

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560230

研究課題名（和文） ダイナミクスを考慮した波動歩行機械の機構系・制御系の設計と実験的検証

研究課題名（英文） Design of Mechanical and Control Systems for Undulatory Locomotors Based on Dynamics and its Experimental Verification

研究代表者

山口 博明（YAMAGUCHI HIROAKI）

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：10360182

研究成果の概要（和文）：ダイナミクス（動力学）に基づいた波動歩行機械の機構系・制御系の設計方法の確立を最終的な目標として、その動力学の方程式を導き、エネルギー効率、安定性、推進力などの定量的な評価指標を定式化し、動力学シミュレータを用いて、これを波動歩行機械の機構系・制御系に反映させる新たな設計の枠組みを提案した。また、新たに、動力学を考慮した波動歩行機械、『4 叉移動機構』を開発し、その有効性を実験的に確認した。

研究成果の概要（英文）：To establish a design methodology of mechanical and control systems for undulatory locomotors based on dynamics, a new design scheme has been proposed. Dynamical equations of the locomotors in the design scheme are first derived and performance indexes such as energy efficiency, stability and propulsion force are secondly formulated. The indexes are reflected in the design of mechanisms and control methods of the locomotors in dynamical simulators. A new undulatory locomotor designed based on dynamics referred to as a "four-forked steering walker" has been developed, and the validity of the design scheme has been verified experimentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2010 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総 計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御工学・波動歩行・nonholonomic system・chained form

1. 研究開始当初の背景

波動歩行（undulatory locomotion）とは体形の周期的な変化をその移動に変換することであり、生物の蛇は波動歩行によりその移動を実現している。この蛇の波動歩行を、移動性（mobility）を有する人工機械の設計と制御に反映させることで創造されたものが『ヘビ型ロボット』である。『ヘビ型ロボット』は、1970 年代初頭、広瀬茂男氏（現東

京工業大学名誉教授）により開発されたロボットであり、世界で初めて波動歩行を実現した移動機構である。『ヘビ型ロボット』は、受動車輪が取り付けられたリンクを複数連結することで構成されるものであり、リンク間の関節の周期的な駆動をその移動に変換することで波動歩行を実現している。日本における『ヘビ型ロボット』の研究は世界に先駆けて行われ、その機構の設計方法と制御方

法の有効性は実験的に確認され、その成果は世界的に非常に高く評価されている。また、広瀬茂男氏により、『ヘビ型ロボット』以外の代表的な波動歩行機械の1つである『ローラウォーカ』が提案され、その優れた移動性は世界に広く知られている。現在においても、『ヘビ型ロボット』、『ローラウォーカ』に代表される波動歩行機械の研究に関する世界の中の日本の優位性は変わっていない。しかし、これらの波動歩行機械の制御方法は開ループ制御法であり、これまでに閉ループ制御法（例えば、目標とする経路、軌道に追従させるフィードバック制御法など）は確立されてはいない。波動歩行機械のフィードバック制御法の確立を難しくしているのは、この移動機構が有する特異性、非ホロノミック性である。波動歩行機械を目標経路、目標軌道に追従させるためには、動力学を考慮したフィードバック制御法が必要であると考えられる。特に、波動歩行機械を目標通りに動作させた上で、動力学的にその動作を評価し、これを機構系・制御系の再設計に反映させることで、より優れた波動歩行機械を創造できると考えられる。

非ホロノミック性を有する機械システムとして、単体の車両型移動ロボット、あるいは、車両型移動ロボットが複数のトレーラを牽引する多重連結車両システムなどがある。これらの機械システムは非線形性を有し、さらに、各車輪がその車軸方向に横滑りしない非ホロノミック性も有している。従来、非線形機械システムの制御においては、目標状態近傍でシステムを線形近似し、線形制御理論を適用してそのフィードバック制御系を設計することが一般的であった。しかし、非ホロノミック性を有する機械システムを線形近似すると不可制御となることから、その制御に線形制御理論を直接適用できないことが知られている。波動歩行機械は非ホロノミック性を有する非線形機械システムであり、しかも、その車輪を直接駆動して走行するのではなく、関節の駆動をその移動に変換して走行することから、この変換が行えない特異姿勢を避けなければならない制約条件が加わり、その制御問題はさらに難しいと言える。非ホロノミック性を有する機械システムの制御については、その運動学的方程式を正準系であるチェインド・フォームに変換し、これに基づいてフィードバック制御系を設計することが、1990年代に、カリフォルニア大学バークレー校、カリフォルニア工科大学、LAAS（フランス）、NTNU（ノルウェー）などにおいて盛んに研究され、その方法が確立

されている。しかし、波動歩行機械は、リンク間を連結している回転関節から受動車輪が離れているoff-hook型の構造を有していることから、その運動学的方程式を正準系であるチェインド・フォームへ変換することは容易ではない。

これまでに研究代表者である山口博明は、新たに仮想的な機械要素を想定することで運動学的方程式が正準系であるチェインド・フォームへ変換可能な4つの波動歩行機械、『ステアリングを有するヘビ型ロボット』、『ステアリングを有する4又ヘビ型ロボット』、『3又移動機構』、『平面5節リンク移動機構』とそれらのフィードバック制御法を提案している。また、文部科学省科学研究費補助金（課題番号：19560238、課題名：波動歩行機械の機構設計と制御方法の実験的検証）により、『3又移動機構』、『平面5節リンク移動機構』を開発し、世界で初めて、波動歩行機械を任意の経路に追従させるビジュアルフィードバック制御を実現し、その有効性を実験的に確認している。

新たな波動歩行機械の創造にあたっては、その運動学的方程式のみならず、動力学的方程式を導き、エネルギー効率、安定性、推進力などの動力学的な評価指標に基づいて、機構系・制御系を設計する必要がある。例えば、波動歩行機械が受動車輪の車軸方向に発生する力の合力が大きければ推進力は大きくなるが、車輪間における力の打ち消し合いが大きければ、移動におけるエネルギー効率は低くなる。また、複数の受動車輪の接地点から構成される支持多角形内に重心があっても、慣性力によっては転倒する（不安定になる）ことがある。あるいは、支持多角形外に重心があっても、慣性力によっては転倒し難い（安定になる）こともある。このように動力学的な評価指標に基づく波動歩行機械の機構系・制御系の設計は不可欠であると言える。しかし、この設計方法を論じた研究例は非常に少ない。

2. 研究の目的

本研究では、波動歩行を動力学的に解析し、エネルギー効率、安定性、推進力などの定量的な評価指標を定式化し、これに基づいて、波動歩行機械の機構系・フィードバック制御系を設計する新たな枠組みの提案を目的としている。

具体的には、これまでに研究代表者である山口博明が開発している『3又移動機構』、『平面5節リンク移動機構』の動力学的方程式を導き、波動歩行の定量的な評価指標を定

式化し、運動学的方程式に基づくフィードバック制御法を動力学に対応するように拡張し、動力学方程式を数値積分する独自に開発する動力学シミュレータ上において、機構系・フィードバック制御系を評価する。また、機構設計のCADデータから『3又移動機構』、『平面5節リンク移動機構』の力学的な特性を再現する力学モデルを商用の動力学シミュレータ上に構築し、機構系・フィードバック制御系を評価する。さらに、実験機にセンサーを取り付けて評価指標を計測し、動力学シミュレータ上の数値計算の有効性も検証する。そして、『3又移動機構』、『平面5節リンク移動機構』の機構系・フィードバック制御系の設計変更を行い、再度、動力学シミュレータ上で評価する。動力学シミュレータを用いる最大の利点は、機構系・フィードバック制御系の設計変更を、実験機を開発することなく評価できることである。これらの評価を踏まえて、新たな波動歩行機械の機構系・フィードバック制御系を設計・開発し、それらの有効性を実験的に検証する。

3. 研究の方法

(1) 初年度である平成22年度においては、これまでに研究代表者である山口博明が開発している『3又移動機構』の動力学方程式を導き、波動歩行のエネルギー効率、安定性、推進力などの定量的な評価指標を定式化し、以下の文献に示す運動学的方程式に基づく制御方法を動力学に対応するように拡張した。

・山口博明, “ステアリングをもつ3又移動機構の経路追従フィードバック制御法”, 計測自動制御学会論文集, 43巻, 7号, 562-571, (2007)

また、動力学方程式を数値積分する独自に開発した動力学シミュレータ上において機構系・フィードバック制御系の有効性を評価した。さらに、『3又移動機構』の機構設計のCADデータから、実験機の動力学な特性を再現する力学モデルを商用の動力学シミュレータ上に構築し、直線経路追従動作、曲線経路追従動作を再現し、評価指標を数値計算的に求め、機構系・フィードバック制御系を評価した。実験機にセンサーを取り付け、評価指標を計測し、数値計算の妥当性も検証した。そして、評価指標に基づいて、機構系・フィードバック制御系の設計変更を行い、再度、評価指標を動力学シミュレータ上で数値計算的に求め、設計変更を評価した。

(2) 平成23年度においては、これまでに研究代表者である山口博明が開発している『平面5節リンク移動機構』の動力学方程式を導き、波動歩行のエネルギー効率、安定

性、推進力などの定量的な評価指標を定式化し、以下の文献に示す運動学的方程式に基づく制御方法を動力学に対応するように拡張した。

・山口博明, “4つのステアリングをもつ平面5節リンク移動機構の制御”, 計測自動制御学会論文集, 42巻, 10号, 1107-1116, (2006)
また、動力学方程式を数値積分する独自に開発した動力学シミュレータ上において機構系・フィードバック制御系の有効性を評価した。さらに、『平面5節リンク移動機構』の機構設計のCADデータから、実験機の動力学な特性を再現する力学モデルを商用の動力学シミュレータ上に構築し、直線経路追従動作を再現し、評価指標を数値計算的に求め、機構系・フィードバック制御系を評価した。そして、評価指標に基づいて、機構系・フィードバック制御系の設計変更を行い、再度、評価指標を動力学シミュレータ上で数値計算的に求め、設計変更を評価した。これに加えて、『ヘビ型ロボット』、駆動系を有さない車両型移動ロボットに複数の受動車輪が回転バネを介して連結されたヒレを取り付けることで構成される『魚型移動機構』の機構系・フィードバック制御系を動力学シミュレータ上において評価した。

(3) 平成24年度においては、平成22年度、平成23年度に行った『3又移動機構』、『平面5節リンク移動機構』、『ヘビ型ロボット』、『魚型移動機構』の機構系・フィードバック制御系の評価、ならびに、『3又移動機構』、『平面5節リンク移動機構』の設計変更の評価に基づいて、新たな波動歩行機械である『4又移動機構』を設計・開発した。特に、ダイナミックに受動車輪が転がる軌道を変化させることによりエネルギー効率、安定性、推進力を向上させる方法の有効性を動力学シミュレータと実験機を用いて検証した。

4. 研究成果

(1) 平成22年度においては、これまでに研究代表者である山口博明が開発している『3又移動機構』の動力学方程式を、ラグランジュ力学に基づいて導いた。動力学方程式は、オイラー・ラグランジュ方程式と受動車輪の速度拘束(受動車輪が車軸方向に横滑りしない非ホロノミックな拘束)を与える方程式の1階微分から構成され、特に、非ホロノミックな拘束を与える拘束力はラグランジュの未定乗数を介して組み込まれている。動力学方程式に基づいて、波動歩行のエネルギー効率、安定性、推進力などの定量的な評価指標を定式化し、運動学的方程式に基づく制御方法を動力学に対応するように拡張した。また、動力学方程式を数値積分する独自に開発した動力学シミュレータ上において、水平面上の直線経路追従動作、曲

線経路追従動作、斜面上のこれらの動作（登坂走行）を動力的に解析し、制御方法の有効性を確認した。

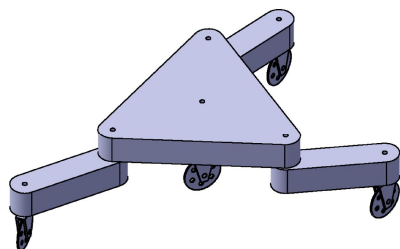


図1 3又移動機構のモデル

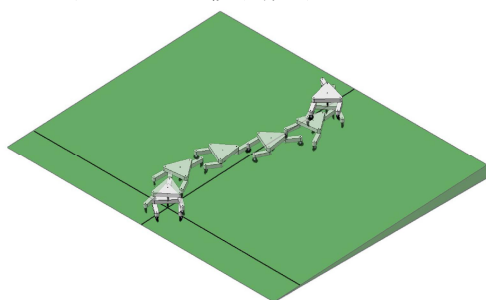


図2 3又移動機構の登坂走行
(LMS Virtual. Lab Motion)

さらに、『3又移動機構』の機構設計のCADデータから、実験機の動力的な特性を再現する力学モデルを本科学研究費補助金により導入した商用の動力学シミュレータ（LMS Virtual. Lab Motion）上に構築し、水平面上の直線経路追従動作、曲線経路追従動作、斜面上のこれらの動作（登坂走行）を再現し、評価指標を数値計算的に求め、機構系・フィードバック制御系の有効性を確認した。そして、実験機にセンサーを取り付け、評価指標を計測し、数値計算の妥当性を確認した。この評価指標に基づいて、『3又移動機構』の機構パラメータ、制御パラメータの設計変更を行い、再度、評価指標を動力学シミュレータ上で数値計算的に求め、この変更を評価した。特に、『3又移動機構』の受動車輪の車軸方向にかかる力（受動車輪が床面を蹴る力）、特異姿勢（推進力を発生できない姿勢）における減速などを動力学シミュレータ上においても再現できることを確認した。新たに、特異姿勢からの距離を表す定量的な評価指標として『推進力伝達評価関数』を定義し、この評価関数を最適化する運動パラメータを設計し、その有効性を動力学シミュレータ、ならびに、実験機において確認した。

（2）平成23年度においては、これまでに研究代表者である山口博明が開発している『平面5節リンク移動機構』の動力学方程式をラグランジュ力学に基づいて導いた。動力学方程式に基づいて、波動歩行のエネル

ギー効率、安定性、推進力などの定量的な評価指標を定式化し、運動学的方程式に基づく制御方法を動力学に対応するように拡張した。また、動力学方程式を数値積分する独自に開発した動力学シミュレータ上において、水平面上の直線経路追従動作を動力的に解析し、制御方法の有効性を確認した。さらに、『平面5節リンク移動機構』の機構設計のCADデータから、実験機の力学的な特性を再現する力学モデルを、本科学研究費補助金により導入した商用の動力学シミュレータ（LMS Virtual. Lab Motion）上に構築し、水平面上の直線経路追従動作を再現し、評価指標を数値計算的に求め、機構系・フィードバック制御系の有効性を確認した。この評価指標に基づいて、『平面5節リンク移動機構』の機構パラメータ、制御パラメータの設計変更を行い、再度、評価指標を動力学シミュレータ上で数値計算的に求め、この変更を評価した。

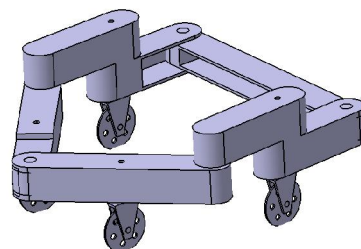


図3 平面5節リンク移動機構のモデル

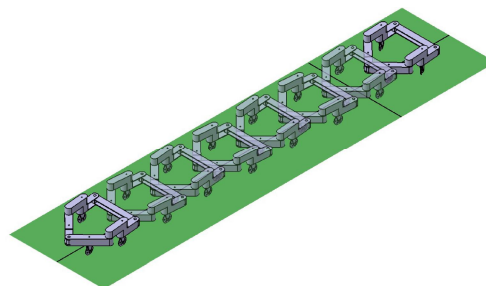


図4 平面5節リンク移動機構
の直線走行 (LMS Virtual. Lab Motion)

また、従来の『ヘビ型ロボット』の経路追従制御法を運動学的方程式に基づいて導き、これを動力学に対応するように拡張し、その有効性を動力学シミュレータ上において確認した。特に、斜面の登坂走行を通してその有効性を確認した。さらに、駆動系を有さない車両型移動ロボットに複数の受動車輪が回転バネを介して連結されたヒレを取り付けることで構成される『魚型移動機構』の経路追従制御法を運動学的方程式に基づいて導き、これを動力学に対応するように拡張し、その有効性を動力学シミュレータ上において確認した。特に、バネ系に蓄積されるポテンシャルエネルギーを解放することで推進力を発生できない特異姿勢の回避が可能で

あることを示した。『3 又移動機構』、『平面 5 節リンク移動機構』、『ヘビ型ロボット』、『魚型移動機構』などの動力学的な解析を通して、新たな波動歩行機械である『4 又移動機構』を設計し、その力学モデルを商用の動力学シミュレータ (LMS Virtual. Lab Motion) 上に構築し、経路追従制御法を運動学的方程式に基づいて導き、これを動力学に対応するように拡張し、その有効性を確認した。

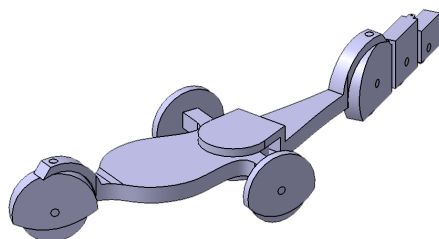


図 5 魚型移動機構のモデル

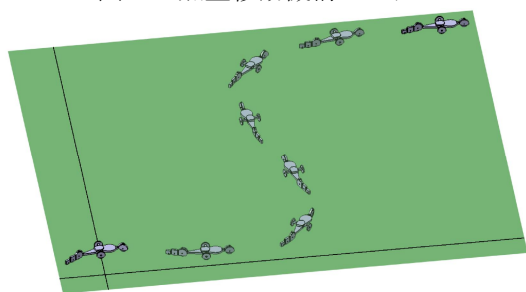


図 6 魚型移動機構の経路追従動作 (LMS Virtual. Lab Motion)

(3) 平成 24 年度においては、平成 22 年度、平成 23 年度の研究成果である『3 又移動機構』、『平面 5 節リンク移動機構』、『ヘビ型ロボット』、『魚型移動機構』の機構系・フィードバック制御系の動力学的な解析に基づいて、本科学研究費補助金により、新たな波動歩行機械である『4 又移動機構』を設計・開発し、その有効性を実験的に確認した。具体的には、平成 23 年度までに、『3 又移動機構』の動力学方程式を解析力学、ここではラグランジュ力学に基づいて導き、状態変数、力（例えば、地面から車輪がその車軸方向に受ける力）を数値積分により計算し、さらに、商用の動力学シミュレータから得られる計算結果と比較することで、ラグランジュ力学に基づく解析方法と運動パラメータの設計方法の有効性を確認した。また、『平面 5 節リンク移動機構』、『ヘビ型ロボット』、より少ないアクチュエータで波動歩行を実現する『魚型移動機構』の動力学的な特性を動力学シミュレータにより解析した。これらの解析結果に基づいて、よりエネルギー効率がよく、安定性に優れ、推進力大きい波動歩行機械として『4 又移動機構』を設計し、その動力学方程式をラグランジュ力学に基づいて導き、状態変数、力などを数値積分

により計算し、商用の動力学シミュレータの計算結果と比較することで、ラグランジュ力学に基づく解析方法と運動パラメータの設計方法の有効性を確認した。最終年度である平成 24 年度においては、これまでに行った『4 又移動機構』の動力学的な解析に基づいて、実験機を開発し、その機構系・フィードバック制御系の有効性を実験的に確認した。特に、(ア) 正 4 角形のベースのモーションコントロール（正 4 角形のベースの重心の移動と重心回りの回転を定量的に指定する）モード、(イ) 障害物回避のため正 4 角形のベースの軌道を目標軌道に対してダイナミックに変化させるモード、これら 2 つのモードを定義し、それぞれのモードを実現する運動パラメータの設計方法を新たに提案し、その有効性を実験的に確認した。

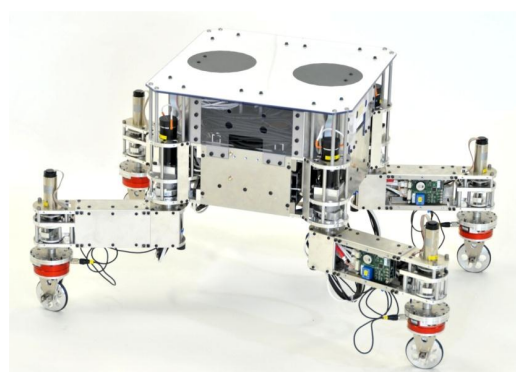


図 7 4 又移動機構の実験機



図 8 4 又移動機構の経路追従動作

これまでに、動力学的な評価指標に基づく波動歩行機械の機構系・フィードバック制御系の設計方法は確立されてはならず、本研究は十分な先行性、優位性を有していると言える。本研究で得られた成果は、世界に先駆けた研究成果であり、今後、波動歩行機械に関する研究を推進する上で原動力となると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 竹田敏之、山口博明、河上篤史、魚型移動機構の経路追従制御～ベネ系を用いた

補助動力機構による推進力の補償～、第30回日本ロボット学会学術講演会、2012年09月20日、札幌市、北海道

- ② Hiroaki Yamaguchi, Dynamical Analysis of an Undulatory Wheeled Locomotor: A Trident Steering Walker, The 10th IFAC Symposium on Robot Control (Syroco 2012), September 5th 2012, Dubrovnik, Croatia
- ③ Hiroaki Yamaguchi, Toshiyuki Takeda and Atsushi Kawakami, Control of a Trident Steering Walker - Design of Motion Parameters Based on a Propulsion Transfer Function -, The 12th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-12), June 29th 2012, Jeju Island, Korea
- ④ 竹田敏之、藤代渉、山口博明、河上篤史、ステアリングを有する3叉移動機構の制御～推進力伝達評価関数の導入とこれに基づく運動パラメータの設計～、第29回日本ロボット学会学術講演会、2011年9月7日、江東区、東京
- ⑤ Hiroaki Yamaguchi, Takuya Morinaga and Atsushi Kawakami, A Path-Following Feedback Control Law with a Variable Velocity for a Trident Steering Walker and its Experimental Verification, The 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS2010), September 3rd 2010, Bologna, Italy

[図書] (計1件)

- ④ Hiroaki Yamaguchi, Toshiyuki Takeda and Atsushi Kawakami, Control of a Trident Steering Walker - Design of Motion Parameters Based on a Propulsion Transfer Function -, Intelligent Autonomous Systems 12, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol.194, Springer Berlin Heidelberg, 2013, 693-705

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 博明 (YAMAGUCHI HIROAKI)
青山学院大学・理工学部・教授
研究者番号：10360182

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

河上 篤史 (KAWAKAMI ATSUSHI)
青山学院大学・理工学部・客員研究員
研究者番号：20397061