

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01410

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Motor Learning for Flexible Musculoskeletal Robot Arms using Physical Constraints

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) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、空気圧人工筋で駆動される柔軟な筋骨格ロボットアームを用い、学習初期において物理的な拘束下で試行錯誤を行った方が、最終的に拘束が無い状態で同様の運動を実現することが容易になるという実例を示すことを目標としている。具体的な例として、柔軟なロボットアームにクランクを把持させて回転させる運動に注目し、クランクを回転させることができる制御入力の探索問題に取り組んだ。その結果、筋骨格ロボットアームの柔軟性により、手先に与えられたクランクの物理的な拘束が自ずと運動に表れ、非常に簡単な方法であってもこの探索問題を解くことができることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、外から押されることで姿勢が変化する柔軟なロボットアームを用いる場合、学習初期において運動が制限されるような物理的拘束下で試行錯誤を行った方が、最終的に拘束が無い状態で同様の運動を実現することが容易になるという実例を示すことを目標とした。実際に空気圧で駆動される柔軟なロボットアームを開発し、クランクを回すというタスクを設定して検証したところ、クランクを回転させることができる制御入力を探索する問題において、ロボットアームの柔軟性により、手先に与えられたクランクの物理的な拘束が自ずと運動に表れることが確認され、非常に簡単な方法であっても問題を解くことができることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we employ flexible musculoskeletal robot arms driven by pneumatic artificial muscles, and aim to show that trial and error under physical constraints in the early stage of learning makes it easier to achieve similar motions in the final stage without constraints. As a specific example, we focused on the motion of a flexible robot arm grasping a crank and rotating it, and addressed the problem of finding a control input that can make the crank rotate. As a result, it was found that due to the flexibility of the musculoskeletal robot arm, the physical constraint of the crank given to the hand was naturally reflected in the motion, and the search problem could be solved even in a very simple way.

研究分野：生物規範ロボティクス

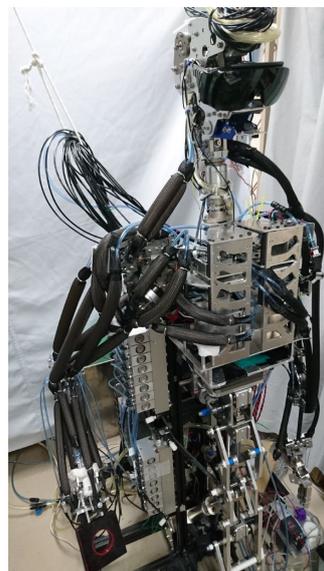
キーワード：筋骨格ロボット 空気圧人工筋

## 1. 研究開始当初の背景

運動学・動力学的解析的モデルに基づくロボット制御の発展は、ロボットに生物を超える運動速度・正確性を与えるに至った。そして、ロボティクスにおける目下の課題は、環境との物理的な相互作用を含むロコモーションやマニピュレーション、人間との協調作業などへと移っている。そのような環境との相互作用を含むタスクがロボット単体の正確な制御よりも困難であることは、対象の解析的なモデル化を前提とする方法論において自然であるだろう。しかし、それとは対照的に、生物においては、誕生直後から環境との相互作用を求められ、運動速度・正確性は個体の成熟に伴って向上する。例えば、ヒトにおいて歩行は、つかまり立ち、伝い歩きよりも高度なタスクであるが、ロボットにとっては逆である。すなわち、生物においては、「環境との相互作用」の方が低次の機能であり、その上に単体での運動制御が実現されていると考えることができる。

## 2. 研究の目的

ヒトの運動学習を考えると、自転車の補助輪や箸トレーニングの補助具など、学習の初期に運動を物理的に拘束することで学習を円滑にする例が多く見られ、環境との相互作用が精緻な運動学習・制御の基盤になっていることが良く分かる。本研究では、この物理的拘束を利用する学習の枠組みをロボットの運動学習でも実現することを目指す。環境との相互作用を特別な制御なく、ハードウェアレベルの低次の機能として実現できるロボットは、この研究の遂行に不可欠である。この要求に対し、本研究では、空気圧人工筋で駆動される柔軟な筋骨格ロボットアームを用いる。右図は、本研究で開発した 11 自由度筋骨格ロボットアームである。空気圧人工筋は、素材自体の柔軟性や作動流体である空気の圧縮性により、駆動する関節にハードウェアレベルで柔軟性を与える。また、ヒトの筋骨格系を模倣した構造は、ヒトに近いハードウェアレベルでの関節間の連関の再現に繋がる。



このような生物の身体設計が生み出す機能の再現を目指したロボット開発は、主に、生物規範ロボティクスの分野で広く行われてきた。しかし、盛んな研究・開発の一方で、それらのロボットの解析的なモデル化が困難であることから、制御システム的设计は未だ発見的に行われることが多い。本研究は、柔軟な生物規範ロボットの新たな利点として、学習時に好ましい物理的拘束を自由に与えられることを提起し、データ駆動型の制御システム的设计への端緒を与える試みである。また、このような複雑な生物規範型ロボットに対してもモデル駆動型の制御システム设计を可能にするような手法の提案も併せて目指すこととした。

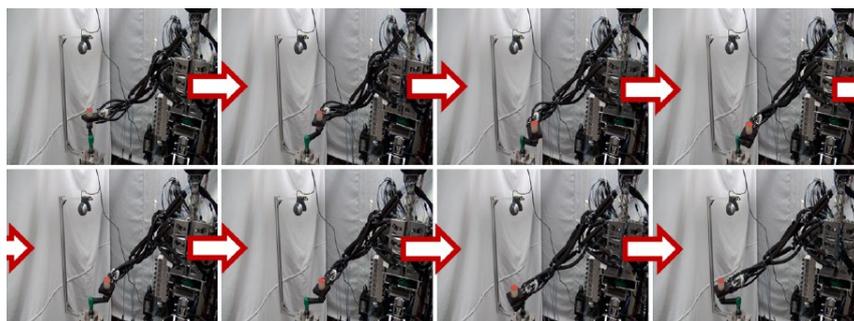
## 3. 研究の方法

本研究の遂行は、主に、研究代表者の池本を中心とした大学院生数名のグループで行い、研究分担者の細田は、空気圧人工筋で駆動される筋骨格ロボットアームに関する豊富な経験と実績に基づき、密な連携・議論によって円滑な計画実行を補佐することとした。

初年度では、空気圧人工筋で駆動される柔軟な筋骨格ロボットアームを研究プラットフォームとして用いるためのハードウェア開発・改善に取り組み、以降の研究環境を整えることとした。

次年度では、学習初期において物理的な拘束下で試行錯誤を行った方が、最終的に拘束が無い状態で同様の運動を実現することが容易になるという実例を示すことを目指した。具体的には、先に示した空気圧人工筋駆動の筋骨格ロボットアームによるクランク回し(下図)を例とし、手先を円軌道で動かす

タスクにおいて、最初から空中で軌道を描く試行錯誤をするのではなく、学習初期での目標の円軌道上手先を拘束するクランクを持たせ、その拘束下で試行錯誤する方が、結果として容易に問題が解かれると



いう実例を示すこととした。

最終年度では、それまでの結果を受け、データ駆動型の制御システム設計の方法をまとめることを目指した。例えば、特定の運動を意味しない一般的な形の損失・報酬関数によって、与えた物理的拘束に応じた運動が獲得できるか検証することを目指した。

以上のように、研究期間を通じ、物理的拘束を与えてタスクを暗に定義するアプローチの創出を目指した。

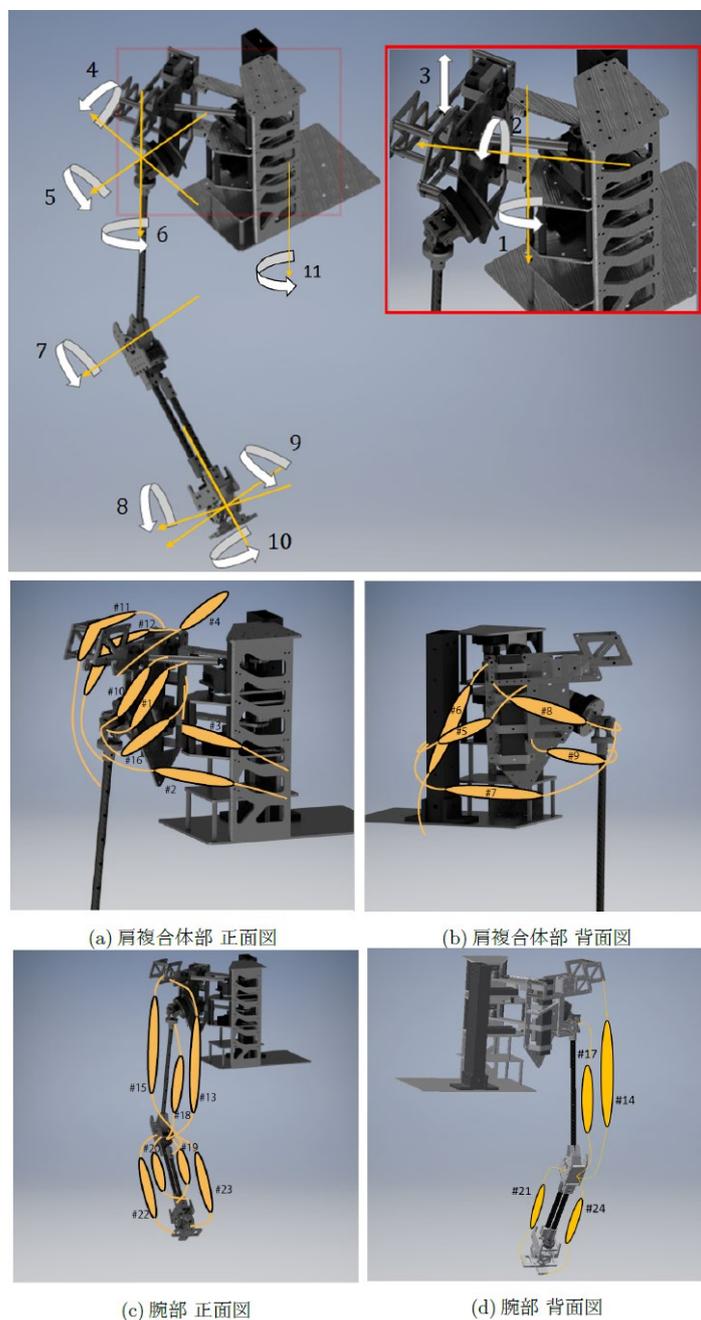
#### 4. 研究成果

前に示した空気圧人工筋で駆動される筋骨格ロボットアームの自由度配置、および、空気圧人工筋の配置も式を右に示す。初年度はこれらの機械的構造の改善に取り組むと共に、ROS を利用したロボットの操作が行えるように環境整備を行った。当該結果は、[Hitzmann et al. 2018]として、成果報告を行っている。

当該ロボットを研究プラットフォームとして用いることで、データ駆動型の制御に関する複数の研究を遂行することが可能になった。[Campbell et al. 2019], [Liu et al. 2019], [Masuda et al. 2019]では、いずれも当該ロボットを用いて収集されたデータを用いたデータ駆動型の制御・運動計画に関する研究である。

加えて、このような複雑な生物規範ロボットをモデル駆動型の枠組みで取り扱うための学習制御手法に関する研究にも取り組み、[Duan et al. 2018], [Takahara et al. 2018], [Ikemoto et al. 2021]などの成果報告を行った。

研究代表者の池本は、2019年度より、大阪大学から九州工業大学へと異動し、また、2020年度からはコロナウィルス感染状況の悪化によって、開発した筋骨格ロボットアームを用いた実験の実施が難しく状況が継続することとなった。その結果、前述のように、多くの研究成果を報告できた一方、先に示したクランク回しを具体例とした研究成果については、未だ十分な結果を得られておらず、成果報告に至っていない。よって、計画全体として総合的に見れば当初予定通り以上に成功裏に遂行できたと言えるが、一部、当初予定の研究実施、成果報告に至らなかった点があり、今後、継続して研究に取り組むことを予定している。



(a) 肩複合体部 正面図

(b) 肩複合体部 背面図

(c) 腕部 正面図

(d) 腕部 背面図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hitzmann Arne, Masuda Hiroaki, Ikemoto Shuhei, Hosoda Koh	4. 巻 32
2. 論文標題 Anthropomorphic musculoskeletal 10 degrees-of-freedom robot arm driven by pneumatic artificial muscles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 865 ~ 878
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2018.1494040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikemoto Shuhei, Takahara Kazuma, Kumi Taiki, Hosoda Koh	4. 巻 2
2. 論文標題 Neural Model Extraction for Model-Based Control of a Neural Network Forward Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SN Computer Science	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) 10.1007/s42979-021-00456-4	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Joseph Campbell, Arne Hitzmann, Simon Stepputtis, Shuhei Ikemoto, Koh Hosoda, Heni Ben Amor
2. 発表標題 Learning Interactive Behaviors for Musculoskeletal Robots Using Bayesian Interaction Primitives
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zinan Liu, Arne Hitzmann, Shuhei Ikemoto, Svenja Stark, Jan Peters, Koh Hosoda
2. 発表標題 Local Online Motor Babbling: Learning Motor Abundance of a Musculoskeletal Robot Arm
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Masuda, Arne Hitzmann, Koh Hosoda, Shuhei Ikemoto
2. 発表標題 Common Dimensional Autoencoder for Learning Redundant Muscle-Posture Mappings of Complex Musculoskeletal Robots
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池本周平, 組泰樹, 細田耕
2. 発表標題 状態方程式を近似するNNからの数式モデル抽出に基づくモデル予測制御
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Duan Yu, Shuhei Ikemoto, Koh Hosoda
2. 発表標題 Optimal Feedback Control based on Analytical Linear Models extracted from Neural Networks trained for Nonlinear Systems
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hiroaki Masuda, Shuhei Ikemoto, Koh Hosoda
2. 発表標題 Common Dimensional Autoencoder for Identifying Agonist-Antagonist Muscle Pairs in Musculoskeletal Robots
3. 学会等名 Intelligent Autonomous Systems 15 (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Kazuma Takahara, Shuhei Ikemoto, Koh Hosoda
2. 発表標題 Reconstructing State-space from Movie using Convolutional Autoencoder for Robot Control
3. 学会等名 Intelligent Autonomous Systems 15 (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019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
研究分担者	細田 耕 (Hosoda Koh)  (10252610)	大阪大学・基礎工学研究科・教授  (14401)	

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
---------	---------