

令和 7 年 6 月 23 日現在

機関番号：32201

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2024

課題番号：21K14128

研究課題名（和文）筋骨格構造マニピュレータにおける構造的特性に基づいた筋シナジの生成

研究課題名（英文）Generation of muscle synergy based on the structural characteristics in musculoskeletal manipulators

研究代表者

越智 裕章 (Ochi, Hiroaki)

足利大学・工学部・講師

研究者番号：50780128

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、筋骨格構造の持つ構造的特性から筋骨格構造マニピュレータにおける筋シナジを生成し、その筋シナジを利用した運動制御手法について検討を行った。

2関節6筋システムを対象に、作業座標系における平衡点位置に対応した筋シナジ信号を生成し、目標とする平衡点位置と筋シナジにより生成した筋張力による平衡点位置を評価した。生成した筋シナジ信号を近似ヤコビ行列とした運動制御実験を行った結果、人間のように時間遅れの大きい系で、通常のヤコビ行列を用いたフィードバック制御系よりも安定となる結果を得た。また、筋シナジの発展的な獲得や腕のような多自由度系への拡張に向けた基礎研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、筋骨格構造マニピュレータの構造的な特徴から筋シナジを生成することで、機械システムに適した運動信号を自発的に獲得するようなシステムを構築できる。このことは、人間模倣のアプローチではなく工学的なアプローチから、人間のような発達的な運動生成が可能なロボットシステムの開発の可能性を示唆している。また、筋シナジにおける筋骨格構造の役割を工学的に示すことで、人間の運動生成メカニズム解明の一助になることも期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, muscle synergies were generated in a musculoskeletal manipulator from the structural characteristics of the musculoskeletal structure. In addition, a motion control method using the muscle synergies was examined.

For a two-joint, six-muscle system, muscle synergy signals corresponding to the equilibrium point position in the task coordinate system were generated, and the equilibrium point position generated by muscle synergies was compared with the target equilibrium point position. Motion control experiments were performed using the generated muscle synergy signals as an approximate Jacobian matrix. The results showed that the control system is more stable than a traditional feedback control system using a Jacobian matrix in a system with a large time delay, such as a human. Furthermore, basic research was conducted toward the developmental acquisition of muscle synergies and their extension to a multi-degree-of-freedom system such as a human arm.

研究分野：ロボティクス

キーワード：筋骨格構造 筋シナジ 平衡点解析 冗長マニピュレータ

1. 研究開始当初の背景

ロボットの社会的応用が求められている現在、人間の代替が可能なロボットシステムの開発が目指されている。ロボティクス研究では、人間のような運動機能を有するロボットシステムの開発のための一つのアプローチとして、人間の運動生成メカニズムに着目されている。

人間の運動生成メカニズムの一つとして、例えば、Bernstein は筋骨格構造の持つ不良設定問題に対し、冗長自由度を低次元化するような筋の協調動作パターンの存在を示唆した。この筋の協調動作は「筋シナジー」と呼ばれ、近年の生理学的解析の結果、その存在が確認されている。筋シナジーは人間の運動生成の基幹に関係すると目され、神経伝達と運動に関する指標の一つとしても活用されている。

ロボティクスの分野においても、人間の運動生成メカニズムを再現するために、人間の運動データから筋シナジーを抽出してロボットに実装する試みが行われている。また、筋骨格系や神経系の相互作用、運動学習や運動認知など、統合的な運動制御モデルを構築することで、人間のような運動生成を目指す試みがなされている。

しかしながら、こうした試みは人間の運動データに基づいた手法であり、個々の運動生成要素が果たす役割を明らかにすることが難しい。運動生成メカニズムをロボティクスに応用するためには、人間の運動生成の模倣といったトップダウン的アプローチのみに留まらず、ボトムアップ的なアプローチによって個々のシステムを設計し、工学的視点に基づいた運動生成手法を確立する必要がある。

2. 研究の目的

研究代表者はこれまでに、筋骨格構造の冗長性と、冗長性から生じる筋内力に着目し、筋内力の安定性が筋付着位置に依存して大きく変化することを示し、筋内力の安定性と筋付着位置の関係性を解析的に示した。さらに筋内力が安定となる筋付着位置条件を解析して、筋骨格構造マニピュレータの設計指針を示している。

また、筋シナジーに関する知見として、1) 筋シナジーの筋入力パターンとその時間変動パターンが別のメカニズムで生成されていること [T. Takei et al., 2017]、2) 乳幼児期では運動の基本となる筋シナジー数が少なく、成長とともに筋シナジー数が増えること [N. Dominici et al., 2011] が報告されている。これらのことから、1) 時間的に変化しない筋入力パターンは静的な要因：例えば構造的特性によって生成されること、2) 生来から保有する特性に基づいた筋シナジーをベースにして運動発達することが考えられる。

そこで本研究では、構造的な特性から運動生成の基礎となる筋シナジーを導出することで、筋骨格構造マニピュレータの運動の基礎となる入力生成を行う。このことによって、機械システムに適した運動生成信号を生成し、将来的には、人間の運動発達と同様に、運動生成システムを発達的に獲得するような筋骨格構造システムを構築し、人間のような運動生成が可能なロボットシステムの開発を目指す。本研究では、ボトムアップ的に筋骨格構造システムにおける運動生成メカニズムを構築することで、人間のような運動生成が可能なロボットシステムの構築と設計に応用することが期待できる。また、筋シナジーにおける筋骨格構造の役割を工学的に示すことで、人間の運動生成メカニズム解明の一助になることも期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、筋骨格構造マニピュレータの構造的な特性から運動生成の基礎信号を導出し、ロボティクスへ応用するために以下の項目を実施する。

① 筋骨格構造の構造的特性に基づく筋シナジーの生成

筋骨格構造では筋入力数の冗長性から筋内力が生成される。人間の運動生成原理の一つである「平衡点仮説」のように、筋内力が平衡点を生成することに着目し、作業座標空間における平衡点位置に対応するような筋シナジーを生成する。

② 導出した筋シナジーに基づく運動生成

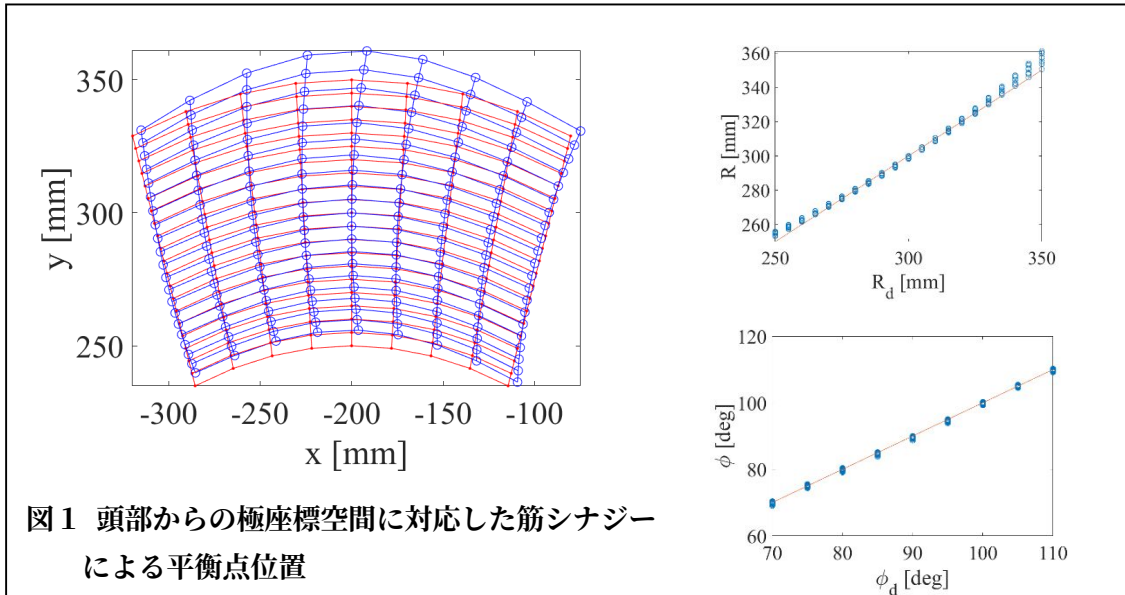
①で得られた知見に基づいて運動生成を試みる。筋シナジーに基づいたフィードフォワード運動生成や人間の知覚できる作業座標空間での筋シナジー入力によるフィードバック制御によって、人間のような運動生成が可能か検証する。

③ 筋骨格構造マニピュレータによる実験的検証

本研究の手法では構造的特性に基づいた筋シナジーを用いて運動制御することから、人間の運動や神経伝達機構を模倣せずとも、人間のような運動生成ができる筋骨格構造マニピュレータシステムの構築が可能である。一般的な機械構造で構成されたような筋骨格構造マニピュレータシステムを製作し、①、②で得られた知見を機械システムへ実装して、検証実験を行う。

4. 研究成果

筋骨格構造マニピュレータの構造的特性に基づく筋シナジー生成では、目標位置に安定平衡点を生じさせるような筋内力に基づき、作業座標系での平衡点に対応するような筋シナジーの生成を試みた。多数の作業座標系での筋内力群から、作業座標系位置と線形となるように筋内力の係数を繰り返し計算によって調整することで、筋シナジー導出した。生成した筋シナジー信号による筋入力平衡点と目標位置座標について、人間の身体認知空間と近い関節角度座標系や肩からの手先極座標系、頭部からの手先極座標系（図1）においては対応性が高かったが、手先デカルト座標系では対応性が低いという知見が得られた。



生成した筋シナジー信号を用いた運動制御についての検討では、上記の手法で生成した筋シナジー信号を用いて、目標位置へのフィードフォワード位置決め制御をコンピュータシミュレーションおよび実験機によって解析し、生成した筋シナジー信号の有効性を確認した。また、作業座標空間におけるPDフィードバック制御則と筋シナジー信号を組み合わせることで、人間のような直観的な運動生成を試み、有効性を確認した。このフィードバック制御手法は筋シナジーを用いることで実時間でのヤコビ行列の計算を省略でき、実時間における計算処理や誤差の影響が少なく、工学的にも有用なシステムの構築が期待できる結果となった。また、人間のように時間遅れの大きいシステムで、通常ヤコビ行列を用いたフィードバック制御系よりも安定となる結果を得た。これは、生成した筋シナジー生成の基となる筋内力群が安定となるため、フィードバックシステムに用いることで安定性が向上したものと考えられる。今後、筋骨格構造マニピュレータでの運動学誤差を含むシステムや、カメラフィードバックやセンサ・コンピュータ処理の遅れが比較的大きいシステムにおいての初期の運動生成などへの活用が期待できる。

当初の研究計画に加えて、以下の基礎研究を実施した。

より人間に近い3次元の筋骨格構造マニピュレータでの筋シナジー生成の可能性を検討した。基礎研究として、人間の肩の構造を参考にした、球体関節を有する筋骨格構造における筋内力の安定性を筋内力ポテンシャルによって解析した。球体関節の筋骨格構造マニピュレータにおいても先行研究と同様に、筋の付着位置によって筋内力の安定性が大きく変化すること、適切な筋の付着位置を設定することで安定した筋内力を生成できることを確認した。また、目標値での内力を入力することによるフィードフォワード位置決めが可能であることを、動力学シミュレーションと実験機によって検証し、目標位置近傍での安定性を確認した。以上より、3次元の筋骨格構造マニピュレータにおいても本研究の手法によって筋シナジーの生成ができる可能性を見出した。

人間のような発達的な運動生成のための基礎研究として、本手法での筋シナジー生成の基礎となる筋内力ポテンシャルの学習的な手法による生成を検討した。任意のポテンシャル形状を生成するような係数ベクトルを、ニューラルネットワークモデルを用いて学習させ、検証を行った。ニューラルネットワークモデルや学習評価方法について改善の余地はあるものの、ある程度の範囲内で目標設定したポテンシャル形状を生成できた。この知見を活用し、ニューラルネットワークモデルによる筋シナジー信号の生成、運動学習による筋シナジー信号の調整を行い、人間のような発達的な運動生成が可能なシステムの構築を目指す。

これらの基礎研究によって、人間の腕のような3次元の筋骨格構造マニピュレータへの拡張や、筋シナジーの発展的な獲得が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 越智裕章
2. 発表標題 筋骨格構造ロボットにおける筋内力ポテンシャルの任意形状生成のための係数決定法に関する検討
3. 学会等名 第25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
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 越智 裕章、木野 仁
2. 発表標題 球体関節を有する筋骨格構造システムにおける筋内力ポテンシャル解析の検討
3. 学会等名 第24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
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 越智 裕章、木野 仁、永田 寅臣
2. 発表標題 筋骨格ポテンシャルに基づく筋入力パターンを用いた運動制御に関する検証
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
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 越智 裕章、木野 仁、永田 寅臣
2. 発表標題 筋骨格ポテンシャルに基づく筋入力パターンを用いた運動制御に関する検証
3. 学会等名 第22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
4. 発表年 2021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
---------	---------