

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19815

研究課題名（和文）100以上のアクチュエータを備えた超冗長マニピュレータの実現

研究課題名（英文）Realization of a hyper-redundant manipulator with more than 100 actuators

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、可能な限り多くのアクチュエータで駆動されるロボットの設計方法、および、その制御方法の提案に取り組んだ。具体的に、前者としては、テンセグリティを利用することで、アクチュエータ数を増やしても機械的干渉や摩擦の影響を受けない設計を提案した。実際に、その設計方法を採用し、40本の空気圧シリンダで駆動される冗長マニピュレータを開発し、その設計方法の有用性を示した。また、後者としては、オートエンコーダを利用した順・逆運動学モデリング手法を提案した。開発した冗長マニピュレータを用い、長時間に及ぶランダム試行のデータを集めることで、実際にそのロボットの運動学がモデル化できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生物の身体はロボットよりもやわらかく、多くの関節自由度を持ち、さらに多くの筋肉で動される。このロボットと生物の間にある「柔軟性の差」と「冗長性の差」のうち、「柔軟性の差」については、ロボット全体を柔軟にするなどの挑戦が行われ、新しい分野として「ソフトロボティクス」が生まれた。一方、「冗長性の差」については、関節やアクチュエータを可能な限り多くするなどの挑戦がなかった。本研究は、冗長性の追求という新しい挑戦に取り組んだ。ロボットが汎用的になるほど、そのロボットは多くの自由度を備えなければならない。本研究は、その備えとして方法論を整備するものであり、萌芽的研究としての異議がある。

研究成果の概要（英文）：This study proposed a design and control for a robot driven by as many actuators as possible. As the design method, specifically, we proposed a mechanical design that minimizes mechanical interference and friction even if the number of actuators is increased by using tensegrity. The validity was confirmed by developing a redundant manipulator driven by 40 pneumatic cylinders using this design. As the control method, we proposed a forward and inverse kinematics modeling method using an autoencoder type network. Applying this method to the developed redundant manipulator, we successfully confirmed/demonstrated the validity of the design and control methods.

研究分野：ロボティクス

キーワード：テンセグリティロボット ソフトロボット 冗長性

1. 研究開始当初の背景

生物の身体はロボットよりもやわらかく、多くの関節自由度を持ち、さらに多くの筋肉でそれらの関節を駆動する。この事実は、「柔軟性の差」と「冗長性の差」という2つの差が生物とロボットの間にあることを示している。このうち「柔軟性の差」については、ロボット全体を柔軟にするなどの挑戦が行われてきた。その結果、柔軟であることの利点のみを積極的に追及する分野「ソフトロボティクス」が生まれた。一方、「冗長性の差」については、関節やアクチュエータを可能な限り多くするなどの挑戦は行われていない。現状、冗長であることの利点はあくまでも欠点とのバランスで語られるが、ここに「冗長であればあるほど良い」というような新しい価値観に基づく分野が生まれる可能性がある。

2. 研究の目的

上記の可能性を模索するには、「冗長さ」の利点・欠点の両方を考慮しつつも、それに注目する学術的な面白さを強く主張する必要がある。本研究では、冗長なロボットをシンプルなルールで機械的に設計でき、故障のリスクを低く抑えられるような設計論を示すことで、「冗長さ」の欠点を小さく・利点を大きくし、アクチュエータ数100という目標を達成することを目指す。そして、開発したマニピュレータを研究プラットフォームとして使い、高次元の冗長自由度に物理的な意味を割り当てる方法の提案を目指す。本研究の意義は、このようなプロセスを辿ることによって、ロボティクスにおいて「冗長さ」を追求する学術的な研究領域創出の可能性を示し、分野形成の流れを作り出すことにある。

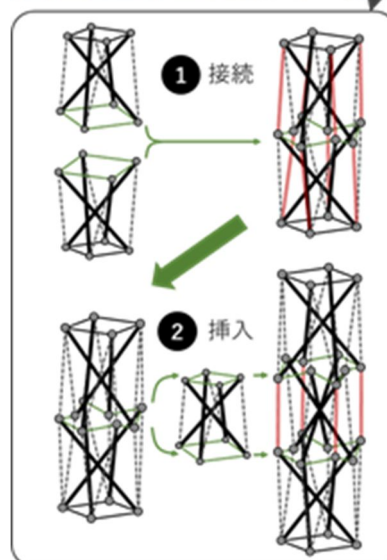
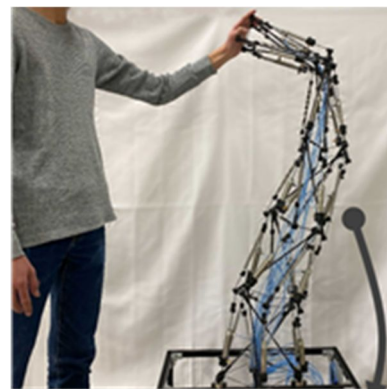
3. 研究の方法

100以上の独立なアクチュエータを備えた柔軟マニピュレータを実現するために解決すべき主要な課題は、

1. アクチュエータ数に応じたスケーラブルな設計であり、特定のアクチュエータ数に限定されないこと。
2. 摩擦や機械的干渉などが抑えられ、研究プラットフォームとして実際に運用できる程度の耐久性・信頼性を備えること。
3. 重量増加が抑えられ、研究プラットフォームとして実際に運用できる運動性能を備えること。

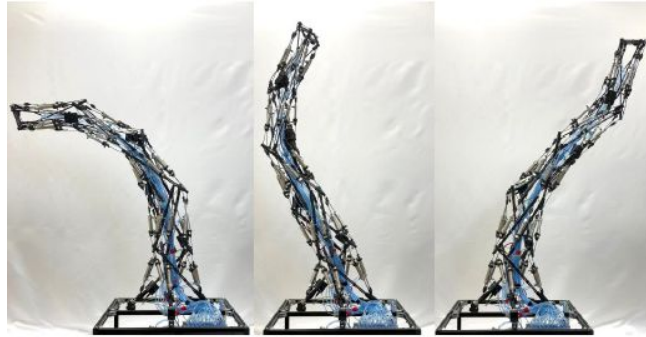
これらの課題を解決するため、本研究では、テンセグリティとよばれる構造を利用する。テンセグリティとは、複数の剛体の配置が、それらの間に働く張力によって安定化した構造を指す。特に、棒材とケーブル材から成り、棒材同士の接続がないテンセグリティは、意匠や強度/重量比に優れた構造として良く知られている。この構造は、全体に柔軟性を与えることが容易で、剛体パーツ同士の接触も避けられるという本課題にとって好ましい特徴を持つ。右図に、当初、応募者が開発に取り組んでいるテンセグリティを利用した柔軟マニピュレータ、および、単純なテンセグリティの結合によってマニピュレータの形状のテンセグリティを得る方法の模式図を示す。図のように、この設計は、関節自由度とアクチュエータ数を段階的に増やすことができるスケーラブルな設計方法であり、現状20のアクチュエータ数から破綻なく100まで増加させることも決して実現困難ではないと考えられた。そこで、本設計方法を発展させることで、ロボットプラットフォームを実現するという目的の達成を目指した。

冗長自由度が極端に多いことで可能になる冗長性の利用方法を提案するには、冗長性を表す空間の表現を獲得し、それを解析・可視化することが求められる。応募者はこれまで、オートエンコーダの利用により、運動学の直交補空間(冗長自由度の空間)の表現を得る手法を提案しており、実ロボットを使って妥当性を検証・報告した。この手法を開発するテンセグリティマニピュレータに適用し、タスク空間に直交する空間(ヌル空間)に具体的な意味を見出すことで、極端に多い冗長自由度の利用方法が見出すことを目指した。

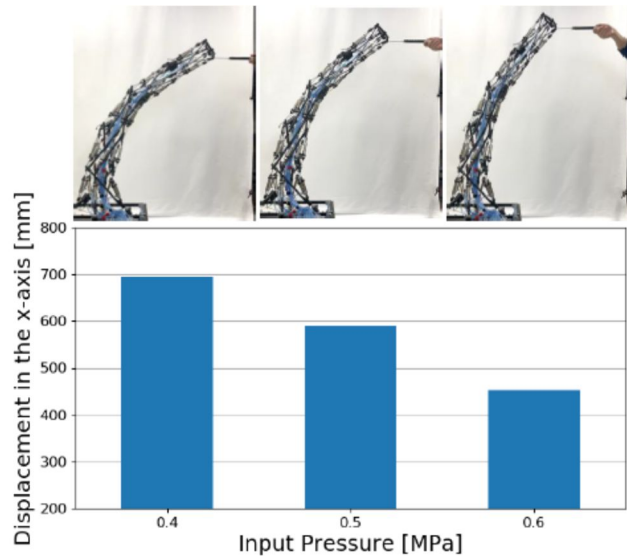


4. 研究成果

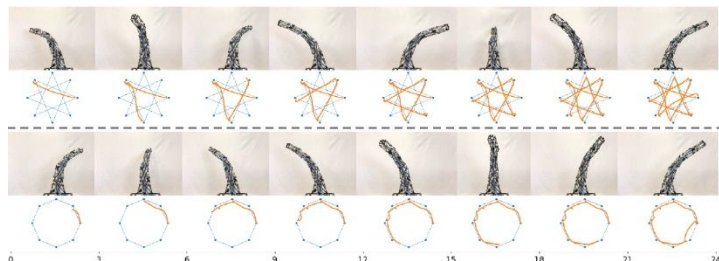
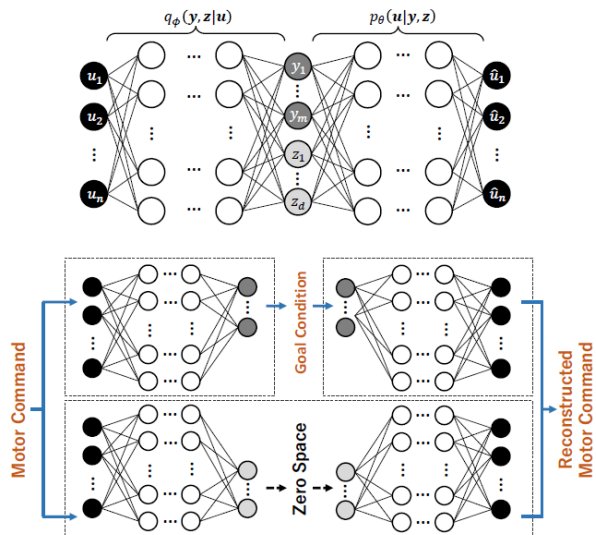
右に開発したテンセグリティマニピュレータと、とりえる姿勢の例を示す。このテンセグリティマニピュレータは、40本の空気圧シリンダで駆動されており、それぞれの空気圧シリンダの内圧は独立した圧力制御弁によって制御される。テンセグリティを利用したことで、アクチュエータ同士、棒同士、アクチュエータと棒は、右図のような形状を撮った場合でも干渉することが無い。また、空気圧で駆動されることから、空気の圧縮性により、外力に対して柔軟に振る舞うことができる。



40本のアクチュエータには筋骨格構造のような拮抗関係も存在する。たとえば、左右側面にあるアクチュエータは、収縮に伴いマニピュレータを左右に湾曲させるが、それらを両方とも収縮させれば、身体にグッと力を入れるようにして構造全体が硬くなる。右図に、実際に剛性が変化することを表す結果を示す。全てのアクチュエータの内圧を同じ圧力にした直立姿勢であっても、水平方向に一定力を掛けた時の変形の度合いが異なることが現れている。つまり、同じ姿勢で異なる剛性を実現できるということが確認できる。ロボットプラットフォーム開発に関する一連の結果は、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]。



冗長性を利用する方法としては、このテンセグリティマニピュレータの順・逆運動学を、解のバリエーションを表すヌル空間も含めてモデル化するネットワーク（右図）を提案した。このネットワークは、オートエンコーダ型になっており、入出力層はロボットのコンフィギュレーション空間に対応する。その潜在空間となる中間層では、一部がタスク空間となるよう教師データを与えて訓練する。すると、残る中間層は、「コンフィギュレーション空間からタスク空間への写像で失われるが、タスク空間からコンフィギュレーション空間への写像で解のバリエーションを記述するのに必要な情報」を担う必要が生じる。これはヌル空間が担うべき役割であることから、これにより、ヌル空間込みでの運動学モデリングが実現できる。本手法を実際にテンセグリティマニピュレータに適用し、手先位置の制御、および、その解のバリエーションである剛性の変化を作り出すことができた。



5. 主な発表論文等

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

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Xiao Liu, Yifan Zhou, Shuhei Ikemoto, and Heni Ben Amor
2. 発表標題 \$\alpha\$-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, Takayuki Osa, and 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, Shuhei Ikemoto, Yuhei Yoshimitsu, and 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 Kazuki Wada, Yuhei Yoshimitsu, and Shuhei Ikemoto
2. 発表標題 Data-driven Posture Control for Tensegrity Manipulator based on Accelerometer Measurements
3. 学会等名 International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村井和弥, 池本周平
2. 発表標題 ストラットの姿勢を既知とするテンセグリティの形状推定手法
3. 学会等名 FANシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村井和弥, 池本周平
2. 発表標題 ストラットの姿勢情報に基づくテンセグリティの形状推定
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉満悠平, 池本周平
2. 発表標題 40本の空気圧シリンダで駆動されるテンセグリティマニピュレータの * 順・逆運動学モデル学習
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuhei Yoshimitsu 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
4. 発表年 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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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			