

2023 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
研究員	上西 康平, 高御堂 良太
博士課程学生	曾 帆, 尾村 優一郎, 田中 茂樹, 盧 佳希
修士課程学生	黄 芮, 周 于皓, 張 篠天, 竹内 寛樹, Johann Darboven, 岡崎 翔, 神谷 佳汰, 早川 健太, 侯 希禹
学部4年生	安部 瑞希, 川脇 颯太, 藤生 拓真
秘書	中村 綾子
客員研究員	白藤 翔平

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、最適工学、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「ロボットシステム設計」、「大規模生産／搬送システム設計と支援」、「人の解析と人へのサービス、超適応の科学」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

ロボットシステム設計

- － 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
- － 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
- － 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

生産・搬送システムやプラントの設計・管理の支援

- － AGV の動特性を考慮したタスク割付/動作計画アルゴリズムの提案
- － 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
- － 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

人の解析と人へのサービス、超適応の科学

- － 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
- － 機械学習を用いた DAT-SPECT と運動症状の関係の解析
- － ヒト歩行および歩行開始動作のモデリング
- － 脳卒中患者の立位姿勢制御メカニズムの経時変化の評価
- － パーキンソン病患者の立位姿勢制御のモデリング

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前には、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セティックティーチング[1]や、コントローラ等の遠隔操作で間接的に教示を行う[2]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練者にも扱いやすく、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(c)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、動作テンプレートを生成する(図1(b))。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(c)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、最大で20%程度の成功率の改善、及び70%程度の計算時間の短縮を達成した。今後は実環境下における実機実験等を通して、提案手法の有効性をより厳密に検証していく予定である。

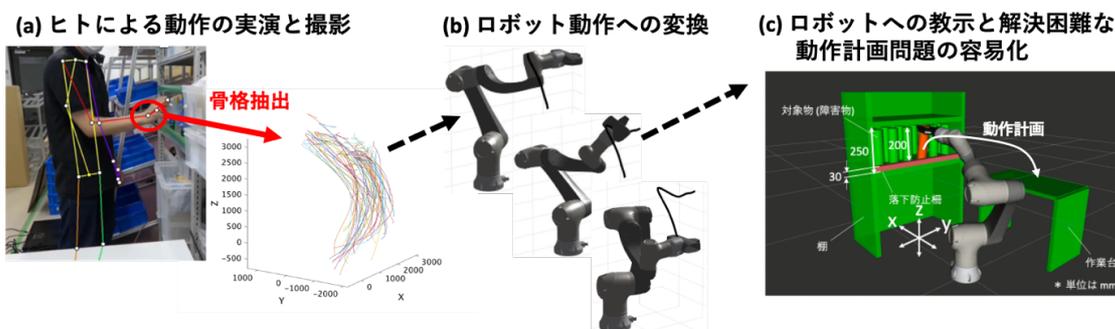


図1. 提案手法の全体像. (a) 人動作の撮影と骨格情報の抽出, (b) ロボット動作への変換, (c) ロボット動作計画問題への適用と解決困難な動作計画問題の容易化.

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

References

- [1] Simonič, M., Petrič, T., Ude, A., & Nemeč, B. (2021). Analysis of methods for incremental policy refinement by kinesthetic guidance. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 102(1), 5.
- [2] Havoutis, I., & Calinon, S. (2019). Learning from demonstration for semi-autonomous teleoperation. *Autonomous Robots*, 43, 713-726.
- [3] 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.
- [4] 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の中の「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) を様子を撮影し、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。

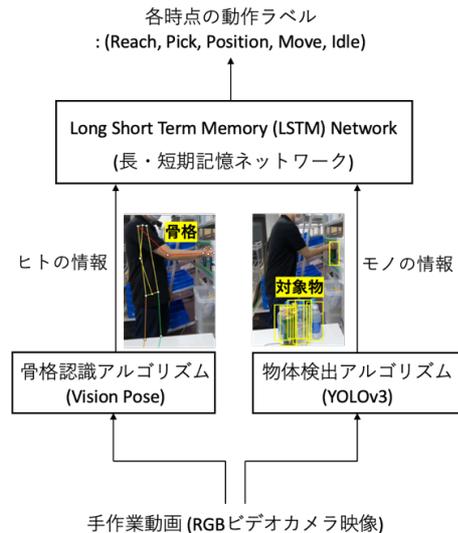


図1. 提案システムの全体像。

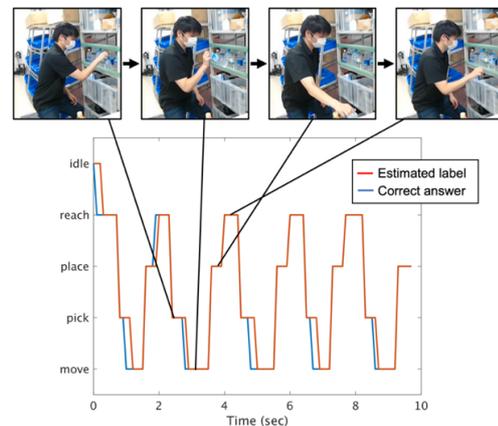


図2. 作業工程の推定結果。

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). 人工作业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.

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。そのうちのひと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。

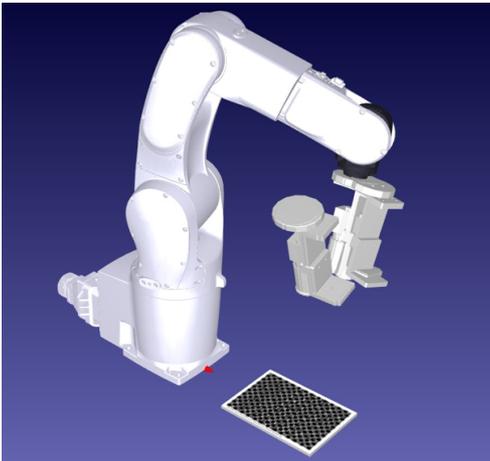


図 1. 従来手法によって最適化された計測ポーズの例.

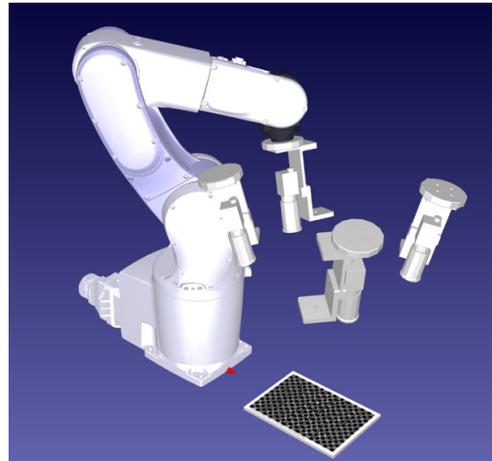


図 2. 提案手法によって最適化された計測ポーズの例.

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.

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、ピックアンドプレイス課題(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。

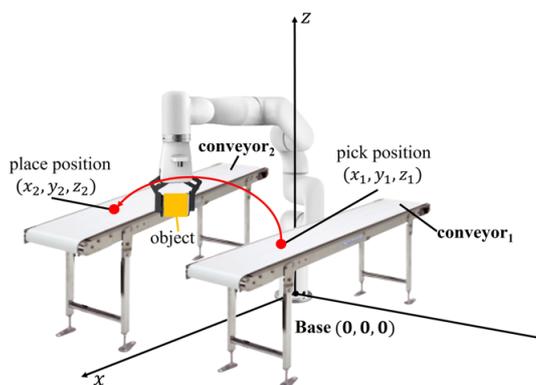


図1. ピックアンドプレイスシステムの例.

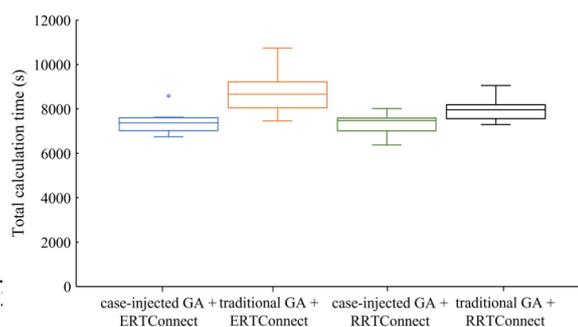


図2. シミュレーション実験の結果

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, Constantinou 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.

AGV の動特性を考慮したタスク割付/動作計画アルゴリズムの提案

物流倉庫の自動化や製造ラインのフレキシブル化の進展を背景に、無人搬送車(Automated Guided Vehicle: AGV)の需要が高まっている。複数台のAGVから構成されるシステムを運用するにあたっては、1. それぞれのAGVがどこで荷物を受け取り、どこへ搬送するかというタスク割付けの問題、及び2. 他のAGVとの衝突を避けながら、可能な限りタスクを早く完了するための動作計画という、2つの問題を解決する必要がある。この際、AGVは一定の加減速パターンに基づいて発着を繰り返しているため、上記の2点の問題において最適解を求めるためには、このようなAGVの動特性を考慮することが重要である。しかしながら、従来研究においては、これまでAGVの動特性を反映しつつ、タスク割付と動作計画を行うアルゴリズムは提案されていない。

そのため、上記のような従来研究の問題点を解決するために、本研究では、AGVの動特性を考慮しつつ、動作計画や搬送等の課題の遂行に要する時間を最小化するような、タスク割付と動作計画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、タスク割付け問題と動作計画の問題の代表的な解法アルゴリズムである Conflict-Based Search with optimal Task Assignment (CBS-TA) [1]をベースとして、AGVの動特性を考慮した課題遂行時間の最小化を行うアルゴリズムを開発した [2]。提案アルゴリズムでは、CBS-TAのフレームワークに基づき複数の探索木を用いて動作計画とタスク割付けを行うにあたって、図1のような図1のようなAGVの動特性(速度曲線)を仮定し、AGVの動特性を反映したヒューリスティック関数を導入した。またさらに、物資のピックアップのための動作計画、運搬のための動作計画を連続して行うことにより、タスクの割付けから物資の運搬完了まで、一貫した最適化を行うことを可能にした。

提案手法を計算機上に実装したのちには、有効性を検証するためのシミュレーション実験を行った。実験においては、ランダムに生成された環境下において、AGVの台数を変化させつつ、タスク割付と動作計画の複合問題を解き、動作計画やAGVの移動に掛かる時間等の観点から従来手法と比較を行うことで、提案手法の有効性を検証した。結果としては、図2のように、従来手法と比較して、短時間内で複数台AGVのタスク割付けと動作計画が可能であることが実装された。今後はAGVの台数を増加させる、より複雑な環境を設定する等をしつつ提案手法のさらなる改善を行っていく予定である。

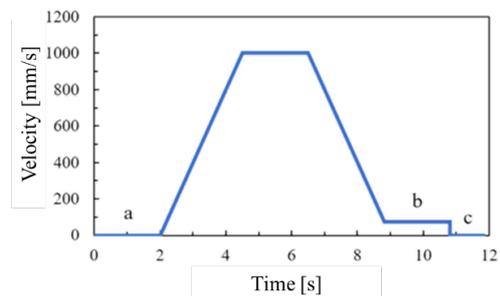


図1. 仮定したAGVの動特性(速度曲線)。この図からも、AGVの速度が最大、最小に加減速するためには、一定時間を要することが分かる。

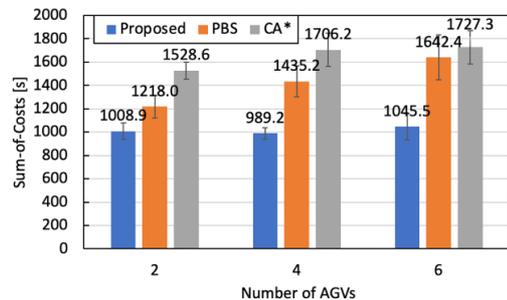


図2. シミュレーション実験の結果。横軸はAGVの台数を表し、縦軸は動作計画の計算時間とAGVの総移動時間の和を示している。

Keywords: Automated Guided Vehicle, Path Planning, Task Assignment, Agent's Dynamics

References

- [1] Hönig, W., Kiesel, S., Tinka, A., Durham, J.W., Ayanian, N.: Conflict-Based Search with Optimal Task Assignment. In Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS). *International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 757765 (2018).
- [2] 清水 智壮, 服部 智弥, 種田 光佑, 後藤 歩, 太田 順. (2022). 複数AGVの動特性を考慮したCBS-TA ベースのタスク割付け・動作計画アルゴリズム. 第40回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2022AC2I2-08, (pp. 1-4), 東京, 2022年9月5日~9日.

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、熟練の作業員による巡回点検が行われている。巡回点検において、作業員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、熟練の作業員は未熟練者に比べて、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[1]。

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員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[2]。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。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)[3]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・予測の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、トレーニングシステムの開発等を行なっていく予定である。

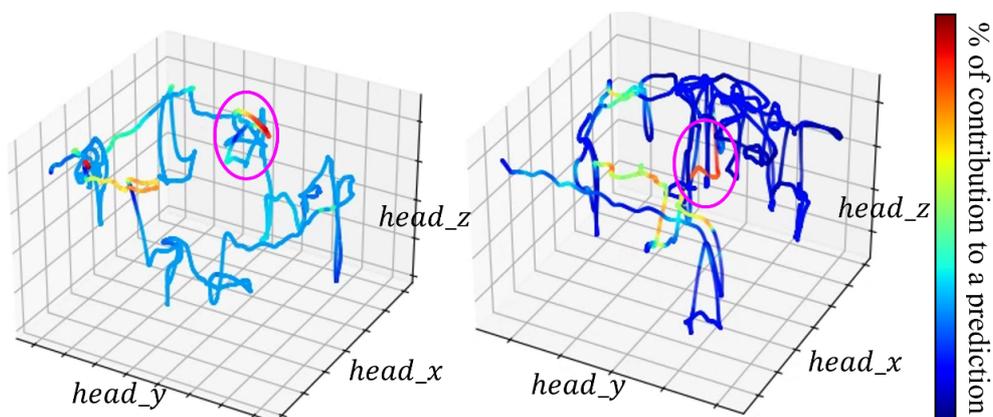


図 1. CAM による熟練度判別時の根拠の可視化。左が未熟練者、右が熟練者。

Keywords: 熟練技能, VR, 機械学習, XAI, CAM

References

- [1] Accenture, “平成 30 年度石油・ガス供給等に係る保安対策調査等事業 保安力の維持・向上を目的とする基礎調査報告書”, https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/H30FY/000284.pdf, 2019.
- [2] 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.
- [3] B. Zhou, A. Khosla, A. Lapedriza, A. Oliva, and A. Torralba, “Learning deep features for discriminative localization,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 2921–2929.

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。

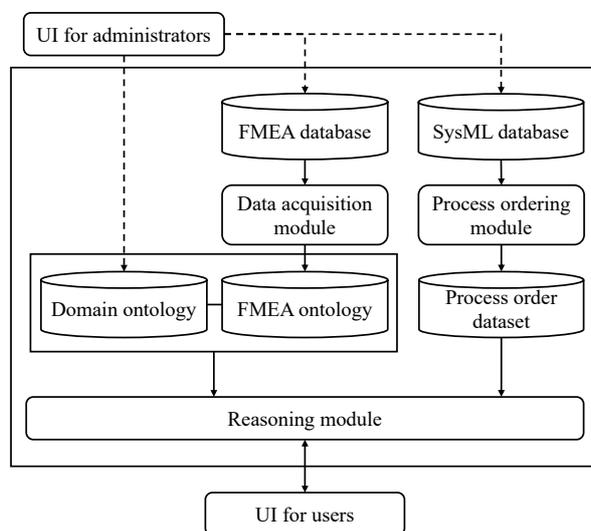


Fig. 1 提案フレームワークの概要

Keywords: *Fault Cause Identification, FMEA, Ontology*

Reference:

[1] Okazaki, S., Shirafuji, S., Yasui, T., Ota, J. (2023, June). A Framework to Support Failure Cause Identification in Manufacturing Systems through Generalization of

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、危険な動作のうち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。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。

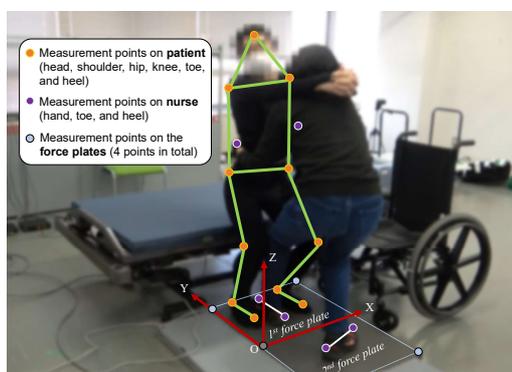


図1. 車椅子移乗動作の実測とモデル化.

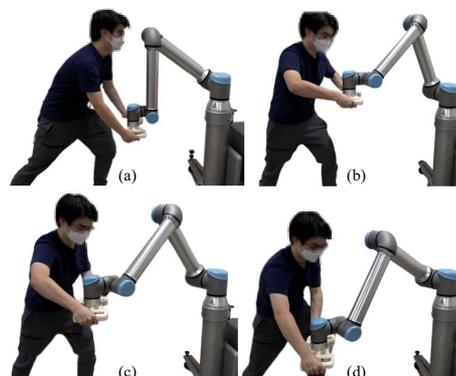


図2. 開発したロボットシステムに対して実行した車椅子移乗動作の例.

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,

機械学習を用いた DAT-SPECT と運動症状の関係の解析

パーキンソン病は、様々な運動症状・非運動症状を引き起こす神経変性疾患であり、高齢者に多くみられる。パーキンソン病患者では、脳内の黒質緻密部におけるドパミン神経細胞の変性・脱落が観察される。脳内のドパミン量に関する情報を得るため、しばしば使われる検査が DAT-SPECT である。DAT はドパミンの取り込みを調節する者であり、これを捉えて間接的にドパミン量を計測する。その評価は主に目視やスカラー評価値である SBR によってなされる。しかしながら、この場合には、評価者の主観の影響や 3 次元情報の消失が避けられない。

そこで我々は、パーキンソン病患者の DAT-SPECT を 3 次元的にとらえ、運動症状との関連を調べるシステムの開発を行っている。システムは DAT-SPECT の 3 次元画像を入力とし、運動機能を評価する指標 UPDRS から計算した、いくつかのスコアを出力とする。回帰分析には、Convolutional neural network を使用した。また、システムが学習した内容を把握するため、Grad-CAM を使用して、結果に大きく影響した部分を可視化した。

その結果、単に SBR のみを入力として用いた場合よりも、DAT-SPECT の 3 次元画像を入力とした場合の方が、良い推定精度となることが確認された。また、可視化の結果、線条体周辺の領域、特に被殻周辺が、推定結果に大きく影響することが示された。これは、被殻が線条体の中でも運動機能に関連しているという知見に合致するものである。

現時点では、推定精度には向上の予知があるため、データの分布の不均一性やデータ量を考慮してよりよい推定を目指す。また、今回は運動症状のみについての解析であったが、パーキンソン病患者はしばしば早期から非運動症状を呈するとされる。今後は非運動症状についても同様の解析を行い、運動症状と非運動症状との関係を明らかにすることを目指す。

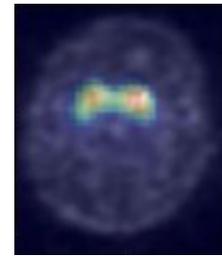


図 1. Grad-CAM を使用して、結果に大きく影響した部分を可視化した例。色が赤に近いほど影響が大きい。

Keywords: DAT-SPECT, Parkinson's disease, Machine learning

References

- [1] 石川 茂一, 上西 康平, 長谷川 哲也, 千葉 龍介, 四津 有人, 高草木 薫, 太田 順. パーキンソン病患者の DAT-SPECT と運動症状: 説明可能 AI を用いた予測と分析. 2023 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, G19, (pp.716-717). 東京, 2023 年 3 月 14 日~16 日.

ヒト歩行および歩行開始動作のモデリング

歩行や歩行開始動作は、我々にとって日常的な動作である。そのため、加齢や疾患等によりこれら動作が妨げられると、日常生活に大きな支障が出る。こうした障害の発生の予防や、リハビリテーションを効果的に行うためには、ヒトの歩行メカニズムを理解することが重要である。我々はこれに対し、神経系コントローラモデルを作成し、計算機上で筋骨格モデルを制御するというアプローチを取っている。

これまでに歩行制御に関して様々なモデリング研究は行われてきたが、3次元的な動作を可能な身体モデルを制御した歩行シミュレーションは実現されていなかった。その際の課題のひとつが、身体モデルが多数の関節自由度を持つことによる、制御パラメータの調節の困難さである。われわれは、関節自由度の少ない条件からはじめ、段階的に自由度を追加しつつ制御パラメータを調節するアプローチを提案している。これにより、70筋・15関節自由度を持つ筋骨格モデルの歩行が実現された。

また、立位から歩行に遷移する歩行開始動作は、しばしば障害され転倒につながることもある重要な動作である。歩行開始動作時には、足の圧力中心が一度後方に移動するような特徴的な現象（予期的姿勢調節；APA）が観察されることが知られているが、その必要性については十分に明らかになっていない。我々は立位・歩行・歩行開始のための神経系コントローラモデルを開発し、これを調べている。その結果、単に立位制御と歩行制御を切り替えるだけでは、立位から歩行に遷移できないことが分かった。また、単に歩行への遷移を実現するよう制御パラメータ調節を行ったにもかかわらず、APAが観察されたことから、歩行開始動作におけるAPAの有用性が示唆された。

現時点では、実際のヒトのモーションの特徴とは異なる特徴が得られている部分がある。今後はこの原因を探りモデルの限界を調べるほか、加齢や疾患の影響をモデルに組み込み、あらわれる影響について解析していく。



図1. 使用した筋骨格モデル（70筋・15関節自由度）の歩行の様子。

Keywords: Gait, Gait initiation, Musculoskeletal model, Forward dynamics simulation

References

- [1] Etoh, Hitohiro, Omura, Yuichiro, Kaminishi, Kohei, Chiba, Ryosuke, Takakusaki, Kaoru, and Ota, Jun. (2022). Investigation of a method to extend a 2-dimensional gait to 3-dimensions in a human musculoskeletal model with 70 Muscles. *Proc. The 33rd 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2022)*, MA2_1_1, Nagoya, Japan, November 28-30, 2022.
- [2] Etoh, Hitohiro, Omura, Yuichiro, Kaminishi, Kohei, Chiba, Ryosuke, Takakusaki, Kaoru, and Ota, Jun. (2022). Motion generation of anticipatory postural adjustments in gait initiation. *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)*. 97/100. 7-9 November, 2022. Taichung, Taiwan (online).

脳卒中患者の立位姿勢制御メカニズムの経時変化の評価

脳卒中は、主に動脈の破裂や閉塞により脳への血流が遮断され、酸素が不足することで発生する。脳卒中患者はしばしばバランス障害を持ち、転倒のリスクが高まる。これまで脳卒中患者の立位時のバランス能力に関する研究は行われてきたが、その制御メカニズムについての検討はなかった。

そこで我々は、これまでに開発してきた神経系コントローラモデルを用いて、脳卒中患者の立位姿勢における動揺の特徴を探った。脳卒中患者がしばしば見せる左右非対称な姿勢を表現できるような筋骨格モデルを、神経系コントローラモデルで制御する。制御パラメータは、モーションキャプチャで得た患者の動揺に関する特徴量を再現するよう、最適化を用いて調節された。また、調節された制御パラメータに対し、非負値行列因子分解による次元削減を行い、参加者間の制御パラメータの違いを比較した。

その結果、45種類の制御パラメータの次元は6次元に削減された。脳卒中患者と若年健常者を比較すると、6成分のうち2成分について有意な差が確認された。このことから、提案手法が、異なるグループ間の姿勢動揺特徴の違いを捉えることができることが示された。なおこれら2成分は各関節の伸展に関連するもの・腰部や足首の急激な伸展を押さえるものであり、これらを適切に組み合わせて使えるかどうかは患者と健常者の最も大きな差異である可能性がある。

今後は損傷部位や発症からの日数によって制御パラメータがどのように変化するかを調べ、効果的な機能回復のために重要な要素を特定することを狙う。また患者の転倒を防ぐためには、静止立位のみではなく、外から力を受けたときにどのように立位姿勢を維持できるかの両方を調べることが不可欠である。これまでに行ってきた外乱印加時の姿勢シミュレーションと併せて、両条件での数理モデルを用いた解析を目指す。

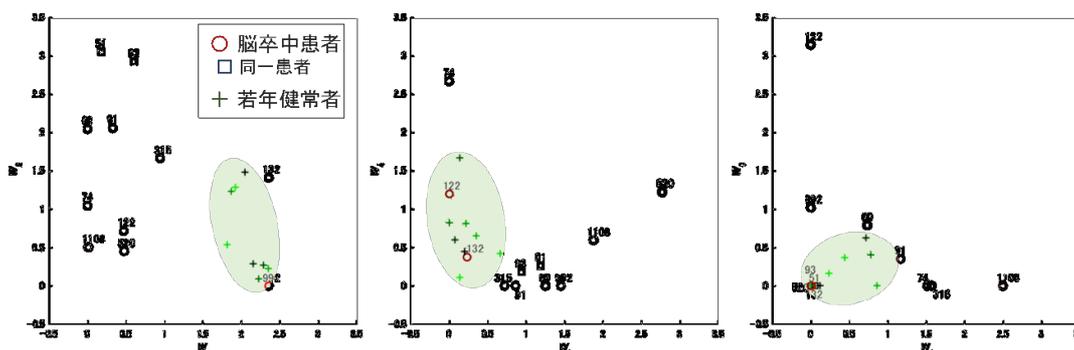


図1. 実験データにフィッティングした制御パラメータを6次元に次元削減したもの。緑の楕円が若年健常者の分布する領域である。要素1と要素3について、脳卒中患者と若年健常者とで有意な差が確認された。

Keywords: Stroke, Musculoskeletal model, Forward dynamics simulation

References

- [1] Kaminishi, Kohei, Li, Dongdong, Chiba, Ryosuke, Takakusaki, Kaoru, Mukaino, Masahiko, & Ota, Jun. (2022). Characterization of postural control in post-stroke patients by musculoskeletal simulation. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 34, (6), 1451-1462, <https://doi.org/10.20965/jrm.2022.p1451>
- [2] 上西 康平, 李 冬冬, 千葉 龍介, 高草木 薫, 向野 雅彦, 太田 順. (2022). 脳卒中患者の立位姿勢制御メカニズムの経時変化の評価: 数理モデルを用いた検討. 第40回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2022AC4D3-04, (pp. 1-4), 東京, 2022年9月5日~9日.

パーキンソン病患者の立位姿勢制御のモデリング

神経変性疾患である Parkinson 病 (PD) の患者は姿勢制御障害に加え、特有の立位姿勢である異常姿勢を呈す。異常姿勢の原因として定常的な筋活動である筋緊張の増加が示唆されている。しかし、立位時の筋緊張を測定することは困難であり、それらの関係は詳細に明らかになっていない。異常姿勢は嚙下障害や背中への痛みを生じさせ、生活の質に大きく影響する。異常姿勢の治療法確立のため、これらの機序を解明することは重要である。そこで、我々は計算機モデルを用いた、姿勢制御の順動力学シミュレーションを行うことによって、PD における異常姿勢・姿勢制御障害の機序の解明を目指している。

我々は、これまでの研究において、仮説: "PD 患者では増加した筋緊張に対して、局所的に重心動揺の小さい静止立位が可能な姿勢が異常姿勢である" について計算機モデルを用いた検討を行った。計算機モデル及び実際の PD 患者の立位データを用いて様々な大きさの筋緊張を推定した(図 1)。推定した筋緊張において、最適化手法を用いて重心動揺の小さい姿勢を算出した。算出した姿勢とその姿勢での立位における重心動揺を実際の PD 患者の姿勢・重心動揺とを比較した。その結果、健常者よりも高い筋緊張において、姿勢と重心動揺の実験値との差が最も小さい値となった(図 2)。このことから、健常者よりも高い筋緊張における重心動揺の小さい姿勢が実際の PD 患者の立位データと近く、その重心動揺も近くなることが分かった。これらの結果は仮説と一致する結果であり、PD 患者が増加した筋緊張において局所的に重心動揺が小さくなる姿勢が異常姿勢である可能性が示唆された[1]。

Keywords: Parkinson's disease, Abnormal posture, Muscle tone

References

- [1] Y. Omura et al., "Analysis of the Relationship Between Muscle Tones and Abnormal Postures in a Computational Model," The 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, July 2023.

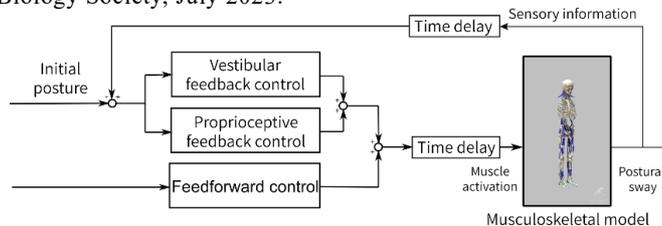


Figure 1. 神経系コントローラモデル。筋緊張を表現する feedforward 制御、固有・前庭感覚を用いた feedback 制御から構成される。さらに、情報伝達や筋の活動による時間遅れを考慮している。

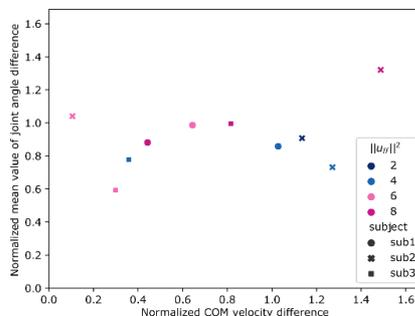


Figure 2. 各被験者のシミュレーション結果と実験結果の関節角度差の正規化した平均値および平均 COM 速度の正規化した差分。 $\|u_{ff}\|^2$ は全身の筋緊張の大きさを表す。原点に近いほど姿勢・動揺が実験値と近いことを表す。