倣い補償器を手続き的に簡単に設計する方法を提案し、有効性を実証している[4]。

NCTF制御法の性能は、外部信号、特に基準入力の影響を受ける。このような外部信号の影響を抑制するためには、信号を生成するモデルを持つ制御系が有効であり、このことは内部モデル原理として知られている。基準入力のモデルは既知とみなすことができるため、NCTF制御法の設計容易性を犠牲にすることなく、追加の補償器として使用できる。この考えに基づいてボールねじ機構の制御器を設計し、その有効性を実証している[5]。

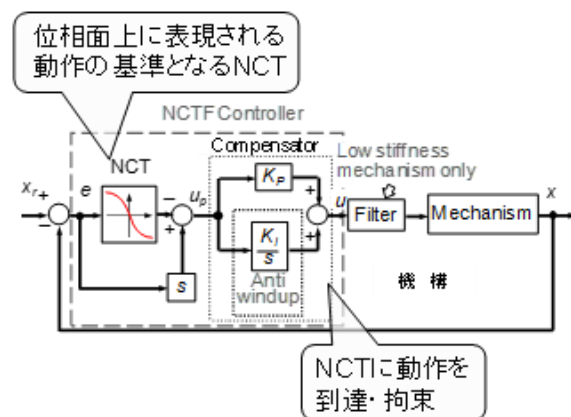


図1 NCTF制御系の構成

3 高齢者支援ロボットのための人間の動作分析

高齢者の日常生活動作を支援するロボットの需要が高まっている。特に起立・歩行・着座は日常生活において連続的に頻繁に行われる動作であり、一台のロボットでの支援が求められている。しかし、高齢者のための施設や一般家庭では、大掛かりなシステムは導入が難しいため、小型で簡単な構成のロボットが望ましい。

そのため、歩行器をベースとして、図2に示す肘置き昇降が可能な支援ロボットを開発している[6]。駆動輪の制御により歩行を支援できるだけでなく、肘置き昇降により起立・着座も支援できる。

ロボットが自律して高齢者を支援するためには、歩こうとしているのか座ろうとしているのかなど、ロボット利用者の状態を推定して、適切な支援動作を行う必要がある。しかし、多数のセンサを使用した複雑なシステムは扱いづらく、プライバシーの観点からも忌避される可能性がある。そのため、簡易なセンサを少数用いた簡単な構成のシステムで、ロボット利用者の状態を推定することが重要である。

そのために、利用者の重心位置を候補点として計算する手法を提案している。人体を剛体のリンクと関節で表したリンクモデルを使用することで重心位置を計算できるが、センサ情報が少ない場合には一意に求めることができない。そこで、関節の可動域を用いることで重心位置の候補を求める手法を提案し、有効性が確認されている[7]。

また、AIを利用することで、重心候補の様々な特徴量を学習させて状態を推定する手法を提案している。サポートベクターマシン(SVM)により、立とうとしている、座ろうとしているといった利用者の状態を推定できる。また、歩行中に転倒しそうな状態などの異常状態の検知

も実現しており、支援ロボットを推定結果に基づいて動作させて有効性を実証している[6].

AIは、学習のための教師データが必要であり、その取得に労力や時間がかかるだけでなく、計測の被験者にも負担がかかってしまう。特に、異常状態を模擬した実験は、身体的な負荷やリスクが大きいという課題があった。そこで、これまでに得られた重心候補のデータを分析することで、正常な起立と異常な起立では、重心候補の前方向の最大値に顕著な差異があることを明らかにした。この特徴を利用することで、1クラスSVMを使用し、正常な起立のデータのみを学習して異常な起立を検知する手法を提案し、有効性を確認している[8].

一般家庭での使用を目指した、更に小型な高齢者支援システムとして、杖型ロボットの開発も進めている。杖型の歩行支援ロボットはこれまでも研究されているが、支持できる面積が小さいことから、大きな力が加わる起立・着座を支援する杖型ロボットの研究は進んでいない。そこで、ベース部分の移動機構に加えて、杖の伸縮と傾きを制御できる杖型ロボットの開発に取り組んでいる。起立時の身体負荷を低減できる杖型ロボットの支援動作を決定するために、杖型の計測装置を用いた起立時の下肢負担を計測する研究を行っている。杖先位置や杖長さ変えて起立実験を行い、膝関節モーメントが低減される条件を明らかにしている[9].



図 2 起立・歩行・着座支援ロボット[6]

4 高齢者支援ロボットと利用者のコミュニケーション

自律して動作する高齢者支援ロボットは、起立などの身体動作の支援に有効である一方で、利用者の不安感が懸念されている。ロボットはセンサ情報をもとに自身の動作を判断して自律して行動するため、その動作の内容やタイミング、動作決定の理由などが利用者には不明確であるため、不安を感じると考えられている。

そこで、ロボット倫理のアカウンタビリティという考えに基づき、ロボット内部の情報を透明化するとともに、ディスプレイとスピーカを用いて、ロボットの動作内容や動作のタイミングなどの情報を人に提示する手法を提案し、有効性を確認している[10].

情報の提示は不安感の払拭に効果があることを明らかにした一方で、自律したロボットに利用者の動作が制御され、利用者の意思が動作決定に反映されにくいことが、不安感や不快感を与えることが分かった。そのため、情報の一方的な提示だけではなく、ロボットと利用者が相互にコミュニケーションを取れることが重要である。しかし、複雑なインターフェイスでは、ロボット利用者が本来行いたい起立などの動作への集中を妨げてし

まうおそれがある。そこで、情報提示のためのディスプレイ・スピーカに加え、押しボタン2個のみを搭載した簡易なインターフェイスをロボットに実装し、実験によりその有効性を実証している[11].

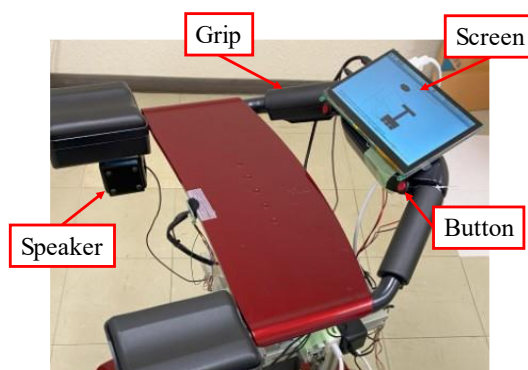


図 3 相互コミュニケーション用インターフェイス[11]

5 まとめ

我々の研究グループでは、ロボット・メカトロニクスシステムを、設計者や製作者だけでなく、利用者などの様々な立場の人にとって使いやすくし、社会に貢献することを目指している。今回報告した研究を更に発展させるとともに、新たな視点で取り組みを進めていく予定である。

参考文献

- [1] Sato K., Maeda G. J., A practical control method for precision motion – Improvement of NCTF control method for continuous motion control, *Precis Eng.* 2009;33:2:175–186.
- [2] Chong S.-H., Sato K., Practical controller design for precision positioning, independent of friction characteristic, *Precis Eng.* 2010;34, 2:286–300.
- [3] 宮平大輝, 佐藤海二, 武田洸晶, NCTF制御系の自動設計のためのNCT決定法, *JSPE2024春季大会講演文集*, 2024;:808–809.
- [4] 佐藤海二, 武田洸晶, 学習制御器を用いた外乱推定器設計と精密制御への応用, *JSPE2024秋季大会講演文集*, 2024;:413–414.
- [5] Xuan G., Takeda M., Sato K., Effect of additional compensator based on internal model principle in precision motion control, *International Conference on Precision Engineering*, 2024;:OS14–O4.
- [6] Takeda M, Sato K, Hirata Y, Katayama T, Mizuta Y, Koujina A., Standing, Walking, and Sitting Support Robot Based on User State Estimation Using a Small Number of Sensors, *IEEE Access* 2021;9:152677–152687.
- [7] Takeda M, Hirata Y, Kosuge K, Katayama T, Mizuta Y, Koujina A., Human CoG estimation for assistive robots using a small number of sensors, *International Conference on Robotics and Automation* 2017;:6052–6057.
- [8] 武田洸晶, 佐藤海二, 福祉ロボット使用者の重心候補を用いた起立時の異常検知, *日本機械学会論文集*, 2024;90:939:24–00150.
- [9] 武居直希, 佐藤海二, 武田洸晶, 起立動作における杖型支援器具の下肢負担低減効果, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 2024;:1P1–E01.
- [10] Takeda M, Hirata Y, Weng Y.-H., Katayama T, Mizuta Y, Koujina A., Accountable system design architecture for embodied AI: A focus on physical human support robots, *Advanced Robotics*, 2019;33:23:1248–1263.
- [11] Takeda M, Sato K, Importance of mutual communication through a simple user interface in care robots, *IEEE Access*, 2024;12:91863–91872.

1 はじめに

我々の研究室では、知能材料（スマート材料, smart materials）を用いて、柔軟なロボット技術の開発を目指して研究を進めています。本研究室では、知能材料として、電場応答性高分子(electroactive polymer, electromechanically-active polymer, EAP)や、熱応答性高分子繊維、圧電材料(piezoelectric materials)などを中心とした高分子アクチュエータと高分子センサに関する基礎と応用について研究しています。高分子アクチュエータとは何かについては解説記事[高木2019, 高木ほか2020]や文献[Asaka2017, 鈴森ほか2023]をご覧ください。

基礎としては、知能材料の数理モデルの構築、物理パラメータ推定、制御法を研究しています。応用としては、ロボティクス応用や、産業機械への応用を目指したメカトロニクス応用を行っています。具体的には、おもに次のテーマについて研究しています。

1. 高分子アクチュエータ・センサのロボティクス・メカトロニクス応用に関する研究
2. 高分子アクチュエータ・センサの数理モデリングと制御に関する研究
3. 圧電材料・電磁アクチュエータなどを用いた振動制御に関する研究

ほかにも、テーマ1に関連して農業応用を目指し、豊橋技術科学大学イノベーション協働研究プロジェクトとしてシンフォニアテクノロジー株式会社様との共同研究に取り組んでいます。またほかのテーマとして、ソフトロボットのモデル化を目指し物理に基づく深層学習に関する研究の取り組みも始めています。

2023年から2024年にかけて、本研究室PIの高木がカナダに国際共同研究のために滞在してきました。今後につながる実りある共同研究を開始することができ、これから成果を発表していきたいと思っています。

以降では、それぞれのテーマに関して、2024年度の活動概要を示します。

2 高分子アクチュエータ・センサのロボティクス応用

近年、高分子アクチュエータを用いた柔軟なロボットへの期待が高まってきています。我々のグループでは、水中で駆動できるIPMC(Ionic Polymer-Metal Composite)アクチュエータのロボット応用、高速で応答する誘電エラストマーアクチュエータの応用、安価で簡易な釣糸人工筋のロボット応用を行っています。これまでに、IPMCアクチュエータを用いた応用を行ってきましたが(図1)、現在はそれに加えて、釣糸人工筋と誘電エラストマーの応用に力を入れて取り組んでいます。

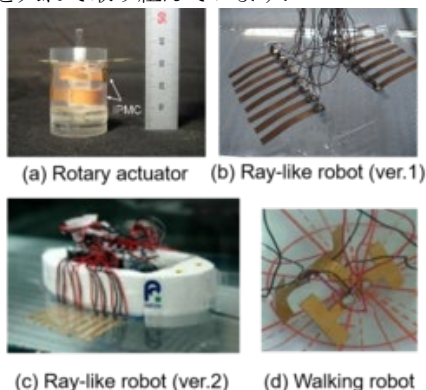


図1：IPMCアクチュエータのロボット応用これまで

釣糸人工筋とは、ねじってコイル状にしたナイロン糸に熱を加えると可逆的に大きく収縮(10%-20%)する現象[Haines et al., Science, 2014]を利用したアクチュエータです。釣糸などの合成繊維は極めて安価で容易に入手でき、今後のアクチュエータ応用が期待されます。ロボットや支援装具への応用を目指し、我々のグループではその高性能化とモデリング、制御法などについて研究しています。

釣糸人工筋の応用に関連した2024年度の成果として、釣糸人工筋と誘電エラストマーの複合化によって性能向上をはかるとともに、ロボットハンドへ応用する研究を進めました[木村ほか2024]。また、後述のUBCとの共同研究ではアクチュエータの設計論につながるモデル化なども行っています。

また、釣糸人工筋の動作原理の動機付けられた新しい新奇人工筋肉アクチュエータの開発を進めています。熱駆動型アクチュエータ「固体ポリマーマッキベン型人工筋」(図2)について、製法によって高性能化できることがわかりました[帖佐ほか2024]。また、従来使われてきたカーボンナノチューブではなく安価なカーボンファイバーでも人工筋肉アクチュエータとして動作することがわかりました[吉松ほか2024]。



図2：固体ポリマーマッキベン人工筋肉

誘電エラストマーアクチュエータとは、薄いゴム膜の両面に柔軟電極を塗布された静電アクチュエータの一種であり、柔軟で大きな変形を生じる高分子アクチュエータとして近年盛んに研究が行われています。2024年度は、誘電エラストマーアクチュエータを加振デバイスとして用いる際、静電吸着効果を用いて簡単に取り付け取り外しができる方法を提案しました[Hiruta et al. 2024, 比留田ほか2024ab]。他にも、柔らかい電磁アクチュエータに関する研究にも取り組み始めました[永井ほか2025]。例えば、果物などの農作物に誘電エラストマーアクチュエータを貼り付け振動を加えると、計測された振動特性から熟度の判定ができるため、農業への応用が期待できます。

農工連携を目指す研究に関連して、豊橋技術科学大学イノベーション協働研究プロジェクトでは、シンフォニアテクノロジー株式会社様と共同研究を行っています。2024年度の成果として、フィンレイグリッパと呼ばれる適応機構をもつソフトグリッパと、柔軟なシリコンゴムで作られる静電吸着パッドを組み合わせ、農作物を把持するためのグリッパを開発しています[温ほか, 2024]。

3 高分子アクチュエータ・センサの数理モデルと制御

高分子アクチュエータやセンサの応用において、シミュレーションや設計、モデルベース開発のために、物理モデルが重要となります。我々のグループでは、物理原理の解明に向けた特性評価や物理モデル構築とともに、動的システムに対する解析と設計の強力な手法であるシステム制御工学を駆使した数理モデルの近似や物理パラメータの推定などについて研究を行っています。とくに、

高分子アクチュエータの物理モデルの多くは非線形偏微分方程式で表されるため、工学的に扱いやすい伝達関数や状態方程式などの形式に近似を行う方法を研究しており、物理ベースの制御指向モデルとして研究しています。

Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC)やBucky gelなどのイオン導電性高分子アクチュエータの物理を完全に記述できるようなモデルはまだ研究途上であり、電気化学、流体力学、弾性力学、高分子物理などを用いたモデル化が必要であると考えられます。我々のグループでは、共同研究者とも協力して特性評価と物理モデルの構築を行うとともに、制御指向モデルへの近似とシミュレーションについて研究をしています。

IPMCの数理モデルに関する成果として、2024年度は、前年度導出に成功したZhuのIPMCセンサモデルの解析解を用いて、数値近似を行いました。その結果、シミュレーションを行うことなく、IPMCセンサの時間応答の予測が可能になりました[Ishikawa et al. 2025]。

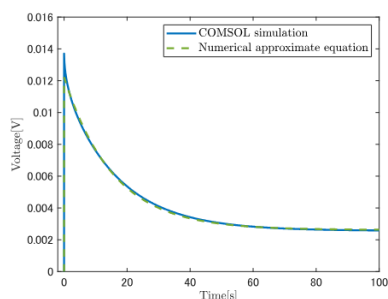


図3：IPMCセンサモデルの時間応答。実線：シミュレーション、破線：モデルから解析的に近似した解

4 振動制御

外部電気回路を接続した圧電素子や電磁モータを用いて、センサレスの振動制御を行う手法（シャント制振，shunt damping）があります。これは、素子やモータにより、振動のエネルギーを電氣的エネルギーに変換して消散もしくは蓄積することにより、振動が小さくなるというものです。機械構造物や自動車部品、モータ、サスペンション、原子間力顕微鏡などへの応用が期待されています。我々のグループでは、とくに、シャント制振を入出力の取り方が特殊な制御系として捉え、物理原理に基づく数理モデルのパラメータ推定や、制御系の解析と設計、ならびに電子回路実装などについて研究しています。

2024年度のシャント制振の研究成果として、剛体モードをもつねじり振動系に対して最適な電磁シャント制振を行うため、定点理論を適用して準最適な係数を得ることに成功しました[塩野ほか2024, Shiono et al. 2025]。

センサレスの振動制御のほかにも、新しい手法に基づく振動制御についても研究を行っています。よく知られている速度フィードバック制御という振動制御手法では、仮想的なダンパをフィードバック制御によって実現し減衰を得る手法ですが、変位センサを用いる場合には制御器が微分特性をもち高周波でハイゲインとなるためあまり望ましくはありません。近年、Integral Resonant Control (IRC)と呼ばれる新しい振動制御手法が注目されており、従来の速度フィードバック制御とは真逆の積分とポジティブフィードバックを用いる点で興味深い手法です。IRCは複数の振動モードに対して大きな振動制御効果とロバスト性を持つ一方で、剛体モードをもつ制御対象

には適用ができません。本研究室では、剛体モードをもつ制御に対してIRCを適用すべく研究を行っています。

5 UBCとの国際共同研究

科研費 国際共同研究加速基金の支援によって、カナダ・ブリティッシュコロンビア大学（UBC）のJohn D. W. Madden教授との国際共同研究を開始しました。主に鈎糸人工筋のモデル化について研究を進め、特にアクチュエータの設計論につながる力学的仕事について成果を得つつあります[Takagi et al., 2025]。Madden先生の研究室では材料の基礎だけでなく、実応用と密接に関連した研究を進めており[Dhillon et al. 2025ab, Yin, et al., 2025]、非常に刺激を受けました。今後も引き続き共同研究を進めてまいりたいと思います。

6 まとめ

知能材料ロボティクス研究室の研究概要と、2024年度の研究成果についてまとめました。研究室のホームページ[5]もどうぞご覧ください。

参考文献

- [1] 高木，ロボット学会誌，2019
- [2] 高木ほか，計測と制御，2020
- [3] Asaka and Okuzaki eds., *Soft Actuators*, Springer, 2017
- [4] 鈴森ほか編著，ソフトロボット学入門，オーム社，2023
- [5] 知能材料ロボティクス研究室ホームページ <https://smr.me.tut.ac.jp/>
- [6] 木村ほか，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，2024
- [7] 帖佐ほか，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，2024
- [8] 吉松ほか，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，2024
- [9] T. Hiruta et al., EuroEAP 2024, 2024
- [10] 比留田ほか，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，2024
- [11] 比留田ほか，IIP2025 情報・知能・精密機器部門（IIP部門）講演会，2025
- [12] 永井ほか，日本機械学会東海支部 第56回学生会卒業研究発表講演会，2025（発表予定）
- [13] 温ほか，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，2024
- [14] K. Ishikawa et al., SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)
- [15] 塩野ほか，日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2024, 2024
- [16] Shiono et al., ASME J. Sound Vib., 2025 (under review)
- [17] K. Takagi et al., SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)
- [18] S. K. Dhillon et al., SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)
- [19] X. Yin et al., DEMO: Sensing rollers, robot skin, and active socks, SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)
- [20] S. K. Dhillon et al., SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)

1 はじめに

移動体に搭載したセンサのみで環境計測によるマップの作成と、そのマップに対して自己位置を推定する SLAM 形式のロボットのナビゲーション技術は成熟期にあり、飲食店での配膳・下げ膳ロボットや複合商業施設での巡回ロボットなど、産業応用や人の生活空間での応用などが進んでいる。一方で、よく利用される LiDAR センサは高価で定期的な校正を要するなど費用コストが大きく、LiDAR-SLAM を大量導入している物流現場においてもまだ採算が合わないという報告もある。近年では、より廉価な RGB カメラを利用する Visual Positioning System (VPS) に注目があつまり効果的な手法がいくつか提案されているが、移動体上での要求計算リソースが大きいことや大学、病院の廊下などのテクスチャが疎な環境では正しく動作させにくいという問題も報告されている。

上記を背景として、本研究室では環境の 3D モデル (geometric) をマップとしてサーバで保持し、クライアントはセンシングデータ (visual) をサーバに送るとサーバ側で位置が推定 (matching) され、その結果をクライアントに返すという、サーバ・クライアント型の位置推定システム Visual-Geometric-Matching (VGM) を提案し開発してきた [1]。このアプローチではクライアントのセンサはカメラのみで、WiFi 通信の他には環境側に物理的なインフラストラクチャの設置が不要であるため特に移動体が多数となるようなアプリケーションでの導入コストや運用コストに大きな利点がある。高橋の着任 3 年目となる 2024 年度は、高精細 3 次元レーザースキャナにより既存建築物の計測作業をさらにすすめ、開発済みの Panorama-VGM[2] と Ceiling-VGM を利用しての Autonomous Mobile Robot (AMR) のナビゲーションへの応用、複数台ロボットでの Multi Agent Picking and Delivery (MAPD)[3] の実機実装などと、応用面での研究がすすんだ。本報告では特に MAPD への応用について述べる。

2 MAPD 問題と MAPF 問題とその解法

複数のロボットがそれぞれの出発地点からそれぞれの目標地点まで、他のロボットとの衝突を回避しつつも効率のよい経路を生成する問題を Multi Agent Path Finding (MAPF) (図 1) 問題という。さらに各ロボットそれぞれに複数の目標地点があり、MAPF を繰り返すことで全体として効率のよい経路を探索する問題を Multi Agent Picking and Delivery (MAPD) 問題という。MAPD 問題の解放の 1 つである A* アルゴリズムを複数台ロボットのケースに拡張する Cooperative A* (CA*) は、ロボットの位置や経路を表する 2 次元座標に時間軸を加えた 3 次元空間において衝突を回避する経路探索を行うものである。しかし、ロボット台数の増加により計算コストが指数関数的に増加しスケーラビリティに問題がある。低レベル探索と高レベル探索の 2 段階の構成をとる Conflict-Based Search (CBS)[4] は最適性を保証しつつより効率的な手法ではあるが、ロボットが数百台となると計算時間が膨大となりやはりスケーラビリティに問題がある。

多少の最適性を犠牲にして、計算コストを下げる手法に Priority Inheritance with Backtracking (PIBT)[5] がある。PIBT では、目的地までの距離などによる優先度の順に経路計画をたてつつも経路衝突の際には優先度を継承し、さらに経路衝突が解消した際には優先度をバックトラックするという柔軟な手法であり、1 つ 1 つの計算が軽量で数万オーダーのロボットの経路計画を数秒で解くことのできるスケーラビリティに優れた手法である。

3 PIBT の問題とその改良による imomushi-PIBT

PIBT は実機で検証されていないという問題がある。実際、我々が VGM を敷設した体育館において 2 台の AMR による

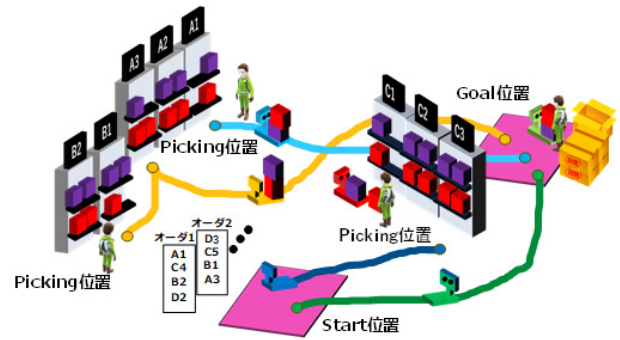


図 1 MAPD 問題

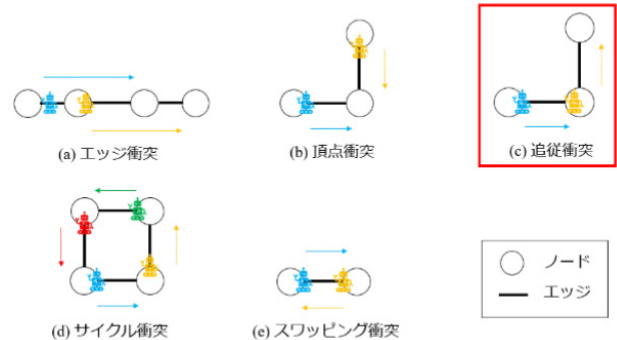


図 2 PIBT で考慮される衝突パターン

MAPD 問題において、PIBT により経路生成をしたところシミュレーションでは経路の衝突はないが実機では衝突するという現象が発生した。我々は衝突の様子を注意深く観察し、衝突には再現性があることを確認した。つまり、PIBT では図 2 に示すような衝突の状況を考慮し、これを回避するように経路を生成するが、実機では (c) の衝突を避けられなかった。その原因は、実機ではシミュレーションと違い、(i) ロボットに大きさがあること、(ii) 加速度の制約があること、(iii) 経路追従制御の特性、(iv) 位置推定誤差 (VGM+Wheelodmetry / w EKF: $e \leq 0.12\text{m}$) であると考えられる。

(e) の衝突の回避方法としては、小型 LiDAR などの近接センサでロボットの接近に応じて速度を調整するという局所的な解決法が容易に思い浮かぶが、すべてのロボットの挙動を考慮した上で生成する動作計画を局所的に変更することは全体に対してどのような悪影響があるか計り知れない。(e) の衝突の回避方法としては、PIBT の改良というアルゴリズムレベルでの改良が望ましい。

この問題に対して、我々はロボットの大きさを考慮する imomushi-PIBT を提案した。図 3 に imomushi-PIBT における優先度継承の様子を示す。ポイントは、各ロボットの 1 時刻前の位置を不可侵領域に加え、その領域への移動要望がある場合も通常と同様に優先度を継承するというものである。通常の PIBT では (d) の段階で Robot01 が移動するが、imomushi-PIBT ではここでは Robot01 は優先度を継承し、(e) の段階で移動する。これはちょうどロボットが伸縮するイモムシのように見立てられ、これが imomushi-PIBT という名前の由来となっている。

一方で、PIBT には潜在的に、ある状況においては複数のロボットが同じ動作を繰り返す振動現象によるデッドロックの問題があることが分かっており、これは imomushi-PIBT においても同様である。そこで、2 ロボット振動については 4 時刻前までのロボット位置情報を保持し、3 ロボット振動については 8 時刻前までのロボット位置を保持し、現在位置と同じ状況であった場合にそれぞれの振動現象を検知するアルゴリ

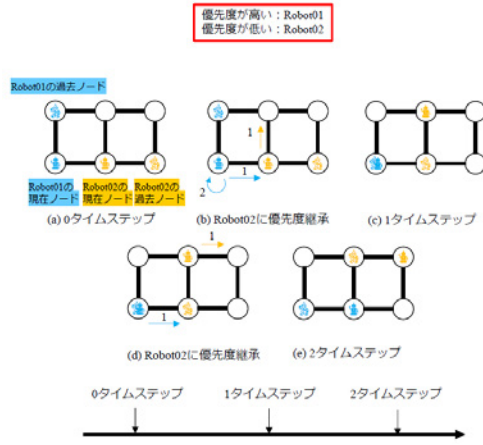


図3 imomushi-PIBTの優先度継承

ズムを開発した。また、振動を検知した場合は、優先度継承のルールを一次的に変更することで振動を解消するアルゴリズムを開発した。

4 シミュレーションによる検証

開発した imomushi-PIBT のシミュレーション環境 (図4) を python で構築し、通常の PIBT と比較した。実験は各設定で 10 回づつ行い、いずれにおいても不可侵領域が増加するため通常 PIBT に比べて imomushi-PIBT では効率が下がることが確認したが、デッドロックに陥ることなく経路生成を完了できることを確認した。10 回の試行の作業完了時間の中央値を通常 PIBT: $T_{classic}$, imomushi-PIBT: $T_{imomushi}$ とし、imomushih-PIBT の作業効率 Q を次式に定める、

$$Q = \frac{T_{classic}}{T_{imomushi}}. \quad (1)$$

シミュレーション結果を図1に示す。imomushi-PIBT では計算時間は150台あたりまではそれほど大きくないが、それ以上となると急激に増加することが分かった。また、作業効率は10台を超えたところから低下することが分かった。これらの結果は、環境のスペースに対するロボットの占有率に大きく依存すると考えられる。占有率が低い場合は、imomushi-PIBT の効率はそれほど劣化しないことを確認した。

5 実機実験

開発した imomushi-PIBT を実機システムに実装し、ロボット4台での MAPD 実機検証を行った (図6)。本学体育館に Ceiling-VGM 位置推定システムを導入し、ロボットシャ

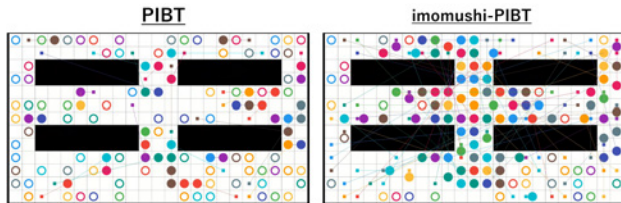


図4 シミュレーションによる PIBT と imomushi-PIBT の比較 (ロボット120台の場合)

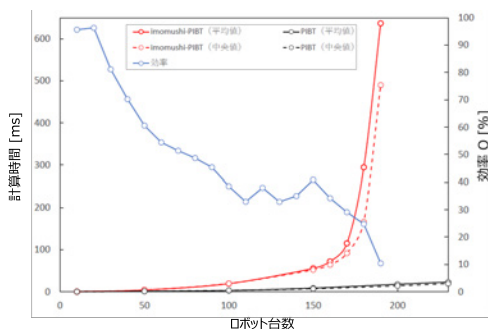


図5 ロボット台数に対する計算時間と効率



図6 実験に用いたロボットと MAPD 実機検証の様子

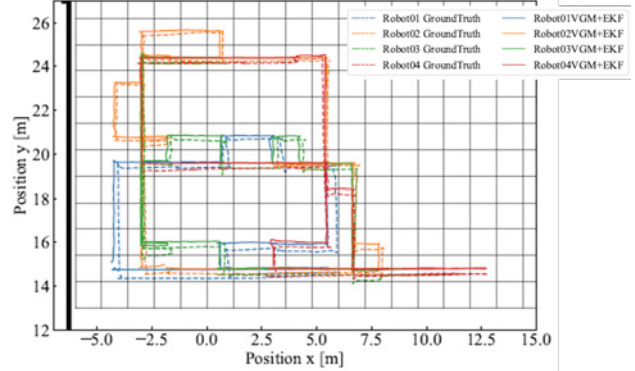


図7 4 台のロボットの走行軌跡 (MoCap 真値と VGM+EKF 推定値)

シー (ScoutMini メカナム) にアルミフレームで床高 1200mm の位置に VGM 用のカメラを垂直上方を向くように取り付けている。Ceiling-VGM, EKF の周期はそれぞれ 1Hz, 10Hz, である。imomushi-PIBT は経路探索用のサーバマシンに実装し、事前にランダムで定めた各ロボットの4つのピックポイントとゴールのリストの情報を用いてあらかじめすべてのロボットの経路を生成し、各ロボットにそのロボットの走行経路を配布している。

ピックポイントのパターンを4種類用意し、それぞれのパターンごとに5回づつ試行したがいずれの試行でもアルゴリズムや VGM 位置推定が原因でロボットが衝突することなく、すべてのロボットが求められる経路を走行できたことを確認した。図7に4台のロボットの走行軌跡を示す。

6 まとめ

2024 年度は引き続き NEDO 若サポ事業の支援を受け、また新たな企業寄付金等もあり研究をすすめることができた。課題であった 3D モデルの作成については市内の土木建築系のサポート企業に作業依頼できることが分かり、今後多くの様々なタイプの建築物で VGM の実機検証を進める予定である。提案する位置推定システムは様々な自動化アプリケーションのためのインフラストラクチャとして利用できることから、人間・ロボット共生リサーチセンターのメンバーと研究連携したり、オープンキャンパス等でデモンストレーションを実施できるように準備を進めていきたい。

参考文献

- [1] Takahashi J, Kawabe M, Ito S, Kaneko N, Takahashi W, Sakamoto T, Shibata A, and Yu Y (2020) Image-retrieval Method Using Gradient Dilation Images for Cloud-based Positioning System with 3D Wireframe Map. Sensor and Materials Vol. 32. No. 2. pp 611-623 DOI:10.18494/SAM.2020.2678.
- [2] Nakao T, Takahashi J, "Accurate and Cost-Scalable Panorama Visual-Geometric-Matching based Localization System for Robot Navigation," 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Munich, Germany, 2025, pp. 1286-1291, doi: 10.1109/SII59315.2025.10871069.
- [3] 生嶋 玄明, 高橋 淳二, "仮想レイヤに基づく複数 AMR の準リアルタイム非衝突移動経路生成", 第 24 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, 2023.
- [4] Guni Sharon, Roni Stern, Ariel Felner, and Nathan R Sturtevant, "Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding," In: Artificial intelligence 219 (2015), pp. 40-66.
- [5] Keisuke Okumura, Manao Machida, Xavier D'efago, and Yasumasa Tamura, "Priority inheritance with backtracking for iterative multi-agent path finding," In: Artificial Intelligence 310 (2022), pp. 103-123.

教育と研究を融合したロボット応用システムに関する研究

次世代半導体・センサ科学研究所/情報・知能工学系 垣内 洋平

1 はじめに

次世代半導体・センサ科学研究所（情報・知能工学系兼任）の情報・ロボットシステム研究室において、2024年度に研究した内容について説明します。当研究室では、ロボットを用いた教育、ロボットを用いる応用分野、新たなロボットシステムの創造・制御について、システムの構成の観点から研究を行っています。

2 ロボットを生成するシステムとロボット教育

ロボットを含んだシステムであるCPS (Cyber Physical System)を用いて課題を解決できるようになるための教育として、課題解決型学習を参考にしたロボット教育のコースを研究しています[1]。課題解決型学習となるように、問題の提示を行い、問題の解決に必要なツールの使用方法を学習し、シミュレーションを用いて検証・修正を行い、最終的に実機を構成して提示された問題を解決できる実システムを構成するという内容の教育コースとなります。

基礎的素養としてCPSを使えることが出来るようになることを目的として、ロボットを専門としない学生に対しても座学の授業を行っています。簡易なヴィジュアルプログラム、模倣的センサネットワーク、シンプルなシミュレーションをwebベースで構築(図1)することで、実験器具やサーバー等のリソースを使用せずに授業を行うことが出来る構成となっており、講義のオンデマンド化等への対応が可能であり、ロボット教材開発等に継続して取り組みます。

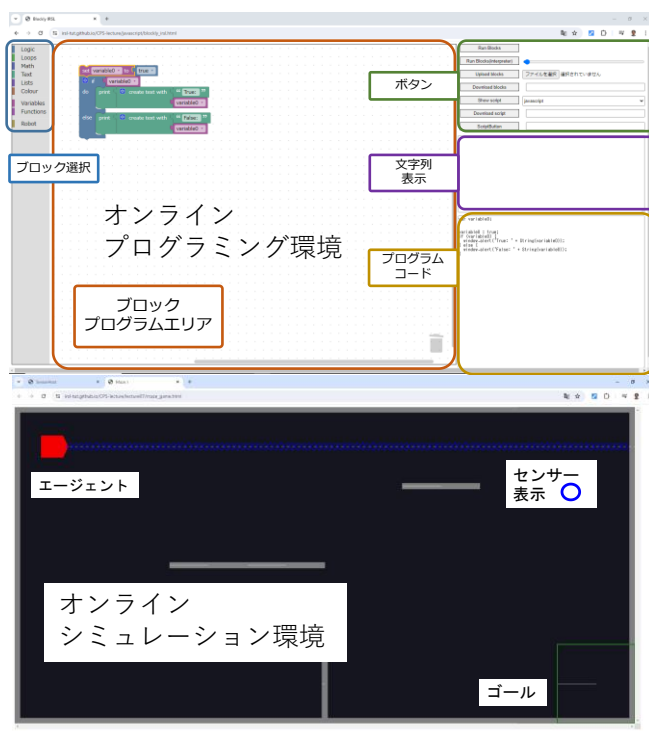


図1 CPS教育に用いるWebベース教材

また、上記の教育用に作成したロボット構成ツールやロボットプログラミング環境を用いて研究を行っています。設計者が対象となる作業を実現できるロボットの構成を考える場合に、実際にどれぐらいの大きさになるか、どのような動作をするかを実感できることが大切になります。また、ロボットを組み立て、見て判断し、修正するプロセスが、直感的かつ短時間に可能になることで、特に初学者にとって、よりロボットに対する理解が深まると考えます。そのために、GUIを用いてコンピュータの画面上にて組み立てているロボット構成ツールをVR内で使えるようにし、現実的にロボットを組立、確認している感覚で構成することができるようにして、研究を進めています(図2)。

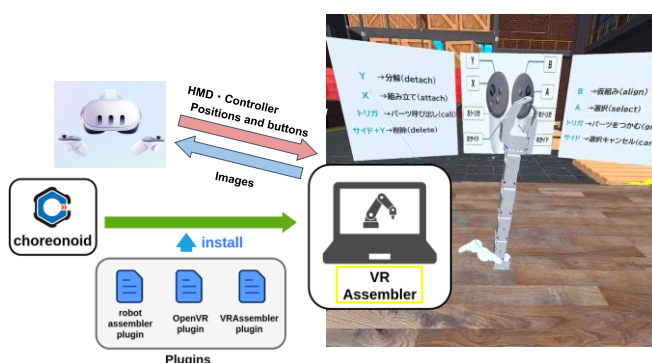


図2 VR空間内におけるロボット組立システム

ロボット構成ツールはロボットの設計図をグラフ形式で構成することのできるシステムになります。これは、このシステムで作られたロボットの構成は、プログラムの操作可能となっていることを意味し、自動生成できたり、部品の接続関係を抽出できたりします。

また、構成ツールより簡単で直感的方法でグラフ形式を作ることが出来れば、ロボットを構成するための個々のパーツに関する知識が無い設計者であっても用いることが出来ます。直感的にロボットの構成のヒントを与える手法として、設計者が手書きの図によってロボットの構成を考え、その図を認識評価することによってロボットの構成を決める手法の研究を行っています(図3)。

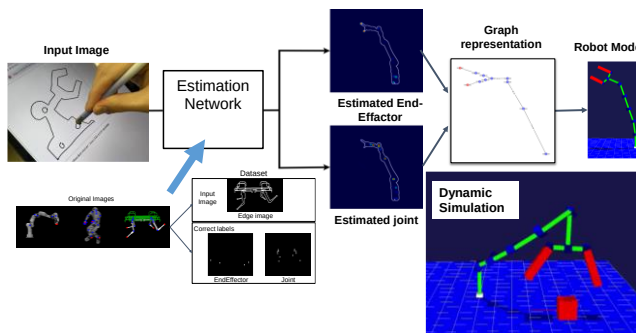


図3 手書き図からロボット構成を作るシステム

3 非エキスパートによるロボット操作

ロボットとの共生が行われるようになるには、現在はロボットを動かすためにエキスパートによって行われている

設定やプログラミングなどを行うことなく、非エキスパートのユーザーのみで完結できる操作方法が提供される必要があり、非エキスパートのユーザーのみによって十分にロボットの機能を使うことができることが重要だと考えます。また、使用者の使い方によってロボットの行動が変化する操作方法が提供されることで、使用者とロボットの多様な関係性を基盤とした、想像していなかった方法を含む多様な利用方法が発見されと考えています。この方向性が、人間とロボットの共生を実現してゆくために必須の研究課題だと認識しています。このような観点から非エキスパートによるロボットの操作方法を研究しています。

本年度は、ロボットに持ってきてもらいたいものを手書きの絵によって示すと、部屋内から示された物をロボットが持ってきてくれるシステムの研究を行いました(図4)。手書きの絵を認識するために、深層学習を用いて線画のクラス分類を行うクラス識別器を構成します。データセットとして、手書き絵を大量に用意するのは現実的ではないため、既存データセットの写真のエッジ抽出を行い線画としてデータセットとして学習を行いました。使用時には、室内環境を見回して検出された物体のクラスを画像認識して手書きクラス識別の結果と比較することで、目的の物体を探索することが出来ました。

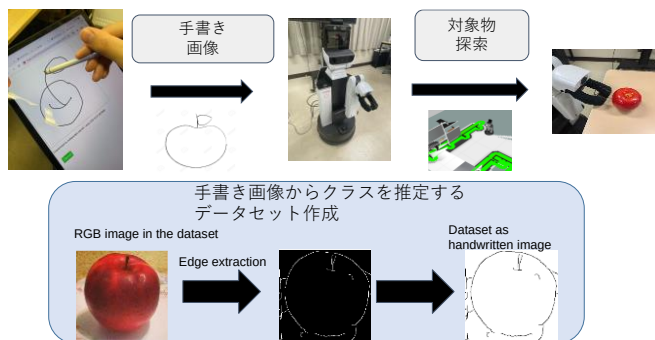
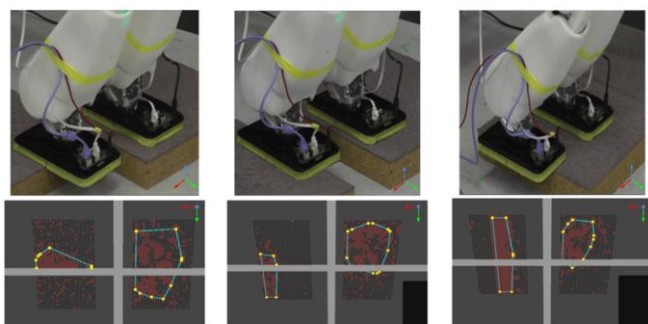


図 4 手書きの絵による対象探索

4 ヒューマノイドロボットシステム

複雑なロボットの制御としてヒューマノイドロボットの制御システムを研究しています。



(1)Anterior Floating (2)Medial Floating (3)Lateral Floating

図 5 足裏センサによる接触領域認識

新たなヒューマノイドロボットの制御を目的として、足裏に分布接触センサを装着するシステム統合を行っています。足裏にセンサが無く足裏全体が接触していない場合には、接触が無い部分に力を掛けて運動を制御しようとしてしまい、反力が得られないために転倒してしまう場合もありました。このセンサによって、ロボットの足平と地面の接触状態を検出し、足裏の接触力を実際に

地面と接触している部分に集まるようにロボットの運動を制御することで、環境から適切な(計画通りの)反力を得ることが可能になり、歩行時の安定性を高めることが可能となりました(図5参照)．[3]

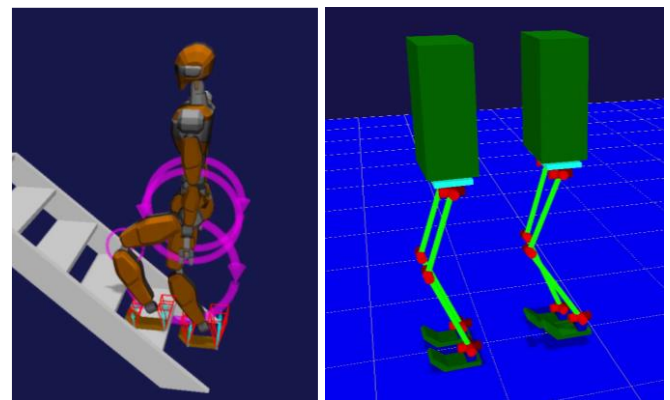


図 6 足裏センサによる接触領域認識

5 おわりに

本年度行った、ロボットを生成するシステムとロボット教育、非エキスパートによるロボットの操作、ヒューマノイドロボットシステムについて述べました。ロボット教育、ロボットプログラミング環境については、実施内容、プログラムソースコード等をオープンにしております[2]ので大学・高専での講義や研究に波及できるように活動に勤め、利用者を増やすことでより良いシステムへ修正する原動力としたいと考えています。また、非エキスパートによるロボットの操作に用いるシステムやヒューマノイドロボットシステム(図6)等についても、同じロボットプログラミング環境を用いて研究できるようにしています。これらのシステムを、ロボット教育研究基盤環境として整備することで、ロボティクス研究への参入を容易にし、教育効果が高められると考えています(図7)。こちらも同じくオープンソース[2]として進めており利用者を増やしていきたいと考えています。



図 7 ロボット研究教育基盤環境

参考文献

- [1] 豊橋技科大CPS講義
<https://irsl-tut.github.io/CPS-lecture/index.ja.html>
- [2] 情報・ロボットシステム研究室 レポジトリ
<https://github.com/IRSL-tut>
- [3] Taro Tako, Rafael Cisneros Limón, Hiroshi Kaminaga, Kenji Kaneko, Masaki Murooka, Iori Kumagai, Hiroaki Masuzawa, Yohei Kakiuchi, "Tactile Sensor-Based Detection of Partial Foothold for Balance Control in Humanoid Robots". IEEE RAS Humanoids2024, pp. 513-520, 2024年

研究業績

【論文誌】

- O. Natan and J. Miura, "DeepIPC: Deeply Integrated Perception and Control for an Autonomous Vehicle in Real Environments", IEEE Access, 2024.
- G. Beraldo, A. Bacchin, J. Miura, E. Menegatti, "Preference-based People-Aware Navigation for Telepresence Robots", Int. J. of Social Robotics, 2024.
- 上村綜次郎, 中園健児, 長谷川孔明, 岡田美智男, 自律性や社会性操作性を兼ね備えたSociable Vehicle (RunRu) の構築、ヒューマンインタフェース学会論文誌、Vol.26, No.2, pp.233-248 (2024).
- 勝俣安伸, 鳥海智志, 井上康之, Harin Hapuarachchi, 北崎充晃 (2024). 共有・結合した手による指リーチングにおける身体性と課題成績, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 29(1), 27-37.
- 北崎充晃 (2024). バーチャルリアリティを用いた視覚・認知研究, 光学, 53(11), 446-454.
- Harada, N., Kitazaki, M., and Tasaki, R. (2025). Physical therapy massage robot system with human motion tracking and finger-pressing force control, Advanced Robotics, 1-20. <https://doi.org/10.1080/01691864.2025.2469695>
- Kim Chheang, Ren Ohmura, Kazuki Karashima, Yosuke Hatayama, Kajihiro Matsuo, Akihiro Mizutani, Haruka Ono, Pilot study: Evaluating the feasibility of real-time kinematic GNSS as a tool for tracking movable chairs in outdoor urban public spaces, JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW, Vol. 7, Issue 1, 2024
- Nur Azizah Amir, Hideki Takahashi, Abdallah Farrage, Min Set Paing, Shintaro Sasai, Hitoshi Sakurai, Masaki Okubo, Naoki Uchiyama, Generation of simple motion sequences for supporting manual operation of rotary cranes, Automation in Construction, Elsevier, 166, 105584, 2024
- Haryson Johaness Nyobuya, Mathias Sebastian Halinga, Naoki Uchiyama, Simple adaptive contouring control for feed drive systems using jerk-based augmented output signal, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer, 130(Issue9-10), 4985 - 5001, 2024
- Haryson Johaness Nyobuya, Naoki Uchiyama, Combined simple adaptive and integral terminal sliding mode control for industrial feed drive systems, Control Engineering Practice, 153, 106109, Elsevier, 2024
- Siti Nur Hanisah Umar, Elmi Abu Bakar, Mohammad Nishat Akhtar, Noorfazreena Mohammad Kamaruddin, Naoki Uchiyama, Development of a Two-Board Potentiostat for Square Wave Anodic Stripping Voltammetry: Prospects for Heavy Metal Monitoring", Vol. Pertanika Journal of Science and Technology, 33 (3), 2025
- 武田洸晶, 佐藤海二, 福祉ロボット使用者の重心候補を用いた起立時の異常検知, 日本機械学会論文集, 2024;90:939:24-00150.
- Takeda M, Sato K, Importance of mutual communication through a simple user interface in care robots, IEEE Access, 2024;12:91863-91872.

【国際会議】

- G. Takasawa, K. Koide, and J. Miura, "Elevator-based Multi-story Navigation for Personal Mobility Systems", Proc. 8th Int. Conf. on Advanced Mechatronics (ICAM 2024), Kitakyushu, Japan, Nov. 2024.
- H. Nakajima and J. Miura, "Combining Ontological Knowledge and Large Language Model for User-Friendly Service Robots", Proc. 2024 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2024), Abu Dhabi, UAE, Oct. 2024.
- N.L. Hong Da, J. Miura, Kotaro Hayashi, "Enhancing Human-Robot Collaborative Search through Efficient Space Sharing with On-demand Bidirectional Intereaction", Proc. 12th Int. Workshop on Assistive Computer Vision and Robotics (ECCVW-2024/ACVR 2024), Milan, Italy, Oct. 2024.
- Kitazaki, M., Onodera, R., Kataoka, J., Inoue, Y., Iwasaki, Y., Ganesh, G. (2024). Owl-Vision: Augmentation of Visual Field by Virtual Amplification of Head Rotation, Augmented Humans 2024, April 4-6, 2024, Melbourne, Australia, Doi: 10.1145/3652920.365304
- Katsumata, Y., Kurihara, N., Inoue, Y., Hagiwra, T., Toriumi, S., and Kitazaki, M. (2025). Chameleon-Eyes: Expanding Visual Experience through Combining Binocular Vision and Independent Eye Control by a Single Analog Stick, IEEE-VR, March 8-12, 2025, Saint Malo, France.
- Harada, N., Kitazaki, M., and Tasaki, R. (2025). Kneading-Motion-Based Tactile Feedback for Personalized Robotic Massage Using VR Avatars, The 20th IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction (HRI2025), 4-6 March, 2025. Melbourne, Australia,
- Kazufumi Kudara, Hideki Takahashi, Shintaro Sasai, Hitoshi Sakurai, Masaki Okubo, Hiroki Nakayama, Teppei Maedo, Naoki Uchiyama, Time-Optimal Motion Generation and Load-Sway Suppression for Rotary Cranes with a Two-Stage S-Curve Trajectory Based on Skilled Operation Analysis, European Control Conference (ECC), 2024, Stockholm, Sweden
- Katrina Hurter, Frank Wolff, Oliver Sawodny, Naoki Uchiyama, Switching Control for Load Sway Suppression of a Rotary Crane using Only Horizontal Boom Motion, 17th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS), IEEE, 2024, Abu Dhabi, UAE
- Koki Fukushige, Naoki Uchiyama, Estimation of Strawberry Weight Using Smart Glasses, IFAC/IEEE 10th 2024 International Conference on Control, Decision and Information Technologies, 420, 2024, Valletta, Malta
- Abdallah Farrage, Min Set Paing, Nur Azizah Amir, Kazufumi Kudara, Hideki Takahashi, Kenichi Terauchi, Shintaro Sasai, Hitoshi Sakurai, Masaki Okubo, Naoki Uchiyama, Discrete-Time Optimization of Collision-Free Rotary Crane Motion with Load-Sway Suppression, 2024 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2024, Bristol, United Kingdom

- Raul D' Armando, Christofer Andrew Hadiprodjo, Carey Sinaga, Nguyen Tai, Muhammad Nurul Puji, Uchiyama Naoki, TurtleBot Operation with Barrier Bypass and Point Navigation Functionality, The 9th International Conference on Computer Science and Computational Intelligence, 287, 2024, Bali, Indonesia
- Nur Azizah Amir, Min Set Paing, Abdallah Farrage, Hideki Takahashi, Kenichi Terauchi, Shintaro Sasai, Hitoshi Sakurai, Masaki Okubo, Naoki Uchiyama, Automatic trajectory generation for rotary cranes combining simple movements for manual operation, SICE International Symposium on Control Systems, 2024, Hiroshima, Japan
- Yotaro Kakuta, Min Set Paing, Abdallah Farrage, Kazufumi Kudara, Hideki Takahashi, Shintaro Sasai, Hitoshi Sakurai, Masaki Okubo, Naoki Uchiyama, Visual Feedback Control for Positioning Support of a Rotary Crane, 94th annual meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, 2024, Magdeburg, Germany
- Haryson Johaness Nyobuya and Naoki Uchiyama, Design of a Simple Adaptive Integral Terminal Sliding Mode Controller for Mechanical Systems, SICE Festival 2024 with Annual Conference, 2024, Kochi, Japan
- Mathew Renny Msukwa and Naoki Uchiyama, Design of a Virtual Laboratory for Control Engineering Education, , SICE Festival 2024 with Annual Conference, 2024, Kochi, Japan
- Iskandar Khemakhem, Johannes Schüle, Oliver Sawodny, Naoki Uchiyama, Data-Driven Optimal Trajectory Generation for Rotary Cranes, International Electronics Symposium 2024, IEEE, Bali, Indonesia
- Fabian Friz, Alice Hierholz, Oliver Sawodny, Naoki Uchiyama, Function Parameterized Optimal Control in Mobile Robots, International Electronics Symposium 2024 IEEE, Bali, Indonesia
- Abdallah Farrage, Nur Azizah Amir, Hideki Takahashi, Shintaro Sasai, Hitoshi Sakurai, Masaki Okubo, Naoki Uchiyama, Optimal Trajectory Generation for Horizontal Boom Motion of Rotary Cranes Considering Load-Rotation Suppression, 2025 3rd International Conference on Mechatronics, Control and Robotics, 21, 2025, Singapore
- Xuan G., Takeda M., Sato K., Effect of additional compensator based on internal model principle in precision motion control, International Conference on Precision Engineering, 2024::OS14-04.
- Toshiki Hiruta , Junya Ohno, Kentaro Takagi, Electrodeposited DEA for a vibration experiment of a cylindrical shell, EuroEAP 2024, 2024
- Kentaro Takagi, Sukhneet K. Dhillon, Ying Li, Adriana J. Cowan, Ardeshir Bahi, Geoffrey M. Spinks, John D. W. Madden, Work out: Measuring the energy output of artificial muscle, SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)
- Sukhneet K. Dhillon, Ying Li, Anastasia Vogl, Adriana J. Cowan, Rafaela Zamataro, Kentaro Takagi, John D. W. Madden, Development of twisted and coiled actuator driven stockings for controlling edema and promoting venous return, SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)
- Xiulun Yin, Sukhneet K. Dhillon, Charles Picciotto, Nima Bakshi, Chrys R. Morton, Ying Li, Jian Gao, Adriana J. Cowan, Rafaela Zamataro, Yiman Chen, Ruth Tau, Devyani McLaren, Rubia Guerra, Preeti Vyas, Sadan Wani, Justin K. M. Wyss, Chenglong Zhang, Siying Wu, Naghmeh Zaghi, Erfan Taatizadeh, Adam T. Clare, Anoush Poursartip, Karon E. MacLean, John D. W. Madden, Ryusuke Ishizaki, Takeshi Ohsato, Kentaro Takagi, DEMO: Sensing rollers, robot skin, and active socks, SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)
- Kosetsu Ishikawa, Kinji Asaka, Zicai Zhu, Toshiki Hiruta, Kentaro Takagi, On the first-order numerical approximation of the exact transfer function of a multi-physics model of IPMC sensors, SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)
- Sukhneet K. Dhillon, Ying Li, Anastasia Vogl, Adriana J. Cowan, Rafaela Zamataro, Kentaro Takagi, John D. W. Madden, Evaluating post-anneal stretch on twisted and coiled actuators for compression therapy in textiles, SPIE Smart Structures + NDE 2025, 2025 (to be presented)
- Taro Tako, Rafael Cisneros Limón, Hiroshi Kaminaga, Kenji Kaneko, Masaki Murooka, Iori Kumagai, Hiroaki Masuzawa, Yohei Kakiuchi, "Tactile Sensor-Based Detection of Partial Foothold for Balance Control in Humanoid Robots". IEEE RAS Humanoids2024, pp. 513-520, 2024年

【国内会議】

- Nicholas Lim Hong Da, 三浦純, 林宏太郎, "人とロボットによる共同物体探索 ～人物の行動観察と双方向対話を用いた探索の効率化～", 日本ロボット学会学術講演会2024, 大阪, 2024年9月.
- 高澤榮, 小出健司, 三浦純, "パーソナルモビリティのためのエレベータによるフロア間移動を含む屋内ナビゲーション", 日本ロボット学会学術講演会2024, 大阪, 2024年9月.
- 鈴木健太, 三浦純, "基盤モデルを用いたクレーン吊荷監視カメラ映像内の吊荷領域の検出", 2024年ロボティクス・メカトロニクス講演会, 宇都宮, 2024年5月.
- 中嶋駿月, 三浦純, "パーソナルサービスロボットののための大規模言語モデルとオントロジを利用したユーザ指示の理解", 2024年ロボティクス・メカトロニクス講演会, 宇都宮, 2024年5月.
- 五箇俊介, 三浦純, "歩行者の存在する環境における状況認識に基づくナビゲーション戦略の選択", 2024年ロボティクス・メカトロニクス講演会, 宇都宮, 2024年5月.
- 島田豊蔵, 三浦純, "非構造化環境における分岐点を考慮した自律移動のためのデータセット生成", 2024年ロボティクス・メカトロニクス講演会, 宇都宮, 2024年5月.
- 西澤英志, 増沢広朗, 三浦純, 小倉昇, 柿原瑛樹, 鈴木健介, "深度カメラを用いた温室内移動ロボットの行動ベースナビゲーション", 2024年ロボティクス・メカトロニクス講演会, 宇都宮, 2024年5月.
- 松浦涼太, 西村駿, 天野僚, 長谷川孔明, 岡田美智男, 一緒に絵本を愉しむ〈Pocketable-Bones〉の提案, ヒューマンインタフェースシンポジウム HIS2024, デモ発表, 2T-D6 (2024).
- 石川未彩, 長谷川孔明, 岡田美智男, PoKeBo Studio, 物語の共創を志向する共創的なインタフェースの提案, ヒューマンインタフェースシンポジウムHIS2024, デモ発表, 2T-D7 (2024).
- 本所然, 三宅将吾, 長谷川孔明, 岡田 美智男, 子どもたちと一緒に成長する共生型STEAM学習のためのロボット〈Toi〉, HAIシンポジウム2025, G-12 (2025).
- 関川泰地, 西村駿, 長谷川孔明, 岡田美智男, 子どもと気づきを分かち合う共創的な学習環境〈PoKeBo Cube〉の構築, HAIシンポジウム2025, G-13 (2025).
- 川口諒真, 西村駿, 長谷川孔明, 岡田美智男, 心も潤す!? ミストタイプのエージェント〈Omboo!〉の研究, HAIシンポジウム2025, G-14 (2025).

- 西村駿, 長谷川孔明, 岡田 美智男, 一緒に散歩を愉しむロボット〈iBones〉の提案 〜コンヴィヴィアルなかかわりに着目して〜, HAIシンポジウム2025, G-15 (2025).
- 天野僚, 西村駿, 長谷川孔明, 岡田美智男, 共愉的な関わりを生み出すブリコラージュ風発話様式 (bricologue) の研究, HAIシンポジウム2025, D-2 (2025/3).
- 松浦涼太, 西村駿, 天野僚, 長谷川孔明, 岡田美智男, Pocketable-Bones: 絵本をながめながら会話を愉しむクリーチャ, HAIシンポジウム2025, P2-13 (2025).
- 大内直, 西村駿, 長谷川孔明, 岡田美智男, 写真を媒介とする人とロボットとの三項関係に基づくコミュニケーションの研究, HAIシンポジウム2025, P2-14 (2025/3).
- 山崎布友美, 松本壮太, 本所然, 長谷川孔明, 岡田美智男, moQut, テーブルの上に棲まうミニマルなクリーチャ, HAIシンポジウム2025, P2-49 (2025).
- 伊東大裕, 長谷川孔明, 岡田美智男, I-to-Te, 人とロボットの〈ひも〉を介した相互主体的コミュニケーションの研究, HAIシンポジウム2025, P2-15 (2025).
- 松本壮太, 長谷川孔明, 岡田美智男, こんなのがあったのか! “Light Floating Robotics” の創成, HAIシンポジウム2025, P2-32 (2025/3).
- 勝俣安伸, 井上康之, 島海智志, 萩原隆義, 北崎充晃 (2024). カメラオンアイズ 左右眼独立制御による両眼視の拡張: 視線制御モデルの検討, 2E2-11, 日本バーチャルリアリティ学会第29回大会, 名古屋, 愛知
- 磯崎竜一, 福村直博, “重量の異なる対象物への到達把持運動における手指のUCM 解析と筋シナジー解析,” 第37回自立分散システム・シンポジウム, 2025
- 可知井雪人, 大村廉, 人流と地域情報を用いた深層学習によるまちなか消費活動予測, 情報処理学会第87回全国大会, 5ZC-08, 2025年3月14日
- 森田慶, 大村廉, IoT雨量計を用いた局所降水量予測, 情報処理学会第87回全国大会, 5ZC-07, 2025年3月14日
- 結城政宗, 大村廉, シート型圧力センサを用いた感情推定, 情報処理学会第87回全国大会, 5ZC-06, 2025年3月14日
- 末本旭, 大村廉, 油圧シリンダ負荷計測に向けた小型無線荷重モニタリングデバイスの開発, 情報処理学会第87回全国大会, 5J-09, 2025年3月14日
- サイチャ ジャイソン, 大村廉, 行動認識における自己教師あり学習の不均衡データ問題に関する一検討, 第85回情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究会, 2025年2月27日
- Tran Viet Thanh, Hoang Xuan Thang, Dang Ba Loc, 堀尾亮介, 内山直樹, 清掃／芝刈／搬送作業などに応用可能な多機能自律走行牽引ロボットの開発, SICE中部支部 研究発表&企業交流会, 2-C9, 2024, 豊橋市
- Dinh Ngoc Duc, Tran Viet Thanh, Ryosuke Horio, Naoki Uchiyama, Design and Control of a Retrofitting Outdoor Cleaning Robot, SICE中部支部 研究発表&企業交流会, 2-C20, 2024, 豊橋市
- 後藤偲月, 増井陽二, 内山直樹, 拡張状態オブザーバと状態予測制御による多慣性系の外乱およびむだ時間補償, 第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2024), 1B6-07, 2024, 盛岡市
- 山本大輝, 百済和文, 高橋秀樹, 笹井慎太郎, 櫻井仁士, 大久保正基, 内山直樹, アクチュエータの一次遅れ特性を考慮した旋回クレーンの最適動作軌道生成, 第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2024), 3C2-03, 2024, 盛岡市
- 堀尾亮介, 石山拓矢, Sinaga Carey, 内山直樹, 果樹周辺に散在する果実収穫のための移動ロボットの巡回経路生成, 日本機械学会 生産システム部門研究発表講演, 209, 2025, 宇部市
- 小松脩征, 松繁俊治, 堀尾介, 内山 直樹, 木造建築部材の断面接合部加工のためのオイラーグラフに基づく工具軌道生成, 日本機械学会 生産システム部門研究発表講演, 302, 2025, 宇部市
- 石原拓人, 堀尾亮介, 笹井慎太郎, 櫻井仁士, 大久保正基, 高橋秀樹, 百済文, 内山 直樹, クレーン吊り荷の旋回動作制御装置の提案と振動抑制, 日本機械学会 東海支部 第56回学生員卒業研究発表講演会, 4D1, 春日井市
- 武居直希, 佐藤海二, 武田洸品, 起立動作における杖型支援器具の下肢負担低減効果, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2024;:1P1-E01.
- 武田洸品, 佐藤海二, 起立支援ロボット使用者の異常起立が重心候補に与える影響, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2024;:1P1-E02.
- 佐藤海二, 武田洸品, 学習制御器を用いた外乱推定器設計と精密制御への応用, JSPE2024秋季大会講演論文集, 2024;:413-414.
- 白谷歩夢, 垣内洋平, “家庭用移動ロボットを用いた手つなぎナビゲーションシステムの開発と評価”, 日本ロボット学会学術講演会, 2024年
- 細川達広, 垣内洋平, “ロボット構成定義を用いた自動組立システムに関する研究”, 日本ロボット学会学術講演会, 2024年
- 大野裕之, 垣内洋平, “不整地生成AIを用いたロボットの未知環境適応のための実験フレームワークに関する研究”, 日本ロボット学会学術講演会, 2024年

【著書】

- 岡田美智男, 『〈弱いロボット〉から考える 人・社会・生きること』, 岩波ジュニア新書 (2024).
- 岡田美智男, ことばとロボット, 辻幸夫・菅井三実・佐治伸郎 (共編), 『ことばのやりとり』(シリーズ ことばの認知科学 第1巻), 朝倉書店(2024).

【招待講演】

- 岡田美智男, 〈弱いロボット〉研究の目指すもの コンヴィヴィアリティのためのHRIデザイン、第3回 アジャイルガバナンスシンポジウム、京都大学 (2024/6/12).
- 岡田美智男, 〈弱いロボット〉たちの視点からコミュニケーションやケアについて考える、愛知県専任教員養成講習会 (2024/7/19).
- 岡田美智男, 吉岡洋, 「無駄の研究」、トークイベント、国際舞台芸術祭 (2024/10/17).
- 岡田美智男, 〈弱いロボット〉研究のめざすもの コンヴィヴィアリティのためのHRIデザイン、中部生産性本部 講演会 (2024/11/28).
- 岡田美智男, 〈弱いロボット〉だからできること、岡崎市立看護専門学校 第17回 学校祭 講演会 (2024/11/28).
- 岡田美智男, 〈弱いロボット〉が開く不完全の世界、法政大学専門職大学院 ビジネス・イノベーション養成セミナー (2024/12/14).
- 岡田美智男, コンヴィヴィアリティのためのHAI デザイン、HAIシンポジウム2025、招待講演 (2025/2/28).
- 岡田美智男, コンヴィヴィアリティのためのHRI デザイン、浪江町STEAMカフェ 講演 (2025/3/15).
- 北崎充晃 (2024), メタバースの基礎と応用、そしてテックメタバース, ものづくり博2024 in 東三河, 2024年6月15日, 豊橋
- Kitazaki, M. (2024). Multimodal information for virtual walking, in the Symposium - The impact of recent technologies on studies of multisensory integration, The 16th Asia Pacific Conference on Vision (APCV2024), 11th July 2024, Singapore
- 北崎充晃 (2024), バーチャルリアリティとメタバースの基礎と

可能性, 令和6年度東海・北陸地区学生指導研修会, 2024年11月19日、豊橋

Naoki Uchiyama, Optimization Anywhere in Industry Collaboration, Keynote speech, Opening Ceremony of UiTM-TUT Collaboration Lab, Shah Alam, Malaysia, May 14, 2024

Naoki Uchiyama, PID controller design by pole placement for mechanical drives, Invited Lecture in Universiti Teknologi MARA, Shah Alam, Malaysia, May 20, 2024

Naoki Uchiyama, Controller design for robotic manipulators, Invited Lecture in Universiti Teknologi MARA, Shah Alam, Malaysia, May 21, 2024

Naoki Uchiyama, Systems Engineering Approaches to University-Industrial Collaborative Projects, Keynote Speech, International Electronics Symposium 2024, IEEE, Bali, Indonesia, August 6, 2024

内山直樹, 産業機械の高度化のための制御系設計/最適化応用に関する事例紹介, MATLAB、JMAGを使用した制御システムMBD事例発表オンラインセミナー ～省エネルギー化！実例から学ぶ制御システム設計と評価～, 穂高電子株式会社, 2024年9月17日

内山直樹, Dinh Ngoc Duc, Tran Viet Thanh, 戸川育勇, 大久保敦之, 屋外清掃ロボットはくろうくん, 万博連携事業イベント「PARK JAM EXPO 2024-2025」, 花博記念公園鶴見緑地, 2024年11月3日（実演）

Naoki Uchiyama, Mobile Robot Studies, 移動ロボットに関する技術体験, JSTさくらサイエンスプログラム, 豊橋技術科学大学, 2024年11月11日

Naoki Uchiyama, Systems Engineering Approaches to Performance Enhancement of Industrial Machines, JICA Follow-up cooperation for Ukraine on “Industrial Technology Education”, November 17, 2024

Naoki Uchiyama, TUT Research Activities and Industry Collaboration, Systems Engineering Approaches to University-Industry Collaboration Projects, JICAラオス産学連携研修, 豊橋技術科学大学, December 6, 2024

【その他】

岡田美智男, かわいい感性デザイン賞(第12回)奨励賞

岡田美智男, HAIシンポジウム2025 Most Outstanding Research Award(最優秀論文賞)

岡田美智男, 2024年度 豊橋技術科学大学広報戦略本部表彰 広報特別賞

岡田美智男, 2024年度 豊橋技術科学大学 研究活動表彰（ものづくり賞）

その他活動

岡田美智男, 日本科学未来館常設展示 (2024年11月22日-2025年6月30日)

岡田美智男, 子ども科学博2024「テクノロジーのチカラ」, 京都市勧業館 (2024年8月2日-4日)

岡田美智男, 「弱いロボット展」、日本科学未来館 (2025年2月1日-2日)

大村廉, ウェアラブルExpo2025展示 (2025年1月23日-25日, 東京ビッグサイト)

内山直樹, 機械系 システム工学の応用による産業機械の高性能化, 高等産業技術機関の教育と研究, ウクライナ支援 今、私たちにできること!, JICA研修「産業技術教育」を起点とした遠隔セミナー, 一般社団法人 ESD コンソーシアム愛知, 2024年10月

内山直樹, 省エネルギー化を実現する制御・動作軌道生成, 日刊工業新聞社, 第2部 JIMTOF2024, pp. 22-23, 2024年11月1日

オープンラボ2024 報告

次世代半導体・センサ科学研究所 人間・ロボット共生分野 オープンラボ2024 開催報告

開催日 2024年9月18日（水） 13:00～16:00

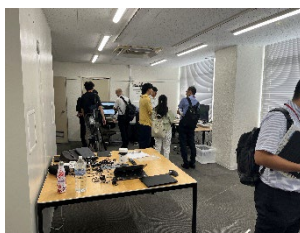
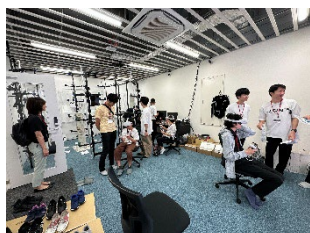
今年も昨年に引き続き、本学のロボット関連技術全体を気軽に見ていただける機会として「オープンラボ」を開催しました。オープンラボは地域の企業や自治体の関係者や関心のある市民の方に、ロボットに関する研究を一般公開するイベントです。機械工学系、情報・知能工学系、IRES²に所属する11研究室が最先端のロボット技術を公開しました。また6月に開催されたNHK学生ロボコンにて優勝し、8月のABUロボコンに日本代表として出場したロボコン同好会のロボットの展示も行いました。

企業の方だけでなく、小学生や高専生などの学生の方や一般の方にも多くお越しいただき、計74名の方々にご来場いただきました。複数の研究室を見学された方もいらっしゃり、研究内容について質問が寄せられ、関心を示されていました。ロボット関連技術に触れていただける機会となりました。

【開会挨拶・全体紹介】



【研究室公開】



【当日配布資料】



豊橋技術科学大学

次世代半導体・センサ科学研究所 社会実装部門

人間・ロボット共生分野

〒441-8580

愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1

<http://robot.tut.ac.jp>