

Title	テンセグリティ構造とその形態に基づく脚移動ロボットの制御系設計および安定性解析
Author(s)	ZHENG, YANQIU
Citation	
Issue Date	2023-09
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/18776
Rights	
Description	Supervisor:浅野 文彦, 先端科学技術研究科, 博士

氏名	ZHENG, Yanqiu		
学位の種類	博士 (情報科学)		
学位記番号	博情第 511 号		
学位授与年月日	令和 5 年 9 月 22 日		
論文題目	Control System Design and Stability Analysis of Legged Locomotion Robots Based on Tensegrity Structures and Its Morphology		
論文審査委員	浅野 文彦	北陸先端科学技術大学院大学	准教授
	平石 邦彦	同	教授
	池 勇勳	同	准教授
	玄 相昊	立命館大学	教授
	軸屋 一郎	金沢大学	准教授

論文の内容の要旨

Inspired by biology, biomimetic robots imitate living organisms to enhance their adaptability and mobility. Designing robots based on their morphology can provide specific functions, but there is a lack of unified guidance and efficient research methods in this area. Therefore, an innovative theory of robot morphology is urgently needed. To establish this system, a representative minimal model is necessary to explore essential issues and provide a research platform. The first step in robot morphology is designing a minimal model that can serve as a platform for future academic research.

Rigid and soft robots are the two main types of robots, each with unique features and applications. Rigid robots offer higher precision, speed, and agility due to their mathematical models, especially their dynamic models. Soft robots, on the other hand, have high adaptability but struggle with high-precision mathematical models, resulting in slower speed and lower accuracy. However, the adaptability of soft robots cannot be replaced by rigid robots.

The significance of robot morphology lies in finding the optimal form for specific tasks. Variable soft robots are advantageous as a minimal model because their structures are more changeable compared to rigid robots. However, the study of soft robots often doesn't utilize high-precision mathematical models, which contradicts the requirements of the minimal model.

Tensegrity robots combine the precision and agility of rigid robots with the adaptability of soft robots, making them lighter, stiffer, and more versatile. They have gained attention in recent years, such as NASA's Super Ball Bot for planetary exploration. However, these robots face challenges, such as difficulties in building dynamic models, limiting their high-speed motion control. Despite this, tensegrity robots offer opportunities for dynamic modeling, making them ideal candidates for studying robot morphology.

This paper focuses on a minimal model called the rimless-wheel-like tensegrity walker (RWT), inspired by the widely studied rimless wheel (RW) model for legged locomotion. The dynamics model considers the internal coupling

force from elasticity and the external constraint force from the environment. Different movement modes are discussed, providing guidance for dynamics modeling and bridging the gap between rigid and soft robots.

Considering practical applications, modifications to the minimal model are necessary. For instance, the SLIP model based on an inverted pendulum explains the motion of the center of gravity during human walking more effectively. Extensions to the RW model accommodate objective conditions like semicircular feet and frictional road surfaces, improving the model's accuracy. A MATLAB-based simulator is designed, demonstrating that the RW achieves periodic passive gaits and stability even when each rod is independent. Changes in the internal structure lead to discrete changes in the RW's characteristics, showcasing the importance of morphology. Morphological transitions based on the proposed morphology-based control (MBC) theory enable different gaits such as crawling, walking, and hopping. The MBC approach simulates morphological changes by controlling inputs, enhancing adaptability and stability of the control system. A simplified version of the model, the simplified rimless-wheel-like tensegrity walker (SRWT), achieves continuous morphological changes through MBC, resulting in locomotion on flat ground. Detailed analyses of gait, stability, and applications are provided. Physical experiments validate the minimal model of robot morphology. Verification experiments reveal drastic internal property changes in tensegrity robots with varying structures, confirming the necessity of the RW as the minimal model. Engineering experiments demonstrate flat walking of the SRWT based on the presented theory, highlighting the model's relevance in academic research and engineering applications.

In conclusion, this study introduces the minimal model for robot morphology, providing a theoretical method and advancing its implementation. Dynamic modeling of tensegrity robots offers insights for high-speed and high-precision movement and interaction with rigid and soft robots. The experiments demonstrate the positive impact of the proposed model in engineering applications.

Keywords: Robot morphology, Minimal model, Tensegrity robots, Rimless wheel, Dynamics modeling, Stability analysis

論文審査の結果の要旨

脚移動ロボットのリミットサイクル型歩行運動は、重力作用や周期安定性を積極的に利用することで高速移動や省エネルギーを達成する一方で、路面の僅かな凹凸にも順応することが難しいという脆弱性を有している。後者の性質は、遊脚着地時の非弾性衝突による衝撃が、身体を構成するすべての剛体フレームへ同時に伝播するという性質に由来するものであり、ヒトの柔軟な歩行との本質的な差異の一つと認識されていた。以上を踏まえ本論文は、ロボットの身体構造をシリアルリンク系として考える固定観念を覆し、すべての関節を排除して1本ずつに分解した剛体フレームをテンセグリティ構造を利用して再構成した柔軟な身体をもつ脚移動ロボットを新規に提案し、その高効率かつ適応的な歩容生成のための要素設計と制御技術に関する基礎的考察を行ったものである。

第一に、6脚のリムレスホイール (RW) を3本の剛体フレームに分解し、これらを6本の粘弾性要素を用いて再構成した RW 型受動歩行器を提案し、単脚支持相と両脚支持相から構成される安定な受動歩行運動が実現可能であること、支持脚接地点が滑り接触をする場合でも安定歩容生成が可能であること、半円足を付加することでより低摩擦な下り斜面上でも安定歩容生成が可能となること、弾性係数の調節により3脚支持相やスキップ歩容が出現することなどを明らかにした。

第二に、X字型歩行ロボットを2本の剛体フレームに分解し、これらをワイヤーを用いて再構成した2脚モデルを提案し、ワイヤーの張力の制御を通して目標の衝突姿勢を実現することで安定かつ頑健な水平面上の歩容生成が可能であることを示した。またワイヤーを省略して制御入力を付加した2脚モデルを導入し、衝突姿勢拘束と回復エネルギー拘束の観点から漸近安定歩容生成の必要条件について議論した。これらの基礎的考察は、2本の脚フレームを同一方向へ回転させることで実現する新しい2脚歩行運動（車輪型歩容）の研究分野の開拓にも大きく貢献した。

第三に、上記の理論的成果の実機検証を目的として、次の実験システムを設計開発し、実機実験を行った。まず3本の剛体フレームをゴムバンドを用いて再構成した RW 型受動歩行器を設計開発し、傾斜したトレッドミル上で安定な受動歩行運動が生成可能であることを確認した。次に2本の剛体フレームをワイヤーを用いて再構成した2脚ロボットを設計開発し、4個のモータでワイヤーの張力を適切に制御することで、水平面上で車輪型歩容生成が可能であることを確認した。

以上、本論文は、テンセグリティ構造に由来する柔軟な身体をもち、移動環境に応じた自在変形が可能な新しい脚移動ロボットの提案、その安定な受動歩行運動の実現可能性に関する考察、および水平面上の能動歩行運動の実現へ向けた基盤技術に関する検討を行ったものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士（情報科学）の学位論文として十分価値あるものと認めた。