

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14124

研究課題名（和文）多関節筋構造の活用と関節間協調制御による四脚ロボットの高運動性能化

研究課題名（英文）Mechanism and motion control for a quadruped robot inspired by multi-articular muscle structure and joint coordination

研究代表者

佐藤 隆紀（Sato, Ryuki）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：10883572

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）：本研究は、動物の複数関節をまたがる多関節筋による関節間エネルギー伝搬に着想を得た機構と制御による脚ロボットの運動性能向上を目的としている。後肢の二関節筋腱複合体の機能を規範とした脚機構を一脚ロボットに搭載し、跳躍能力を最大化する運動制御によって機構の効果を活用した跳躍運動を実現した。また、機構の伸縮状態に基づいて脚軌道を調整する歩容制御を開発し、高効率な四脚ロボット歩容の実現の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多関節筋は動物の身体の特徴的な構造の1つで、従来の脚ロボットの設計にはあまり見られないが、関節間でのエネルギー伝搬を可能にしたり、関節間の協調を生み出したりするなど、重要な役割を持つ。本研究で提案した機構と制御による成果は、動物の筋骨格を規範とした機構を脚ロボットに導入することで動物並みの運動性能を実現できる可能性を示唆しており、脚ロボットの活動範囲の拡張と実用化につながる可能性を持つ。

研究成果の概要（英文）：This research aims to improve the motion performance of a quadruped robot by studying mechanism design and motion control inspired by the kinetic energy transmission mechanism through the multi-articulated muscles in the animals' musculoskeletal systems. We developed the one-legged robot with a leg mechanism inspired by the function of a bi-articular muscle-tendon complex on a hind limb and applied motion control to maximize its jumping motion performance. The jumping experiments using the one-legged robot demonstrate the effectiveness of the mechanism and motion control in dynamic motion. We also developed the gait control for a quadruped robot with the proposed bi-articular muscle-tendon complex mechanism on the legs. The results of the trot gait simulation using the dynamic model of the developed quadruped robot show the feasibility of efficient trotting.

研究分野：ロボティクス

キーワード：脚ロボット 多関節筋 筋腱複合体 弾性機構 関節間協調 生物規範機構

1. 研究開始当初の背景

脚ロボットは、足を任意の位置について移動できるため、様々な地形に適応でき、踏破性に優れる。脚ロボットの既存の研究では、凹凸のある地面の踏破や、外乱に対するロバストな姿勢復帰などの、安定移動制御は多く実施されている。一方で、具体的な利用場面を考えたとき、移動安定性に加えて、高速移動や障害物超越などの高瞬発性ロコモーションや、長時間活動可能な高エネルギー効率ロコモーションなどの運動能力も必要とされている。しかし、制御安定性を優先する従来の脚ロボットの設計思想は、高剛性リンクと高減速比モータの利用と徹底的に受動粘弾性を排除した構造を理想とし、構造自体が上記のような運動を阻害してしまう。

ネコのような四足動物は、全身の多数の筋の駆動と腱の弾性的な特性を活用して、ゆっくりと安定した歩行から、高速な走行や跳躍、急旋回など、高度で多様なロコモーションを高効率に実現している。脚ロボットの場合は、前述のように構造上に課題がある上に、その制御には、非常に多い関節自由度を個別に制御する方法が一般的に用いられ、上記のような高効率運動の実現は難しい。

動物の身体には、1つの関節を駆動するためにその関節周囲に拮抗配置された単関節筋に加えて、複数の関節にまたがるように配置された多関節筋と呼ばれる特徴的な筋が存在する。多関節筋は、運動中の関節間でのエネルギー伝搬を可能にし、安定した歩行から高速な走行や跳躍などの高度で高効率なロコモーションの実行に重要な役割を果たしている。この特徴的な多関節筋構造を脚ロボットに導入し、それを介した関節間での協調制御の導入という生物規範のアプローチによって、脚ロボットの運動性能を向上させることができると考えた。

2. 研究の目的

これまでの研究で、動物の筋骨格構造に特徴的な多関節にまたがる筋腱複合体を脚ロボットに導入することによって運動性能の向上につながる事が確認している。一方で、その効果を運動に活用するには、適した配置に設計し、適切な制御を適用する必要がある。本研究では、陸上で高度なロコモーションを実現している哺乳動物の、多関節間にまたがる特徴的な筋・腱の構造を参考にした生物規範型四脚ロボットを開発し、その多関節間機構の効果を活用した関節間、体幹と四肢の部位間での協調制御によって、高瞬発性運動と高効率運動を可能にする四脚ロボットのための全身制御手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

動物の筋骨格に備わる生体筋と腱で構成される筋腱複合体は、駆動源に加えて受動的な弾性を備える。特に、ネコのように敏捷性が高いとされる四足動物の後肢の股関節、膝関節、足関節の間にある単関節・二関節間筋腱複合体は、強い蹴り出しを伴う走行時の大出力能力と、高衝撃を伴う着地時の衝撃緩和能力に大きく寄与している。以上の観点から、本研究では四脚ロボットの後脚を想定した一脚ロボットと、それを統合した四脚ロボットを対象として、以下の方法で研究を推進した。

(1) 上腿と下腿に二関節間筋腱複合体を有した後脚機構の開発

上腿前部に備わる股-膝関節をまたぐ筋腱複合体と、下腿後部に備わる膝-足関節をまたぐ筋腱複合体は、膝関節を共有する二関節間筋腱複合体であり、3つの関節間の運動やエネルギー伝達を可能にする。そこで、これらを規範とした、電磁モータと引張ばねで構成される機構を上腿と下腿に持つ後脚ロボットを開発し、シミュレーションと実験を通してその効果を確認した。

(2) 二関節間筋腱複合体機構の運動への効果検証

上腿と下腿の二関節間筋腱複合体機構が、ダイナミックな運動に対してどのような効果を発揮するのかを調査するために、それぞれの機構の有無を変えた4種のモデルを用い、動力学シミュレータ上で運動能力を最大化する軌道生成を行い、それに基づいた実機実験を行った。シミュレーションおよび実験結果を分析し、それぞれの機構が運動に与える影響を考察した。

(3) 二関節間筋腱複合体機構の固有受容覚情報に基づく運動制御

脚ロボットの歩容は、接地と離地を繰り返す特徴を持つが、運動中のロボットのダイナミクスと接地時の環境（地面）からの反力とに影響を受けて、脚部の二関節間機構が伸縮して効果を発揮することで、ロボットの運動性能が決定づけられる。そこで、機構の伸縮状態という固有受容感覚をフィードバックした脚ロボットの運動制御を提案し、シミュレーションおよび実験で有効性を検証した。

4. 研究成果

(1) 上腿と下腿に二関節間筋腱複合体を有した後脚機構の開発

図1に、本研究で開発した動物後肢の上腿と下腿の二関節間筋腱複合体を規範とした脚ロボットを示す。大腿直筋とそれに付随する腱で構成される上腿前部の筋腱複合体は、膝関節伸展に寄与する。また、腓腹筋とアキレス腱で構成される下腿後部の筋腱複合体は、足関節の伸展に作用する。これらはいずれも脚伸展運動に機能する。これを規範とし、駆動能力を電磁モータで、受動弾性を引張ばねで置き換えた二関節間筋腱複合体機構を、脚ロボットの上腿と下腿に搭載した。

膝関節を共有するこの2つの筋腱複合体機構を介して、胴体から環境と接触する足先にかけてエネルギーの移動が可能になる。身体のダイナミクスと地面反力を受けて受動的に振る舞う弾性機構の効果を最大限に活用するための垂直跳躍運動生成を行い、動力学シミュレーションで一連の動作中に弾性機構を介してエネルギー伝搬が行われることを確認し、実験を通して機構の有効性を示した。



図1 二関節間筋腱複合体機構を備えた一脚ロボット

(2) 二関節間筋腱複合体機構の運動への効果検証

上腿と下腿の二関節間筋腱複合体が、一連の動的な運動に対してどのような効果を持つのかを分析するために、機構搭載の有無が異なる4種の動力学モデルを用いて効果検証を行った。ダイナミックな運動の1つとして前方跳躍を取り上げ、各モデルにおける最高の運動性能を引き出す最適化計算を用いた軌道生成を行った。

動力学シミュレーションの結果、両方の機構を搭載したモデルで最も飛距離の長い跳躍運動を生成できることが確認された。それぞれの運動を比較すると、上腿機構が主に飛距離の向上に貢献し、下腿機構は主に跳躍姿勢制御と着地衝撃緩和に作用することを確認した。さらに、図2のように上腿と下腿に二関節間筋腱複合体機構を搭載した一脚ロボットを用いて、前方跳躍運動を実現した。

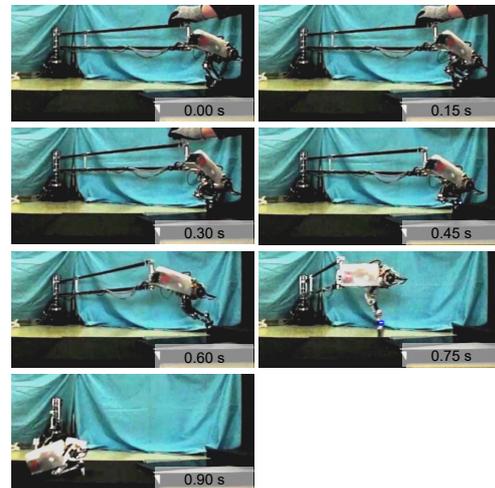


図2 開発した一脚ロボットの前方跳躍

(3) 二関節間筋腱複合体機構の固有受容覚情報に基づく運動制御

下腿の二関節間筋腱複合体はロボットのロコモーションの間、地面から受ける反力が伝達されて伸縮し、その大きさは負荷に応じて変化する。動物が、筋や腱の伸縮量から反射的に緊張状態を調整して外界に及ぼす力を調整しているように、ロボットにもその伸張量に基づいて関節軌道や出力を調整する制御法を適用することで、機構効果を直接的に活用した運動が発現すると考えた。

まず、下腿機構を搭載した一脚ロボットに、伸張状態に基づいて関節剛性を調整する手法を適用し、着地性能への影響を検証した。適切な伸張量で関節剛性を切り換えることで、重心変動が小さく制動までの時間が短い軟着地を実現した。

次に、すべての脚に下腿機構を搭載した四脚ロボットの歩容制御として、各脚の機構の伸張量に基づいてそれに対応する脚の周期運動の速度を調整するフィードバック制御を提案した。動力学シミュレーションで基準歩容周波数とフィードバックゲインを変更して検証した結果、図3のように身体のダイナミクスに合うように歩容が自動的に調整されたことで、転倒せずに歩行できる範囲が拡大し、より移動エネルギー効率の高い運動ができる可能性を示した。

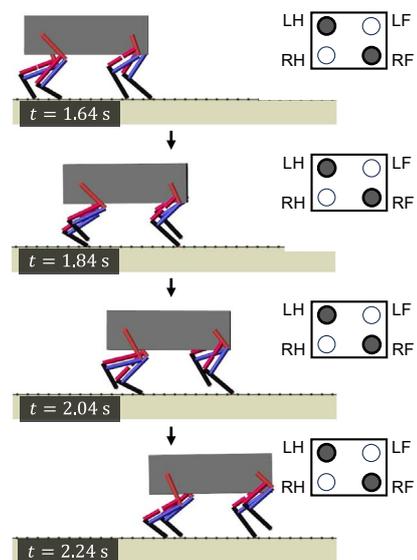


図3 生物規範型四脚ロボットの歩容制御の結果

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryuki Sato, Shuma Hiasa, Lei Wang, Huaxin Liu, Fei Meng, Qiang Huang, Aiguo Ming	4. 巻 6
2. 論文標題 Vertical Jumping by a Legged Robot With Upper and Lower Leg Bi-Articular Muscle-Tendon Complexes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 7572 ~ 7579
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2021.3099226	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 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Saya Amioka, Ryuki Sato, Aiguo Ming
2. 発表標題 Elastic Force Feedback CPG-Based Gait Control for a Quadruped Robot with a Bioinspired Leg Mechanism
3. 学会等名 2023 IEEE Conference on Robotics and Biomimetics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oscar A. Guzman-Medrano, Ryuki Sato, Aiguo Ming
2. 発表標題 Introduction of the Agonist-Antagonist Elasticity Around the Knee Joint of a Bio-inspired Legged Robot
3. 学会等名 IFTToMM WC 2023: Advances in Mechanism and Machine Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤隆紀, 明愛国
2. 発表標題 二関節間弾性機構を有する脚ロボットの軟着地制御
3. 学会等名 第24回システムインテグレーション部門講演会 (SI2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩本惇史, 眞嶋希, 佐藤隆紀, 明愛国
2. 発表標題 動物の筋腱複合体を規範とする脚ロボットの研究開発-上腿と下腿に二間接筋腱複合体を有するロボットの前方跳躍運動制御 -
3. 学会等名 日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023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