



|              |   |
|--------------|---|
| Title        | Spring-Loaded Inverted Pendulum Model Based Musculoskeletal Bipedal Robot Development and Stance Leg Control  |
| Author(s)    | 李, 禕琪   |
| Citation     | 大阪大学, 2025, 博士論文  |
| Version Type |   |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/101707">https://hdl.handle.net/11094/101707</a>   |
| rights       |   |
| Note         | やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。 |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

|  |   |
|--|---|
| 氏 名 ( LI YIQI )  |   |
| 論文題名   | Spring-Loaded Inverted Pendulum Model Based Musculoskeletal Bipedal Robot Development and Stance Leg Control<br>(倒立バネ振り子モデルに基づく筋骨格二足ロボットの開発と立脚制御) |
| 論文内容の要旨  |   |
| <p>This thesis focuses on the development of a musculoskeletal bipedal lower-limb robot and its control for the stance leg during locomotion, using the principles of the spring-loaded inverted pendulum (SLIP) model. The research begins with the robot's design, which utilizes pneumatic artificial muscles (PAMs) as actuators for both jumping and walking. It is followed by the implementation of bioinspired feedback control and model-based approaches for stance leg control, aimed at enhancing locomotion performance.</p> <p>Chapter 2 emphasizes the use of lightweight PAMs to optimize the mass distribution and reduce the overall mass of the legs, with the goal of improving dynamic performance while adhering to the mechanical characteristics of the SLIP model. Experimental data from jumping tests indicate that the dynamics of the robot's center of mass (CoM) closely align with the SLIP model, providing a strong foundation for developing effective control strategies.</p> <p>To enhance jumping motion, Chapter 3 explores the functionality of bi-articular PAMs designed to emulate the action of the human gastrocnemius muscle. Experimental findings reveal that real-time feedback control-based on estimated ground reaction forces (GRFs)—achieved by dynamically adjusting the air pressure within the bi-articular PAMs significantly enhances the robot's jumping performance during locomotion.</p> <p>Finally, Chapter 4 introduces a specialized controller informed by the characteristics of the developed robot and the identified PAM model for walking motion, guided by the SLIP model, to optimize the regulation of GRFs during walking. The results indicate that this controller improves the alignment of the GRFs with the CoM, thereby enhancing the walking movement, even in the presence of variations in the phase duration.</p> <p>In future research, this study aims to manage both the direction and magnitude of ground reaction forces, enabling the robot to exhibit various dynamic characteristics and improve its adaptability in diverse environments.</p> |   |

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 ( LI YIQI ) |     |     |                     |
|-----------------|-----|-----|---------------------|
|                 | (職) | 氏 名 |                     |
| 論文審査担当者         | 主 査 | 教 授 | 多田 隈 建二郎            |
|                 | 副 査 | 教 授 | 原田 研介               |
|                 | 副 査 | 教 授 | 石黒 浩                |
|                 | 副 査 | 教 授 | 細田 耕 (京都大学大学院工学研究科) |

## 論文審査の結果の要旨

この博士論文は、倒立バネ振り子 (SLIP) モデルに基づく、空気圧人工筋 (PAM) 駆動の筋骨格型二足ロボットを開発し、制御することを目的としている。これまでの二足ロボットの運動制御には、ダイナミクスを近似する簡略化されたモデルが一般的に使われる。ただし、実際のダイナミクス特性とモデルに不一致があると、運動が失敗する。論文は、SLIPモデル機械的特性に基づくPAM駆動筋骨格ロボットを開発し、ダイナミクス特性に基づいてジャンプおよび歩行におけるスタンスフェイズにおける地面反力 (GRF) の方向を制御する。

- (1) SLIPモデルの機械的特徴に基づいてロボット開発に焦点を当て、ジャンプ実験を行い、開発したロボットの特性と動的性能を調査した。PAMの軽量性を活用することで、開発したロボットの脚の慣性と質量が大幅に低減され、質量分布は非常にコンパクトに集中している。シンプルな制御で連続ジャンプ実験を実施し、結果から、地面反力データとロボットの質量から算出された重心加速度は、実際に測定された重心加速度と高い一致を示し、開発したロボットの重心のダイナミクスは地面接触時に反力によって主に決定されることがわかった。
- (2) 開発したロボットのダイナミクス特性を利用し、計測した加速度からリアルタイムのGRFを推定した。これにより、ジャンプのスタンスフェイズにおける力の方向を制御し、動作を向上させるための二関節PAMフィードバックコントローラを開発した。実験から、計測した加速度からリアルタイムでGRFを正確に推定できることが実証された。さらに、推定したGRFと重心ベクトル間の角度に基づいて、ジャンプ時のスタンスフェイズにおけるヒトの腓腹筋の機能を模倣した二関節PAMのフィードバック制御を実現した。その結果、単一ジャンプ中のGRFベクトルと重心ベクトルの間の角度を低減し、ロボットの連続ジャンプ能力が向上したことを確認した。
- (3) SLIPモデルとPAMモデルに基づいてPAMコントローラを設計した。このモデルベースのコントローラは、ロボットの歩行運動中に足首屈曲PAMを制御し、GRFの方向を重心方向に調整する研究を拡張した。同定されたPAMモデルを実際のロボット応用に検証する実験を行った。結果は、特定されたPAMモデルがこのロボットでの実際の応用と非常に高い互換性を持つことを示している。同定されたPAMモデルを活用し、提案された制御方法の性能を評価するために歩行実験を行った。実験の結果、SLIPモデルに基づく提案されたPAMコントローラがGRFを効果的に調整していることを示した。

以上の結果から、本研究で開発したSLIPモデルに基づくPAM駆動筋骨格ロボットは、従来のPAM駆動筋骨格ロボットでは制御が困難であったものの、より高度な制御が可能であることが示されました。今後のPAM駆動筋骨格型二足ロボットの設計および制御を実現するために新たな知見を提供するものである。

主査、副査で論文の審査をおこなった結果、いくつかの疑問点が挙げられた。それらは主に、①筋骨格を採用する理由、②ダイナミクス特性の評価方法、③設計したコントローラの安定性と評価基準、④開発したロボットの利点、⑤システムのシンプルさと今後の複雑化への見解、⑥足首関節の組み込み理由についてなどであった。審査の際に出た疑問点に関する議論を中心に、最終審査をおこなった。最終審査では全ての疑問に明確に回答した。したがって、本博士論文は博士 (工学) の学位論文として価値のあるものと認める。