

2022 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>

メンバー

教授	太田 順
助教	白藤 翔平
特任研究員	上西 康平, 范 長湘, 高御堂 良太
博士課程学生	曾 帆, 尾村 優一郎, 田中 茂樹
修士課程学生	盧 佳希, 江藤 人拓, 清水 智壯, 黄 芮, 周 于皓, 張 築天, 竹内 寛樹
学部 4 年生	石川 茂一, 岡崎 翔, 神谷 佳汰
秘書	村上 史朋子, 中村 綾子

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」「生産・搬送システムやプラントの設計・管理の支援」「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。

具体的には以下のテーマについて研究を進めています。

- ロボットシステム設計
 - 小型移動ロボットの開発とマニピュレーション計画
 - 運動情報を用いた物体と環境の接触状態推定
 - ハンドアイカメラを用いたロボットキャリブレーションにおける計測ポーズの最適化
 - 最適化によるタスクに応じた機構の設計手法
- 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
 - VR システムを用いた石油精製プラント運転員の熟練点検技能の抽出
 - 熟練者の知識記述のための生産システムのモデル化
- 人の解析と人へのサービス、超適応の科学
 - 脳卒中患者の立位時の動搖解析
 - 前庭脊髄路を考慮した神経系コントローラによるヒトの姿勢制御のモデル化
 - 予期的姿勢調節に着目した歩行開始動作の動作計画
 - 手指関節角度計測のためのウェアラブルデバイスの開発
 - MRI と EMG からの筋活動推定手法
 - 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
 - 姿勢フィードバックトレーニングが メンタルヘルスに及ぼす影響の解析

小型移動ロボットの開発とマニピュレーション計画

家庭環境や倉庫などの環境での物体の操作にロボットを用いると、人は多くの煩雑な作業から解放され、他の作業に従事することができる。しかし、狭い空間では、大型のロボットは使用できないため、小型ながらさまざまな作業が可能な小型移動ロボットが必要とされている。

本研究では、移動ロボット[1, 2]に受動関節を採用した機構を用いることで、ロボットと被操作物との間にモデル化の観点から理想的な拘束を実現し、対象物を操作する際のモデル化や制御の簡単化を実現した。また、安定した物体操作には、ロボットが操作をおこなううえで十分な拘束力が発揮できるかを判断する必要があり、そのためには接触状態を正しく知る必要がある。開発した機構とそれによる単純な接触モデルにより、接触状態を容易に把握することができ、マニピュレーションの計画が容易になった。

さらに、本研究で対象とするような状況では、ロボットと操作対象、および環境との間で生じる接触が複雑に変化するため、マニピュレーションの計画が非常に難しい。そこで、本研究では階層的にマニピュレーションを計画する手法を提案した。ロボット、物体、環境間の接触の集合にもとづいて抽象的なモードを定義することで、モード間のシーケンスを先に決定したうえで、詳細な動きを決定するモダルプランニングを提案、実現した[3]。提案手法では、マニピュレーションの安定性を確保するためにロボットの数を最初に決定し、対象物と環境間のモード遷移を決定する。さらに、事前に必要な拘束数を検討することで、モードの数とその遷移の組み合わせを減らすことができ、決定されたモードのシーケンスは、詳細な運動の探索により計画の際の指針として利用することができる。

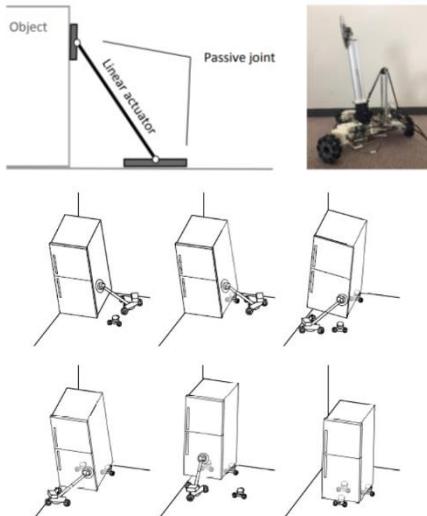


Fig. 1 開発したロボットと協調マニピュレーションの例

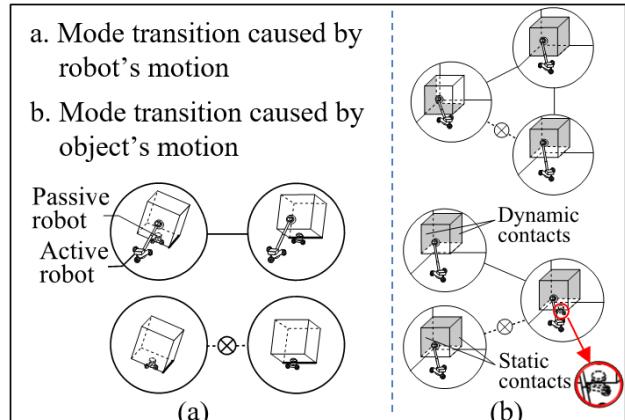


Fig. 2 モードの遷移にもとづくマニピュレーションの計画、また、遷移における制約

Keywords: 移動ロボット、単純な接触モデル、マニピュレーション計画、モダルプランニング

References

- [1] S. Shirafuji, et al. Mechanism allowing large-force application by a mobile robot, and development of ARODA. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 110: 92-101.
- [2] T. Ito, S. Shirafuji, J. Ota. Development of a Mobile Robot Capable of Tilting Heavy Objects and its Safe Placement with Respect to Target Objects. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Roboics and Biomimetics (ROBIO2018), Kuala Lumpur, Malaysia, 12–15 December 2018; pp. 716–722.
- [3] C. Fan, S. Shirafuji, J. Ota. Modal Planning for Cooperative Non-Prehensile Manipulation by Mobile Robots. *Applied Sciences*, 2019, 9.3: 462.

運動情報を用いた物体と環境の接触状態推定

物体と周囲の環境との接触を上手に扱うことで人はさまざまな作業を遂行できる。例えば倉庫等における荷物の積み下ろし作業では、荷物を滑らせるなどの方法で単純に持ち上げるのと比較して力を節約した作業が可能となる。こうした環境を利用したマニピュレーションはロボットにとっても有用である。

不必要的力を加えることなくこうしたマニピュレーションを実現するには、操作対象物体と環境がどのように接触するか（接触している面や辺など）を知る必要がある。そのため物体を把持しているロボットの手先位置の変化などから、物体と環境との接触状態を推定することが重要となる。

本研究では未知形状物体と未知形状環境が接触する際の接触状態の推定手法を提案した。物体の運動情報から接触している面や辺を推定するアルゴリズムを提案し、モーションキャプチャを用いた実験によりその有用性を検証した。

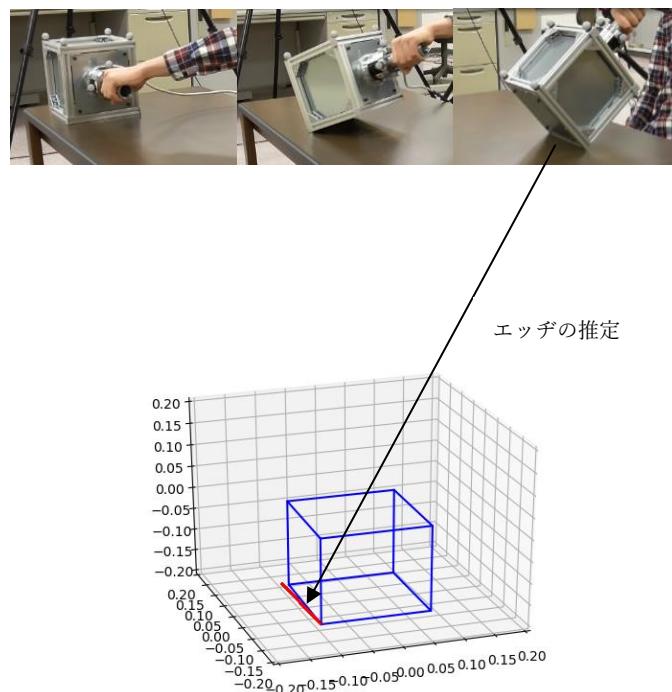


Fig. 1 実験と結果

Keywords: 接触状態推定, コンプライアントモーション, マニピュレーション

References

- [1] Seiya Ishikawa, Shouhei Shirafuji, and Jun Ota: "Objective Functions of Principal Contact Estimation from Motion Based on the Geometrical Singular Condition," Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, USA (Virtual), pp.9465-9471, October, 2020.
- [2] Ishikawa, S., Shirafuji, S. & Ota, J. (2019). Kinematics Analysis for Estimation of Contact Conditions in Teaching, Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Hiroshima, Japan, June 5-8, 2019

ハンドアイカメラを用いたロボットキャリブレーションにおける 計測ポーズの最適化

ロボットを制御する際の運動学モデルは、リンク長や関節のオフセットといった運動学パラメータをもとに構築される。しかし、運動学パラメータはロボットの加工・組立のバラつきや熱膨張といった要因により誤差が生じるため、運動学モデルにも誤差が生じ正確な運動ができなくなってしまう。そこで運動学パラメータの補正、すなわちロボットキャリブレーションが必要となる。従来のロボットキャリブレーションではレーザートラッカーなどの高精度で大掛かりな計測装置が用いられていたが、近年では簡便に計測するためにロボット手先のハンドアイカメラを用いる手法が注目を集めている。しかしながら、カメラの計測精度は比較的低く、キャリブレーションの精度も低下してしまう。つまり、カメラ計測の簡便さと精度はトレードオフの関係にある。

一方で、ロボットキャリブレーションの精度は計測ポーズに依存する、すなわちロボットにどのようなポーズを取らせて計測するかによって変わることも報告されている。この点に関しては、計測ポーズと運動学パラメータの関係を感度解析することにより、一定の制約化で計測ポーズを最適化している研究がある。しかし、この手法はハンドアイカメラを用いたロボットキャリブレーションに対してそのまま適用することはできない。なぜなら、ハンドアイカメラによる計測ではキャリブレーションマーカーを撮影できなければならず、マーカーの設置場所に応じてロボット手先の制約も変化するからである。

以上の背景から、ハンドアイカメラを用いたロボットキャリブレーションにおいて高精度を達成するため、我々はハンドアイカメラによる制約を考慮した計測ポーズの最適化手法を提案している。カメラ画像にのるノイズ等の影響が手先ポーズの推定に与える影響と、手先ポーズの誤差がキャリブレーション自体に与える影響を考慮することで、カメラによる手先ポーズ計測の精度の制約に影響を受けにくいキャリブレーションポーズを最適化により求めることができる。例えば、シミュレーションによる検証の結果、Fig. 1 のように最適化された計測ポーズが得られ、キャリブレーション精度の向上が確認されることを確かめた。このアプローチにより従来の専用の装置を用いたキャリブレーションと比較し、簡易なセットアップで精度の高いロボットキャリブレーションが可能となる。

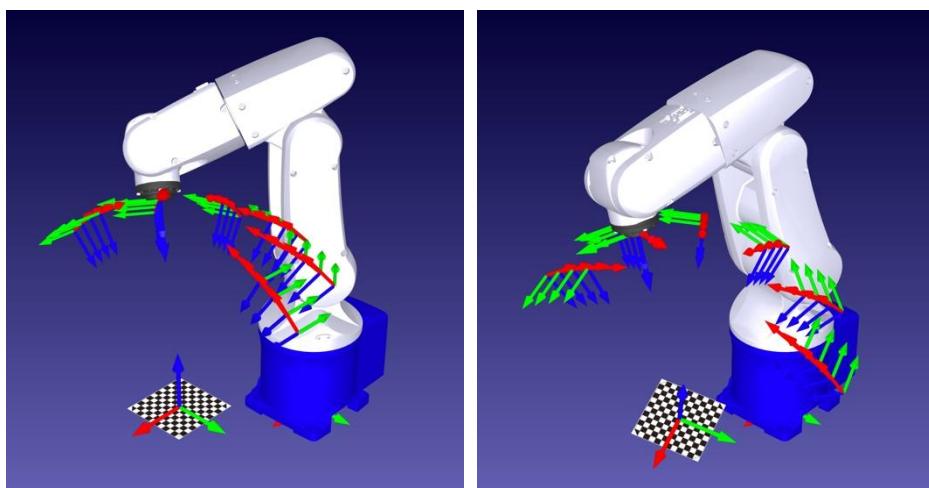


Fig. 1 (左図) 初期計測ポーズ. (右図) 最適化された計測ポーズ.

Keywords: ロボットキャリブレーション, 最適化, ハンドアイカメラ, 絶対位置決め精度

最適化によるタスクに応じた機構の設計手法

多くのロボット工学の研究では、与えられた機構をいかに制御し、目的の課題を達成するかに重点が置かれている。一方で、一部のロボットに課される課題は、制御ではなく、その機構そのものを工夫することで、問題を簡単化する、または問題そのものを解決することが可能である。本研究では、与えられた課題に対して、適切な機構を運動学の観点から計算により求める方法を提案している。

その一つが、関節の間で生じる運動を、ワイヤとそのワイヤが通る経路を工夫することで拘束する手法である。拘束された関節のペアは、複雑な運動を見せる。本研究では、関節に固定された非円形プーリ（ワイヤの通る経路）の形状を目的の関節間運動に合わせて設計する手法を提案した[1]。その一つの応用が、Fig. 1に示すロボットの脚機構である。非円形プーリで拘束された関節を組み合わせることで、このロボットは、制御することなく上体に加わる力を支えながら前方に進むことができる。

他にも、ロボットマニピュレータの関節の配置を、課題に合わせて計算により求める研究もおこなっている。これまでに、少ない数のアクチュエータで、目的の手先軌道を実現するマニピュレータの関節配置を最適化により求める手法を提案した[2]。目標軌道と実現される軌道との間の誤差を計算する手法を工夫することで、少ない計算量で関節配置を設計することが可能となった。Fig. 2は、卵型の物体の表面に文字を描くという例題に対し、提案手法によって計算で求められた機構で、一般的なマニピュレータよりも少ない関節数で目的の課題を達成することができる。

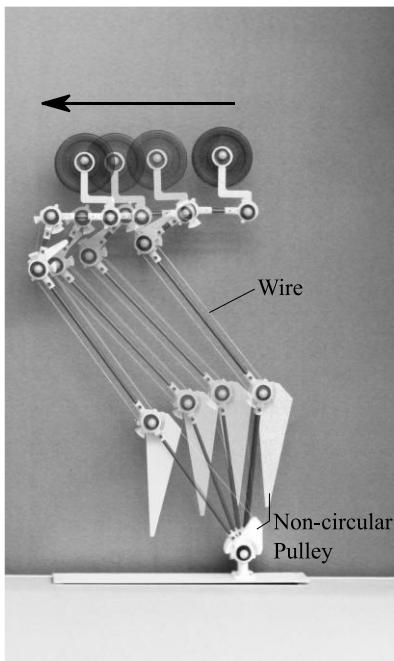
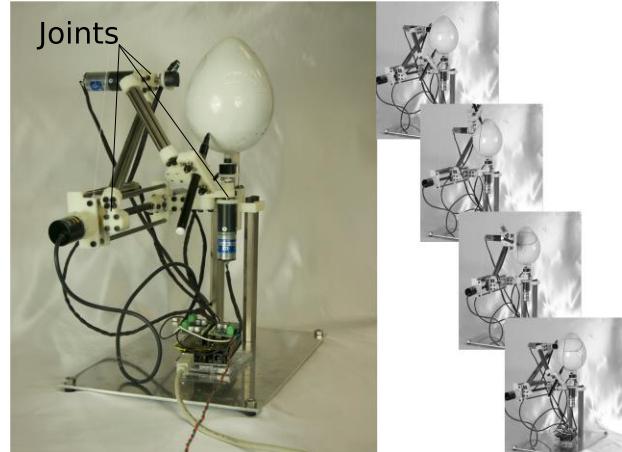


Figure 1. 関節の非円形プーリによる拘束. Figure 2. 最小の関節数で複雑な局面に文字を描く機構.



Keywords: ロボット設計, 最適化, キネマティックシンセシス, ワイヤ, 非円形プーリ

References

- [1] Shouhei Shirafuji, Shuhei Ikemoto, and Koh Hosoda: "Designing Non-circular Pulleys to Realize Target Motion between Two Joints," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.22 no.1, pp.487-497, 2016.
- [2] Shouhei Shirafuji and Jun Ota: "Kinematic Synthesis of a Serial Robotic Manipulator by Using Generalized Differential Inverse Kinematics," IEEE Transactions on Robotics, vol.35 no.4, pp.1047-1054, 2019.

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、AGV(Automated Guided Vehicle)の活用の場が広がっている。複数 AGV から構成されるシステムを運用するためには、各 AGV へ物資の搬送要求(以下、タスク)の割り付け問題、そして各 AGV の初期位置から目的地までの動作計画の問題の 2 種類の問題を解く必要があり、AGV 同士の衝突を避けながら可能な限り早く各タスクを完了させることが重要である。一般に AGV は一定の加減速パターンにより走行しており、実世界で動作する AGV 同士の衝突の回避や最適な経路の導出のためには、このような AGV 動特性を考慮する必要がある。しかし、当該分野における先行研究では、AGV の動特性を反映した最適化は行われていない。そこで本研究では、複数 AGV の動特性を考慮して、タスク割りつけおよび動作計画を行うアルゴリズムの設計を目的とする。

タスク割り付け問題と動作計画の問題を解くアルゴリズムとして、最適性や完全性を有する Höning らの Conflict-Based Search with optimal Task Assignment (CBS-TA) [1] が知られている。本研究では、複数の探索木を用いてタスク割り付けと動作計画を行う CBS-TA のフレームワークに基づいたアルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムは、以下の特徴を有する。

1. AGV の動特性を考慮した移動コストにより最適化を行う。
2. タスクの割り付けから物資の運搬完了まで、一貫した最適化を行う。

探索過程における推定コストの算出に、AGV の動特性を反映したヒューリスティック関数を使用することや、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、上記の内容を実現している。提案手法の有効性を検証するため、従来手法と提案手法の双方で図 1 に示す問題を解き、表 1 の結果を得た。一貫して最適化を行うことにより、AGV が稼働している時間全体にわたって、待機動作や旋回の影響を考慮した解が得られた。今後は、タスクが繰り返し発生するような問題や、途中で外乱が発生する問題への対応が可能なアルゴリズムについて検討を進める。

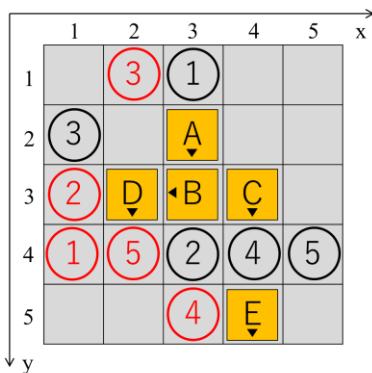


図 1 問題設定

表 1 割り付け結果と総移動時間、計算時間

アルゴリズム	割り付け結果	全AGVの 総移動時間 [s]	計算時間 [s]
CBS-TA + CBS	タスク1:A タスク2:B タスク3:D	197.20	1.53×10^{-1}
提案手法	タスク1:B タスク2:D タスク3:A	188.54	2.37×10^{-1}

[1] Höning, 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)

VR システムを用いた石油精製プラント運転員の熟練点検技能の抽出

石油精製プラントでは、設備異常の早期発見のための巡回点検作業が熟練作業員によって日常的に行われている。本研究では、この巡回点検作業における熟練作業者の技能抽出を行うためのVirtual Reality(VR)システムを開発し、実験的にその有効性を検証した。

従来の点検・異常検知作業における技能抽出は、主に視覚を用いた目視検査(Visual Inspection)[1]を対象とし、アイトラッカー(視線追尾装置)を用いて熟練者と未熟練者の視線行動の比較が行われてきた[2]。しかしながら、プラントの巡回点検作業は、これらの従来研究で扱われてきた課題と比較して、点検対象が大きく一度に対象の全てを視野内に収めることが困難であるという違いがある。このことは、プラントの巡回点検作業では身体運動に伴う視野の変化も異常の検知において重要な役割を果たしていることを示唆している。そのため、本研究ではこれらの背景を踏まえ、点検作業者が見ている箇所(視線)とその際の身体の位置や姿勢(身体運動)という二つの観点から点検作業員の技能を評価するためのVRシステムを構築した。

具体的には、VR空間内に実際のプラントモデルの一部を再現し、そのモデルに対して作業者が点検行動を行う際の、視線と頭部の位置情報をそれぞれヘッドマウントディスプレイ内蔵のアイトラッカーと位置センサーで計測・評価した(図1)。その後、作成したVRシステムを用いて実際に技能抽出実験を行なった結果、1. 熟練者は未熟練者と比較して装置から離れた位置から「引き」で対象を見る動きを多く行なっていること、2. 頭部を低い位置に置いて「下から覗き込む」動きを多く行なっていること、などの熟練者固有の技能を明らかにすることできた。今後は本研究で対象とした視覚情報に加えて、触覚情報や嗅覚情報、聴覚情報などを含めたマルチモーダルな感覚情報を利用した点検行動を評価し、技能抽出を行うことのできるVRシステムを構築する。

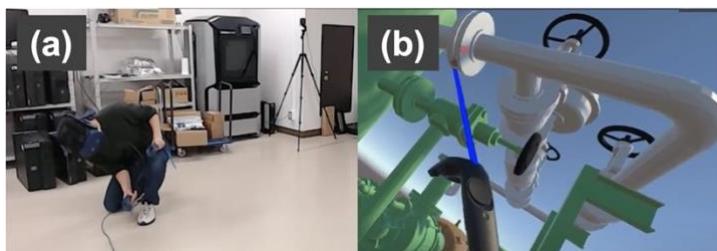


Fig. 1 VR システムを用いた点検作業, (a) 実空間での作

業者の姿勢 (b) VR 空間内の作業者の一人称視点映像

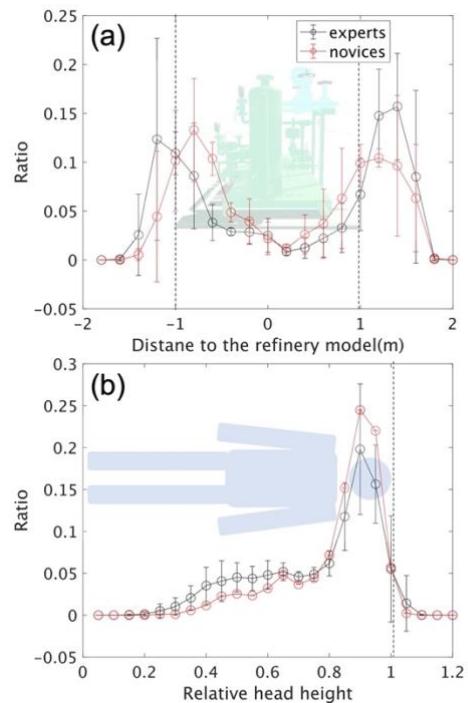


Fig. 2 技能抽出実験の結果, (a) 身長を基準(1.0)とした頭部の高さの分布, (b) 装置との距離の分布

Keywords: 巡回点検作業, 熟練技能抽出, Virtual Reality, 石油精製プラント

References

- [1] See, Judi E.: "Visual inspection: a review of the literature." *Sandia Report SAND2012-8590*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 2012.
- [2] Dzeng, R. J., Lin, C. T., & Fang, Y. C. (2016). Using eye-tracker to compare search patterns between experienced and novice workers for site hazard identification. *Safety science*, 82, 56-67.
- [3] 栗原 恵也, 高御堂 良太, 梅田 靖, 深間 一, 笠原 清司, 田中 祐一, 福元 誠悟, 加藤 俊哉, 是永 真泰, 星 美咲, 太田 順. (2022). VR システムを用いた石油精製プラント運転員の熟練点検技能の抽出. 2022 年度精密工学会春季大会学術講演会, H85.

熟練者の知識記述のための生産システムのモデル化

ロボットによる自動組付けラインなど、近年多くの生産システムが自動化により複雑化している。そのなかで発生した品質の低下や、生産効率の低下などの問題、さらには計画の変化に対応するための設備の改善等においても、現場の作業者が自身の経験をもとに生産システムの状態を確認し、これを修正することが多い。上記のようにシステムが複雑化するなかで、どのように、このような作業を限られた人材で効率よくおこなっていくかが今後の生産システムの立ち上げ、運用で重要となってくるものと考えられる。そのためには、いかに熟練者のもつ経験や知識を蓄積し、現在熟練者が現場でおこなっているような形で、必要に応じて蓄積した知識を参照できる仕組みが必要である。

そのような背景のなかで、本研究では、生産システムのモデルをその要素と要素間の順序関係で記述する方法を提案している。前述のような生産システムにおける問題解決や改善の知識は、その対象である生産システムの構造と切り離して考えることが難しい。一方で生産システムのモデルはさまざまなもののが提案されているが、生産システムに対する知識を記述し、参照する仕組みを考えるうえでは、生産システムの構造を知識と関連付けて簡単に参照できる形式が望ましい。さらに、人の持つ生産システムに対する知識は、人が生産システムをどのように捉えているかに依存しており、頭の中で抽象化された生産システムに対する知識には、そのレベルに合わせたモデルが必要となる。本研究で提案している生産システムのモデルは、要素間の関係を単純な順序関係として記述するもので、これを既存のシステムモデリング言語 SysML をもとに構築する仕組みを提案している。このような記述により、前述のような抽象度により階層化されたモデルを、記述したシステムの構造（順序関係）を維持したまま構築することができ、熟練者の持つ知識をシステムのモデル上で追跡しやすくしている。このような記述をシステムラティスと呼び、実際の模擬生産ライン上で発生している熟練者の問題発見までのプロセスを、そのモデルであるシステムラティス上で記述することで、提案手法の検証をおこなっている。

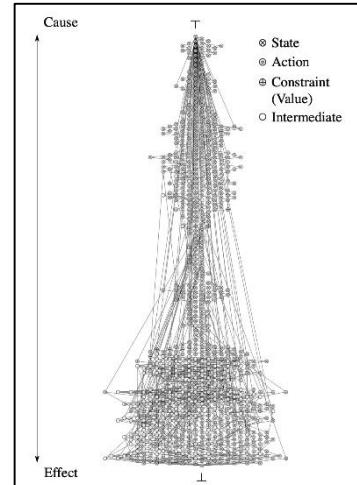


Figure 1. 対象とした模擬生産ライン. Figure 2. 模擬ラインのシステムラティス.

Keywords: 知識記述、生産システム、モデリング

References

- [1] 金 棟植, 白藤 翔平, 助川 拓士, 斎藤 賢宏, 小島 史夫, 太田 順：“作業者の知識の可視化に向けた自動化生産ラインの因果関係の記述,” 第 39 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2D1-06, 長野（オンライン）, 2021 年 9 月.

脳卒中患者の立位時の動揺解析

脳卒中は、脳の血管が破れたり詰まったりし、血液が適切に届かなくなることで、脳の働きに障害が起きる疾患である。脳卒中を発症した患者の立位は健常者の立位と比べ不安定で、転倒のリスクが高いことが知られている。発症の機序や部位により立位姿勢制御への影響は異なり、それに応じて適切なリハビリテーションやトレーニングの方式が異なる可能性はあるが、その詳細な解析は十分になされていない。我々はまず、脳出血の中でも主要な、脳梗塞患者と脳出血患者とに注目し、それらの姿勢動揺の差異について調べている。

我々は、動的時間伸縮法を利用して、脳卒中患者の立位時の動揺に関する時系列データをクラスタリングした[1]。その結果、主に発症からの日数によってデータは異なるクラスタに分けられた。その中でも、脳出血患者は発症からの日数とクラスタの遷移がはっきりしているのに対し、脳梗塞患者はその関係が明確でなく、両者の日数経過に伴う回復に差がある可能性が示された。また、脳梗塞患者と脳出血患者とで、立位時の姿勢が異なる可能性についても調べている[2]。今後は、これらの研究で得られた知見を、これまで構築してきた計算機モデルと合わせて解析を行い、姿勢制御メカニズムの差異を明らかにすることを目指す。

Keywords: Postural control, Stroke, Time-series clustering

References

- [1] D. Li, K. Kaminishi, R. Chiba, K. Takakusaki, M. Mukaino and J. Ota, "Evaluation of Postural Sway in Post-stroke Patients by Dynamic Time Warping Clustering," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 15, 2022, doi: 10.3389/fnhum.2021.731677.
- [2] D. Li, K. Kaminishi, R. Chiba, K. Takakusaki, M. Mukaino and J. Ota, "Evaluating quiet standing posture of post-stroke patients by classifying cerebral infarction and cerebral hemorrhage patients," *Advanced Robotics*, vol. 35, no. 13-14, pp. 878-888, 2022, doi: 10.1080/01691864.2021.1893218.

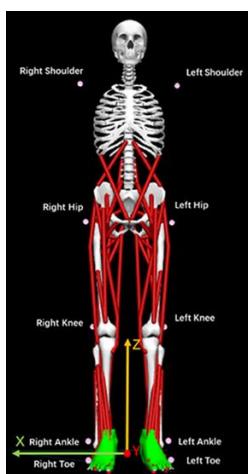


Figure 1. 解析に用いられたマーカー位置。左右あわせて 10 点の位置を記録している。

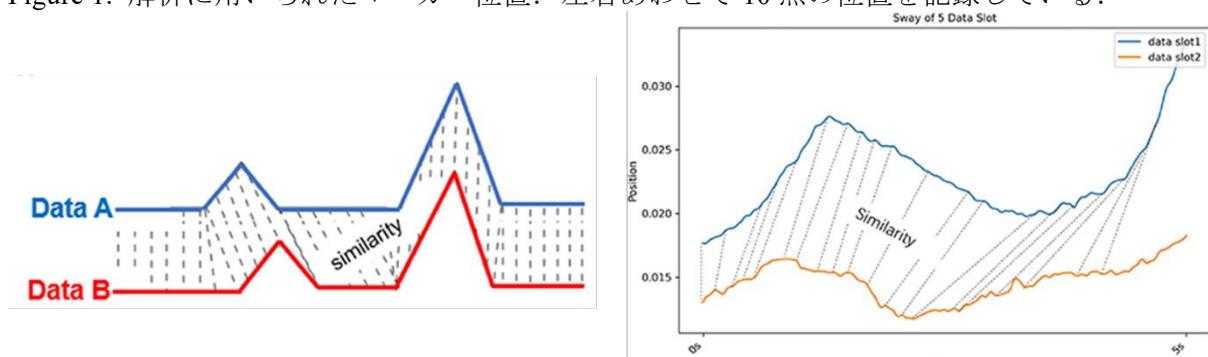


Figure 2. 動的時間伸縮法の概念図と、実際の動揺データで計算された類似度の例。

前庭脊髄路を考慮した神経系コントローラによるヒトの姿勢制御のモデル化

ヒトは常に立位を維持するために必要な身体の制御である、姿勢制御を行っている。そのため、加齢や疾患によって姿勢制御が障害されると生活が大きく制限される。このような生活の制限を緩和するためには、姿勢制御のメカニズムを解明することが重要である。立位姿勢制御は様々な神経の経路によって信号が伝達されることで達成されている。動物による実験などから、立位姿勢制御には身体の固さ（筋緊張）を調節する網様体脊髄路、身体を垂直に保つ前庭脊髄路と呼ばれる神経活動の伝達経路が大きな役割を果たしていることが分かっている。しかし、これらの経路がヒトの姿勢制御において果たす役割は、詳細には未だ明らかになっていない。そこで我々は、これらに着目して計算機モデルを構築することで、ヒトの姿勢制御のメカニズム解明を目指している。

我々は、筋骨格モデルと網様体脊髄路・前庭脊髄路を模した制御を含む神経系コントローラからなる計算機モデルを構築した (Fig.1)。計算機モデルの妥当性をヒトの実験結果と比較することで検証した。その結果、前庭脊髄路を模した制御により、筋骨格モデルがより低い筋緊張で立位可能であることが確認された。また、前庭脊髄路を模した制御がない場合は姿勢の揺れが大きくなることが確認された (Fig.2)。これは実際のヒトの実験結果と類似する結果であった。このことから、構築した計算機モデルの妥当性を確認することができた[1]。今後は構築した計算機モデルを用いることで、ヒトの姿勢制御のメカニズム解明を目指す。

Keywords: Posture control, Vestibulospinal tract, Muscle tone

References

- [1] Y. Omura, K. Kaminishi, R. Chiba, K. Takakusaki, and J. Ota, “A Neural Controller Model Considering the Vestibulospinal Tract in Human Postural Control,” *Front. Comput. Neurosci.*, vol. 16, 2022, doi: 10.3389/fncom.2022.785099.

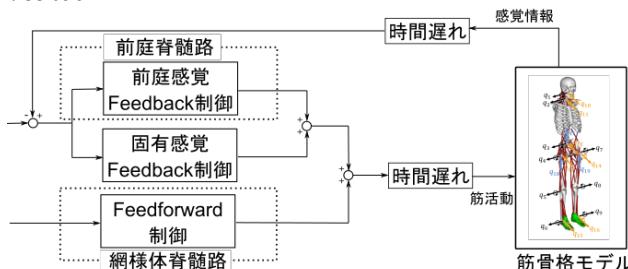


Figure 1. 神経系コントローラモデル。網様体脊髄路に基づく feedforward 制御、前庭脊髄路に基づく feedback 制御から構成される。さらに、情報伝達や筋の活動による時間遅れを考慮している。

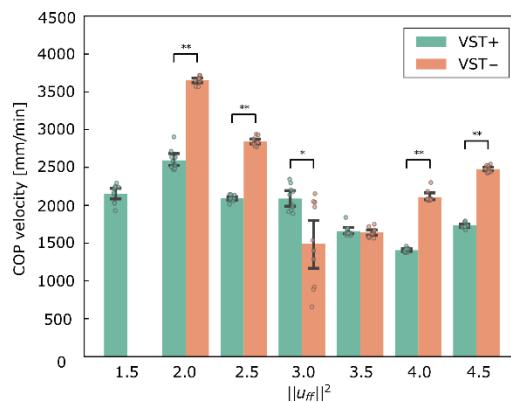
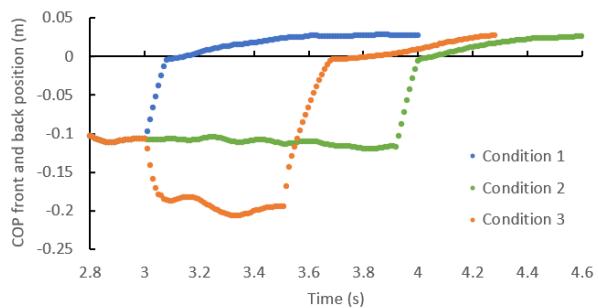
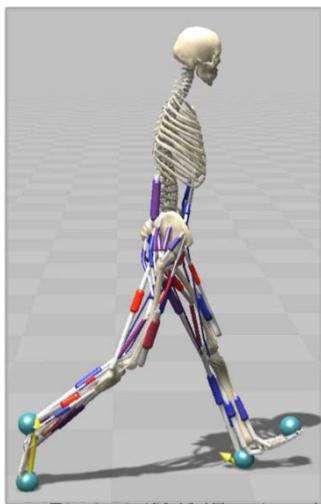


Figure 2. 各筋緊張・前庭脊髄路の有無における足圧中心 (COP) 速度。緑色が前庭脊髄路なし、橙色が前庭脊髄路ありの条件のときの結果を示す。

予期的姿勢調節に着目した歩行開始動作の動作計画

超高齢社会において、ヒトの歩行開始動作に関する課題解決の重要性が高まっている。歩行開始動作において、立位時の足底圧中心(COP)の位置が後方に移動する予期的姿勢調節という動作が観察されている。高齢者やパーキンソン病患者等には、健常者と異なる予期的姿勢調節が観察されており、転倒等の一因であると考えられている。したがって、歩行開始動作における予期的姿勢調節の動作計画を詳しく理解することが重要であるが、予期的姿勢調節は無意識の動作であることから、被験者実験によるアプローチでは予期的姿勢調節がないと歩行開始動作が適切に出来ずに倒れるのかどうかを調べることは容易ではなく、確かめられていない。そこで、本研究では、簡素な歩行開始動作の数理モデルを提案し、予期的姿勢調節が発現することを示すことで、歩行開始動作における予期的姿勢調節の動作計画についての理解を深める。ヒトの身体をモデル化した筋骨格モデルという身体モデルを、筋の長さフィードバック等の簡素な制御モデルで動作させる。フィードバックゲイン等の計 1800 を超える制御パラメータは最適化により調節し、最適化の結果発現する予期的姿勢調節を解析する。結果、立位から歩行開始動作、歩行までの動作を再現できており、COP が後方に移動するという予期的姿勢調節を再現し、予期的姿勢調節が歩行開始動作に有効であるということを示した。以上の成果により、歩行開始動作の予期的姿勢調節の理解を深めることが可能であり、高齢者やパーキンソン病等において、健常者と異なる歩行開始動作の予期的姿勢調節と、転倒との関係の解明の一助になると期待する。



Keywords: 歩行開始動作, 筋骨格モデル, 神経系コントローラ, 順動力学シミュレーション, SCONE

手指関節角度計測のためのウェアラブルデバイスの開発

ウェアラブルデバイスによる手指の運動計測は、バーチャルリアリティ(VR)技術や遠隔操作などを代表とするヒューマン・マシン・インターフェイス(HMI)やリハビリテーションなど様々な用途への利用が期待されている。しかし、現在主流である光ファイバや伝導性インクを用いたウェアラブルな計測には、センサの出力する角度が指の大きさや形状に依存してしまうという特徴がある。そのため、計測者が変わるたびに、指の実際の関節角度とセンサの出力を合わせるためのキャリブレーションの作業が必要不可欠だ。このキャリブレーションには時間がかかり、手に疾患を抱えた人は十分なキャリブレーションが行えないため計測の感度が悪くなるなどのデメリットがある。そこで我々は、指の大きさや形状に依存せず指の関節角度が計測できるウェアラブルデバイスの開発を目的として研究を進めている。

手法としては、指の上に一定の間隔で糸を重ねて張り、それぞれの糸の変位を計測することで関節角度を推定できる(Fig. 1)。それぞれの糸の関節部における回転半径の違いを利用してすることで、指の形状や大きさに依存せず関節角度を計測することが可能となる。糸の間にはソフトポリ塩化ビニル製のベルトを挟むことで、曲率の大きい指の曲げに対しても柔軟に曲がることができ、糸同士の間隔を一定に保っている。本手法の妥当性を示すため、シリアルリンク機構による指の屈曲伸展の運動を模したモデルを開発した(Fig. 2)。モデルの上に糸とベルトを張ることで実験をし、本手法により十分な精度で計測できることを示した。今後は、実験で得られた知見をもとに装着可能なグローブ型のデバイスを開発する。

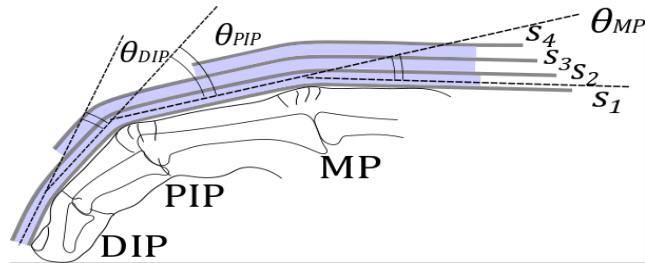


Fig. 1 指の関節に対する糸とベルトの配置。指の関節は先端から DIP 関節(Distal Interphalangeal joint), PIP 関節(Proximal Interphalangeal joint), MP 関節(Metacarpophalangeal joint)と呼ぶことにする。4 本の糸のうち、下から 1, 2 番目の糸を指の先端から、3 番目の糸を DIP 関節と PIP 関節の間から、4 番目の糸を PIP 関節と MP 関節の間から通すことにより各関節角度を同時に計測することができる。

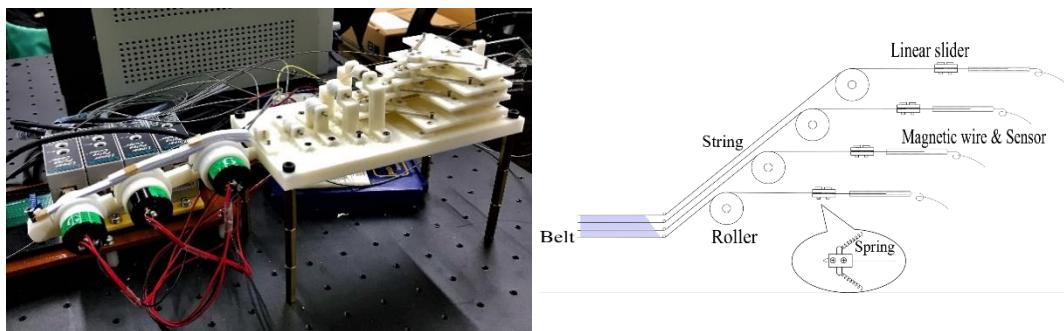


Fig. 2 (左図) 実験で使用したシリアルリンク機構の指のモデル。各関節にはポテンショメータを組み込み、関節角度の真値を計測した。(右図)糸のセンサまでの経路。各糸はローラを経由し直動スライダにつながれている。直動スライダは糸と磁性体ワイヤを接続する役割を持っており、磁性体ワイヤの変位をセンサで計測する。

Keywords: データグローブ, ウェアラブルデバイス, 指関節角

MRI と EMG からの筋活動推定手法

神経筋変性疾患の研究や、その治療におけるリハビリテーション療法の開発において、筋活動をモニタリングすることは、疾患の性質を理解し、治療による筋活動の変化をフィードバックするためには重要である。また、疾患の結果として、身体構造や筋肉の動作に変化が現れることも珍しない。したがって、疾患の状態を十分に理解するためには、筋の形態と筋の活性化状態を同時に把握する重要である。筋の形態情報を取得する典型的な方法は、体内で起こっている解剖学的・生理学的現象を見るための画像診断技術であるMRI (Magnetic Resonance Imaging) である。一方で、筋肉の状態に関する時間的な情報を取得するためには、表面筋電図 (sEMG) と呼ばれる筋肉の収縮による電位変化を読み取る方法が最も一般的な手法です。sEMG を用いた最新の手法では、運動単位レベルまでの筋活動を推定することが可能であるが、深部筋の活動の推定は未だに困難な課題である。

本研究では、MRI で得られた筋の形態情報と sEMG から得られた動的情報を融合させ、深層筋と表層筋の活動を直接推定する方法を提案した。この方法では、MRI 画像に含まれる形態情報を利用して導電体の電気的ネットワークモデルを構築し、高密度の sEMG 電極を前腕に巻き付けて収集した筋電位信号から筋活動を推定する逆問題の解法を提案している。

この方法により、sEMG の時間分解能で筋活性化の推定を可能にし、診断時に臨床医へ提供する情報の品質を向上させることができると考えている。

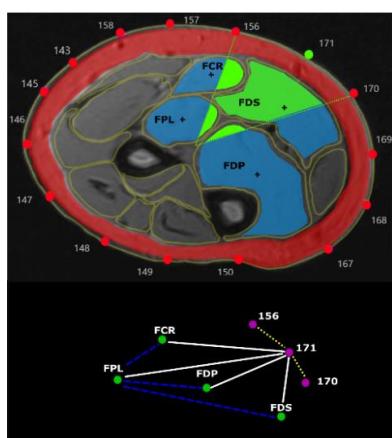


Fig. 1 MRI 画像から得られた回路網の例

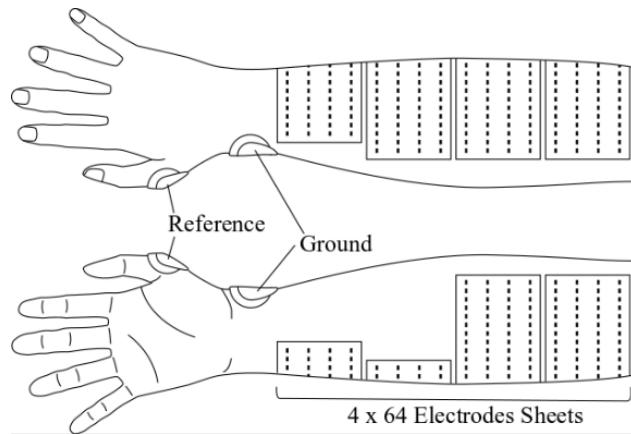


Fig. 2 sEMG 電極の配置

Keywords: 神経筋制御、筋電図、MRI、高密度 sEMG、ヒューマンマシンインターフェース

References

- [1] Piovanelli, E., Piovesan, D., Shirafuji, S., & Ota, J. (2019). A Simple Method to Estimate Muscle Currents from HD-sEMG and MRI using Electrical Network and Graph Theory. In 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (pp. 2657–2662).
- [2] Piovanelli, E., Piovesan, D., Shirafuji, S., & Ota, J. (2019). Estimating Deep Muscles Activation from High Density Surface EMG using Graph Theory. In 2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation RObotics (ICORR) (pp. 3–8).
- [3] Piovanelli, E., Piovesan, D., Shirafuji, S., Su, B., Yoshimura, N., Ogata, Y., & Ota, J. (2020). Towards a simplified estimation of muscle activation pattern from MRI and EMG using electrical network and graph theory. Sensors (Switzerland), 20(3), 1–20.

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。我々はこれまでこのような問題に対して、図1に示すような教育用の患者ロボットを開発するというアプローチで解決に取り組んできた[1][2]。実際の患者の動きを模擬したロボットを用いて練習を行うことで、誤った操作で患者に怪我をさせてしまうことの心配も無く、使用者は実際の患者には行えないような、様々な動作を試しながら看護動作を学習することができる。このロボットの仕組みとしては、ロボットの腰に取り付けられた力センサーで看護師から加えられた力を計測し、その力に応じて足関節、膝関節、股関節部分に設置されたモーターを制御し、看護師から加えられた力に応じたロボットの運動反応を実現している。

本研究ではさらに、実際の人を対象として車椅子移乗動作の実測を行い、その際の患者-看護師間の力の相互作用の関係をモデル化し、ロボットに組み込むことで、看護師から加えられた力に対してよりリアルな応答をする患者ロボットの開発に取り組んだ[3]。具体的には、まず、実際の人を対象として車椅子移乗動作時の患者に加えられる力と、それに対する応答としての患者の立ち上がり動作を、光学式モーションキャプチャカメラシステム及び地面反力系を用いて計測した。その後、計測した力と患者の動きのデータを基に、アドミックタンス制御則を用いて車椅子移乗動作における患者-看護師間の力の相互作用の関係をモデル化した。アドミックタンス制御では、看護師から加えられた力を入力として股関節部分の位置や姿勢を制御した。これによって看護師から加えられた力に対する、患者の動きや姿勢の変化を再現することで、看護学生等などの学習者は「こういった力の加え方をした場合には、患者はこう動く、なのでこれ以上大きな力を加えることは危険である」といった、患者を扱うための力加減を学ぶことができる。

その後、実際に開発したロボットを用いて検証実験(図1)を行ない、患者ロボットが看護師から加えられた力の大小を判別し、フィードバックが可能なことを明らかにした。今後はさらに、様々な症状の患者の実測データを取り入れることで、一台のロボットで多様な症状の患者との接し方を学習することのできるロボットシステムの開発などが期待される。

Keywords: 患者ロボット、動作計測、人動作のモデル化、看護教育

References

- [1] Lin, C., Ogata, T., Zhong, Z., Kanai-Pak, M., Maeda, J., Kitajima, Y., ... & Ota, J. (2021). Development and validation of robot patient equipped with an inertial measurement unit and angular position sensors to evaluate transfer skills of nurses. *International Journal of Social Robotics*, 13(5), 899-917.
- [2] Lin, C., Ogata, T., Zhong, Z., Kanai-Pak, M., Maeda, J., Kitajima, Y., ... & Ota, J. (2021). 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*, 11(6), 2872.
- [3] 鈴木暖, 高御堂良太, 金井 Pak 雅子, 前田 樹海, 北島 泰子, 中村 充浩, 桑原 教彰, 緒方 大樹, 太田 順. (2022). 車椅子移乗動作における患者の安全性を評価するための患者ロボットシステムの開発. サービス学会第 10 回国内大会講演論文集, A-2-1-01.

姿勢フィードバックトレーニングが メンタルヘルスに及ぼす影響の解析

現代社会において、メンタルヘルスをいかに維持するかは重要な課題である。有酸素運動や筋力トレーニング、またヨガ等の運動は、メンタルヘルスの維持・増進に効果的である可能性が示されている。しかしながら、そのような運動は、特殊な設備や能力を必要とせずに、誰もが日常生活の中で容易に行えるとは限らない。

そこで我々は、日常的な動作のひとつである、立位姿勢の維持に注目している。メンタルヘルスの状態が姿勢やその動搖に現れることは知られており、また立位姿勢維持に寄与する器官が形成する身体所有感は、メンタルヘルスと相互に影響し合うと考えられている。我々は、若年健常者に、フォースプレートの上に立ち、モニタ上に表示された足圧中心の位置を指示されたターゲット内におさめるような姿勢フィードバックトレーニングを行わせた[1]。その結果、トレーニング群は、トレーニング直後の計算課題中の心拍指標でよりリラックスした状態を示したほか、2週間のトレーニング期間の間で、抑うつ・不安等を評価する質問紙調査で、より良い値を示した。これらは、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・増進に寄与する可能性を示すものである。今後は実験参加者を増やしメンタルヘルスへの影響の機序を調べるほか、より簡便なトレーニング手法の提案を目指す。

Keywords: Postural control, Mental health

References

- [1] 出分 康太郎, 上西 康平, 山本 直樹, 濱谷 尚志, 荒川 大輝, 檜山 聰, 沖村 宅, 寺澤 悠理, 前田 貴記, 太田 順. (2022). 立位バランストレーニングにおける視覚フィードバックがストレスに対する身体反応に及ぼす影響. 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, G105, (pp.574-575). オンライン, 2022年3月15日~17日.

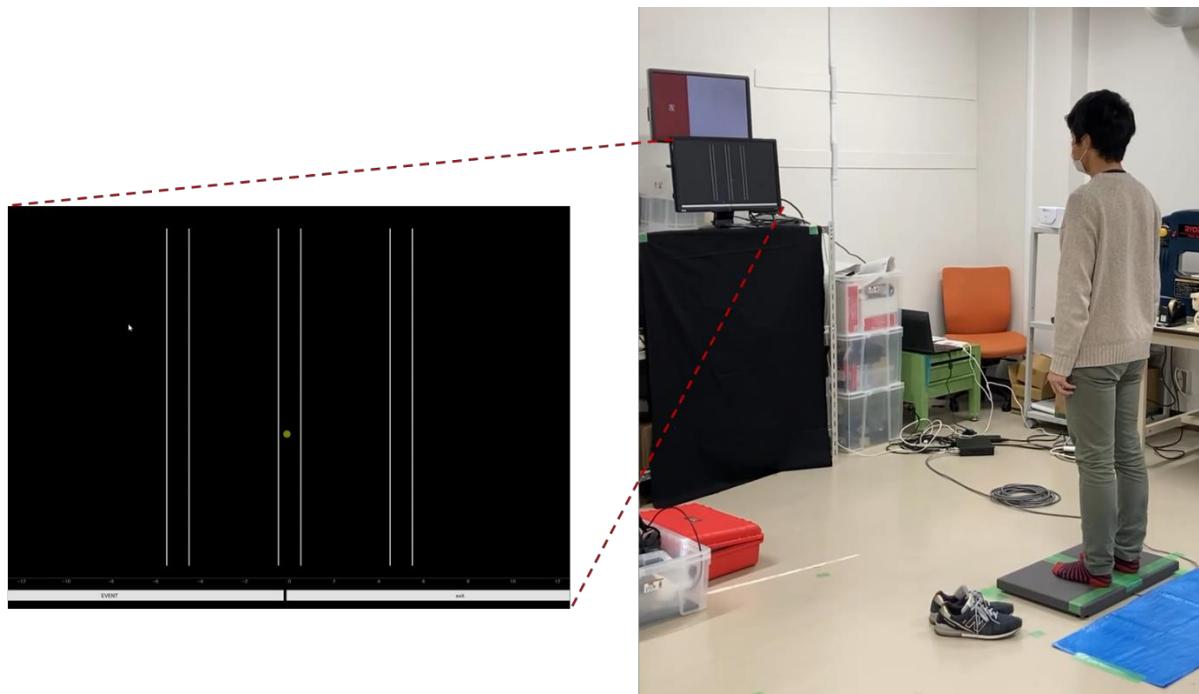


Figure 1. 姿勢フィードバックトレーニングの例。モニタ上に3つの領域と足圧中心の位置が表示され、参加者は指示に従って足圧中心の位置を各領域の内に保持する。