

令和 6 年 4 月 19 日現在

機関番号：17104

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2020～2023

課題番号：19KK0285

研究課題名（和文）やわらかなロボットによる人間との安全な相互作用を基盤とする運動学習

研究課題名（英文）Motor learning based on safe interactions between a human and a soft robot

研究代表者

池本 周平（Ikemoto, Shuhei）

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授

研究者番号：00588353

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000円

渡航期間： 1ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究プロジェクトでは、やわらかく耐久性に優れたロボットプラットフォームを開発し、人間-ロボット間インタラクションのシナリオにおける運動学習に取り組んだ。開始直後からのコロナ禍により、渡航先でのプラットフォームの整備と実験の実施を断念し、研究代表者の所属組織（九州工業大学）で実施する方針に変更した。遠隔で共同研究を実施できる環境構築に力を入れ、大半を遠隔実施したが、2022年に短期の渡航を実施し、密な議論・短期間の集中的な研究実施により、ロボットプラットフォームの特性を活かした運動学習について、複数の成果を報告するに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ソフトロボットは、ロボット自体をやわらかさによって人やモノに安全に触れることができるが、一般に制御が難しい。本研究では、やわらかく耐久性に優れたロボットプラットフォームとしてテンセグリティマニピュレータを開発し、その特徴を活かして問題に対処する方法として、長時間ランダムに動いた経験、人やモノに触れ合った経験から、制御系を学習によって獲得する枠組みに注目した。その結果、テンセグリティマニピュレータの設計・実装に関する新しい知見や、その手先の位置や体の剛性、状態の推定など、多くの機能を実際に学習によって獲得できることなどが明らかになった。

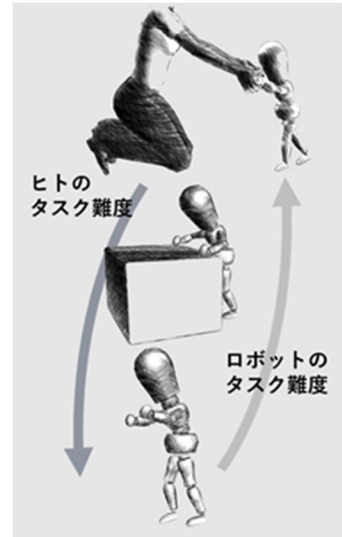
研究成果の概要（英文）：In this research project, we have developed a soft and durable robot platform and tackled the motor learning in a human-robot interaction scenario. Due to the COVID-19 disaster that occurred shortly after the start of the project, we gave up on developing the platform and conducting experiments at the collaboration partner's laboratory, and changed our policy to conducting the experiments at the organization to which the principal investigator belongs (Kyushu Institute of Technology). The majority of the research was conducted remotely, but a short-term trip was conducted in 2022, and through close discussions and intensive research over the visiting term, several academic results were successfully achieved. We have reported on kinematics learning exploiting the advantages of the robot platform as multiple conference proceedings.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ソフトロボット 運動学習 テンセグリティロボット

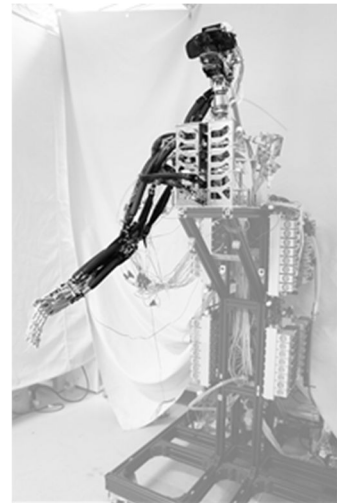
1. 研究開始当初の背景

ロボットと環境の相互作用の様態が複雑になるにつれ、ロボットの制御・学習が困難になる。しかし、ヒトを例とすれば、相互作用の様態が複雑なつかまり立ちや伝い歩きといった運動は、より単純な独り立ちや独り歩きに先んじて達成される。この差は、ロボット自体の制御を基礎として環境との相互作用の実現を目指すロボティクスに対し、生物では、逆に、環境との相互作用を基盤として単独での運動を実現していることを示唆する(右図)。ソフトロボティクスや生物規範ロボティクスでは、このような生きものとロボットの直感的なタスク難易の差にヒントを求めてきた。



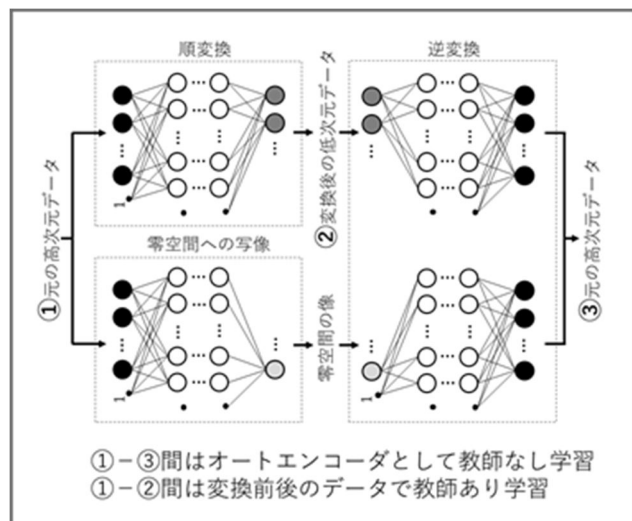
近年の深層学習の発展は、ロボティクスに長足の進歩をもたらしつつあるが、この「ロボット自体の制御を基礎として、環境との相互作用を含む運動の実現を目指す」という枠組みは根強く残っている。ハードウェア的なやわらかさを持つロボットは、この枠組みを逆転させる可能性がある。ハードウェア的なやわらかさによって、ロボットが事前の知識や高度な制御なく環境と安全に相互作用できるのであれば、「利用価値のある環境の複雑さとは？」という視点が生まれる可能性が高い。

本課題の基課題に当たる「基盤研究(B)、物理的拘束を利用する柔軟筋骨格ロボットアームの運動学習、代表：池本周平、2018-04-01-2021-03-31」では、申請当時、ロボットの運動制御・学習において、その目的を明示的にコスト関数・報酬関数で定義するのではなく、物理的な拘束を与えることでタスクを定義するというアイデアに注目していた。右図は、基課題の遂行のために利用した筋骨格ロボットアームの写真である。このロボットアームは、ヒトの上肢を参考にした10自由度の骨格構造(3自由度の肩甲骨に対して7自由度の腕部が繋がる構造)を24本の空気圧人工筋で駆動するロボットアームである。各空気圧人工筋には、それぞれ内圧・張力を計測する圧力センサ・張力センサが備わっており、連続的に流量を調整できる比例制御弁を利用することで、各空気圧人工筋の内圧が目標圧力値へと制御される。また、現在の各空気圧人工筋の内圧・張力情報へのアクセス、および、目標圧力値の指示は、ROSを通じて実行できる。基課題では、当時、筋骨格ロボットアームを開発し、物理的な拘束を与えることがタスク自体の定義につながるという主要なコンセプトの実証に差し掛かっていた。



2. 研究の目的

本課題は、基課題の発想の拡張として、人間を含む複雑な環境を逆に利用するロボットの運動制御・学習に注目するものとして提案・採択された。基課題の着目する物理的な拘束を、やりとりが毎回同じ意味を持つ「意味的な拘束」にまで拡張することで、当該着目点を強化・一般化することを目的とした。ここで「意味的な拘束」とは、たとえば「握手が整理するが毎回異なる動き」や「手先が同じ位置にあるが異なる剛性」のように、着目する部分(タスク)によって限定(拘束)されるということの意味する。研究遂行における具体的な目的としては、渡航先で一連の研究に用いるロボットプラットフォームを開発・整備し、また、拘束を利用する方法を確立する方法として代表者が提案・研究していたオートエンコーダをベースとした順・逆写像とヌル空間を同時にモデル化する手法(右図)を利用・改良することとした。



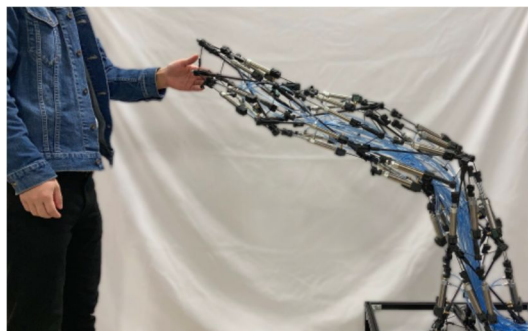
3. 研究の方法

当初計画では、滞在先において代表者が実験のためのロボットプラットフォームを整備し、渡航期間全体を通じて利用することを予定していたが、折しもコロナ禍が始まり、当初計画通りの渡航を断念せざるを得ない状況となった。そこで、ロボットプラットフォームについては研究代表者の所属組織（九州工業大学）において整備し、主に遠隔で研究遂行しながら、渡航可能になったタイミングで短期渡航をし、研究成果をまとめるという計画に変更した。

計画変更に伴い、研究目的についてはロボットプラットフォームの開発の比重を大きくすることとし、筋骨格ロボットアームでは不十分であった駆動の冗長性や耐久性などの向上も狙いながらロボットプラットフォームを整備することとした。一方、学習手法については、研究代表者と受け入れ研究者（アリゾナ州立大学、Prof. Heni Ben Amor）でロボットプラットフォームから得られるデータを共用して個別に進め、議論を重ねることとし、探索的な試みを容易に行えるよう配慮した。

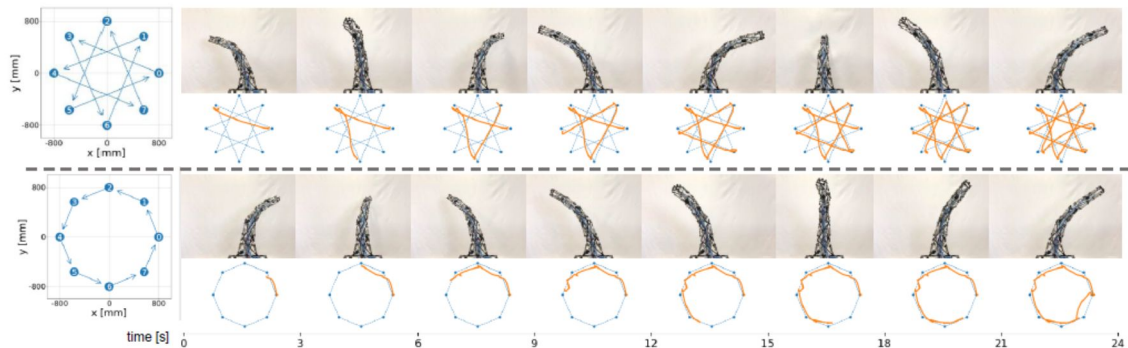
4. 研究成果

右図にロボットプラットフォームとして開発したテンセグリティマニピュレータの写真を示す。先に示した筋骨格ロボットアームは、ヒト上肢の筋骨格構造を模倣した機械的構造を有していた。しかし、ヒトの筋骨格構造は、たとえば、複数の筋肉が擦れ合うように配置されながら摩擦による破損が非常に起きにくいなど、現在の工学では実現不可能な性能を前提とした構造になっているため、単純な模倣をするとハードウェアトラブルが非常に多くなる。そこで、ヒトの筋骨格構造を模倣することは諦め、しかし、リンクが



多くの柔軟なアクチュエータで拮抗・冗長に駆動されるという抽象的特徴だけ突き詰めながら、不要な摩擦や機械的干渉を避けるアプローチに切り替えた。テンセグリティマニピュレータは、テンセグリティと呼ばれる構造を採用している。テンセグリティとは、複数の剛体の空間的な配置が、互いの間に張力を加えることで安定になった構造を指す。その中には、剛体としては棒状のパーツだけで、全てのパーツの間で接触が生じない構造がある。開発したテンセグリティマニピュレータでは、その構造を採用することで40本というアクチュエータを組み込みながら摩擦や機械的干渉を極力避けた。このロボットプラットフォーム開発については、2022年度のIEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2022)で発表するなど、複数の研究成果に繋がった[Y. Yoshimitsu et al. 2022]。

耐久性が高いロボットプラットフォームが実現されたことにより、長時間のデータ収集と共有が可能になった。それにより、コロナ禍終息後の2022年度に実施した短期渡航で成果を得るための準備を着実に進めることができた。短期渡航で得られた成果は、共著論文としてIROS 2023に2件[Y. Yoshimitsu et al. 2023, X. Liu et al. 2023]、Conference on Robot Learning 2023 (CoRL 2023) [X. Liu et al. 2023]に1件受理されたなど多くの成果に繋がった。下図に、先に挙げたオートエンコーダをベースとした手法で順・逆運動学を学習した結果を示す。



与えられた目標位置に手先を移動させながら、ヌル空間に相当するパラメータを変更することで剛性が変化することを示すなど、本研究課題の主要な着目を実証することができた。また、最終年度である2023年度は、当該成果の発表会場において集中的にミーティングを行ったことで、この結果を改善する枠組みについてIROS 2024にも共著論文を投稿するなど、今後につながる成果もあがった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshimitsu Yuhei, Ikemoto Shuhei	4. 巻 35
2. 論文標題 Development of Tensegrity Manipulator Driven by 40 Pneumatic Cylinders for Investigating Functionality in Hyper-Redundant Musculoskeletal Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1366 ~ 1373
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2023.p1366	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuhei Yoshimitu, Kenta Tsukamoto, and Shuhei Ikemoto	4. 巻 27
2. 論文標題 Posture control of tensegrity manipulator based on kinematic model using kernel ridge regression	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 684-690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-022-00789-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ikemoto Shuhei, Tsukamoto Kenta, Yoshimitsu Yuhei	4. 巻 8
2. 論文標題 Development of a Modular Tensegrity Robot Arm Capable of Continuous Bending	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2021.774253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Xiao Liu, Shuhei Ikemoto, Yuhei Yoshimitsu, Heni Ben Amor
2. 発表標題 Learning Soft Robot Dynamics using Differentiable Kalman Filters and Spatio-Temporal Embeddings
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuhei Yoshimitu, Takayuki Osa, Shuhei Ikemoto
2. 発表標題 Forward/Inverse Kinematics Modeling for Tensegrity Manipulator based on Goal-conditioned Variational Autoencoder
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xiao Liu, Yifan Zhou, Shuhei Ikemoto, Heni Ben Amor
2. 発表標題 α -MDF: An Attention-based Multimodal Differentiable Filter for Robot State Estimation
3. 学会等名 Conference on Robot Learning (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuhei Yoshimitu, Kenta Tsukamoto, and Shuhei Ikemoto
2. 発表標題 Development of Pneumatically Driven Tensegrity Manipulator without Mechanical Springs
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉満悠平, 池本周平
2. 発表標題 40 個の空気圧アクチュエータで駆動する冗長テンセグリティロボットアーム
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuhei Yoshimitsu, Shuhei Ikemoto
2. 発表標題 Posture Control of Tensegrity Robot Arm based on Kinematic Model using Kernel Ridge Regression
3. 学会等名 The 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Kenta Tsukamoto, Yuhei Yoshimitsu, Shuhei Ikemoto
2. 発表標題 Tensegrity manipulator redundantly driven by 20 pneumatic cylinders
3. 学会等名 The 9th International Joint Symposium on Applied Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Yusuke Sato, Kosuke Goto, Shuhei Ikemoto
2. 発表標題 Low-cost tactile sensing technology using conductive sponges
3. 学会等名 The 9th International Joint Symposium on Applied Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 塚本健太, 吉満悠平, 池本周平
2. 発表標題 テンセグリティ構造を利用した連続体マニピュレータ
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 佐藤祐亮, 後藤孝輔, 池本周平
2. 発表標題 ポーラスCNTs-PDMSを用いた触覚センシング
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年～2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
ベン アモル ヘニ (Ben Amor Heni)	アリゾナ州立大学・School of Computing and Augmented Intelligence, Ira A. Fulton Schools of Engineering・Associate Professor	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Arizona State University		