

2025 年度

東京大学 大学院工学系研究科 人工物工学研究センター

移動ロボティクス研究室 (太田研究室) 研究紹介

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

東京大学 本郷キャンパス

URL: <http://otalab.race.t.u-tokyo.ac.jp>

現在のメンバー

教授	太田 順
特任講師	上西 康平
助教	王 鈺晟
特任研究員	長谷川 哲也
博士課程学生	盧 佳希, 張 篠天, 陳 建強, 星野 恵, 李 双洋, 岡崎 翔
修士課程学生	川脇 颯太, 藤生 拓真, 十時 優太, 龚 竞泽, 宋 始顯, 張 豊麟, 大槻 弦矢, 木原 将雄, 先崎 生真
学部4年生	栗林 昂生, 白坂 翠萌
秘書	中村 綾子, 八木 実香

研究の概要

我々は 1989 年から群知能ロボットの研究を行ってきました。我々は、「ある空間に滞在し、動作している人間」、「人間を支援する知的エージェントとしてのロボット」、「ロボットと人間が相互作用する環境」の三者から構成される系を考えてきました。我々は、動作計画手法、進化的計算、最適化学、制御工学等を理論的基盤として、ロボット工学、サービス工学、生産システム工学に関する研究プロジェクトを遂行しています。最終的には人間と相互作用し人間を支援するエージェントの知能並びに運動・移動機能を解明し、人を含むマルチエージェントシステム設計論の構築を目指します。現在は「マルチエージェント系とロボットシステム設計」、「人が人／人を支援するロボティクス、生産システム」、「人の解析と身体性システム科学」という 3つの分野において研究を行っています。具体的には、以下のような研究活動を現在行っています。

現在の研究活動一覧

マルチエージェント系とロボットシステム設計

- 群 AGV の動特性を考慮した動作計画における探索の高速化
- 群農業機械を対象とした分割配送計画問題の汎用アルゴリズムの提案
- 過去の経験を利用したロボットシステム配置設計最適化アルゴリズムの提案
- 段階的な大規模マルチエージェントタスク計画の近傍探索を使用した計画方法
- ロボットのジョイントコンプライアンスキャリブレーションのための計測ポーズ最適化手法の提案

人が人／人を支援するロボティクス、生産システム

- 人の両手動作教示を用いた片腕ロボットアームの動作計画手法
- 1 台のビデオカメラから取得したヒト骨格情報を用いた解決困難なロボット動作計画の容易化
- 不確実な人教示データを活用した柔軟かつ高速な最適動作計画手法の提案
- ヒト骨格情報と物体位置情報を用いた作業工程の自動推定アルゴリズム
- 人の手動作解析に基づいたワイヤハーネス把持のためのロボットによる動作再現
- 車椅子移乗動作学習のための患者ロボットシステムの開発
- 多感覚 Virtual Reality を用いた熟練点検技能抽出
- 自動生産ラインの知識の構造化による故障原因特定支援システム
- 生産システムの故障原因推論のための保全記録の記述方法とオントロジーの提案

人の解析と身体性システム科学

- 体格差を考慮した手指リハビリテーションのためのグローブ型デバイスの開発
- 機械学習を用いた歩行分析によるパーキンソン病患者の機能的自立度の予測
- 歩行障害者における踵の加速度を用いた LSTM に基づく歩行フェーズの予測
- ヒト姿勢制御メカニズムのモデリング
- パーキンソン病患者の歩容を表現する制御パラメータと臨床尺度との関係
- 姿勢フィードバックトレーニングの機序の解明

群 AGV の動特性を考慮した動作計画における探索の高速化

生産・物流の自動化を背景に、AGV (Automated Guided Vehicle) を用いた物資の搬送が広く行われている。通常 AGV は複数台が同時に運用され、搬送要求に従って互いに干渉のない経路を走行する。生産性向上のためには、それぞれの搬送要求を短時間で満たすことが求められる。また、搬送要求が与えられてから動作を計画するために、計算も短時間で終了する必要がある。優れた動作計画と短時間での計算を両立することが重要である。

複数エージェントに対し、干渉がない経路を計画する問題は MAPF (Multi-Agent Path Finding) 問題と呼ばれる。MAPF 問題の解法の一つである CBS (Conflict-based search) [1] をベースとした AGV の動特性を考慮した動作計画法が提案されている[2]。この手法は優れた動作を計画できることが示されたが、計算時間が長く、特に狭窄部がある環境下では AGV の台数に伴い計算時間が増加することが指摘されている。本研究では、CBS をベースとした AGV の動特性を考慮した動作計画法に、貪欲な探索手法と機械学習を適用することによって計算を高速化することを目指した。CBS では、MAPF 問題を単一エージェントの動作計画問題と、それらを組み合わせた際の干渉ごとの優先情報の組み合わせ問題の 2 つに分割して扱う。この際、前者では A*探索を、後者には最良優先探索を用いていた。提案手法では、A*探索を重み付き A*探索もしくは機械学習を利用した A*探索で置き換え、最良優先探索はビームサーチで置き換えた。重み付き A*探索・ビームサーチは貪欲な探索手法として知られている。これらのパラメータの組は、10 台の AGV に対してグリッドサーチを行うことによって優れたパラメータを調べた。次に、機械学習を利用した A*探索の詳細について述べる。探索の効率化・干渉が少ない経路の計画を目指して、動作計画結果から逆算した各ノードからゴールまでの最適コストの値を教師データとしてヒューリスティック値を推論するモデルを提案した (Fig. 1)。ここで、モデルの入力はベクトル情報と画像情報の 2 種類あり、ベクトル情報には AGV の向き、速さ、ゴールでの向き、従来のヒューリスティック値の 6 次元、画像情報は障害物情報、現在位置、ゴールの位置、他エージェントの位置、他エージェントのゴールの 5 チャンネルである。1 台(1000 試行)、2 から 10 台(各 100 試行)の動作計画結果を訓練データとし、シミュレーションによって提案手法の評価を行った。搬送システムを模したレイアウトにおいて、ランダムにタスクの組を選択し、10 台の AGV に対して展開ノード数と計算時間、動作計画の質(各 AGV の走行時間の和, Sum-of-Costs)を評価した。結果を Fig. 1 に示す、機械学習を利用した手法は重み付き A*探索を利用した手法に対し、上位展開ノード数を減少させ、計算時間を短縮しながら動作計画の質は下げないことが示された[3]。

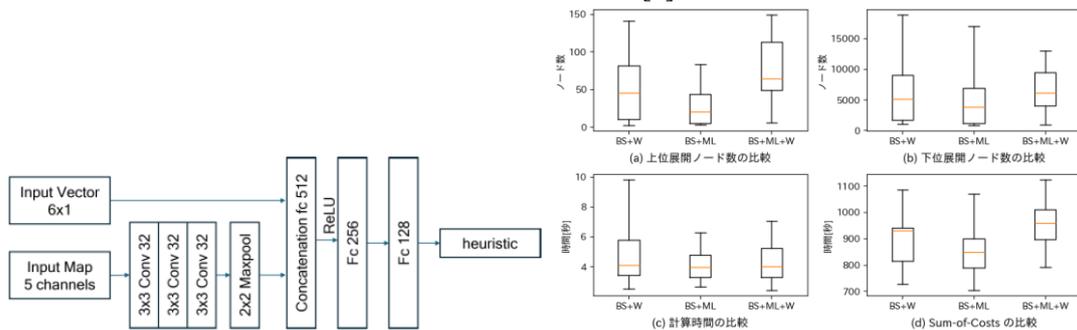


Fig. 1 左：提案モデル，右：シミュレーション結果 (BS：ビームサーチ，ML：機械学習，W：重み付き A*探索)

Keywords: Automated Guided Vehicle, Motion Planning, Multi-Agent Path Finding

References

- [1] Shron,Guni, Stern,Roni, Felner,Ariel, Sturtevant,Nathan R., (2015). Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding. Artificial Intelligence, vol.219, pp. 40-66.
- [2] Shimizu,Tomoaki, Tanedao,Kosuke, Goto,Ayumu, Hattori,Tomoya, Kobayashi,Toyokazu, Takamido,Ryota, Ota,Jun. (2023). Offline Task Assignment and Motion Planning Algorithm Considering Agent's Dynamics, 2023 9th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), pp. 239-243.
- [3] Kawawaki,Sohta, Goto,Ayumu, Taneda,Kosuke, Muranaka,Takeshi, Enoki,Yuji, Kobayashi,Toyokazu, Hattori,Tomoya, Takamido,Ryota, Ota,Jun. (2024). Multi-AGV motion planning using greedy search algorithms and learned heuristics. Proc. 2024 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). , 1539-1544.

群農業機械を対象とした分割配送計画問題の汎用アルゴリズムの提案

近年、農業の効率化を目的として、テクノロジーを活用したスマート農業への注目が高まっている[1]。農家は複数の圃場に対して複数台の農機(群農業機械)を用いて作業を行っている。その際に(a)各圃場を担当する農機(タスクの割り付け)、(b)各農機が担当する圃場の巡回経路の両者を決定する必要がある。これらにあたって、各農家の農地規模や農機間の仕事量のバランス、1枚の圃場を担当する最大農機数、作業計画に費やせる計算時間(最大計算時間)の条件などに多くのバリエーションがあり、それに対応した汎用的なタスク割り付け・経路生成システム(以下「配車システム」と称する)の開発が必要である。

この問題に対して、従来研究では様々な手法が提案されているが、個別の農家の状況に合わせて条件が与えられた場合にどの手法が適切なのかは明らかではなく、配車システムとして汎用性に欠ける。さらに、各手法ではハイパーパラメータ(アルゴリズムの動作や性能に影響を与える、外部から設定されるパラメータ)が経験的に与えられており、どの手法もその性能が十分に活かされているとは言い難い。以上の理由から、汎用的な配車システムの開発は達成されていないと言える。

そこで、本研究では農業用の汎用的な配車システムの開発を目指した。本研究の課題は大きく2つある。1つ目は、1枚の圃場規模が非常に大きく、2台以上の農機で担当する場合があることを考慮する必要がある点である。2つ目は、個別の農家の状況に合わせて与えられた条件に対して、適切な最適化手法とハイパーパラメータの組を同時に決定する必要がある点である。

これらに対して本研究では汎用配車システムを開発し、効果を検証した。具体的には、1つ目の課題に対して対象問題を分割配送計画問題として定式化し農地グラフの構築によって1枚の圃場における複数台での作業を考慮した。2つ目の課題に対しては、分割配送計画問題を扱うことのできる最適化手法候補を従来研究から網羅的に選定し、各最適化手法のハイパーパラメータも併せて、与えられた条件に対して最良解を得る設定をグリッドサーチによって調べた。つまり条件に応じた適切な最適化手法ならびにその手法における適切なハイパーパラメータを導出した[2]。

シミュレーションの結果を表1に示す。農地規模が小さい場合は焼きなまし法、規模が大きく計算時間が短い場合は局所探索法が優れていることが示され、農地規模に応じたハイパーパラメータの値が導出された。今後はより多くの農地条件やメタヒューリスティクスを対象として実験を行い、適切なアルゴリズムを選択するために必要な特徴量の抽出等、汎用的な農業用配車システムの開発をさらに進めていく。

表1 農地規模と最大計算時間に応じた最良な最適化手法とハイパーパラメータの組

		最大計算時間 (sec)			
		1	10	100	1000
農地規模	大	局所探索法	局所探索法	局所探索法	SA (初期温度, 冷却率) =(25, 0.999)
	中	ACO (蒸発率, 初期フェロモン量, 付与フェロモン量) =(0.9, 10, 0.1) ほか	SA (初期温度, 冷却率) =(25, 0.99999)	SA (初期温度, 冷却率) =(25, 0.99999)	SA (初期温度, 冷却率) =(25, 0.999)
	小	SA (初期温度, 冷却率) =(25, 0.999)	SA (初期温度, 冷却率) =(50, 0.9999)	SA (初期温度, 冷却率) =(25, 0.99999)	SA (初期温度, 冷却率) =(25, 0.999)

Keywords: スマート農業, マルチエージェントシステム, 分割配送計画問題, メタヒューリスティクス

References

- [1] Ju, C., Kim, J., Seol, J., & Son, H. I. (2022). A review on multirobot systems in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107336.
- [2] Hayakawa, K., Miyashita, S., Fujiwara, N., Takamido, R., Ota, J. (2024). A versatile task allocation system for agricultural operations by formulation with a split delivery vehicle routing problem. *Proc. 2024 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 1056-1060.

過去の経験を利用したロボットシステム配置設計最適化アルゴリズムの提案

近年の製造業において、産業用ロボットは溶接、組み立て、塗装、運搬等の様々な作業を行っている。これらの作業の実行にあたって、ロボットの動作計画や力の制御に加えて、ベルトコンベア等の周辺機器をロボットに対してどのように配置するかといった、周辺機器配置は生産効率に大きな影響を与える重要な要素である。すなわち、たとえロボットが同じ作業を行うにあっても、対象物やその他の機器との位置関係によって、ロボットが実行する動作や軌道は変化し、それによってサイクルタイムも大きく変動することになる。

しかしながら、従来研究では、周辺環境の情報が与えられた状況下での動作効率最適化が重視されており、周辺環境も含めて生産効率を向上させるアルゴリズムに関しては、未解決な問題が多く存在していた。本研究では、重要なロボット作業であるピックアンドプレース課題(図 1)を対象として、ロボットの動作計画と周辺機器の同時最適化を行うアルゴリズムを開発した[1]。

具体的には、本研究では主に以下に示す二つの点に着目し、提案手法の開発を行なった。まず、我々がこれまで行なった研究[2]を基にして、配置と動作計画という複合最適化問題を効率的に解くために、配置設計の最適化を行う層と動作計画を行う層の二つの層から成る階層的なアルゴリズムを開発した。具体的には、上位の配置設計を行う層において、動作計画の結果得られた動作効率(軌道の長さ)を基に配置の生成を行うという手順を繰り返し行うことで、ロボットの動作効率を最大化する配置の同定を試みた。またさらに、二つ目の着眼点として、複合最適化問題における計算量の削減のために、過去の最適化や計算の結果を利用する、経験ベースの手法をそれぞれの階層に採用した(配置設計:[3], 動作計画:[4])。すなわち、最適化や動作計画の結果をデータベースとして保存し、類似問題を解く際に利用することで、計算時間の短縮を図った。

結果として、図 2 に示すようにシミュレーション実験から提案手法の有効性が示された(図 2 左が提案手法に相当)。今後は異なるロボット間での経験の利用を可能にする等、提案手法のさらなる改善を行っていく予定である。

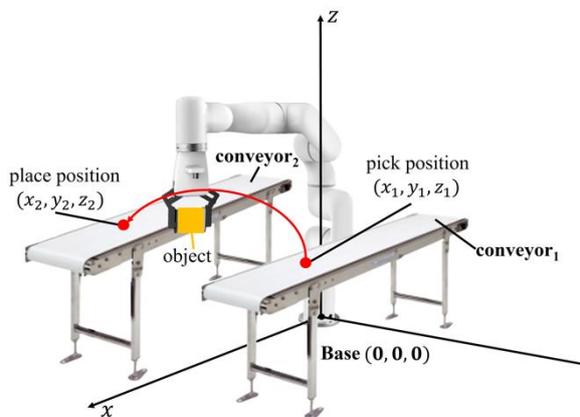


図 1. ピックアンドプレースシステムの例。

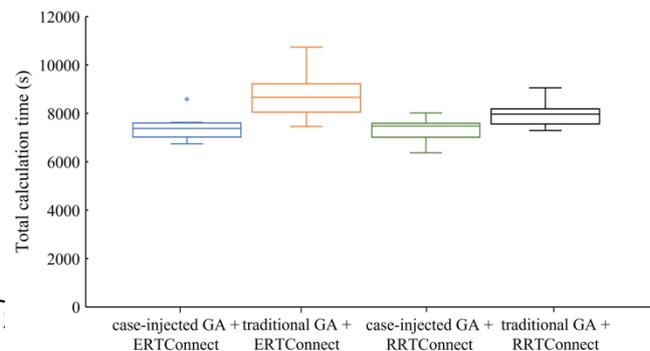


図 2. シミュレーション実験の結果

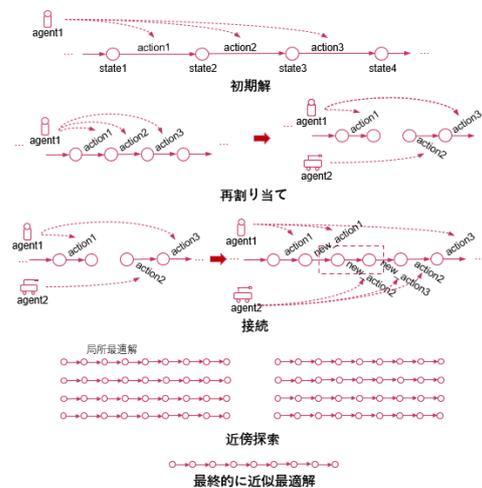
Keywords: ロボット動作計画, 配置設計, experience-based learning

References

- [1] Lu, Jiayi, Takamido, Ryota, Wang, Yusheng, Ota, Jun. (2024). How to arrange the robotic environment? Leveraging experience in both motion planning and environment optimization. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, 1468385 1-12. 10.3389/frobt.2024.1468385
- [2] Gueta, L., Chiba, R., Ota, J., Arai, T., and Ueyama, T., "Design and optimization of a manipulator-based automated inspection system," *SICE Trans. on Industrial Application*, vol.6, no.6, pp. 41-51, 2007
- [3] Louis, Sushil J., and John McDonnell, "Learning with case-injected genetic algorithms," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol.8, no. 4, pp. 316-328, 2004.
- [4] Païret, Èric, Constantinos Chamzas, Yvan Petillot, and Lydia E. Kavraki, "Path planning for manipulation using experience-driven random trees," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.6, no. 2, pp. 3295-3302, 2021.

段階的な大規模マルチエージェントタスク計画の近傍探索を使用した計画方法

マルチエージェントタスクプランニングは、システム全体のパフォーマンスを最大化することにより、複数のエージェントを用いて目標を達成する解を得ることを目的としています。これは、ロボティクス、交通、物流、製造など、さまざまな分野に共通する基本的な問題です。ドメイン記述においては、世界を真または偽で表現可能な述語を用いて記述できるため、STRIPS スタイルの言語 [1] がよく使用されます。この言語は、状態や行動を追加することで非常に複雑な問題にもスケラブルに対応できますが、解の探索空間は述語の数に対して指数的に増加します。このようなプランニング問題は PSPACE 完全であり、NP 完全問題よりも解くのが困難です [2]。本研究では、Planning Domain Definition Language (PDDL) で記述された大規模な STRIPS スタイルの問題において、現実的な時間内にマルチエージェントタスクプランニング問題を解決するための段階的手法を提案します。既存のプランナー [3] は、少数のエージェントを含む問題に対しては迅速に解を求めることができますが、大規模な問題を効率的に扱うことはいまだに課題です。我々の手法 [4] は、まず最小限のエージェント数で与えられた目標を達成し、その後、行動の順序変更および一部再割り当てを通じて解を段階的に洗練させていきます。局所的な洗練処理の中で、行動の順序変更や再割り当ては、隣接する行動間の論理的な接続を壊す可能性があります。そのため、我々の手法では、プラングラフを用いた最適な接続を探索することにより、それらの接続を再構築します。隣接する行動を接続して新たな解を得るための時間計算量は、解の長さに対して線形に關係するため、全体の計算複雑度を多項式レベルに抑えることができます。最適解の追求は現実的ではないため、スケラブルかつ迅速に動作するアルゴリズムの設計に重点を置いています。洗練プロセスには近傍探索手法を採用し、再割り当てや順序変更によって得られる解を「近傍」とみなして探索を行います。さらに、ローカル最適解からの脱出を図るためにタブーサーチを適用し、最終的に準最適解を得ることを目指します。さらに我々は、この手法を実際の工場におけるタスク割り当てシナリオに拡張し、人間の疲労を追加の最適化指標として考慮しました [5]。



[1] Fikes, R. E., & Nilsson, N. J. (1971). STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial intelligence*, 2(3-4), 189-208.

[2] Bylander, T. (1994). The computational complexity of propositional STRIPS planning. *Artificial Intelligence*, 69(1-2), 165-204.

[3] Liu, Z., Wei, H., Wang, H., Li, H., & Wang, H. (2021). Integrated task allocation and path coordination for large-scale robot networks with uncertainties. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19(4), 2750-2761.

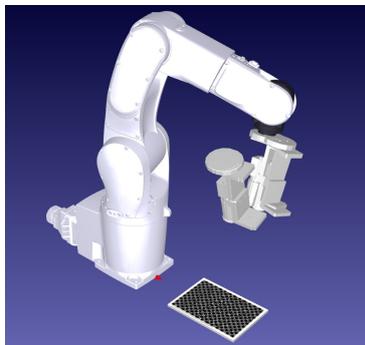
[4] Zeng, F., Shirafuji, S., Fan, C., Nishio, M., & Ota, J. (2024). Stepwise large-scale multi-agent task planning using neighborhood search. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(1), 111-118.

[5] Zeng, F., Fan, C., Shirafuji, S., Wang, Y., Nishio, M., & Ota, J. (2025). Task allocation and scheduling to enhance human-robot collaboration in production line by synergizing efficiency and fatigue. *Journal of Manufacturing Systems*, 80, 309-323.

ロボットのジョイントコンプライアンスキャリブレーションのための計測ポーズ最適化手法の提案

ロボットマニピュレータの動作精度は、製造公差、設置誤差、摩耗などのさまざまな要因によって影響を受ける可能性があります。オンラインティーチングを使用すれば、マニピュレータの動作を目標軌道と一致させることができますが、この方法は時間とリソースを大量に消費する可能性があります。一方、ロボットキャリブレーションを用いたオフラインティーチングを実施すれば、オンラインティーチングのコストを削減できますが、高精度な動作を実現するためには、関節オフセットのキャリブレーションが不可欠です。これまでに、エンドエフェクタを拘束するための特殊な装置を用いたり、レーザーポインタを追跡したりするなど、さまざまなキャリブレーション手法が提案されてきました。しかし、関節角のオフセットは、誤差の RMS 値の最大 90% を占める可能性があり、さらに、関節オフセットは日常的な使用によって変化するため、キャリブレーションは継続的な課題となっています。

この課題に対処するため、研究者たちは単眼カメラと地面上のマーカーを使用したキャリブレーション手法を提案しました。しかし、この方法による姿勢推定の精度は、物理的な制約のため、レーザートラッキングよりも低くなります。本研究では、ハンドアイカメラとマーカーを用いて、最適な計測姿勢を決定する新たな手法を提案します。従来の可観測性指標 O1[1] に基づき、カメラ画像による姿勢推定誤差が関節コンプライアンスキャリブレーションに与える影響を評価するための新しい指標 Ov1 を提案しました [2]。本研究では、提案した指標を最大化するよう最適化された姿勢においてマーカーを用いた計測を行うことで、他の手法よりも高い精度で関節コンプライアンスキャリブレーションを実現しました。



(a) Optimized poses by O1



(b) Optimized poses by Ov1

References

- [1] Shouhei Shirafuji, Hiroki Goto, Xiaotian Zhang, Keiji Okuhara, Noritaka Takamura, Naoya Kagawa, Hiroyasu Baba, and Jun Ota. Visual-biased observability index for camera-based robot calibration. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 16(5), 2024.
- [2] Xiaotian Zhang et al. Visual-based joint compliance calibration using measurement pose optimization. *International Journal of Automation Technology*, 2025.

人の両手動作教示を用いた 片腕ロボットアームの動作計画手法

人がロボットに対して理想的な動作を提示し、ロボットがそれを基に動作を学習する、教示学習(LfD: learning from human demonstration)は、ロボット動作計画の分野において、幅広く活用されてきた[1]。産業場面で広く活用される片腕のロボットアームに対しては、通常、人が両手を使って行う作業であったとしても、片腕を用いて動作教示を行う[2]。しかしながら、本来人が両手を用いて行っている作業を片手で行うことは、不自然な動作を生じさせ、動作教示の有効性を減少させている恐れがあった。

そこで本研究では、人が両手でを行った動作を教示を用いて、片腕のロボットの動作を生成する、新たな教示ベースの動作計画手法を考案した。具体的には、図1に示すような両手を用いたピックアンドプレース課題において、まず、両手の距離が最も近づいた最近接点を求める。その後、その時点で物体に対して影響を与える効果器(エフェクタ)が切り替わると仮定して、その前後の両手の動きを結合させて、教示軌道を得る。接続点を境に動作が離散的に変化するため、ローパスフィルタを用いて、二つの動作を滑らかに繋ぐ。最後に、得られた3次元空間上の軌道情報の逆キネマティクを解き、ロボットの動作(6次元の姿勢空間上の時系列データ)を得る。このような処理を行うことによって、人が両手を用いて行った動作から、滑らかな片腕ロボットの動作を生成することができる。

提案手法の有効性を検証するために、実験を行った。実験では、図1のような課題におけるロボットの動作を提案手法と従来手法を用いて計画した際の、成功率や姿勢空間上でのパス長(計画された動作の質の高さを表す)等を比較した。結果として、図2に示すように、提案手法は従来手法と比較して、より高品質な動作を高い確率で生成可能なことが明らかにされた。今後は本研究の結果を基に、提案手法のさらなる改善を行っていくと同時に、より実践的な場面を想定した評価・検証を行うことを予定している。

Keywords: Motion planning, Learning from human demonstration, Bi-manual motion

References

- [1] Ravichandar et al., (2020). Recent advances in robot learning from demonstration. *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*, 3(1), 297-330.
- [2] Takamido, R., & Ota, J. (2023). Learning robot motion in a cluttered environment using unreliable human skeleton data collected by a single RGB camera. *IEEE Robotics and Automation Letters*.
- [3] Chen et al., (2024). Dual-arm demonstration based single-arm robot motion planning for pick and place task. *In proceedings of the 42nd Annual Conference of the Robotics Society of Japan*, AC1G3-02, 1-4.



図1. 両手を用いたピックアンドプレース課題。

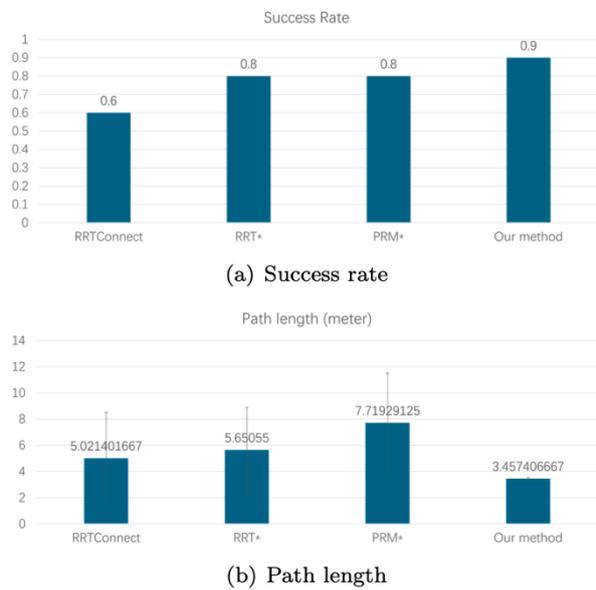


図2. 検証実験の結果。(a) 成功率, (b) パス長。

1台のビデオカメラから取得したヒト骨格情報を用いた 解決困難なロボット動作計画の容易化

ロボットに新規のタスクを実行させる際には、人がロボットに対して具体的にどのような動作や手順でそれを実行するかを伝達する、教示(Demonstration)やティーチングが行われる。本研究では、1台のRGBカメラから抽出したヒト骨格情報を用いて、解決困難な動作計画問題を容易化するという、新しい教示手法を提案し、シミュレーション実験によりその有効性を検証した。

従来の教示ベースの動作計画手法としては、人がロボットのエンドエフェクタ部分を直接操作して理想的な動作を教示するキネシセティックティーチングや、コントローラ等の遠隔操作で間接的に教示を行う等の方法が用いられてきた。しかしながら、これらの従来研究の問題点として、1. 教示を行うためにロボットの機構や制御に関する専門知識が必要であること、2. 設備等に大きなコストが掛かること等が挙げられる。そこで本研究では、これらの背景を踏まえて、1台のRGBカメラ映像から抽出したヒトの骨格情報を利用した、新しい教示ベースの動作計画手法を提案した(図1)[3-4]。この手法においては、利用者は1台のビデオカメラの前で、自らの身体を用いて理想的な動作を実演するだけで、それを自動的にロボット動作に変換した上で、それらを利用した動作計画を行うことができる。そのため、従来手法と比較して、1. 直感的で専門知識を有しない未熟者にも扱いやすく、2. 安価な設備で実行可能であるという利点がある。また、後述のように人から生成したロボット動作を直接利用するのではなく、それらを再度ロボットに適した形で変換・修正することにより、従来研究で問題とされてきた、図1(e)のような混雑な環境(cluttered environment)への適用を可能とした。

図1は提案手法の全体像を示している。まず、人が対象のタスクを行なった際の様子を1台のビデオカメラで撮影し、骨格抽出ソフトを用いて、3次元の骨格情報を抽出する(図1(a))。その後、抽出した骨格情報をロボットの動作へと変換し、データベースとして保存する(図1(b)-(d))。この際、1台のカメラ映像から抽出した骨格情報にはノイズが多く含まれ、図1(e)に示すような困難な動作計画問題における直接的な利用は困難であるため、それらを再度専用のアルゴリズムで修正し、実行可能なパスを生成する。提案手法の有効性を検証するために行なったシミュレーション実験の結果として、提案手法は最新の従来手法と比較して、3つの異なるタスク全てで50-90%程度の大幅な計算時間の短縮と成功率の向上を達成した[1]。

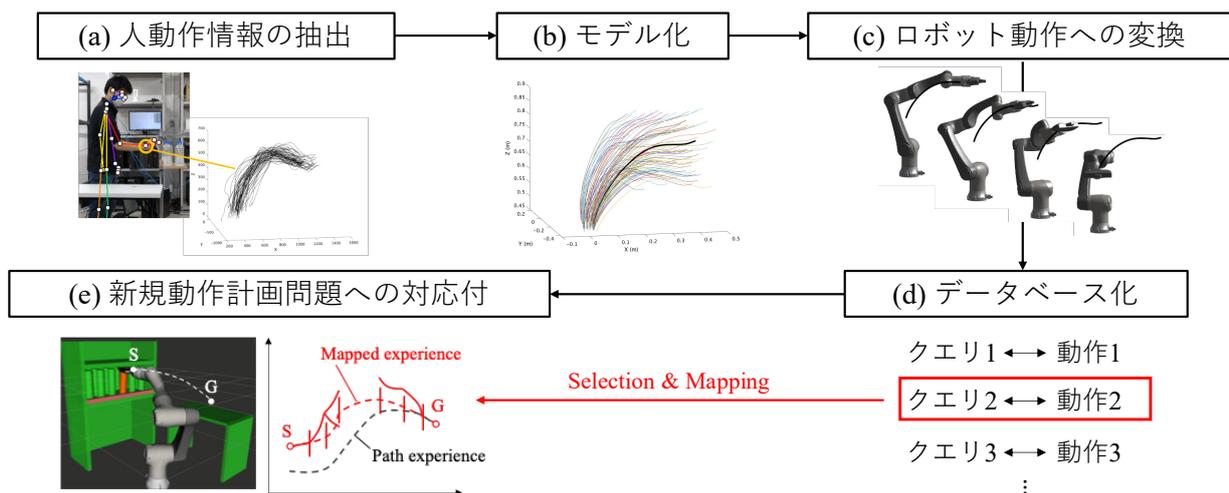


図1. 提案手法の全体像. (a) 人動作の撮影と骨格情報の抽出, (b) ロボット動作への変換, (c) ロボット動作計画問題への適用と解決困難な動作計画問題の容易化[1].

Keywords: Learning from Demonstration (LfD), 教示, 動作計画, 骨格抽出

References

- [1] Takamido, R., & Ota, J. (2023). Learning robot motion in a cluttered environment using unreliable human skeleton data collected by a single RGB camera. *IEEE Robotics and Automation Letters*.
- [2] 東大、人の動きでロボ動作作成 映像から移動軌跡推定, 日刊工業新聞, 2022年10月3日

不確実な人教示データを活用した 柔軟かつ高速な最適動作計画手法の提案

人がロボットに対して理想的な動作を提示し、ロボットがそれを基に動作を学習する、教示学習 (LfD: learning from human demonstration) は、ロボット動作計画の分野において、幅広く活用されてきた[1]. 通常ロボットの動作計画は、姿勢空間上でランダムに点を抽出する、ランダムサンプリングを用いた方法が主に取られているが、この教示学習を用いることによって、通常の方法では解けないような複雑な問題も、高速に解くことができる. しかしながら、従来手法ではモーションキャプチャ等の高精度な計測手法に依存したアルゴリズムを用いているため、1台の RGB 映像から抽出した骨格情報など、不確実な教示データに対しての適用なこんなんであった. 我々はこれまでの研究[2]でその問題を部分的に解決してきたが、その研究で開発したアルゴリズムでは、動作の最適性が保証されていないという問題があった.

そこで本研究では、1台のビデオカメラから抽出した骨格情報という、不確実な人教示データを活用して、柔軟かつ高速に最適動作計画を実施する、新たな動作計画アルゴリズムの開発を行った[3]. 図1は提案手法の概要を示している. 提案手法では、まず、不確実な人教示データを部分パスに分割して、姿勢空間内の詳細な探索を行う. これによって、ノイズ等の影響で衝突が生じる部分を局所的に修正しつつ、姿勢空間内を幅広く探索することができる. 次に、初期解の発見後は、より短い毛色になるようにパスの繋ぎ替えを行っていくことにより、漸近的に解を最適解へと収束させていく. これによって、不確実な教示データを活用して、柔軟かつ高速に最適動作計画を行うことを可能にした.

提案手法の有効性を検証するため、実験を実施した. 実験においては、図2に示す2つの課題を対象とし、1台の RGB カメラで人の動作を撮影し、それをロボットへの教示データとした. 実験の結果、提案手法によって、通常的手法では解くことが困難な動作計画問題においても、90%以上の確率で解を求めることができ、また、経路長も50%以上削減できることが明らかになった. 今後は提案手法のさらなる改善を行っていくと同時に、より厳密な検証を行っていく.

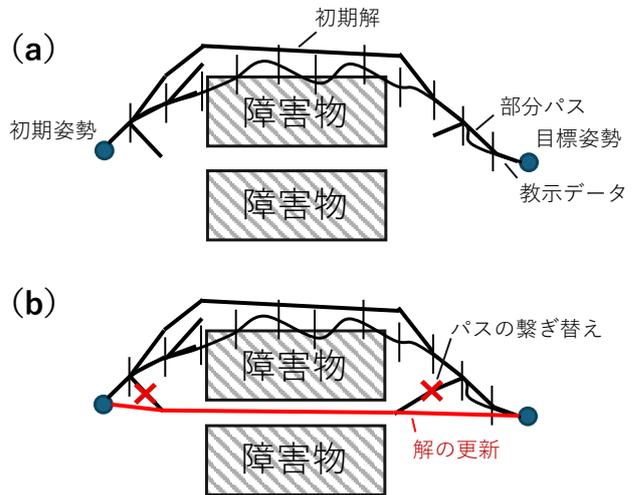


図 1. 提案手法の全体像. (a) 部分パスを利用した解の探索, (b) パスの繋ぎ替えによる最適化.

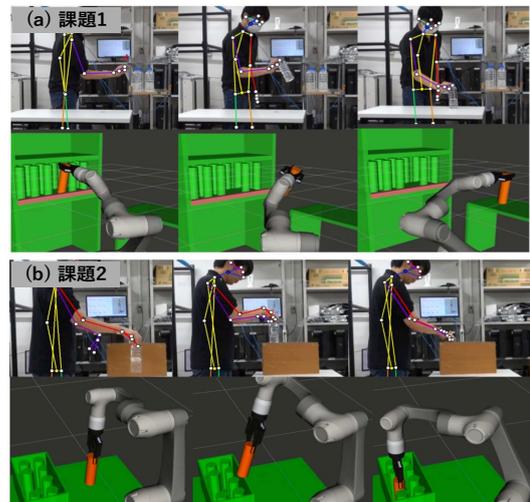


図 2. 実験における課題. (a) 棚から物体の取り出し, (b) 箱の中への物体の設置.

Keywords: Motion planning, Sampling-based planning, Optimal motion planning

References

- [1] Ravichandar, H., Polydoros, A. S., Chernova, S., & Billard, A. (2020). Recent advances in robot learning from demonstration. *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*, 3(1), 297-330.
- [2] Takamido, R., & Ota, J. (2023). Learning robot motion in a cluttered environment using unreliable human skeleton data collected by a single RGB camera. *IEEE Robotics and Automation Letters*.
- [3] 高御堂 良太 & 太田順, (2024). 不確実な人教示データを活用した柔軟かつ高速な最適動作計画手法の提案, 日本ロボット学会学術講演会第 42 回学術講演会予稿集, AC3B2-01, 1-3.

ヒト骨格情報と物体位置情報を用いた 作業工程の自動推定アルゴリズム

作業者が各時点で実行している動作の記述を行う時間分析は、Industrial Engineering (IE) の代表的な分析手法である。時間分析によって対象作業中の「ムダ」な動作を検出し改善作業を行うことで、作業効率の大きな増加が見込まれる [1]。しかしながら、従来は人がビデオ映像などを見ながら手作業で各時点での動作の分類・ラベル付を行っていたため、分析に要する時間の大きさが問題となっていた。そこで本研究では、この問題点を解決するため、機械学習技術を用いて、ピックアンドプレース作業における作業工程の自動推定アルゴリズムを開発した [2]。

人の動作認識、作業認識は近年の機械学習分野において主要な研究領域の一つであるが [3]、本研究のように産業場面での人作業を対象とした研究は比較的少なくなっている。その要因として、人の情報のみでなく、人と物体の相互作用も考慮する必要した認識を行う必要があることが挙げられる。そこで、本研究では、この問題に対処するため、図 1 に示すような人動作認識、作業工程の自動推定アルゴリズムの開発を行なった。

具体的には、本研究では作業の様子を写したビデオカメラの映像から、骨格認識アルゴリズムで人の骨格情報、物体検出アルゴリズムで物体の位置情報を検出し、両者の時間変化を入力データとして、Bi-LSTM (長・短期記憶ネットワーク) に入力し、各時点での作業工程の記述を行なった。このように「ヒトの情報」としての骨格情報と、「モノの情報」としての物体の位置情報の両者を考慮することにより、人が物体を搬送するという相互作用の関係を効果的に記述することが期待される。最終的には、これらの情報を用いて各時点での作業の様子を 5 つの動作ラベルで記述することにより、どの動作が最も時間を要するボトルネックとなっているか、あるいは手待ち (Idle) の時間はどの程度であったか等の時間分析の結果を可視化する。

提案したアルゴリズムの有効性を検証するため、出力されたラベル情報を用いて、作業の遅延 (ここでは、その作業者の平均作業時間からの偏差) を予測する実験を行った。具体的には、左右の手のラベルの非対称性などのパラメータを考慮した重回帰モデルを構築し、それに基づく作業遅延の推定を行った。結果としては、モデルの説明率は全ての課題において 50% を越えており、提案手法で作業時間の分散の半分近くを説明できることがわかった。今後は本研究の結果を受けて、自動フィードバックシステムの開発や、認識モデルのさらなる精度改善を行っていく。

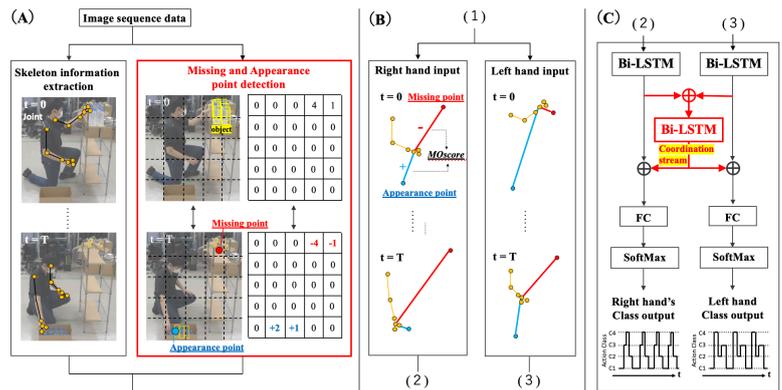


図 1. 提案システムの全体像。

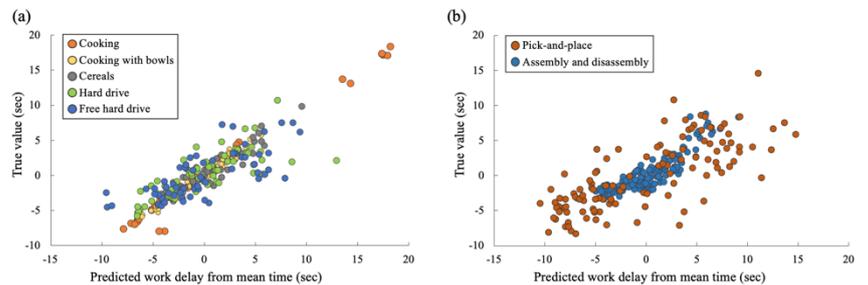


図 2. 作業遅延の推定結果。

Keywords: 動作認識, 物体認識, 機械学習, 骨格抽出, 時間分析

References

- [1] Barnes, R. M. (1991). Motion and time study: design and measurement of work. John Wiley & Sons.
- [2] Takamido, R., & Ota, J. (2024). Action recognition and subsequent in-depth analysis for improving the time efficiency of bimanual industrial work. *IEEE Access*.
- [3] Zhang, H. B., Zhang, Y. X., Zhong, B., Lei, Q., Yang, L., Du, J. X., & Chen, D. S. (2019). A comprehensive survey of vision-based human action recognition methods. *Sensors*, 19(5), 1005.

人の手動作解析に基づいたワイヤーハーネス把持のための ロボットによる動作再現

近年、工場現場におけるビンピッキングの自動化が進んでいる。主に金属部品などの剛体物体のビンピッキングにおいては、部品の 3D データを活用することで実装されている [1]。しかし、ワイヤーハーネスなどの変形可能な物体では、その姿勢が不確定なため、実用化が難しく、人間が作業するのがほとんどである。この問題を解決するために、人間がロボットにワイヤーハーネスの掴み取り動作を教示するシステムを提案する [2]。まず、人間がワイヤーハーネスを掴む様子を上から撮影し、RGB-D 画像に基づいて人間が掴んだ位置と掴み取り姿勢を学習させる。実際の把持動作実験から、人間がワイヤーハーネスの特徴的な構造を持つ領域を掴む傾向があることに気づいた。そのような情報を学習するために、ニューラルネットワークの学習のためのデータセットを構築した。インスタンスセグメンテーションを行うために、ワイヤーハーネス画像をさまざまな背景シーンに貼り付けることでデータセットを拡張して実装を行った。次に、把持領域の点群について、デモンストレーション時と現在の状態を比較することで、その移動量と回転量を計算する点群処理を行う。この情報とデモンストレーションのワイヤーハーネスの掴み取り姿勢を利用して、現在のワイヤーハーネスを掴む動作をロボットに実演させる。

実験は、掴み取る中央部分のセグメンテーションの精度と、ワイヤーハーネスの把持成功率を評価した。今後の展望としては、異なる種類のワイヤーハーネスで把持動作を行うことや、箱内に入れるワイヤーハーネスの数を増やすこと、および箱の隅に近いワイヤーハーネスの把持を試みる。

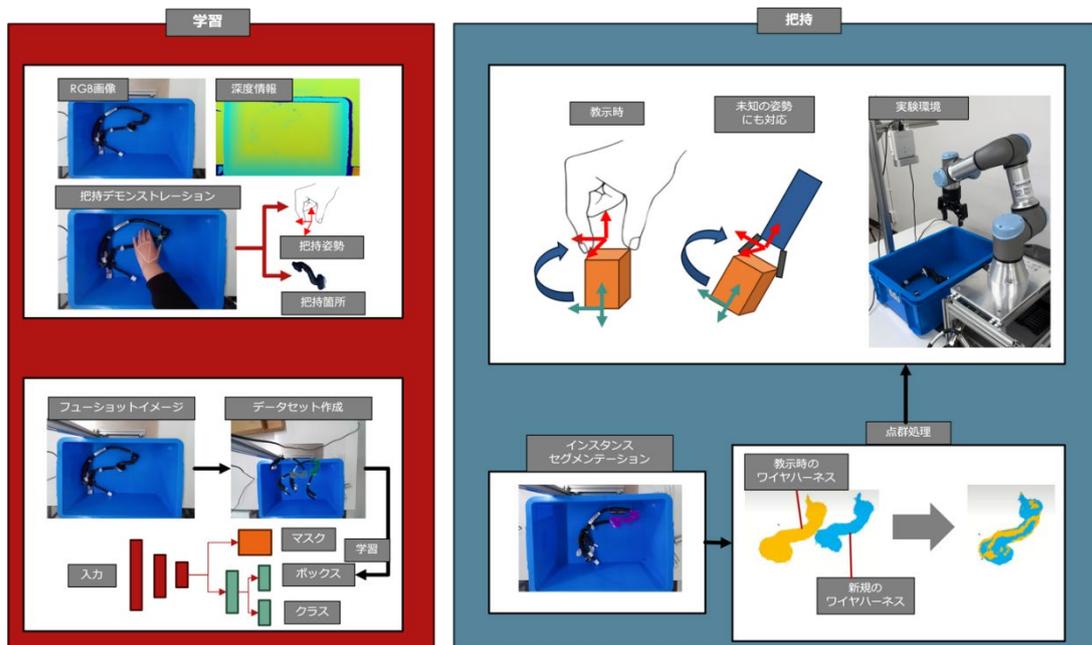


Fig 1. 概要

Keywords: Wire harness, Grasping, Hand demonstration, Segmentation

References

- [1] K. Kleeberger, C. Landgraf, and M. F. Huber, "Large-scale 6d object pose estimation dataset for industrial bin-picking," Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 573–577, Aug. 2019
- [2] K. Kamiya et al., "Learning from human hand demonstration for wire harness grasping," Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 1645-1650, Jul. 2024

車椅子移乗動作学習のための患者ロボットシステムの開発

近年の看護教育の現場においては、安全管理や倫理上の問題から、看護学生らが実際の患者に触れる機会が減少するという問題が生じている。そのため、教育用ロボットシステムを用いた看護スキルトレーニングの需要が高まっており、近年多くのロボットシステムが提案されてきた。このようなトレーニングシステムの中には、車椅子移乗動作における患者の動作を再現し、その練習効率を上げる、患者シミュレーター(HPS: Human Patient Simulator)が提案されている[1-3]。車椅子移乗動作は看護技能の中でも特に患者や看護師の怪我のリスクが高く、危険な動作の一つとされている。そのため、ロボットを通して車椅子移乗動作の学習を行うことは、看護現場における事故や怪我のリスクを減少させることに繋がり、有意義であると考えられる。しかしながら、これまでに提案されてきた先行研究の方法論には、車椅子移乗動作における患者の動きの再現精度に問題(例えば、患者を立ち上がらせた状態で回転させ、向きを変える動きの再現が困難等)があった。

そこで本研究では、上記の先行研究の問題点を解決するために、車椅子移乗動作を学習するための、新たな患者ロボットシステムの開発を行った[4]。具体的には、まず、図1に示すように、看護師が患者に力を加えた際の応答を実験的に計測しモデル化を行った。ここでは、従来対象とされてきた立ち上がり時のみでなく、方向転換や座り動作を含めた車椅子移乗動作全体のモデル化を行った。モデルとしては、加えられた力に応じて速度を生成する、可変アドミッタンス制御則を用いた。最終的に、UR10eに上記の制御則を実装し、図2のように車椅子移乗動作の練習を行うことのできる、ロボットシステムを実現した。図2では使用者から加えられた力に応じてロボットのエンドエフェクタの位置や速度を変化させ、患者の動きを再現している。このような本研究の取り組みの結果を受けて、今後は提案したシステムを評価するための実験を行い、実用化に向けたさらなる改善を加えていく予定である。

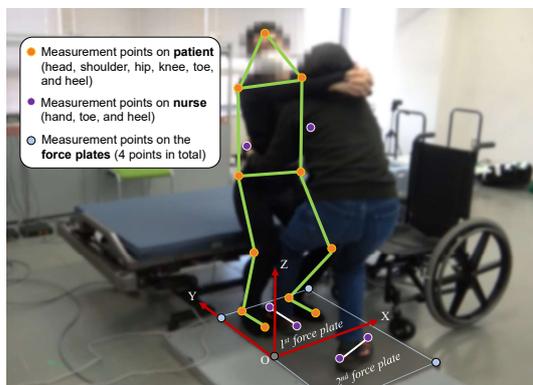


図1. 車椅子移乗動作の実測とモデル化.

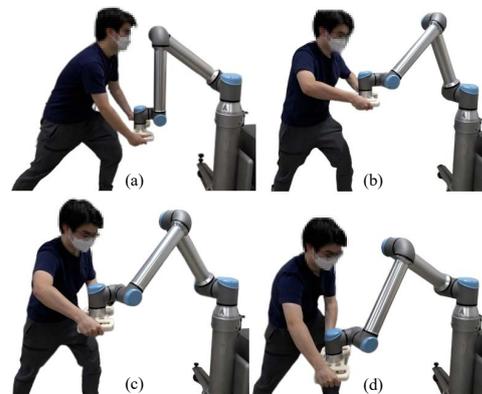


図2. 開発したロボットシステムに対して実行した車椅子移乗動作の例.

Keywords: 教育用ロボットシステム, 看護教育, アドミッタンス制御

References

- [1] Z. Huang, C. Lin, M. Kanai-Pak, J. Maeda, Y. Kitajima, M. Nakamura, N. Kuwahara, T. Ogata, and J. Ota, "Robot patient design to simulate various patients for transfer training," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2079–2090, 2017.
- [2] C. Lin, T. Ogata, Z. Zhong, M. Kanai-Pak, J. Maeda, Y. Kitajima, M. Nakamura, N. Kuwahara, and J. Ota, "Development of robot patient lower limbs to reproduce the sit-to-stand movement with correct and incorrect applications of transfer skills by nurses," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, p. 2872, 2021.
- [3] D. Suzuki, R. Takamido, M. Kanai-Pak, J. Maeda, Y. Kitajima, M. Nakamura, N. Kuwahara, T. Ogata, and J. Ota, "Robot patient system for evaluating patient's safety in sit-to-stand motion," The 10th National Conference of the Service Society of Japan, 2022 (in Japanese).
- [4] Zhou, Y., Takamido, R., Kanai-Pak, M., Maeda, J., Kitajima, Y., Nakamura, M., ... & Ota, J. (2023, June). Development of a Nursing Skill Training System Based on Manipulator Variable Admittance Control. In 2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) (pp. 1226-1231).

多感覚 Virtual Reality を用いた熟練点検技能抽出

石油精製プラントでは設備異常の早期発見のため、熟練の作業者による巡回点検が行われている。巡回点検において、作業者はプラント内に設置された様々な機器を点検して回り、異常が発見された際にはその旨を報告する。この際、熟練の作業者は未熟練者相比于、未熟練者が見落としてしまうような僅かな異常（予兆）の発見が可能であることが知られており、このような熟練した作業員のみが持つ点検技能を明らかにすることがプラントの保全能力を向上させるために、必要不可欠であると考えられている。

これまで我々は上記のような研究背景を受けて、Virtual Reality (VR) システムを用いて熟練点検作業者の点検行動の計測と分析を行い、1. 熟練者は装置から離れた位置から「俯瞰的に」対象を見る頻度が高いこと、2. 漏洩を発見するために有効な、下から見上げる姿勢を多く取っていること等を明らかにした[1]。しかしながら、従来研究においては、熟練の作業者が活用する様々な感覚情報のうち、視覚のみに着目をしたものであった。実際の作業においては、熟練者は視覚のみでなく、聴覚（例：キーンという音）、触覚（例：パイプの振動）、嗅覚（例：プロセス流体の匂い）など、様々な感覚情報を活用して作業を行っていると考えられる。

そこで、上記のような問題点を解決するために、本研究では図1に示すような視覚情報に加え、聴覚、触覚、嗅覚情報などの情報呈示が可能な、多感覚 VR システムを新たに開発した。このシステムにおいて、作業者は VR 空間内の仮想プラントを対象に点検作業を行いつつ、様々な感覚情報を手掛かりに異常の発見に取り組むことができる。

開発したシステムの有効性を検証するために、点検作業の初級者と熟練者を対象とした技能抽出実験を行った。対象は石油精製プラントにおいて日常的に点検作業に従事する熟練者 9 名と、研修期間を除いて実務経験の無い初級者 12 名とした。実験において、参加者はランダムに設定された異常を 2 分間の制限時間内に発見するという課題に従事した。実験の結果として、(1) 熟練者は多感覚の情報を駆使して発見する異常に関して、特に発見率が高いこと、(2) 回転機などの重要な点検対象に関しては、視覚のみでなく触覚や聴覚を用いて複合的に判断を行っていること、などを明らかにした。これらの事柄は多感覚の VR システムによって初めて明らかになったものであり、提案システムの有効性を示すものである。今後は本研究で開発した多感覚 VR システムをベースとして、初級者を対象とした教育システムの開発等を行なっていく予定である。

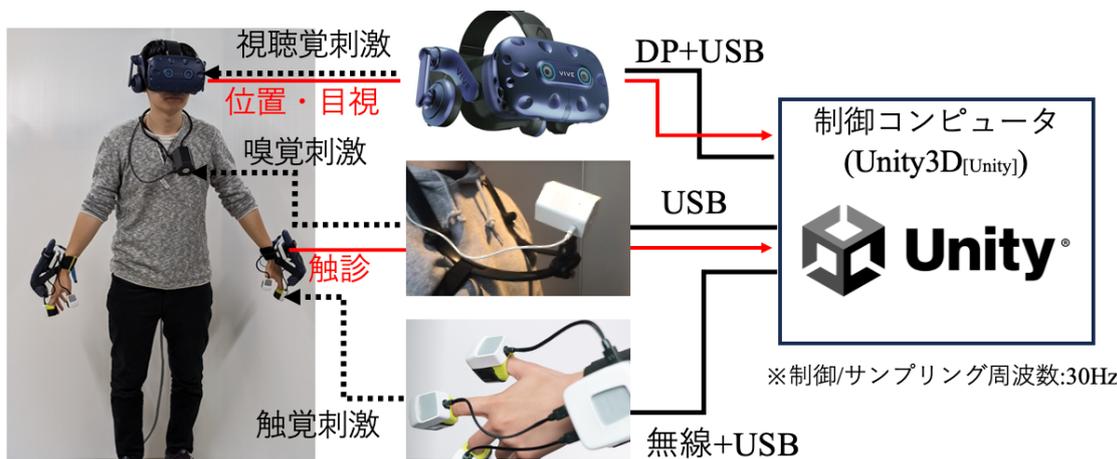


図1. CAMによる熟練度判別時の根拠の可視化。左が未熟練者、右が熟練者。

Keywords: 熟練技能, Virtual Reality, 多感覚情報処理, 点検作業

References

- [1] R. Takamido et al., "Evaluation of expert skills in refinery patrol inspection: visual attention and head positioning behavior," *Heliyon*, vol. 8, no. 12, p. e12117, Dec. 2022.
- [2] 竹内寛樹 他, "マルチモーダル知覚行動計測システムによる熟練点検技能の抽出", 2024年度精密工学会春季退会学術講演会講演論文集, H44, p. 816-817, 2024年3月.

自動生産ラインの知識の構造化による故障原因特定支援システム

本研究は、自動生産ラインにおける故障原因の特定を支援するシステムを提案する。自動生産ラインの保全活動には設備に関する深い理解と熟練の技術が必要とされ、広く使われている Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)の知識を再利用することが有効である。従来の研究では過去の FMEA から故障原因を検索できるシステムが開発されてきたが、異なる生産ライン間での知識再利用が困難であった。

本研究では、FMEA の記述から生産ライン上の概念（行為、状態、パラメータ、工程要素）を抽出し、概念間の関係を表現したナレッジグラフを構築する。このグラフを RGCN によって埋め込み、得られたベクトル表現を用いて故障原因を推論する。車載センサーの組み付け工程における FMEA データを用いた実験では、「基板の組み付け位置ずれ」に対する原因候補推論において比較手法と同等の精度を達成した。この手法により、異なる生産ライン間での知識再利用が可能となり、より効率的な故障原因特定が期待される。

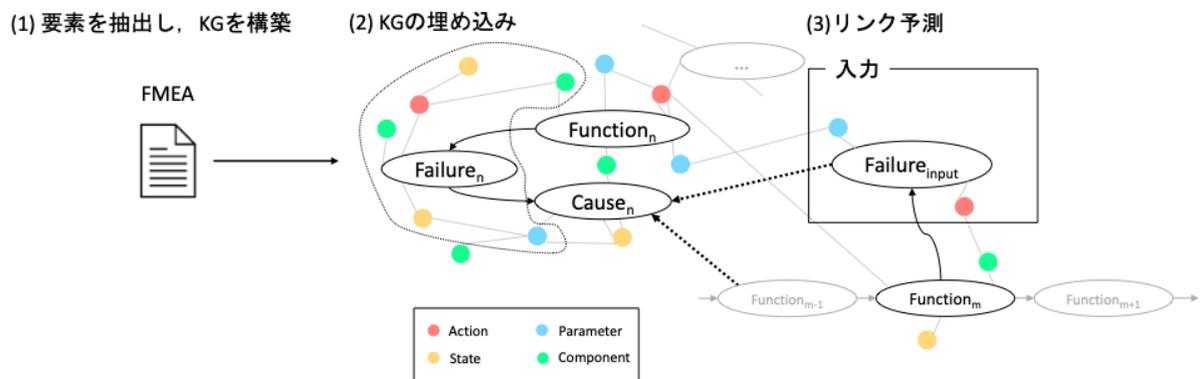


図 1. 提案フレームワークの概要.

Keywords: 生産システム, 故障原因特定, FMEA, オントロジー

References

- [1] 岡崎翔, 藤生拓真, 安井俊徳, 上西康平, & 太田順. (2024). 自動生産ラインの知識の構造化による故障原因特定支援システム. 人工知能学会第二種研究会資料, 2024(SWO-063), 07.
- [2] Okazaki, Sho, Shirafuji, Shouhei, Yasui, Toshinori, & Ota, Jun. (2023). A framework to support failure cause identification in manufacturing systems through generalization of past FMEAs, Proceedings of the 2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), June 28-30, 2023. Seattle, Washington, USA, pp. 858-865.

生産システムの故障原因推論のための 保全記録の記述方法とオントロジーの提案

生産システムの生産効率維持・向上のための改善活動では、故障原因の調査が重要であるが、これは知識や経験の無い非熟練者にとっては難しい作業である。そこで、熟練者によって過去に行われた故障分析を利用した様々な支援方法が検討されてきた。これまで、既存の FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) を利用した故障原因推論が広く行われている。しかし、FMEA を用いた故障原因推論では、同一故障に対し熟練者が列挙した原因候補との一致度が低い結果となった。これは、故障原因特定の際に熟練者が FMEA よりも詳細な部分に着目するためであり、故障原因推論において、FMEA よりも詳細な記述を含む保全記録を利用することの必要性が示唆された[1]。実際に行われた保全活動を記録した保全記録の特徴として、記述の量や形式が統一されていないことが挙げられる。また、FMEA は対象システムの構造を階層的に分析し作成されるため記述される故障の階層が明確である一方で、保全記録ではどの階層に着目して故障を記述するかが定まっておらず不揃いである。これらの理由から、現状の保全記録は、故障原因推論に必要な因果関係が抽出しにくく、再利用が難しいデータとなっている。

本研究では、保全記録を再利用性の高い形で記述するための記述方法と、記述された故障を整理するためのオントロジーを提案し、保全記録を FMEA と併用することで、生産システムの故障原因の推論精度の向上を目指した。保全記録を FMEA と併用するために、FMEA を拡張する形で保全記録の記述方法を提案した。故障間の因果関係、故障と機能間の関係を記述した上で、FMEA と保全記録の各記述を過去事例オントロジーのインスタンスとして表現した。また、ドメインオントロジー内に故障オントロジーを構築し、故障をその発生工程とそれによって損なわれる条件を用いて表現した。

提案手法の評価のために、提案手法を用いて FMEA と保全記録を利用した推論と、FMEA のみによる推論を比較した[2]。推論出力を、同一の故障に対し熟練者が列挙した故障原因候補を比較し、Precision と Recall の 2 指標で評価した。結果を図 1 右に示す。これにより、本研究で提案した保全記録の記述方法と故障オントロジーは故障原因推論の精度向上に有効であることが示された。

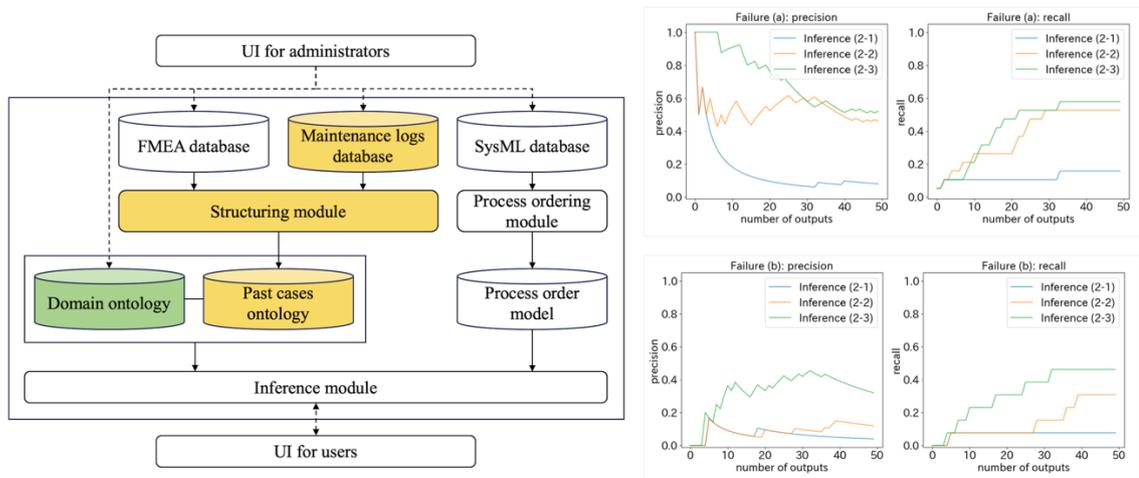


図 1 左: 提案フレームワークの全体像, 右: 推論結果 (緑: 提案手法, 青: FMEA のみによる推論)

Keywords: 生産システム, 故障原因特定, FMEA, 保全記録, オントロジー

References

- [1] S. Okazaki, S. Shirafuji, T. Yasui and J. Ota, "A Framework to Support Failure Cause Identification in Manufacturing Systems through Generalization of Past FMEAs," 2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Seattle, WA, USA, 2023, pp. 858-865.
- [2] T. Fujiu, T. Yasui, S. Okazaki, K. Kaminishi and J. Ota, "Description Method and Failure Ontology for Utilizing Maintenance Logs with FMEA in Failure Cause Inference of Manufacturing Systems," 2024 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Boston, MA, USA, 2024, pp. 512-517.

体格差を考慮した手指リハビリテーションのための グローブ型デバイスの開発

手のリハビリテーションデバイスを設計する際には、患者間の体格の違いを考慮し、それぞれの患者のニーズに合わせてリハビリテーションを行うことが重要である。本研究では、患者個々の体格に合わせてグローブを簡単に調整し、指の運動をカスタマイズできる、ケーブル駆動のソフト手袋の開発を目的としている。開発しているデバイスは、指の長さや指の太さを考慮し、人差し指の固定部の位置を容易に調整することができ、指に4本のケーブルを配置することで、患者に適した様々な指の運動が可能になる。これまで、グローブの運動学的モデルを作成し、この運動学モデルに基づき、開発したグローブをモーターで動かし、4つの異なるサイズの人工指に4つの代表的な指の動作を再現した。これにより、異なるサイズの指に対し、複数の動作を再現できることを示した[1]。

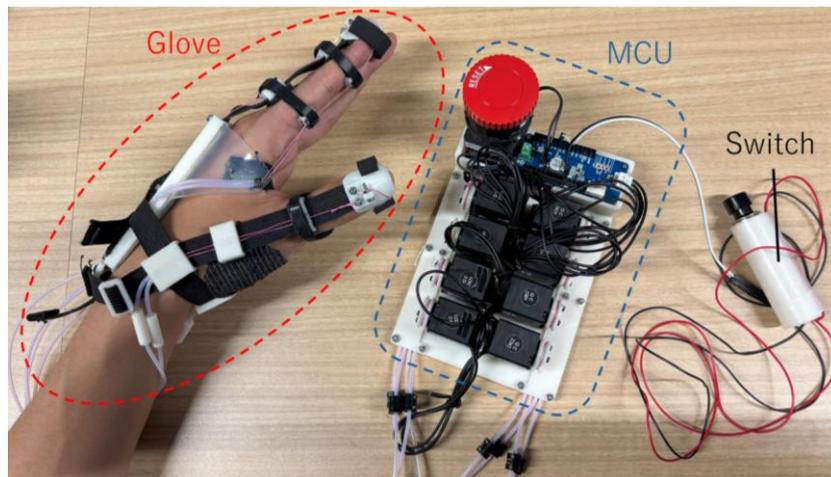


図 1 開発したグローブ型デバイス

Keywords: 補助デバイス, 手指, リハビリテーション, 医工学

References:

[1] R. Nishizawa, T. Hasegawa, S. Shirafuji, J. Ota and A. Yozu, "Development of a soft-type glove capable of customizing finger rehabilitation exercises considering differences in physique*," *2024 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Orlando, FL, USA, 2024, pp. 1-4,

機械学習を用いた歩行分析によるパーキンソン病患者の 機能的自立度の予測

パーキンソン病は高齢者に多くみられる神経変性疾患であり、患者数は年々増加の傾向をたどっている。歩行障害は、パーキンソン病患者の日常生活自立度を低下させる主要な要因となるため、リハビリテーションの対象となっている。しかし、具体的にどのような歩行の変化が患者の日常自立生活能力の向上に影響を与えるかということは明らかでない。パーキンソン病患者に対する効果的なリハビリテーションの計画のために、歩行動作の変化を詳細にとらえ、患者の自立生活能力にどのような影響を与えているか定量的に分析することは重要である。そのため、我々は、パーキンソン病患者を対象に、歩行動作を定期的に計測し、歩行中のどのような動きの変化が日常生活自立度に影響するのかを調査している。これまで、機械学習の手法を用いて、日常生活自立度を予測できることが明らかとなった。今後は、予測に使用したモデルを元に、日常生活自立度向上に寄与する歩行動作を具体的に明らかにすることを目指している。

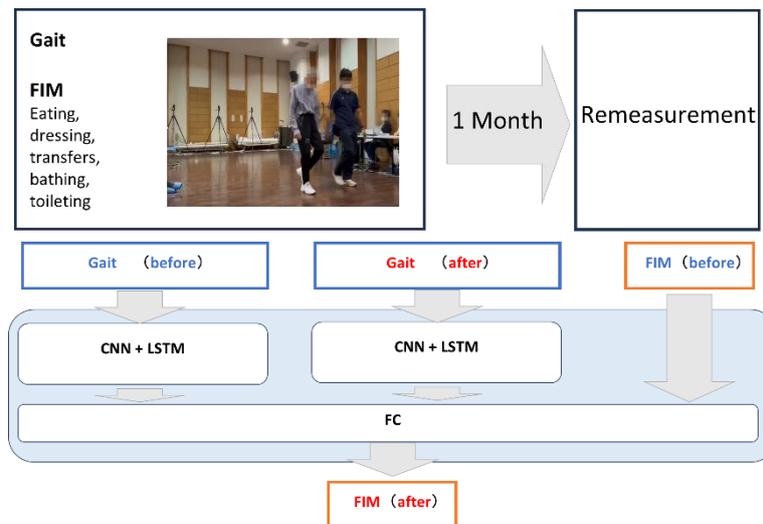


図 1. 計測手順および予測モデル

Keywords: パーキンソン病, 歩行, 日常生活自立度, リハビリテーション, 機械学習

References:

[1] M. Ishikawa T. Hasegawa, K. Kaminishi, R. Chiba, J. Ota and A. Yozu, "Analysis of gait factors relevant to daily living in patients with Parkinson's disease, 2024 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Orlando, FL, USA, 2024.

歩行障害者における踵の加速度を用いた LSTM に基づく 歩行フェーズの予測

歩行補助デバイスを適切かつ正確に制御するためには、歩行フェーズの予測が不可欠である。本研究では、健常者と歩行障害者の歩行フェーズの予測を、歩行のモーションキャプチャデータをもとに行った。歩行フェーズの予測モデルは、ニューラルネットワークの一種である長期短期記憶を用いて構築した。踵の加速度データを入力とし、0.1 秒先の歩行フェーズを予測した。患者に対する予測精度を向上させるために、参加者個人ごとにモデルを作成し、入力加速度データの長さをその参加者の 1 歩行周期の長さに応じて調整する方法を提案した。歩行フェーズの予測精度は、従来モデルで 84%、個別モデルで 89% であった。この予測モデルは、歩行補助デバイスへの応用が期待される [1]。

Prediction Model

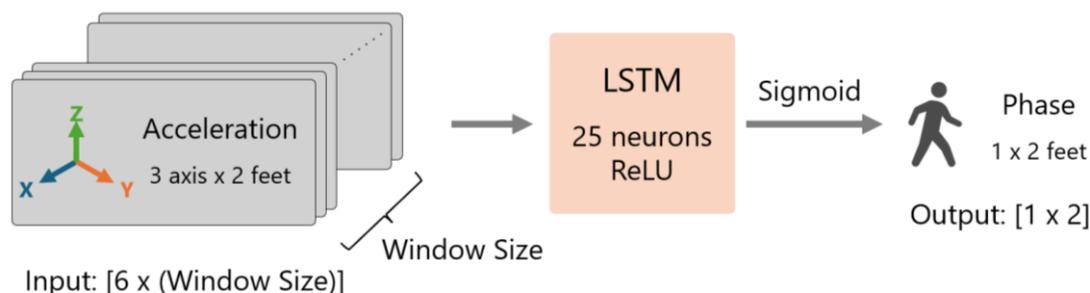


図 1. 予測モデル

Keywords: 歩行フェーズ, 予測, 歩行障害, 深層学習, Long short-term memory

References:

[1] Y. Totoki, T. Hasegawa, S. Shirafuji, J. Ota and A. Yozu, "Long short-term memory-based Gait Phase Prediction Using Heel Acceleration in People with Gait Disorders," 2024 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Orlando, FL, USA, 2024, pp. 1-4

ヒト姿勢制御メカニズムのモデリング

効果的なリハビリテーションを行うためには、ヒトの姿勢制御メカニズムを深く理解することが不可欠である。これを実現するための有力なアプローチの一つが、身体モデルに対して制御モデルを適用し、その挙動をシミュレーションによって解析する手法である。我々は、多数の筋と関節を有する筋骨格モデルと、そのシミュレーションを活用することで、ヒト姿勢制御メカニズムの解明を目指している。

ステッピング動作（その場足踏み）は、患者の運動機能を評価するための重要な指標として広く用いられている。これまで、立位や歩行に関する制御モデルは複数提案されてきたが、ステッピングを実現する制御モデルは存在していなかった。そこで我々は、既存の歩行制御モデル、特に筋反射に基づくモデルを参考にしながら、ステッピング動作を生成可能な新たな制御モデルを構築した。その結果、筋骨格モデルにその場でのステッピング動作を再現させることに成功した。さらに、筋力の低下や筋緊張の増加といった条件を与えることで、動作が小さくなる、動作速度が低下する等、臨床で観察されるような変化も再現可能であることを確認した。

そのほか、立位や歩行、そしてそれらをつなぐ歩き出し動作に関する筋骨格シミュレーションも実施してきた。特に、パーキンソン病患者でしばしば観察される筋緊張の異常を考慮した制御モデルの構築にも取り組んでおり、今後のリハビリ支援技術や臨床応用への展開を目指す。



図1. ステッピングを行う筋骨格モデル。

Keywords: 姿勢制御, 筋骨格モデル, ステッピング

References

- [1] Hou, X., Kaminishi, K., Hasegawa, T., Chiba, R., Takakusaki, K., & Ota, J. (2024, November). Analysis of Stepping in Place Task in Parkinson's Disease Using a Predictive Simulation Model. In *International Conference on NeuroRehabilitation* (pp. 193-197). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [2] Omura, Y., Kaminishi, K., Chiba, R., Takakusaki, K., & Ota, J. (2022). A neural controller model considering the vestibulospinal tract in human postural control. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 16, 785099.

パーキンソン病患者の歩容を表現する制御パラメータと臨床尺度との関係

パーキンソン病は、神経変性疾患の一つであり、患者はしばしば歩行障害を呈する。こうした歩行障害が、現場で用いられる各種の臨床評価尺度とどのように関係しているかを明らかにすることは、リハビリテーションの方針決定において重要な示唆を与える。

我々は、筋骨格シミュレーションを活用してこの問題に取り組んだ。具体的には、患者の歩行データに対して、筋骨格モデルおよび神経制御モデルをフィッティングした。そして、その過程で得られた制御パラメータと、同時に記録された臨床尺度との関係を解析した。その結果、各臨床尺度に対して相関を示す制御パラメータの組が存在することが確認された。これは、臨床的に評価される多様な運動障害が、それぞれ異なる制御パラメータによって特徴づけられる可能性を示唆している。さらに我々は、これらの関係性を線形モデルにより定式化し、臨床尺度の情報から個人の歩容を再現するための制御パラメータを推定し、それをを用いた筋骨格シミュレーションの実行にも成功している。

将来的には、臨床尺度のみに基づいて、どのような歩行障害が現れているか、あるいは将来的に生じるかを推定・予測することが可能になると考えられる。逆に、歩行パターンのみから運動障害の程度を推定するような応用も期待される。

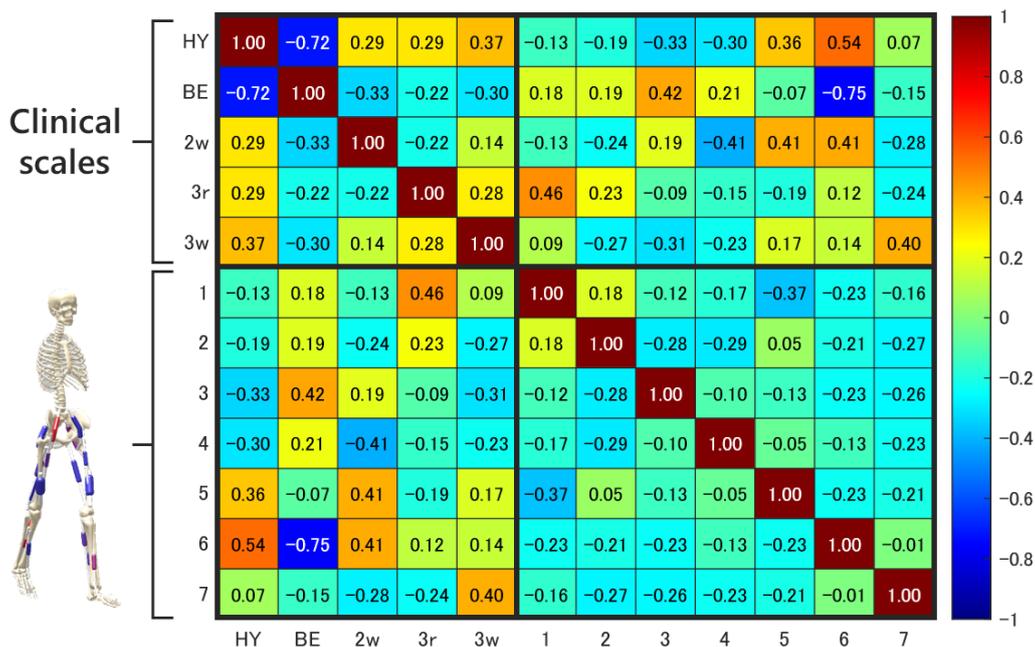


図1. 臨床尺度と次元削減された制御パラメータの相関。

Keywords: 姿勢制御, パーキンソン病, 歩行, 筋骨格モデル

References

- [1] Kaminishi, K., Chiba, R., Takakusaki, K., & Ota, J. (2024, November). Towards Data Augmentation for Parkinson's Disease Gait Data Using Neuromusculoskeletal Simulations. In *International Conference on NeuroRehabilitation* (pp. 208-212). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [2] 上西康平, 千葉龍介, 高草木薫, & 太田順. (2024, August). パーキンソン病患者の歩行を記述する神経筋骨格モデル変数と臨床尺度の関係. In *第18回Motor Control 研究会*.

姿勢フィードバックトレーニングの機序の解明

疾患や加齢に伴うバランス能力の低下を補う手段として、人間の姿勢に関する情報を何らかの形でフィードバックする姿勢フィードバックトレーニングが提案されている。これまでに、その有効性を示す報告はあるものの、その効果がどのような機序によって生じているのかについては、十分に明らかにされていない。我々は、この機序の解明を目的として研究を進めている。

足底の圧力中心（Center of Pressure, CoP）に関する情報をリアルタイムでフィードバックするトレーニングを一定期間継続して実施した。また、その前後で、開眼および閉眼状態での静止立位保持課題を実施し、感覚情報の使用の軽重の変化を評価した。これは、姿勢フィードバックトレーニングによって、視覚・体性感覚・前庭感覚等の感覚情報の統合の仕方が変化し、それがバランス能力の向上に寄与している可能性を検証するものである。その結果、日内における身体動揺の変化と、感覚情報の使い方の変化との間に関連があることが示された。さらに、トレーニングを行った群と行わなかった群との間で、この関係性に差がある可能性も示唆された。これらの結果は、感覚情報の適応的な利用の重要性を示すとともに、バランス能力の向上には複数の戦略が存在し得ることを示唆している。

そのほか我々は、姿勢フィードバックトレーニングがメンタルヘルスの維持・改善にも寄与する可能性について検討を進めている。また、より簡便にトレーニングを実施できるよう、スマートフォン単体で姿勢フィードバックを提供する手法の開発にも取り組んでいる。

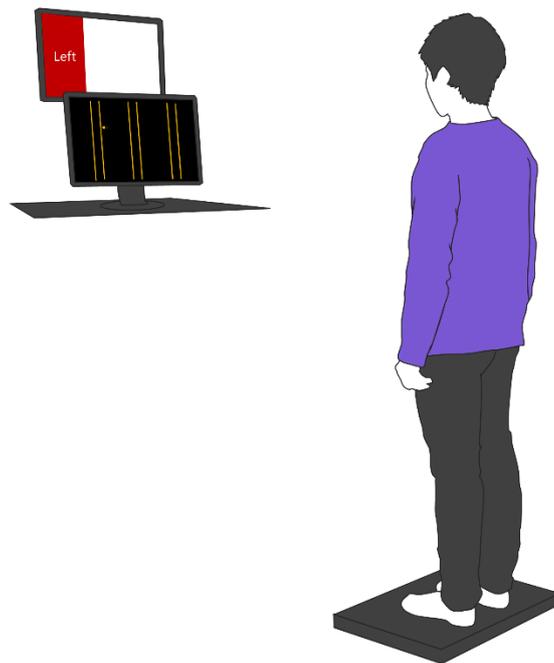


図1. フォースプレートで計測したCoP情報を返す姿勢フィードバックトレーニングの例。

Keywords: 姿勢制御, 重心動揺

References

- [1] Kaminishi, K., Debun, K., Okimura, T., Terasawa, Y., Maeda, T., & Ota, J. (2024, July). Biofeedback Training for Balance Ability Improvement: An Analysis of Short-term Effects and Sensory Information Utilization. In *2024 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [2] 橋本純, 上西康平, 長谷川哲也, 千葉龍介, & 太田順. (2025, March). 姿勢フィードバックトレーニングがメンタルヘルスおよび身体所有感に及ぼす影響. In *精密工学会学術講演会講演論文集 2025 年度精密工学会春季大会* (pp. 436-437). 公益社団法人 精密工学会.