

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K17835

研究課題名（和文）筋骨格構造のメカニズムに基づく運動生成法の構築

研究課題名（英文）Motion Producing Method based on the Mechanism of Musculoskeletal Structure

研究代表者

松谷 祐希（MATSUTANI, Yuki）

近畿大学・工学部・講師

研究者番号：80757120

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、人間の身体構造である筋骨格構造のメカニズムを解析し、筋骨格構造特有のメカニズムと巧みな運動の関係性を明らかにすることである。本研究では、筋内力フィードフォワード制御法における任意ベクトルを利用した手先軌道の整形法を提案し、その有効性をシミュレーション結果より示した。また、プリーモデルと非プリーモデルの特徴を併せ持つ関節構造を提案した。さらに、リンクの物理パラメータを変更可能な受動歩行ロボットを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、筋骨格構造特有のメカニズムを利用することで、複雑な実時間計算や正確な物理パラメータなどを必要とせず、筋骨格型ロボットで巧みな運動を実現することが可能であり、筋骨格型ロボットの実用化に向けた必要な技術である。また、本研究の成果は筋骨格型ロボットの基盤技術となり、実現したい運動に適した筋骨格構造の設計法の確立や、筋骨格構造特有のメカニズムに基づいた運動生成法の確立に役立てることができ

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to deepen the understanding of the relationship between the mechanism of the musculoskeletal structure and skillful movements by analyzing this mechanism. Herein, an end-point trajectory shaping method using arbitrary vector for a muscular internal force feedforward controller is proposed and its effectiveness is confirmed through simulation. Furthermore, a new joint structure is proposed wherein the moment arms are changed according to a joint angle and its effectiveness is confirmed by experiment. Also, a passive walking robot with changeable physical parameters of links is proposed.

研究分野：ロボット工学

キーワード：筋骨格構造 受動歩行

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

人間は巧みな運動を容易に実現することができる。その理由の一つとして、人間の身体構造である筋骨格構造が関係していると考えられている。筋骨格構造は関節・骨格が筋肉に覆われた構造となっており、筋肉によって関節が駆動する。また、関節を伸ばした姿勢から関節を曲げると、筋肉は関節・骨格の表面を沿って変化する。このとき、筋肉のモーメントアームも姿勢に応じて変化しており、力学的な観点から見ると、筋骨格構造は姿勢に応じて内部が変化する構造であると言える。さらに、筋肉の拮抗駆動や二関節筋など、筋骨格構造は従来の産業用ロボットとは異なる特有のメカニズムを有している。

このような筋骨格構造を模倣したロボットの研究は盛んに行われており、多くの研究では関節に配置されたプーリに筋肉が巻き付くようにモデル化した筋骨格構造(プーリモデル)を対象としている。プーリモデルでは、筋肉のモーメントアームはプーリの半径となり、姿勢が変化しても筋肉のモーメントアームは変化しない。一方、申請者はプーリを用いずに、筋骨格構造をモデル化した非プーリモデルを対象に研究を行ってきた。非プーリモデルでは、筋肉を骨格に直接取り付けており、姿勢に応じて筋肉のモーメントアームを変化させることができる。先行研究では、非プーリモデルを対象に筋内力フィードフォワード(FF)制御法を提案しており、筋骨格構造と筋内力から導出するポテンシャル場に着目し、運動の収束性をポテンシャル場の安定平衡点によって力学的に説明できることを示した。しかしながら、筋骨格構造のメカニズムと運動性能の関係性は明らかになっておらず、どのような筋骨格構造が実現したい運動に適しているのかは不明である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、人間の身体構造である筋骨格構造のメカニズムを解析し、筋骨格構造特有のメカニズムと巧みな運動の関係性を明らかにすることである。本研究では、筋肉の配置と筋肉のモーメントアームに着目し、筋骨格構造のメカニズムを解析することで、筋肉の配置などによって実現しやすい運動を明らかにし、巧みな運動を容易に実現できる、筋骨格構造に基づいた運動生成法を確立する。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的に対して、以下の課題を実施する。

#### (1) 安定な筋骨格構造に基づいた位置制御法の最適化

先行研究では、筋内力フィードフォワード制御法の収束条件を、筋内力が生成するポテンシャル場が目標位置で安定平衡点となることと、筋内力の正の値を引っ張り方向の力と定義すると、すべての筋肉で正の値となることとしていた。筋骨格型ロボットでは、筋冗長性の影響により、筋内力を一意に決定することができない不良設定問題を有しており、筋内力の値は任意ベクトルの値によって決定される。一方、令和1,2年度の科研費若手研究の研究過程で、筋骨格構造によってポテンシャル場の条件を満たせば、任意ベクトルの値によって筋内力の条件を満たさなくても、運動が目標位置に収束できる可能性が明らかになった。つまり、ポテンシャル場の条件を満たした安定な筋骨格構造を設計することができれば、運動中に筋力を発揮しない筋肉が存在していても位置制御することが可能である。そこで、筋内力フィードフォワード制御法を省エネルギー化することができる任意ベクトルの決定法を提案する。

#### (2) モーメントアームを関節角度に応じて変化させることが可能な関節構造の構築

先行研究で制御対象としていた筋骨格構造は、筋肉を関節周辺の骨格に固定した非プーリモデルでモデル化していた。非プーリモデルを用いることで、関節角度に応じて筋肉のモーメントアームが変化し、目標位置方向に関節トルクを発生させることができる。しかし、実験機では関節部分に組立誤差が生じやすく、その影響で手先の収束位置に誤差が生じてしまうことがあった。また、非プーリモデルでは筋肉が直線的に変化するが、実際の筋骨格構造では、プーリモデルのように筋肉が関節の表面を沿うように変化する。そこで、実験機を対象とした筋内力フィードフォワード制御法で高精度な位置決めを実現するため、プーリモデルと非プーリモデルの特徴を併せ持った関節構造を構築する。

#### (3) 物理パラメータが可変可能な受動歩行ロボットの構築

様々な応用を実験的に検証することができるように、質量や慣性モーメント等のリンクパラメータを変更することが可能な受動歩行ロボットを構築する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 安定な筋骨格構造に基づいた位置制御法の最適化

本研究では、筋内力フィードフォワード制御法における任意ベクトルを利用した手先軌道の整形法を提案した。提案手法は、目的関数を最小化するように任意ベクトルを最適化する。シミュレーション結果より、提案手法が目標軌道を規範として手先軌道を整形できることを示した。

##### (2) モーメントアームを関節角度に応じて変化させることが可能な関節構造の構築

筋骨格システムの実験機を対象とした筋内力フィードフォワード位置制御法で、高精度な位置決めを実現するため、プリーモデルと非プリーモデルの特徴を併せ持った関節機構を構築した。まず、非プリーモデルにおける関節角度と筋肉のモーメントアームの関係を数式化し、その数式を基に関節角度に応じてモーメントアームが変化する関節構造を設計した。その関節構造を図1に示す。図1に示す非円形プリーの関節構造は3Dプリンタで製作しており、外周の部分に筋肉に相当するワイヤが巻き付くことで、モーメントアームを変化させることが可能である。次に、構築した関節構造を有する筋骨格システムを製作し、基礎実験を行った。その筋骨格システムを図2に示す。図3に示す基礎実験の結果より、運動がセンサレスで目標位置に収束することを確認した。また、従来の筋骨格システムと同じ制御入力で振動が生じたことより、提案する関節構造を利用することで実験機の摩擦が減少できることが示唆された。

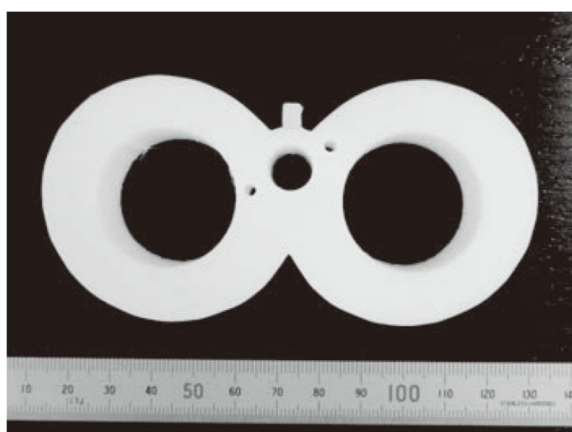


図1 非円形プリーの関節構造

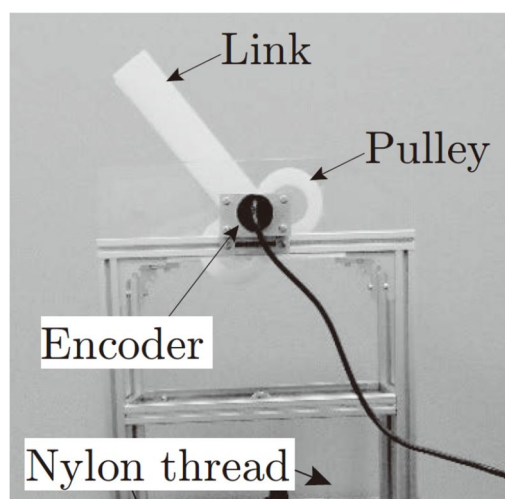


図2 構築した関節構造を有する筋骨格システム

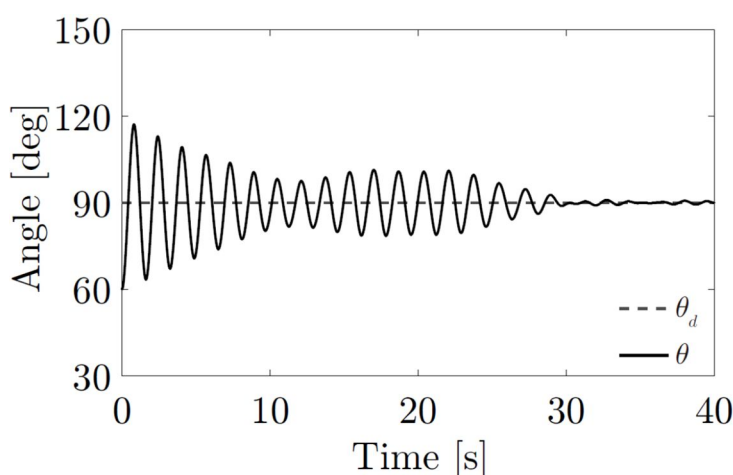


図3 構築した関節構造を有する筋骨格システムの実験結果

##### (3) 物理パラメータが可変可能な受動歩行ロボットの構築

リンクの物理パラメータを変更可能な受動歩行ロボットを提案し、実験を行った。提案するロボットは、おもりパーツをブロックのように付け替えることが可能であり、質量、重心位置、慣性モーメントを変更することができる。この実験結果より、提案するロボットの有効性が示唆された。しかし、リンクパラメータ変更後に歩行する条件を試行錯誤的に求めることは現実的ではなく、このモデルのシミュレーションとの関係が重要であることが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 1件）

1. 著者名 Matsutani Yuki, Tahara Kenji, Kino Hitoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Simulation Evaluation for Methods Used to Determine Muscular Internal Force Based on Joint Stiffness Using Muscular Internal Force Feedforward Controller for Musculoskeletal System	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.2021.699792	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松谷祐希、田原健二、木野仁
2. 発表標題 角度に応じてモーメントアームが変化する関節を有する筋骨格システム
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集
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
---------	---------