

2024 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

助教 王 鈺晟

研究員 上西 康平, 高御堂 良太, 長谷川 哲也

博士課程学生 曾 帆, 田中 茂樹, 盧 佳希, 張 篠天, 陳 建強, 星野 恵

修士課程学生 Johann Darboven, 侯 希禹, 岡崎 翔, 神谷 佳汰, 早川 健太,

石川 茂一, 西澤 律輝, 川脇 颯太, 藤生 拓真, 十時 優太,

Gong Jingze, 宋 始顯

学部4年生 赤坂 北斗, 木原 将雄, 橋本 純

特別聴講学生 Jessica Ye

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
- ロボットのジョイントオフセット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
- 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

人が／人を支援するロボティクス、生産システム

- 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
- 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
- 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
- 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
- XAI と Virtual Reality システムを用いた巡回点検作業の熟練技能抽出
- 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
- 過去の FMEA の汎化による生産システムにおける故障原因の特定を支援するフレームワーク

人の解析と身体性システム科学

- パーキンソン病患者の立位姿勢制御のモデリング
- スマートフォンセンサを用いた足の圧力中心情報の推定

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。そのため、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。これまでに提案されてきた MAPF 問題における動作計画法として、そ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た。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。

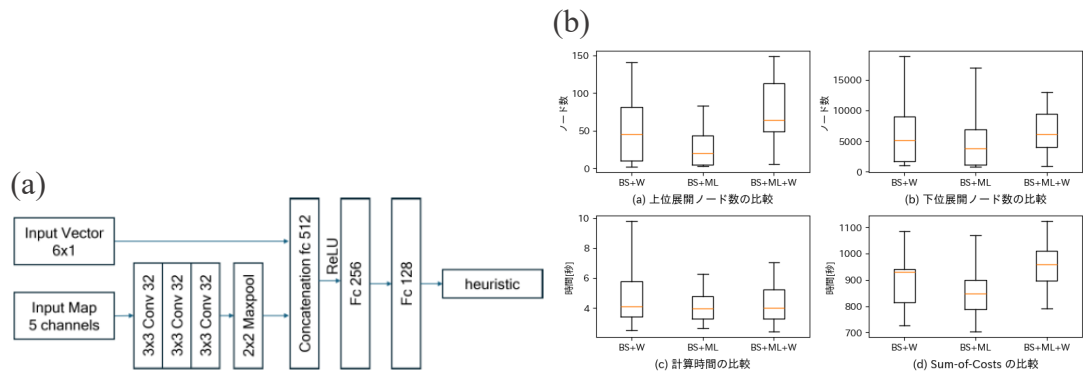


Fig. 1 (a) 提案モデル, (b) シミュレーション結果 (BS: ビームサーチ, ML: 機械学習, W: 重み付き A*探索)

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

References

- [1] Guni Sharon, Roni Stern, Ariel Felner, and Nathan R. Sturtevant.: "Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding," *Artificial Intelligence*, vol.219, pp.40-66, 2015.
- [2] Tomoaki Shimizu, Kosuke Taneda, Ayumu Goto, Tomoya Hattori, Toyokazu Kobayashi, Ryota Takamido, and Jun Ota.: "Offline Task Assignment and Motion Planning Algorithm Considering Agent's Dynamics," 2023 9th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), pp. 239-243, 2023.

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。

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)

		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, 0.9999)	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.

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、このような対象を扱った従来研究では、周辺環境の情報が与えられた状況下で如何にして動作効率を最適化するかといった点が重視されており、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る。そこで本研究では、生産ラインにおける産業用ロボットの代表的な作業である、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の開発を行なった。

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[1]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:[2], 動作計画:[3])。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それらを効果的に利用することで、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。

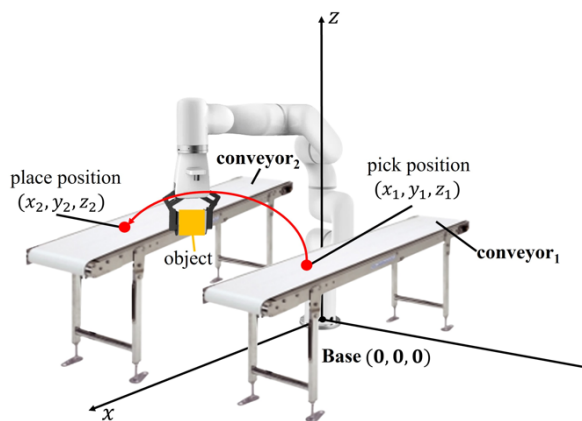


図 1. ピックアンドプレースシステムの例.

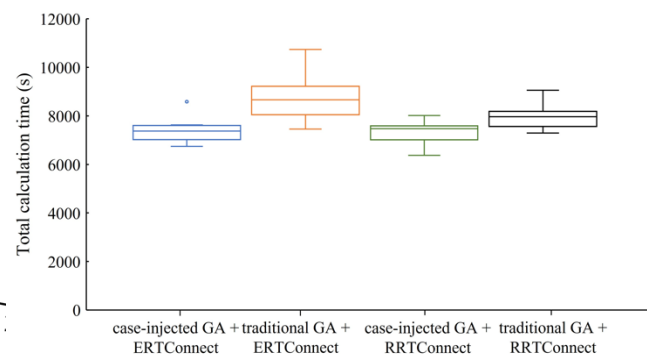


図 2. シミュレーション実験の結果

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

References

- [1] 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
- [2] 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.
- [3] Pairet, 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.

ロボットのジョイントオフセット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

精密機械の組み立てや溶接など、産業用ロボットは人が手作業では行うことが困難な、非常に繊細で高精度な動作を求められる作業を自動的に実行することができる。そのため、製造誤差やセットアップエラー等の様々な要因によって影響を受けて低下する、このようなロボットの動作精度を向上させるためのキャリブレーションは様々な産業分野において重要な側面を担っている。従来現場で行われてきたキャリブレーション手法には、主に二種類の方法がある。そのうちの一つはオンラインティーチングと呼ばれる手法であり、生産ラインを止めた状態でティーチングペンダント（コントローラ）等を用いて直接ロボットのキャリブレーションを行う。この手法は高精度なキャリブレーションが可能であるが、時間や人的資源を多く消費することになる。他方で、ソフトウェアやシミュレーション環境上でキャリブレーションを行う、後者のオフラインキャリブレーションはこれらのコストを削減できるという利点があり、その中でも特にハンドアイカメラを用いたキャリブレーションは、レーザートラッカー等の高価な装置を必要とせず、非常に低コストで実現できる手法であることが知られている。しかしながら、このような簡易的な方法を用いた手法では、計測精度が低下するという問題があった。

そこで本研究では、オフラインティーチングにおける、ハンドアイカメラを用いた新しいロボットキャリブレーション手法を提案した。キャリブレーションの対象となる指標には様々なものがあるが、本研究では、その中でも特に動作精度への影響が大きく、計測誤差の90%の要因を占めることもあるとされる、ジョイントオフセットのキャリブレーションを対象とした。具体的には、本研究では、ハンドアイカメラを用いてキャリブレーションを行う際に使用する、計測ポーズの新たな最適化手法を提案した。すなわち、これまで従来研究[1]によって提案されていた、可観測指標 (observability index) $O1$ を本研究では改善を加え、 $Ov1$ という新たな計測指標を提案し、それを基にキャリブレーション時の計測ポーズの最適化を実施した。図1, 2には従来手法と本研究の手法によって最適化された計測ポーズの比較を示している。それぞれの図に示すように、提案手法によって最適化された計測ポーズは、従来手法のそれと大きく異なっている。今後は提案手法の厳密な評価を行なった上で、実用化に向けた更なる改善を行なっていく予定である。

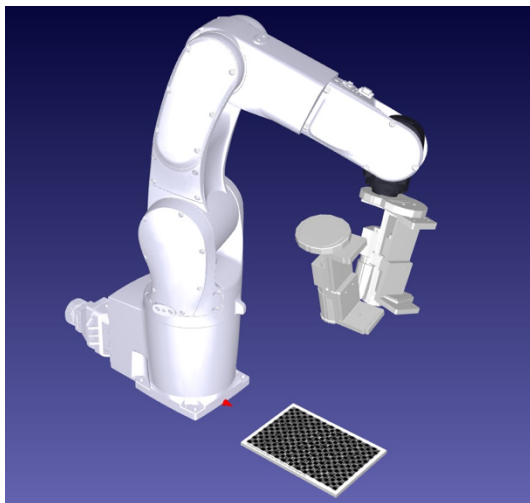


図 1. 従来手法によって最適化された計測ポーズの例.

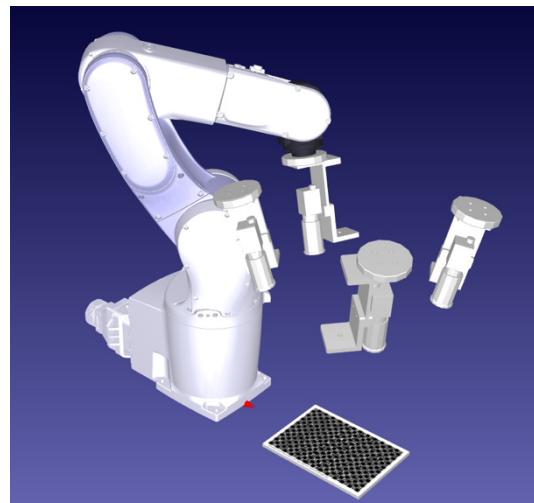


図 2. 提案手法によって最適化された計測ポーズの例.

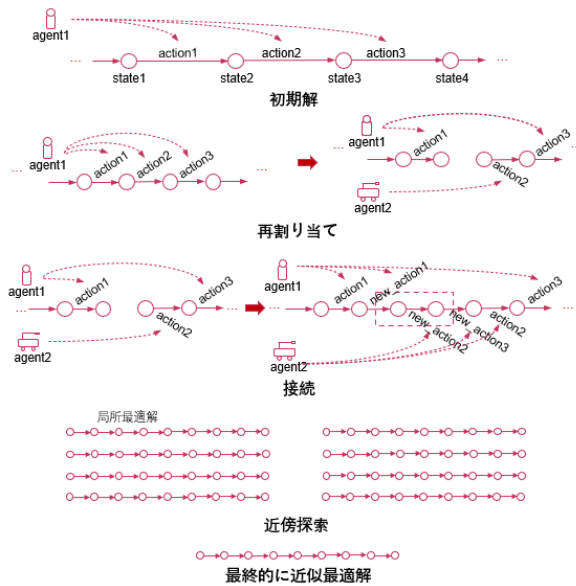
Keywords: キャリブレーション, 計測ポーズ最適化, ハンドアイカメラ

References

- [1] Jin-Hwan Borm and Chia-Hsiang Meng. Determination of optimal measurement configurations for robot calibration based on observability measure. *The International Journal of Robotics Research*, 10(1):51–63, 1991.

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で、エージェントのグループを使用して目標を達成できる解決策を得ることを目指します。これは、ロボティクス、交通、物流、製造など様々な分野で共通の基本問題です。ドメイン記述に関しては、世界を真または偽のステートメントである述語を使用して記述できる STRIPS スタイルの言語[1]がよく利用されます。この言語は、より多くの状態とアクションを追加することで、高度に複雑な問題を解決するためのスケールリングを容易にしますが、述語の数に応じて解を見つけるための探索空間は指数関数的に増大します。Bylander[2]は、そのような計画問題が PSPACE 完全であり、NP 完全問題と比較して解くのがより困難であると報告しています。我々は、現実的な時間枠内で大規模な STRIPS スタイルの問題をプランニングドメイン定義言語 (PDDL) [3]で記述された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な方法を提案します。既存のプランナー[4, 5]は少数のエージェントのみを含む問題を迅速に解決できますが、大規模な問題を効率的に対処することは依然として課題です。我々の方法は、最小数のエージェントを使用して与えられた問題の目標を最初に達成し、その後、アクションを他のエージェントに再割り当てして部分的に再配置することで解決策を反復的に洗練することでこの問題を解決します。局所的な洗練プロセス中に、再配置と再割り当ては隣接するアクション間の元の論理的な接続を崩す可能性があります。提案された方法は最適な接続をプラングラフを使用して探索することでそれらを再接続します。隣接するアクションの接続を使用して新しい解決策を得るための時間複雑性は、解決策の長さに比例しており、複雑性を多項式レベルに削減します。最適解を実現する追求は、最適性を実現するためのスケラブルで迅速なアルゴリズムの開発が現実的ではないため、放棄されます。洗練プロセスは、再割り当てされた解決策と再配置された解決策を近隣として扱う近傍探索アプローチを採用します。さらに、タブー探索を使用して局所最適解から反復的に脱出し、最終的に近似最適解を得るために用いられます。



- [1] R. E. Fikes and N. J. Nilsson, "STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving," *Artif. Intell.*, vol. 2, no. 3/4, pp. 189–208, 1971.
- [2] T. Bylander, "The computational complexity of propositional strips planning," *Artif. Intell.*, vol. 69, no. 1/2, pp. 165–204, 1994.
- [3] M. Fox and D. Long, "PDDL21: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains," *J. Artif. Intell. Res.*, vol. 20, pp. 61–124, 2003.
- [4] D. Shi, Y. Tong, Z. Zhou, K. Xu, W. Tan, and H. Li, "Adaptive task planning for large-scale robotized warehouses," in *Proc. IEEE 38th Int. Conf. Data Eng.*, 2022, pp. 3327–3339.
- [5] Z. Liu, H. Wei, H. Wang, H. Li, and H. Wang, "Integrated task allocation and path coordination for large-scale robot networks with uncertainties," *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 2750–2761, Oct. 2021.

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%程度的大幅な計算時間の短縮と成功率の向上を達成した[1]。

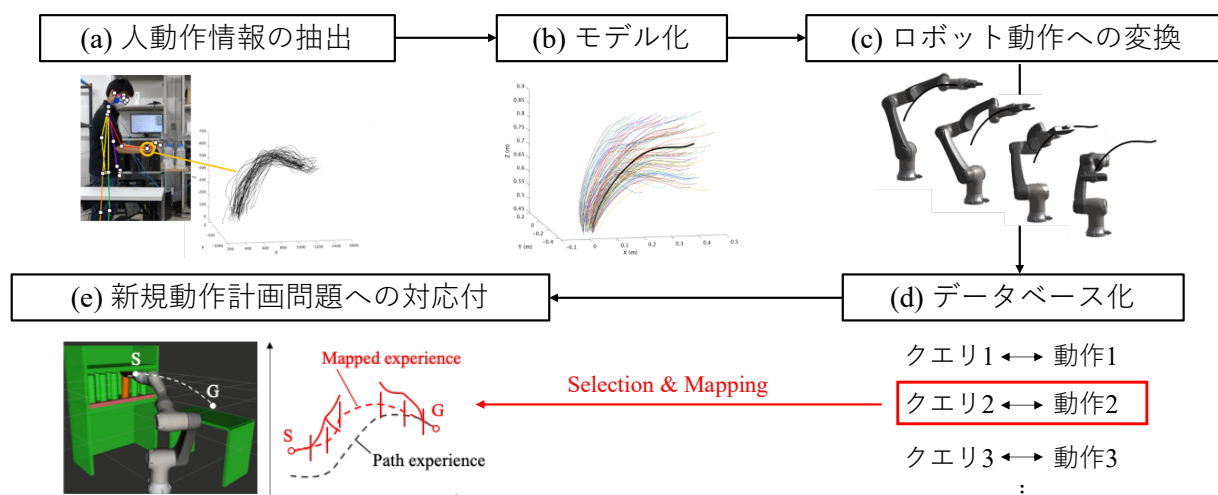


図1. 提案手法の全体像。(a) 人動作の撮影と骨格情報の抽出、(b) ロボット動作への変換、(c) ロボット動作計画問題への適用と解決困難な動作計画問題の容易化[1]。

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

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、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、実験室内で擬似的に作業環境を再現し、その中でピックアンドプレース動作 (搬送作業) を様子撮影し、実験的な検証を行なった。図2は検証実験の結果を示している。図2に示すように、作業者が棚から対象物 (ペットボトル) をピックアップしてテーブルの上に置く繰り返し作業を、各時点で記述を行うことができ、正解データに対する正答率としては、90%以上を示した。今後は今回対象とした実験室環境下での作業よりもより複雑な、実環境下での作業映像などを対象として、提案アルゴリズムの適用とその結果に基づく改善を行なっていくことを予定している。

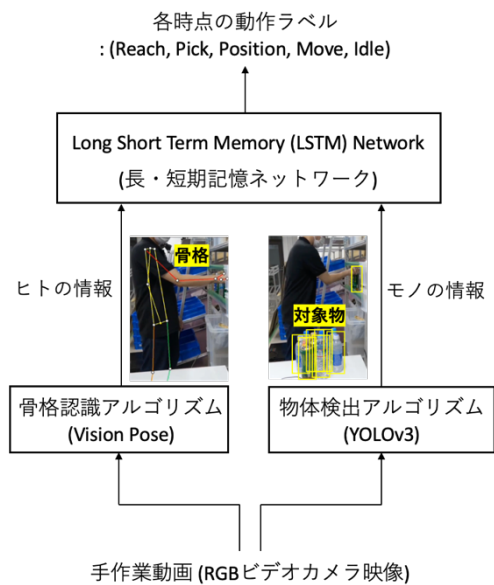


図1. 提案システムの全体像。

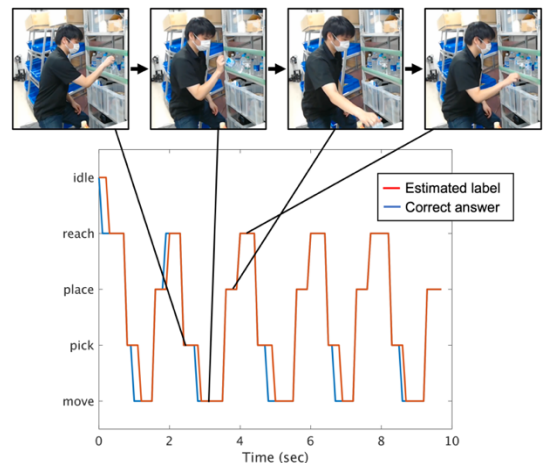


図2. 作業工程の推定結果。

Keywords: 動作認識, 物体認識, 機械学習, LSTM, 骨格抽出

References

- [1] Barnes, R. M. (1991). Motion and time study: design and measurement of work. John Wiley & Sons.
- [2] 高御堂 良太, 太田 順. (2022). 人手作業データを活用した新規ロボットシステム設計手法の提案. 第40回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2022AC3F1-05, (pp. 1-4), 東京, 2022年9月5日~9日.
- [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.

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。

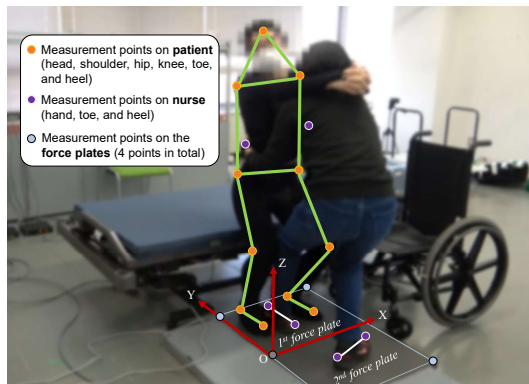


図1. 車椅子移乗動作の実測とモデル化。

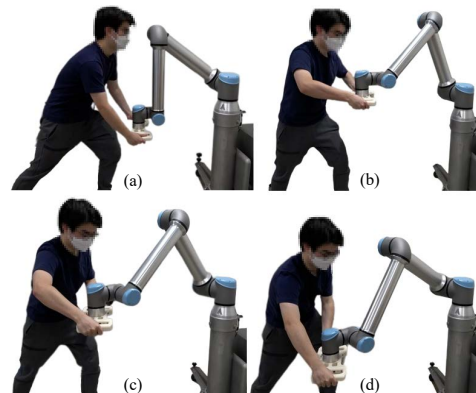


図2. 開発したロボットシステムに対して実行した車椅子移乗動作の例。

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).

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

近年、工場現場におけるピ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ピ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。まず、人間がワイヤ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ハーネスの掴み取り姿勢を利用して、現在のワイヤ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ハーネスで把持動作を行うことや、箱内に入れるワイヤハーネスの数を増やすこと、および箱の隅に近いワイヤハーネスの把持を試みる。

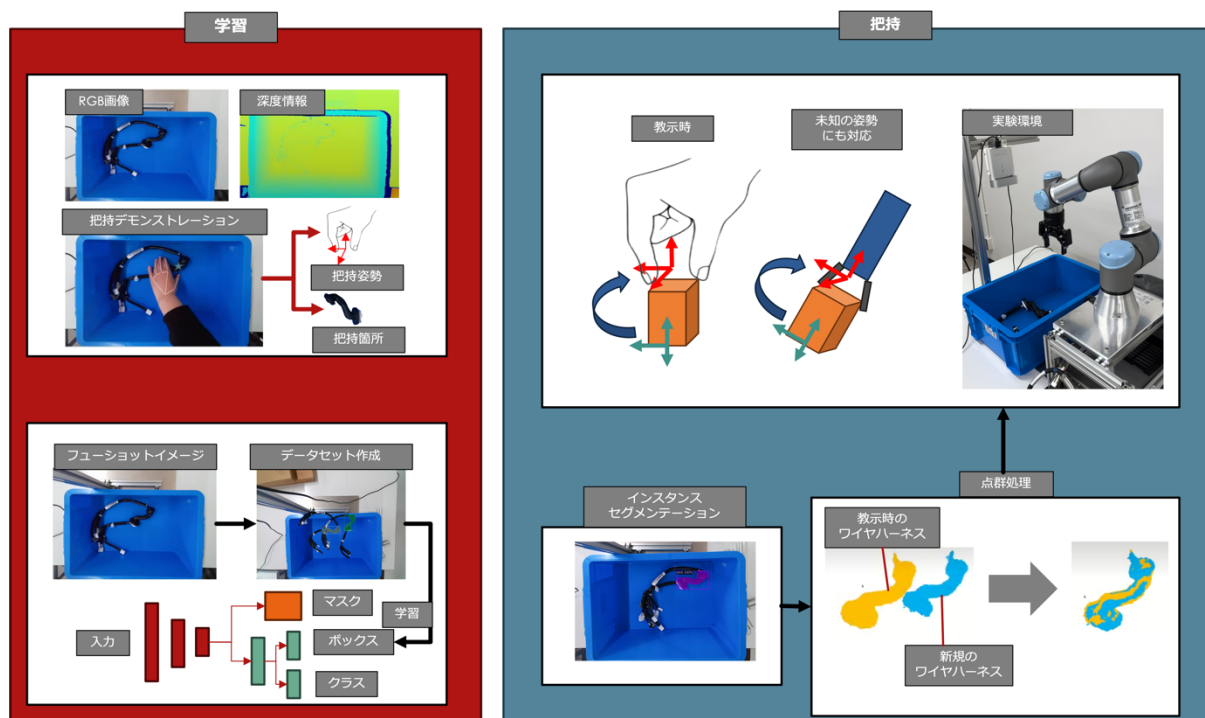


Fig 1. 概要

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

XAI と Virtual Reality システムを用いた巡回点検作業の熟練技能抽出

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、従来研究で用いた手法の問題点として、具体的に、「いつ」「どこで」上記のような熟練技能が発揮されたかという、時間的・空間的な局所性に関する情報が失われるという問題点があった。

そこで、このような問題点を解決するために、本研究では Explainable-AI(XAI)を用いた解析手法を新たに導入した[2]。XAI は分類タスク等における出力結果の解釈可能性を高めることを重視した手法であり、医療等の判断の整合性のみでなく、その根拠の明示化が求められる分野において、近年多くの応用がなされている。そのため、本研究ではこの XAI を用いて熟練者と見熟練者の判別を行なった際の根拠を時間的、空間的に範囲を制限した形式（例えば、この機器のここを見ているときのデータ等の形）で提示する枠組みを構築し、従来手法の問題点を克服した。Explainable-AI(XAI)の手法には様々なものがあるが、本研究では特に、Class Activation Map(CAM)を用いた可視化を行なった。

図1には、頭部の位置データを対象として、XAI が熟練者と予測した際の根拠を CAM により可視化した例を示す。グラフ内の色が赤色に近いほど、熟練者と判断・予測する際に大きな貢献をしたことを示している。結果としては、この図に示すように、初心者は特定の対象を点検する際に、熟練者より頭部が上部に位置していること等、XAI を通して従来手法では同定が困難であった、局所的な熟練技能の抽出を行うことができた。今後は本研究の結果を基にして、とラーニングシステムの開発等を行なっていく予定である。

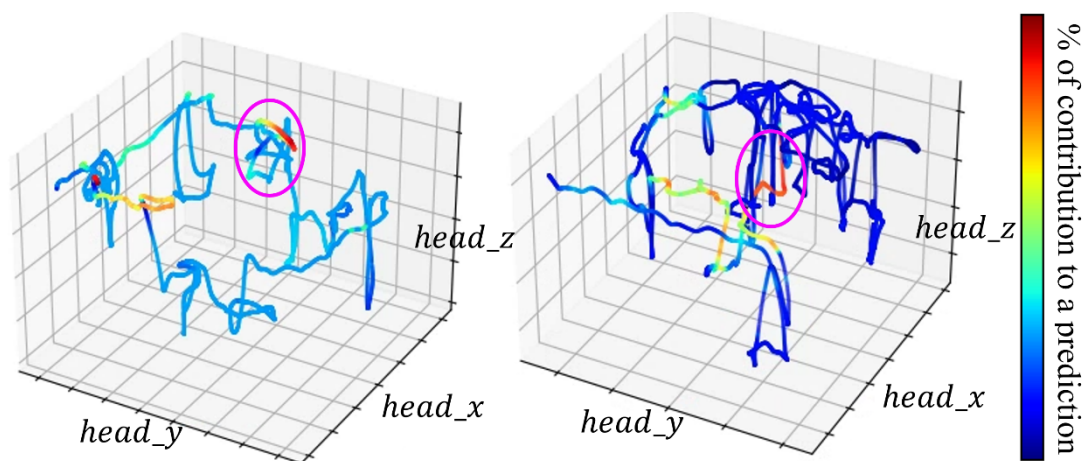


図1. CAMによる熟練度判別時の根拠の可視化。左が未熟練者、右が熟練者。

Keywords: 熟練技能, VR, 機械学習, XAI, CAM

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] Takeuchi, H., Takamido, R., Kanda, S., Umeda, Y., Asama, H., Kasahara, S., ... & Ota, J. (2023). Virtual Reality System using Explainable AI for Identification of Specific Expert Refinery Inspection Skills. In *2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (pp. 1214-1219). IEEE.

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 による推論結果は、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、保全の際に熟練者が 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、実際の保全活動の記録である保全記録の利用の必要性が示唆された[1]。保全記録は、FMEA よりも詳細な情報を含む一方で、記述の量や形式が統一されていないという特徴がある。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。

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熟練者の知識をもとにしたオントロジーを提案し、保全記録を FMEA と併用することによって生産システムの故障原因の推論精度を向上させる。

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する。故障間の因果関係、故障・機能間の関係を記述した上で、FMEA と保全記録の各記述を「FMEA+保全記録オントロジー」のインスタンスとして表現する。また、生産システム内の概念を表現するドメインオントロジー内に、特に故障に関する熟練者の知識を表現する「故障オントロジー」を構築する。達成すべき条件を表す Condition クラス、故障とそれが損なった条件を関係付ける fail_Condition、故障とその発生工程を関係付ける happen_in_Action によって故障を表現する。

提案手法の効果検証のために、提案手法を用いて FMEA と保全記録を利用した推論と、先行研究[1]と同様に FMEA のみによる推論を比較した。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と比較し、正解率と網羅率の2指標で評価した。結果として、提案手法を用いて FMEA に保全記録を加えた推論は正解率が 0.79、網羅率が 0.47 となり、それぞれ FMEA のみの推論の 7.5 倍、4.5 倍であった。このことから、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と考えられる。一方で、出力の中には「ストップ読取不能」のような生産システム上では有り得ない単語の組み合わせが複数存在した。これはドメインオントロジーの不十分が原因と考えられ、今後はさらなる充実が必要である。

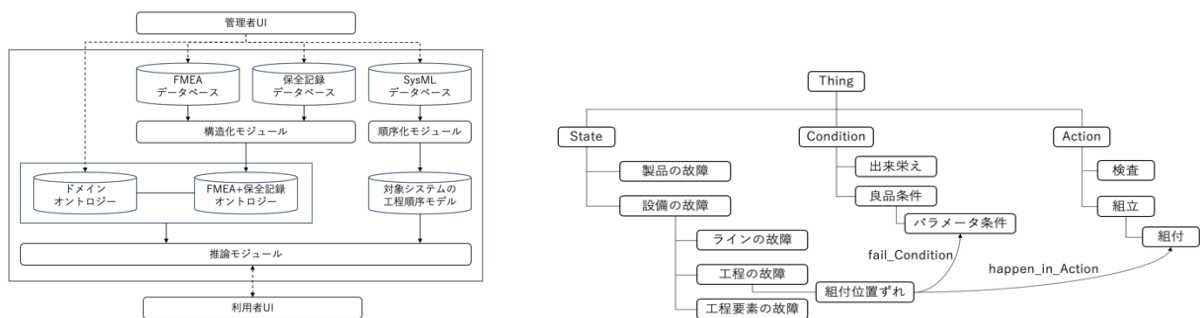


図1 左: 提案フレームワークの全体像, 右: 故障オントロジー

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] Sho Okazaki, Shouhei Shirafuji, Toshinori Yasui, and Jun 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), pp.858-865, 2023

過去の FMEA の汎化による生産システムにおける故障原因の特定を支援するフレームワーク

生産システムの検査と保全には、システムの構造や発生する可能性のある故障に精通した熟練者が必要である。日本の製造業では、熟練者の不足により、将来的に故障原因の特定や保全活動が困難になることが懸念される。そういった技術の不足を補うための実用的なアプローチとして、過去に専門家が実施した故障解析を参照して、故障原因を特定し修理を行うことが有効である。

本研究では、様々な生産システムに対して過去に実施された FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) を基に、生産システムのドメインオントロジーを使用して、故障原因を推論するためのフレームワークを提案する。フレームワークは、工程の順序を表すモデルを SysML ダイアグラムから生成して、対象の生産システムの工程を満たす可能性のある故障原因を絞り込み、汎化された過去の FMEA 記述を推論する。提案されたフレームワークによる推論結果と、熟練者による 3 つの典型的な製造システムの故障に関する推論結果の比較と、その推論結果の妥当性についてのインタビューにより、73%以上の出力が妥当な故障原因となることが示された。

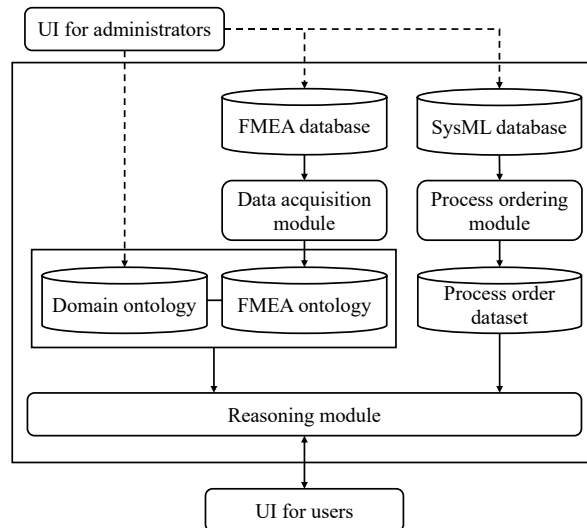


図 1. 提案フレームワークの概要.

Keywords: 故障原因特定, FMEA, オントロジー

References

- [1] 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.

パーキンソン病患者の立位姿勢制御のモデリング

パーキンソン病 (PD) は、神経変性疾患の一つであり、患者は姿勢制御障害の他に、特有の立位姿勢である異常姿勢を示すことが知られている。この異常姿勢の一因として、筋緊張の増加が関係していることが示唆されているが、立位時の筋緊張を正確に測定することは容易ではなく、筋緊張と異常姿勢の関係はまだ詳細には解明されていない。異常姿勢は嚥下障害や背中の痛みを引き起こし、患者の生活の質 (QOL) に大きな影響を及ぼす。したがって、これら異常姿勢や姿勢制御障害の発生の機序を明らかにし、効果的な治療法を確立することは重要である。

我々は計算機モデルを使用して姿勢制御の順動力学シミュレーションを行い、PD 患者に見られる異常姿勢および姿勢制御障害のメカニズムを解明することを目指している。これまでの研究で、我々は多数の筋肉と関節の自由度を持つ筋骨格モデルを制御するための、神経系コントローラモデルを開発してきた。この神経系コントローラモデルは、立位姿勢の維持に重要な下行路の機能を考慮している。PD 患者から得られたデータに基づき、制御パラメータを調整することで、筋緊張と異常姿勢の関係を検討した。さらに、脳内の神経伝達物質であるドーパミンが立位姿勢制御にどのように関与しているかを、これらのモデルを通じて調査している。

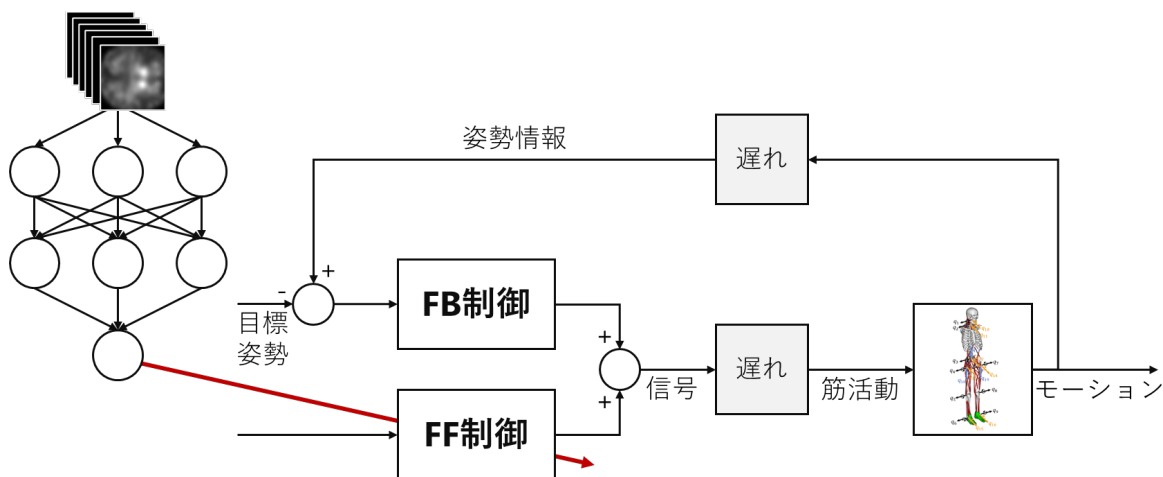


図 1. ドーパミンの働きを考慮した立位姿勢制御の神経系コントローラモデル。

Keywords: パーキンソン病, 異常姿勢, 筋緊張

References

- [1] Omura, Yuichiro, Togo, Hiroki, Kaminishi, Kohei, Hasegawa, Tetsuya, Chiba, Ryosuke, Yozu, Arito, Takakusaki, Kaoru, Abe, Mitsunari, Takahashi, Yuji, Hanakawa, Takashi, & Ota, Jun. (2023). Analysis of abnormal posture in patients with Parkinson's disease using a computational model considering muscle tones. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 17:1218707, 1-13.
- [2] Omura, Yuichiro, Kaminishi, Kohei, Chiba, Ryosuke, Takakusaki, Kaoru, & Ota, Jun. (2022). A neural controller model considering the vestibulospinal tract in human postural control. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 16:785099, 1-20.

スマートフォンセンサを用いた足の圧力中心情報の推定

姿勢制御トレーニングによる、運動機能回復の効果に関する報告が増加している。このようなトレーニングで最も一般に使われている情報の一つが、足の圧力中心 (CoP) である。多くの研究が、CoP 情報に基づく姿勢制御トレーニングの有効性を証明している。この CoP の測定には、しばしばフォースプレートが使われる。しかし、フォースプレートは一般には広く普及しておらず、また高価である。そこで、私たちはより手軽な姿勢制御トレーニングのため、日常的に使用されるスマートフォンのセンサのみを使用して、CoP 変位を推定することを目指している。

我々は1リンクと2リンクの倒立振り子モデルを使用し、スマートフォンでの CoP 推定値とフォースプレートによる実測値を比較した。その結果、これらのモデルにより CoP の変位を推定でき、特に2リンク倒立振り子モデルが優れた性能を示すことを確認した。将来的には、このような姿勢制御トレーニングを実際に行えるようなスマートフォンアプリの開発と、その効果の検証を予定している。

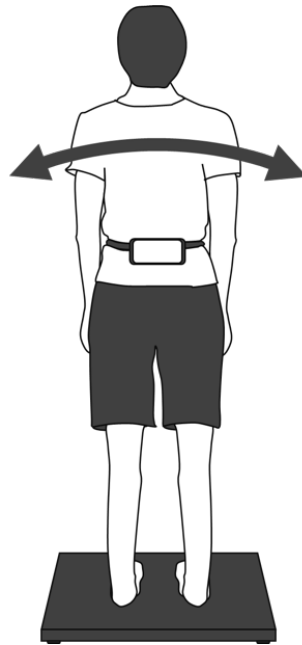


図 1. スマートフォンを腰に装着しての立位時の CoP 推定.

Keywords: 姿勢制御, スマートフォン, 重心動揺

References

- [1] Huang,Rui, Kaminishi,Kohei, Hasegawa,Tetsuya, Yozu,Arito, Chiba,Ryosuke, & Ota,Jun. (2023). Estimation of center of pressure information by smartphone sensors for postural control training. Proc. 2023 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Sydney, Australia, July 24-27, 2023.