

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：33908

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03523

研究課題名（和文）筋骨格ポテンシャル法とソフトアクチュエータを融合した超多筋骨格ソフトロボティクス

研究課題名（英文）Super multi-musculoskeletal soft robotics that combines musculoskeletal potential method and soft actuator

研究代表者

木野 仁 (Hitoshi, Kino)

中京大学・工学部・教授

研究者番号：50293816

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、筋骨格ポテンシャル法を拡張して、筋骨格構造・筋肉の柔軟性・中枢神経系からの信号処理の3つを調和した超多筋骨格システムを持つソフトロボットを実現させることを目指した。具体的には筋肉の粘弾性モデルを導入し、筋張力を筋の活性度として入力するシステムのモデル化を行った。また、多関節筋を持つシステムに対する数学解析を行い、筋肉の満たす条件を明らかにした。人体構造を高精度に再現したデジタルヒューマンにおいて、上腕の姿勢制御の解析を行い、本手法の有用性をデジタルヒューマンで確認した。さらに、シューティング法を拡張し、繰り返し試行によって軌道生成を行う手法の提案し、有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超多筋骨格システムに対し、筋骨格の構造特性と筋肉の柔軟性、中枢神経系からの信号処理という3つを調和した運動生成法の基幹として筋骨格ポテンシャル法の有効範囲を大きく広げた点は大きな意味を持つ。具体的な学術的意義は、超多自由度システムに対する有効性を示したこと、筋肉の粘弾性を考慮した生物に近いシステムへの有用性を示したこと、人間の動作生成に類似する繰り返し学習制御による動作生成が実現できたことは、次世代の超多筋骨格ヒューマノイドロボットの運動生成に応用でき、人間のように柔軟・器用な新しいロボットシステムを創造できる。また、内骨格生物を模倣したバイオミメティクス分野の機械設計や制御設計に応用できる。

研究成果の概要（英文）：Our objective was to expand the musculoskeletal potential method to develop a soft robot featuring a super-multi-muscular skeletal system, which seamlessly integrates three key aspects: musculoskeletal structure, muscle flexibility, and signal processing from the central nervous system. To achieve this, we introduced a muscle viscoelastic model and designed a system where muscle tension serves as muscle activation input. Additionally, we conducted mathematical analysis on a system incorporating multi-joint muscles, elucidating the conditions under which these muscles operate optimally. We investigated posture control of the upper arm utilizing a digital human model that faithfully replicates human body structure with high precision. Through this analysis, we validated the efficacy of our approach using the digital human model. Furthermore, we expanded upon the shooting method and proposed a trajectory generation technique based on iterative trials, confirming its effectiveness.

研究分野：ロボット工学

キーワード：生体システム バイオミメティクス 運動生成

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)日本は少子高齢化やコロナ禍の感染拡大防止のために、幅広い産業分野で更なるロボットの社会進出が望まれており、今まで以上に柔軟で器用なロボットの実現が必要となる。このためには、従来の堅いロボットの方法論からの脱却が必要であり、生体システムを規範とした柔軟な発想が必要である。

実際の人間に着目すると、人間の柔軟で器用な運動生成のカギは、以下にまとめる3つ要素の相互作用や調和に基づくと考えられる。

【構造特性】人体は筋骨格構造を有しており、骨格・関節に複雑に付着した骨格筋(以下、筋肉)は引張りしか発生できず、複数の筋肉を拮抗させる冗長駆動となる。その結果、筋肉間に関節運動に直接影響しない内力(以下、筋内力)が生じる。

【筋肉の柔軟性】人間は冗長駆動によって生じる筋内力を変化させて、筋肉の柔軟性を調節して関節の粘弾性を変化させ、外環境に適応した運動を行なっている。

【中枢神経系からの信号処理】体性感覚情報を基にしたフィードフォワード制御を基本にし、それに視覚や触覚などの感覚器からの実時間情報を基にした感覚フィードバック制御を組み合わせて動作生成していると考えられる。

生物進化から考えれば、3つのカギは別々に考慮しても効果的でなく、人間と同様の柔軟で器用なロボットの実現には、人間の持つ複雑な筋骨格の構造特性と筋肉の柔軟性、それを動作させる信号処理を包括的に解析し、それらを調和させた総合システムの構築が極めて重要である。

(2)申請者は従来研究で、筋骨格構造体に目標姿勢で釣り合う筋内力をステップ状にフィードフォワード入力することで、感覚フィードバックや逆モデルなどの複雑な実時間処理を行うことなく、姿勢制御が可能なることを発見した。これは冗長駆動から生じる筋内力が、システム内に安定平衡点を持つポテンシャル場を形成することに起因する(以下、筋骨格ポテンシャル法)。

このポテンシャルは筋弾性の有無とは無関係に、構造が潜在的に持つものである。この制御は『構造特性』と『信号処理』を同時に取扱っており、生物が運動生成において、筋骨格ポテンシャルを有効利用している可能性を示唆する。また、感覚フィードバックが不要なため、センシングノイズや時間遅れの影響を受けず、モデル化誤差などに対しても強いロバスト性を持つ。

しかし、過去の筋骨格ポテンシャル法では筋肉の屈曲や粘弾性などの『筋肉の柔軟性』は考慮されておらず、また、『信号処理』に関しても釣り合い内力をステップ入力するだけの簡易なモデルであり、中枢神経系の詳細モデルを考慮していなかった。さらに、対象システムも2関節で自由度が少なく、人体の自由度と比較して極めて貧弱なモデルであった。

(3)一方、構造特性と筋肉の柔軟性に注目した研究として、空気圧や電磁駆動の人工筋を用いた筋骨格ロボットがある。しかし、機械的な人工筋は小型化が困難で、空気供給や廃熱問題から使用数には制限がある。また、信号処理は感覚フィードバックを主体とする従来法が基本にあり、人間のような柔軟で器用な運動を十分に実現するに至っていない。

これに対し、近年、高機能材料を用いたソフトアクチュエータが盛んに研究されている。これらは小型・軽量・柔軟などの利点が存在し、筋骨格ロボットの人工筋として用いれば、非常に多くの筋肉を配置することができる。従って、実際の人体に近い超多骨・超多筋・超多関節を有する超多筋骨格システムが容易に実現できる。

しかし、高機能材料は個体差のバラツキが大きく、物理特性が確率的に変動するため、詳細モデル化が困難な材料も多く、高精度のモデルベース制御が難しい。また、個々の人工筋には生体の筋紡錘のような感覚センサの機能もなく、現状では多くがON-OFF制御が主体であり、精度と柔軟性を両立した制御性能を保証するのが難しい。よって、従来は二値制御などの簡易な制御を用いるアプリケーションでの利用がほとんどであった。

2. 研究の目的

強いロバスト性を有する筋骨格ポテンシャル法を拡張して、高機能材料ソフトアクチュエータの人工筋と調和させることで、高機能材料の欠点を克服し、『筋骨格構造・筋肉の柔軟性・中枢神経系からの信号処理の3つを調和した超多筋骨格システムを持つソフトロボットを実現』させることが本申請の大きな目的である。

しかし、この超多筋骨格ソフトロボティクスの実現には以下の未解決課題が存在する。

【課題(1)】従来の筋骨格ポテンシャル法では生体の筋肉の粘弾性や中枢神経系の詳細モデルを全く考慮していないため、単なる位置制御に留まり、柔軟さや器用さに直結するインピーダンス制御や可操作性、操作性などは考慮されていなかった。

【課題(2)】従来研究では 1~2 関節の構造を対象としており、人体と同様の構造を持つ超多筋骨格システムに対しての有効性は不明である。特に、筋肉の張力の組み合わせは不良設定問題（ベルンシュタイン問題）となるため、超多筋骨格の筋骨格ポテンシャル法においても適切な筋内力の分配方法が不明であった。

【課題(3)】モデルベース制御が困難な人工筋を持つ超多筋骨格システムに対し、適切な筋骨格ポテンシャル法を導入した例は存在しない。従って、その有用性も不明である。

上記の未解決課題を踏まえ、本申請では、目的を以下に 3 つに細分して取り組む。

【目的(1)】これまで考慮していなかった筋肉/中枢神経系の詳細モデルを含んだ拡張筋骨格ポテンシャル法を構築し、柔軟・器用な新しい運動生成戦略を提案する。

【目的(2)】人体と同様の超多筋骨格システムに対し、拡張筋骨格ポテンシャル法にベルンシュタイン問題を考慮し、それに基づく運動生成の有効性を数値解析する。

【目的(3)】モデル化困難な高機能材料の人工筋を持った超多筋骨格システムを試作し、目的(1)~(2)の結果より得られた拡張筋骨格ポテンシャル法によるロバストで柔軟・器用な運動生成について実機検証を行なう。

3. 研究の方法

本研究では、先述した目的(1)~(3)に対して、以下のことを行なう。

(1)【詳細モデルを考慮した拡張筋骨格ポテンシャル法の確立】筋肉の粘弾性に Hill モデルを導入する。また、中枢神経系には脊髄神経の CPG(Central Pattern Generators)に注目し、運動リズムを生成するリズム生成層とその運動生成を行うパターン形成層の 2 層 CPG」と「各筋肉へ信号を送るニューロン」のモデル化を検討する。これらのモデルを介し、目標の関節インピーダンスなどから筋の活性度として入力する拡張された筋骨格ポテンシャル法を提案する。

(2)【人体と同じ筋配置を持つ超多筋骨格システムへの有効性】人体の筋配置を精密に再現した筋骨格シミュレータ(デジタルヒューマン)として『OpenSim』を用いる。この OpenSim に MATLAB を組み合わせた数値解析を行う。ベルンシュタイン問題には、筋の張力選定の低次元化を図る筋シナジー仮説}に注目し、筋骨格ポテンシャル法に組み込む。上記の拡張筋骨格ポテンシャル法をシミュレートし、インピーダンス特性、可操作性、操作性などの視点から評価を行なう。

(3)【人工筋を持った超多筋骨格システムの実機検証】人工筋にはこれまで申請者らが研究してきた収縮性ゲルや釣糸人工筋などの高分子アクチュエータを用いる。ハードウェアとして人間の四肢と同様の超多筋骨格システムを作成し、上記(1)~(2)に基づく拡張筋骨格ポテンシャル法が、シミュレーションでは考慮していなかった不確定要素を含む人工筋を用いた場合にも柔軟でロバストな運動生成の実現性について実機検証を行なう。

4. 研究成果

(1) 筋肉/中枢神経系の詳細モデルを含んだ拡張筋骨格ポテンシャル法を構築し、柔軟・器用な新しい運動生成戦略のベースとなるアルゴリズムを検討した。筋骨格ポテンシャル法は基本的には PTP 制御のみに適用されたが、それを経路制御が可能のように、目標経路から目標のポテンシャルを生成し、そのポテンシャル場を実現する方法を非線形系計画法などで検討した。平面 2 関節人腕モデルに対し、シューティング法を拡張し、初期筋力と粘性を繰り返し試行によって軌道生成を行う手法の提案し、シミュレーションにより、提案手法の有効性を確認した。

(2) 超多筋骨格システムに対し、デジタルヒューマンからの詳細な幾何学情報を抽出し、MATLAB によるシミュレーションに転化させ、人体の筋骨格構造を高精度に再現したデジタルヒューマン上において、矢状面内の上腕について筋骨格ポテンシャル法を用いた姿勢制御の解析を行い、筋内力の選定法を確立し、本手法の有用性をシミュレーションで確認した。

(3) 超多筋骨格システムへの拡張として、関節が多自由度を有する場合や各筋肉が 3 関節以上に影響を与える多関節筋を持つシステムに対する、目標姿勢の収束性の数学解析を行った。筋内力によって生成されるポテンシャルにおけるヘッセ行列の固有値解析を行い、筋肉の満たす数学的条件を明らかにした。

(4) 筋肉の粘弾性に Hill モデル導入し、筋張力を筋の活性度として入力する拡張された筋骨格ポテンシャル法の基礎解析を行った。また、Hill モデルに基づく 4 本筋肉を用いたコンパス型の脚モデルに対し、受動方向に筋骨格ポテンシャル法を組み合わせた際のロバスト性に注目

し、シミュレーション解析を通じて、ロバスト性の向上を確認した。このシステムでは、受動歩行要素に CPG を実装しやすいシステムであり、運動リズムを生成するリズム生成層とその運動生成を行うパターン形成層の 2 層 CPG の今後の実装が可能となった。

(5)高機能材料ソフトアクチュエータの人工筋の利用を想定し、軟体動物に代表されるソフトロボットにおいて、筋の配置や剛性のマッピングを知的に生成する手法を提案し、その初期段階としてシミュレーションモデルを作成した。

(6)ハードウェアとして、人腕を模した筋骨格システムを実際に作成し、人工筋肉を持つアクチュエータ要素にディザーを加えることで、摩擦等の外乱を大幅に除去できることを実験で確かめた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Hitoshi Kino, Hiroaki Ochi, and Kenji Tahara	4. 巻 33
2. 論文標題 Optimal Muscular Arrangement Using Genetic Algorithm for Musculoskeletal Potential Method with Muscle Viscosity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 619-628
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2021.p0619	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 Yuki Matsutani, Kenji Tahara, and Hitoshi Kino	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 699792
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 Satoshi Hara, Akinori Tomoda, Hitoshi Kino	4. 巻 10
2. 論文標題 Improvement in rotational performance by periodic tensile change of a torque transmission wire: basic experimental verification using a single straight wire	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 474-487
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2022.2060715	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 Hiroaki Ochi, Koichi Komada, Kenji Tahara, Hitoshi Kino	4. 巻 35
2. 論文標題 Convergent Conditions of Feedforward Control for Musculoskeletal Systems with Multi 1-DOF Joints Driven by Monoarticular and Biarticular Muscles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 751-761
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2023.p0751	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 K. Makihara, T. Otsubo, and S. Makita	4. 巻 35
2. 論文標題 Through-hole Detection and Finger Insertion Planning as Preceding Motion for Hooking and Caging a Ring	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 734-742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2023.p0734	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 Shoki Tsuboi, Hikaru Arita, Hitoshi Kino, and Kenji Tahara	4. 巻 37
2. 論文標題 Variable end-point viscoelasticity control for a musculoskeletal redundant arm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1128-1141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2023.2239880	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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 壺井翔貴、木野仁、田原健二
2. 発表標題 筋骨格構造を持つ腱駆動冗長マニピュレータによる手先剛性制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021 (ROBOMECH2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木野仁、
2. 発表標題 単一方向駆動としての筋骨格システム
3. 学会等名 第6回 次世代アクチュエータ材料応用研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木野 仁
2. 発表標題 ロボット工学からの筋骨格システム
3. 学会等名 第2回電気機器・パワーエレクトロニクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shoki Tsuboi, Hitoshi Kino, Kenji Tahara
2. 発表標題 End-Point Stiffness and Joint Viscosity Control of Musculoskeletal Robotic Arm Using Muscle Redundancy
3. 学会等名 Proc. IEEE/RSJ 18th Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

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 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 (SI2022)
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 構造的特性に基づいて生成された筋入力パターンによるフィードバック位置決め制御
3. 学会等名 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 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 壺井翔貴, 木野仁, 有田輝, 田原健二
2. 発表標題 筋骨格ロボットアームを用いた可変手先粘弾性楕円体による外力適応性の向上
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千田和輝, 駒田洸一, 松谷祐希, 田原健二, 木野仁
2. 発表標題 筋骨格システムの筋内カフィードフォワード位置制御法における繰り返し学習を用いた軌道制御
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2023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 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 Kazuki Senda, Koichi Komada, Tetsuya Morizono, Yuki Matsutani, Kenji Tahara, Hitoshi Kino
2. 発表標題 Proposal of Feedforward Trajectory Control with Iterative Learning for a Musculoskeletal System
3. 学会等名 IEEE 18th Int. Conf. on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Lertdumronglak and S. Makita
2. 発表標題 Material Classification using Heat Transfer Analysis with Infrared Camera
3. 学会等名 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 濱田 涼, 横田諭
2. 発表標題 ロボットマニピュレーションにおける非接触な幾何学的拘束の効果をポテンシャルエネルギーに基づいて評価する手法
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤村輝, 横田諭
2. 発表標題 メカノクロミック構造色ゲルの色調変化に基づく接触荷重の推定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>中京大学工学部機械システム工学科 木野研究室 http://openweb.chukyo-u.ac.jp/~h-kino/ 九州大学 大学院工学研究院機械工学部門 制御システム講座 ヒューマンセンターロボティクス研究室 http://www.kt.mech.kyushu-u.ac.jp/ 福岡工業大学工学部知能機械工学科 横田研究室 https://www.fit.ac.jp/~makita/</p>

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	榎田 諭 (Makita Satoshi) (60580868)	福岡工業大学・工学部・准教授 (37112)	
研究分担者	石原 彰人 (Ishihara Akito) (80387620)	中京大学・工学部・教授 (33908)	
研究分担者	田原 健二 (Tahara Kenji) (80392033)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	

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