

2025. 1. 15

報道関係者 各位

< 配信枚数3枚 >

テンセグリティ型脚移動ロボットによる環境に応じた、ウォーキング、スキップ、クロール歩容の実現

立命館大学総合科学技術研究機構の鄭彦秋専門研究員、理工学部の顔聡助教、徳田功教授、北陸先端科学技術大学院大学の浅野文彦准教授、中国北京化工大学の李龍川准教授（元立命館大学理工学部ロボティクス学科助手）による国際研究チームは、脚移動を行う最小の枠組みであるリムレスホイールと、生体組織を模倣するテンセグリティ構造を融合させたモデル「リムレスホイール型テンセグリティ歩行器（Rimless Wheel-like Tensegrity Walker, 略称 RTW）」を提案し、RTW モデルが、環境に応じて、「ウォーキング」、「スキップ」、「クロール」などの多様な歩容を自律的に生成できることを示しました。RTW モデルは、形態的特徴を活かしながら多様な歩容を生み出す生物の基本原則を理解するための革新的な枠組みを提供するだけでなく、ロボット移動システムの設計や環境適応技術の発展にも新たな道を切り開きます。本研究成果は、2025 年 1 月 10 日に国際学術誌「IEEE/ASME Transactions on Mechatronics」に Early Access 版がオンライン掲載されました。

本件のポイント

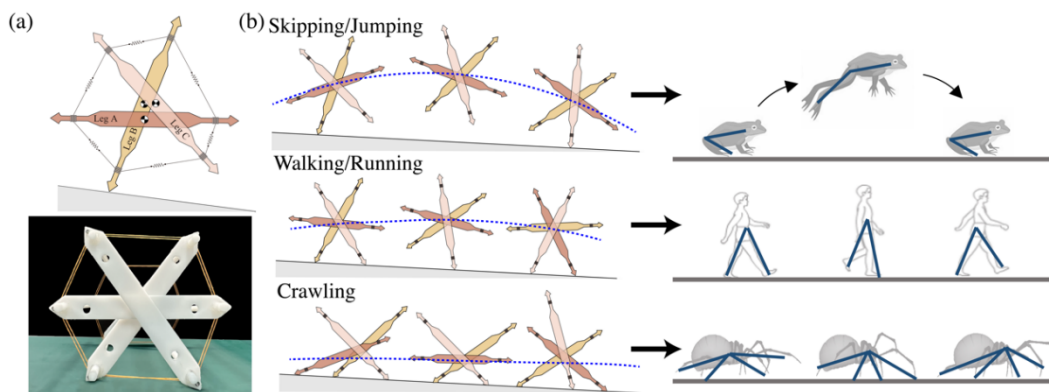
- リムレスホイールとテンセグリティ構造を組み合わせ、生物形態を模倣する統一的な脚移動モデル RTW を提案しました。
- 単一のパラメータを調整するだけで、「ウォーキング」、「スキップ」、「クロール」などの多様な歩容を生成し、環境の変化に応じて歩容間の遷移を滑らかに実現しました。
- 生物の歩容生成機構に関する理解を深め、ロボット移動設計や適応技術の発展に寄与しました。

<研究成果の概要>

生物はそれぞれの形態に適した脚移動モード（歩容）を持ち、それぞれの環境に適応しながら効率的かつ安定した移動を実現してきました。しかし、これらの脚移動を統一的にモデル化し解析するには、複雑な計算と多くの仮定を必要とするため、長年に渡り未解決の課題とされてきました。

この課題に対して、鄭彦秋専門研究員、顔聡助教、徳田功教授、浅野文彦准教授、そして李龍川准教授による国際研究チームは、テンセグリティ構造に基づく統一的な歩容モデル「リムレスホイール型テンセグリティ歩行器（Rimless Wheel-like Tensegrity Walker, 略称 RTW）」を提案しました。本モデルは、1) リムレスホイールが脚移動を研究するための最も簡潔な枠組みを与える点と、2) テンセグリティ構造が生体組織を模倣する上で有効であること、に基づいています。この2つのアイデアを融合させることで、RTW モデルは構造の簡潔さを保ちながら、生物の示す歩容の多様性と適応性を併せ持つ仕組みを実現しました。

RTW モデルは、身体と脚をつなぐ弾性特性を単一のパラメータとして調整するだけで、「ウォーキング（Walking）」、「スキップ（Skipping）」、「クロール（Crawling）」を含む多様な歩容を再現することが可能です。また、これらの歩容間を自然かつ滑らかに遷移させることもできます。この統一モデルを活用することで、個々の形態から多様な歩容を生み出す生物の基本原則を理解するための、新たな視点を提供するだけでなく、ロボット移動システムの設計や環境適応技術の発展にも新たな道を切り開きます。



＜図1 RTW モデルの模式図＞

- (a) : RTW モデルは、3本のロッドが弾性ゴムを介して組み合わさった「テンセグリティ構造」を持つ。
 (b) : 環境（この場合、傾斜角度）や弾性強度に依存して、カエルのようにスキップ（ジャンプ）したり、ヒトのようにウォーキング（歩行）したり、昆虫のようにクロール移動する。

＜研究の背景＞

生物は、複雑に変化する環境に適応する進化を通して、多様な形態を発達させ、それぞれの形態に対応する移動手段（歩容）を形作ってきました。これらの歩容には、ウォーキング、スキップ、クロールなどが含まれます。生物が多様な歩容パターンを示すことは、生物の形態が環境に高度に適応していることを示すだけでなく、形態に依存して、歩容のエネルギー効率や安定性を最適化していることも示唆します。しかし、複雑な歩容の生成メカニズムは完全には解明されていません。形態と歩容の関係を解析するための統一モデルを構築することが、生物力学やロボット工学の分野における重要課題となっています。

脚移動を研究するための最小のモデルとして広く知られているリムレスホイールは、シンプルな幾何学構造を持ち、脚移動の基本特性を明らかにするのにきわめて有効です。特に傾斜平面上においては、重力により供給される位置エネルギーを運動エネルギーに変換し、外部からの制御入力を用いることなく、受動的な歩行運動を行うことができます。このような受動歩行^{*1}では、モデルの構造特性が最大限に活かされます。このためリムレスホイールは、ヒトやロボットなどの歩行の安定性やエネルギー効率を理解するための理論基盤を与えます。

一方で、テンセグリティ構造は、圧縮材（例：剛性棒）を張力材（例：弾性ワイヤ）とのバランスで安定に組み合わせた特殊な仕組みを指し、その力学特性は生物の組織（例：筋肉や筋膜）にとっても似ています。この構造は軽量で柔軟性が高く、衝撃に強いという特徴を持ち、ロボットの適応設計によく用いられます。

このような背景を基に本研究では、1)脚移動を研究するための最小モデルと、2) 生物の組織に類似したテンセグリティ構造を組み合わせて、RTW モデルを提案しました。

＜研究方法＞

本研究では、提案した RTW モデルに基づき、動力学を構築しました。この動力学モデルでは、単脚支持、両脚支持などの異なる状態に応じて、適切な拘束条件を定義しました。また、各状態間の遷移関係を明確化し、各状態に対応する衝突方程式（着地する際、遊脚が地面に衝突することで起こる瞬間的な状態変化を反映する運動方程式）を導出することで、モデルの運動過程を包括的に記述しました。

この動力学モデルに基づき、数値解析を行いました。まず、異なる条件下でモデルが生成する多様な歩容（ウォーキング、スキップ、クロールなど）を探索しました。次に、モデルの歩容特性やパラメータ依存性を詳細に調べ、リミットサイクル^{*2}や分岐現象^{*3}といった典型的な非線形現象を観察しました。これにより、モデルの動力的な複雑性とその法則性を明らかにしました。

さらに、理論の有効性と実用性を確かめるため、実験による検証を行いました。実験でも、数値解析で予測された歩容特性を再現することに成功し、理論解析の正確性を裏付けるとともに、モデルが実地に応用可能であることを証明しました。

<社会的な意義>

従来の脚移動ロボット研究では、SLIP(spring-loaded inverted pendulum) モデルが広く使われてきましたが、特定の歩容しか実現できない制約がありました。これに対し RTW モデルは、単一の構造で「ウォーキング」、「スキップ」、「クローリング」といった多様な歩容を再現し、さらに歩容間をスムーズに遷移することも可能です。また、環境（例：地形の傾斜角）や、身体と脚をつなぐ弾性強度といったシンプルなパラメータを調整するだけで、多様な歩容を生成できる汎用性を備えています。

このモデルは、テンセグリティ構造の柔軟性と自己釣り合い形状を活用することで、生物の筋肉特性を模倣するだけでなく、生物を超える運動性能を持つ設計の可能性を示しました。本研究は、形態に応じた多様な脚運動の機構解析に新たな視点をもたらすだけでなく、複雑な環境に適応する効率的な生物模倣ロボットの設計に向けた理論基盤を提供します。

<研究プロジェクトについて>

本研究は、立命館大学、北陸先端科学技術大学院大学、中国北京化工大学の国際共同研究による成果です。本研究は、日本学術研究振興会科学研究費補助金基盤研究(23K03727, 23H03424, 24H03008) および中国大学基礎研究基金(ZY2301, BH2316, buctrc202215)の支援を受けて実施しました。

<研究者のコメント>

乗馬や競馬の好きな方はご存知かと思いますが、馬は移動する速さに応じて、ウォーク（歩行）、トロット（駆歩）、キャンター（緩い駆歩）、ギャロップ（競走駆歩）と走り方を変えます。走り方を変えることで、身体に掛かるストレスを緩和し、エネルギー効率を上げ、走行姿勢を安定に保つのです。そのような、生物の持つ柔軟な環境適応能力を、ロボットの脚移動技術に応用できればと思ったのが研究のきっかけでした。生き物のように歩容パターンを柔軟に変える RTW モデルが多くの皆様の関心を惹くことを期待しています。

<論文タイトルと著者>

論文名 Tensegrity-Based Legged Robot Generates Passive Walking, Skipping, and Crawling Gaits in Accordance with Environment

（テンセグリティ構造を用いた脚型ロボットによる、環境適応的な受動歩行、スキップ、クローリング歩容の生成）

著者 鄭彦秋、浅野文彦、顔聡、李龍川、徳田功

掲載誌 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics

掲載日 2025年1月10日

DOI 10.1109/TMECH.2024.3522904

URL <https://doi.org/10.1109/TMECH.2024.3522904>

（用語解説）

※1：受動歩行：外部からの制御入力なしに、システムの形態や重力を活用して生成される歩行運動を指します。

※2：リミットサイクル：非線形動力学系において、システムが一定周期の運動を安定して繰り返す閉じた軌道（サイクル）を指します。

※3：分岐現象：システムのパラメータの変化に伴い、質的に異なる挙動が出現する現象を指します。例えば、傾斜の傾きが急になることで、安定であった一周期の歩容が不安定化し、二周期の歩容が新たに出現します。

以上

●本件に関するお問い合わせ先

（研究内容について）

立命館大学 理工学部 教授 徳田 功

TEL : 077-561-2832

Email : isao@fc.ritsumeai.ac.jp

（報道について）

立命館大学広報課 担当：勝屋

TEL : 075-813-8300

Email : r-koho@st.ritsumeai.ac.jp