

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007～2008
課題番号：19560238
研究課題名（和文） 波動歩行機械の機構設計と制御方法の実験的検証

研究課題名（英文） Experimental Verification of Design and Control of Undulatory Locomotors

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

研究成果の概要：波動歩行機械の設計論の構築とその制御方法の確立を最終的な目標として、これまでに研究代表者が提案しているフィードバック制御系が構成可能な波動歩行機械、3 叉移動機構と平面 5 節リンク移動機構を開発し、ビジュアルフィードバック制御による直線経路追従動作を実現し、機構設計と制御方法の有効性を実験的に確認した。この実験で得られた成果は、世界に先駆けた成果であり、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。

交付額

(金額単位：円)			
	直接経費	間接経費	合 計
2 0 0 7 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2 0 0 8 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総 計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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、制御工学、ロボティクス、運動制御、波動歩行

1．研究開始当初の背景

本研究においては、波動歩行機械の設計論の構築とその制御方法の確立を最終的な目標としている。波動歩行機械とは、体形の周期的な変化をその移動に変換する波動歩行を行う移動機構のことである。生物である蛇の精巧な波動歩行を観察しその力学的な考察を、移動性を有する人工機械の設計とその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年代の初頭、東京工業大学において開発されたロ

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。このヘビ型ロボットは、受動的に回転する車輪が取り付けられたリンク、これを複数個連結することで構成されるものであり、リンク間の関節を周期的に駆動することでその移動を実現している、つまり、波動歩行を実現している。この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により検証され、その成果は非常に高く評価されている。現在においても、ヘビ型ロボットの研究に関する世界の中における日本の優位性は

変わっていない。しかし、その制御方法は35年ほど前に提案されたものであり、それはフィードフォワード制御法であって、これまでにフィードバック制御法は確立されてはいない。この波動歩行機械のフィードバック制御系の構成をこれほどまでに難しくしているのは、この移動機構が持つ特異性、非ホロノミック性のためである。

非ホロノミックな拘束を有する機械システムとして、多重連結車両システムがある。これは、駆動力を有する車両が複数のトレーラを牽引する機械システムのことである。この多重連結車両システムにおいて、各車輪はその車軸方向に直接移動することはできない。これが非ホロノミックな拘束である。これまで、非線形な機械システムを制御する場合、目標とする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漸近安定化を実現する方法が用いられてきた。しかし、この非ホロノミックな拘束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、その制御系を構成するために線形近似に基づいて線形制御理論を適用することはできない。

さて、本研究で取り扱う波動歩行機械は、機構的に多重連結車両システムの一つ、つまり、非ホロノミックな拘束を有する機械システムの一つである。さらに、この波動歩行機械は、それが持つ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することで走行している。したがって、関節の駆動をその移動に変換できない特異姿勢を避けなければならないというもう一つの制約条件も加わり、その制御問題はさらに難しいといえる。本研究においては、波動歩行機械のフィードバック制御系を構成するために、その運動学的方程式を正準系であるChained Formへ変換する数学的な枠組みとして、微分幾何学、微分形式を用いることにする。

この正準系であるChained Formを用いる理論的な背景にはつぎのようなものがある。1990年代、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)、INRIA(フランス)、NTNU(ノルウェー)において、微分幾何学、微分形式に基づく多重連結車両システムの制御方法が研究されている。この研究で確立された制御方法においては、多重連結車両システムの運動学的方程式を微分幾何学、微分形式に基づいて正準系であるChained Formへ変換し、このChained Formに基づいてそのフィードバック制御系を構成している。もちろん、すべての多重連結車両システムの運動学的方程式を、正準系であるChained Formへ変換できるというわけではな

い。個々の機械システムごとに、Chained Formへ変換可能であるかどうか調べなければならない。また、Chained Formへ変換可能であるとしても、その変換は一意ではなく、同じ多重連結車両システムに対して、幾つもの変換の仕方があることも知られている。これまでに研究代表者である山口博明は、以下の3つの文献に示すように、2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システムの運動学的方程式が正準系であるChained Formへ変換可能であることを示し、このChained Formに基づいて、この協調搬送システムを直線経路、曲線経路に追従させるフィードバック制御系を構成し、その有効性をシミュレーションにより検証している。

・山口博明、新井民夫、“2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システムのTwo-Chain, Single-Generator Chained Formへの変換とその操舵”、日本機械学会論文集、C編、69巻、686号、2751-2758、(2003)

・山口博明、新井民夫、“2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システム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、39巻、6号、575-584、(2003)

・山口博明、新井民夫、“2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システムのベジェ曲線による経路計画”、日本機械学会論文集、C編、70巻、691号、774-781、(2004)

これら3つの文献に示す研究成果から、正準系であるChained Formに基づいて多重連結車両システムの制御系を構成することの有効性を十分に確認している。しかし、この多重連結車両システムの制御方法を、直接、波動歩行機械の制御に適用することはできない。なぜなら、多重連結車両システムのうち、車両間を連結する回転関節の位置と車軸の midpoint の位置が同一となる構造を持っているものについては、その運動学的方程式を正準系であるChained Formへ変換することは可能である。これに対して、車両間を連結する回転関節の位置と車軸の midpoint の位置が異なる off-hook 型の構造を持っている多重連結車両システムの運動学的方程式をこのChained Formへ変換することは簡単ではない。本研究で取り扱う波動歩行機械は、関節の駆動をその移動に変換するために off-hook 型の構造を持っていることから、その運動学的方程式を正準系であるChained Formへ変換し、そのフィードバック制御系を構成することは非常に挑戦的な研究テーマである。

2. 研究の目的

本研究においては、波動歩行機械の設計論の構築とその制御方法の確立を最終的な目標とし、ヘビ型ロボット以外の様々な波動歩行機械を設計し、それらの制御方法を考える。これまでも幾つかの波動歩行機械は提案されている。しかし、それらの制御方法はフィードフォワード制御法であり、これまでにフィードバック制御法は確立されてはいない。波動歩行機械を安定的に動作させるにはフィードバック制御法が必要であると考えられる。これまでに研究代表者である山口博明は、フィードバック制御系が構成できるように、運動学的方程式が微分幾何学に基づいて正準系である Chained Form へ変換可能となるものとして、以下の4つの文献に示す波動歩行機械、2つの関節と2つのステアリングを持つヘビ型ロボット、ステアリングを持つ3又移動機構、4つのステアリングを持つ4又ヘビ型ロボット、4つのステアリングを持つ平面5節リンク移動機構を設計している。そして、これらの運動学的方程式が微分幾何学に基づいて正準系である Chained Form へ変換可能であることを示し、直線経路への追従を可能にするフィードバック制御法を提案し、その有効性をシミュレーションにより検証している。特に、仮想的な機械要素を定義し、この要素の状態変数を組み込むことで運動学的方程式を再構成し、それらの運動学的方程式を正準系である Chained Form へ変換可能としているところが、新しい。

・山口博明、“2つの関節と2つのステアリングを持つヘビ型ロボットの制御”、日本機械学会論文集、C編、71巻、706号、1899-1906、(2005)

・山口博明、“ステアリングを持つ3又移動機構の制御”、計測自動制御学会論文集、41巻、6号、499-508、(2005)

・山口博明、“4つのステアリングを持つ4又ヘビ型ロボットの制御”、日本機械学会論文集、C編、72巻、715号、879-886、(2006)

・山口博明、“4つのステアリングを持つ平面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)

本研究においては、これら4つの文献に示した波動歩行機械の設計方法、それらの制御方法の有効性を実験により検証することを目的とする。具体的には、ステアリングを持つ3又移動機構を設計し、その実機を開発し、直線経路への追従を可能にするフィードバック制御法の有効性を実験により検証する。検

証方法としては、研究代表者である山口博明の研究室にある移動ロボット用走行実験フィールドにおいて、開発したステアリングを持つ3又移動機構の動作の実験結果とシミュレーション結果を比較し、それらの整合性を評価する。それから、実機に力センサーを取り付け、車輪が実験フィールドから受ける反力などを測定し、移動に関わるエネルギー効率についても評価する。また、4つのステアリングを持つ平面5節リンク移動機構についても同様の検証実験を行う。これら4つの文献に発表した成果は、世界で初めて、運動学的方程式に基づいて波動歩行機械のフィードバック制御系を与えたものである。したがって、これらの波動歩行機械の実機を開発し、それらの機構設計、制御方法の有効性を実験により検証することで、本研究における先行性、優位性を実証することができる。この検証実験で得られる成果は、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。

3. 研究の方法

初年度である平成19年度においては、以下の文献に示すステアリングを持つ3又移動機構を設計し、その実機を開発し、その機構設計と制御方法の有効性を実験により検証した。

・山口博明、“ステアリングを持つ3又移動機構の制御”、計測自動制御学会論文集、41巻、6号、499-508、(2005)

これまでに研究代表者である山口博明は、この3又移動機構の運動学的方程式を、微分幾何学に基づいて、正準系である Chained Form へ変換し、Chained Form に基づいて、直線経路に追従させるフィードバック制御法を提案し、その有効性をシミュレーションにおいて検証している。

平成19年度においては、この3又移動機構の実機を開発し、その機構設計と制御方法の有効性を検証するために以下の研究体制を組織した。研究代表者である山口博明は、実機開発の予備実験を行うために、この3又移動機構の機構設計とその制御方法の有効性を多様な条件設定（パラメータ設定、初期状態設定など）において検証することができるシミュレータを開発した。また、研究代表者である山口博明は、機構設計に基づく製図も担当した。そして、研究代表者である山口博明の所属研究機関である青山学院大学理工学部 に在籍している森永拓哉、渡辺正記、関泰士が、実機の製作（機械加工を含む、た

だし、高い精度の加工については外注)、モータ駆動系、センサー駆動系などの電気・電子回路の作成、制御システムの開発、視覚フィードバック制御システムの開発を担当した。

最終年度である平成20年度においては、以下の文献に示す4つのステアリングを持つ平面5節リンク移動機構を設計し、その実機を開発し、その機構設計と制御方法の有効性を実験により検証した。

・山口博明、“4つのステアリングを持つ平面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)

これまでに研究代表者である山口博明は、この平面5節リンク移動機構の運動学的方程式を、微分幾何学に基づいて、正準系であるChained Formへ変換し、Chained Formに基づいて、直線経路に追従させるフィードバック制御法を提案し、その有効性をシミュレーションにおいて検証している。

平成20年度においては、この平面5節リンク移動機構の実機を開発し、その機構設計と制御方法の有効性を検証するために以下の研究体制を組織した。前年度と同様に、研究代表者である山口博明は、実機開発の予備実験を行うために、この平面5節リンク移動機構の機構設計とその制御方法の有効性を多様な条件設定(パラメータ設定、初期状態設定など)において検証することができるシミュレータを開発した。また、研究代表者である山口博明は、機構設計に基づく製図も担当した。そして、研究代表者である山口博明の所属研究機関である青山学院大学大学院博士前期課程に在籍している森永拓哉、渡辺正記、関泰士が、実機の製作(機械加工を含む、ただし、高い精度の加工については外注)、モータ駆動系、センサー駆動系などの電気・電子回路の作成、制御システムの開発、視覚フィードバック制御システムの開発を担当した。

さらに、最終年度である平成20年度においては、開発した平面5節リンク移動機構と前年度開発した3叉移動機構に取り付ける力センサーにより、それぞれの機構について、波動歩行を行う際に車輪が実験フィールドから受ける反力を測定し、移動に関わるエネルギー効率を計算し、開発した2つの波動歩行機械の性能をこのエネルギー効率に基づいて評価した。エネルギー効率の計算については、研究代表者である山口博明が担当した。

4. 研究成果

平成19年度においては、波動歩行機械の1つであるステアリングを持つ3叉移動機構を設計し、その実機を開発し、その機構設計と制御方法の有効性を実験的に検証した。具体的には、(1)研究代表者である山口博明が、3叉移動機構の運動学的方程式を微分幾何学に基づいて正準系であるChained Formへ変換し、このChained Formに基づいて直線経路への追従を達成するフィードバック制御法を、多様な条件設定(パラメータ設定、初期条件設定)において評価することができるシミュレータを開発した。また、(2)研究協力者である青山学院大学理工学部に在籍している森永拓哉、渡辺正記、関泰士らと共に、開発したシミュレータを用いて直線経路への追従を達成するフィードバック制御法の評価を行った。そして、(3)シミュレータ上における評価から、3叉移動機構の関節の駆動、ステアリングの操舵に必要なトルク、関節角の測定、ステアリング角の測定に必要なセンサの測定精度を算出し、これらに基づいて、機構の設計、アクチュエータ(モータ)の選定、センサ(エンコーダ、ポテンシオメータ)の選定を行った。それから、(4)機構部品の製作を行った。さらに、(5)波動歩行機械の走行実験を行うための広さ4.0m×4.0mのフィールドを新たに設け、このフィールド上の高さ3.0mの天井に取り付けた定点カメラによりその運動を計測するためのビジョンシステムを開発し、直線経路への追従を達成するビジュアルフィードバック制御系を構成し、その機構設計と制御方法の有効性を実験的に確認した。特に、実験値が理論値に非常に良く一致していることから、設計した運動性能をこの3叉移動機構が十分に実現していることを確認した。図1に開発した3叉移動機構を示す。図2に3叉移動機構の直線経路追従動作を示す。

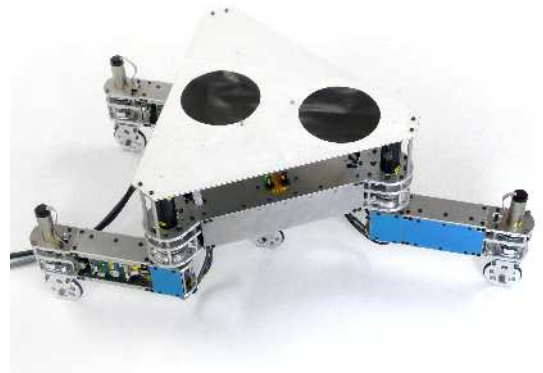


図1 開発した3叉移動機構



図2 3 叉移動機構の直線経路追従動作

平成20年度においては、波動歩行機械の1つである4つのステアリングを持つ平面5節リンク移動機構を設計し、その実機を開発し、その機構設計と制御方法の有効性を実験的に検証した。具体的には、(1)研究代表者である山口博明が、平面5節リンク移動機構の運動学的方程式を微分幾何学に基づいて正準系であるChained Formへ変換し、このChained Formに基づいて直線経路への追従を達成するフィードバック制御法を、多様な条件設定(パラメータ設定、初期条件設定)において評価することができるシミュレータを開発した。また、(2)研究協力者である青山学院大学大学院理工学研究科に在籍している森永拓哉、渡辺正記、関泰士らと共に、開発したシミュレータを用いて直線経路への追従を達成するフィードバック制御法の評価を行った。そして、(3)シミュレータ上における評価から、平面5節リンク移動機構の関節の駆動、ステアリングの操舵に必要なトルク、関節角の測定、ステアリング角の測定に必要なセンサの測定精度を算出し、これらに基づいて、機構の設計、アクチュエータ(モータ)の選定、センサ(エンコーダ、ポテンショメータ)の選定を行った。それから、(4)機構部品の製作を行った。さらに、(5)波動歩行機械の走行実験を行うために設置した広さ4.0m×4.0mのフィールドにおいて、このフィールド上の高さ3.0mの天井に取り付けた定点カメラによりその運動を計測するビジョンシステムを用いて、直線経路への追従を達成するビジュアルフィードバック制御系を構成し、その機構設計と制御方法の有効性を実験的に確認した。特に、実験値が理論値に非常に良く一致しており、設計した運動性能をこの平面5節リンク移動機構が十分に実現していることを確認した。図3に開発した平面5節リンク移動機構を示す。図4に平面5節リンク移動機構の直線経路追従動作を示す。

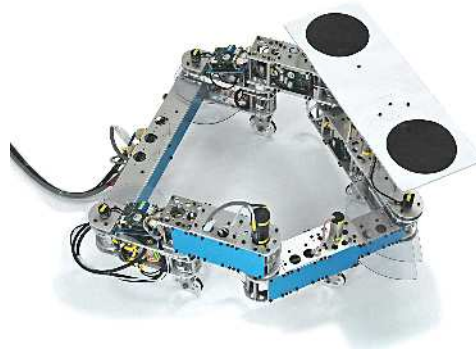


図3 開発した平面5節リンク移動機構



図4 平面5節リンク移動機構の直線経路追従動作

さらに、平成20年度においては、開発した平面5節リンク移動機構と前年度開発した3叉移動機構に取り付けた力センサーにより、それぞれの機構について、波動歩行を行う際に車輪が実験フィールドから受ける反力を測定し、移動に関わるエネルギー効率を計算し、開発した2つの波動歩行機械の性能をこのエネルギー効率に基づいて評価し、エネルギー効率の良い歩行パターンをそれぞれ導出した。

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)

[雑誌論文](計2件)

Hiroaki Yamaguchi, Control of A New Type of Undulatory Wheeled Locomotor: A Trident Steering Walker Based on Chained Form, Journal of Robotics and Mechatronics, (2009), 掲載決定, 査読有

山口博明、ステアリングをもつ3叉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、562-571、(2007)、査読有

〔学会発表〕(計7件)

Hiroaki Yamaguchi, A Path Following Feedback Control Law for A New Type of Undulatory Locomotor: A Trident Steering Walker, The 14th

International Conference on Advanced Robotics, Munich, Germany, 2009年6月24日

Hiroaki Yamaguchi, Control of A Four-steering, Planar Five-bar Linkage-Walker, The 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009年5月15日

森永拓哉、山口博明、河上篤史、関泰士、渡辺正記、3叉移動機構の開発、第26回日本ロボット学会学術講演会、神戸大学、2008年9月11日

渡辺正記、山口博明、河上篤史、4つのステアリングを持つ平面6節リンク移動機構の制御、第26回日本ロボット学会学術講演会、神戸大学、2008年9月11日

関泰士、山口博明、河上篤史、複数のステアリングを持つヘビ型ロボットの制御、第26回日本ロボット学会学術講演会、神戸大学、2008年9月11日

Hiroaki Yamaguchi, Control of A Trident Steering Walker, The 10th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, Baden-Baden, Germany, 2008年7月25日
森永拓哉、渡辺正記、関泰士、山口博明、ステアリングをもつ3叉移動機構の経路追従フィードバック制御法、先端ロボット工学合同ワークショップ、横浜国立大学、2007年11月7日

〔図書〕(計1件)

Hiroaki Yamaguchi, Intelligent Autonomous Systems 10 Edited by W. Burgard, R. Dillman, C. Plagemann and N. Vahrenkamp, IOS Press, 6-15, (2008)

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・准教授
研究者番号: 10360182

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし