

平成 22 年 6 月 2 日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2009

課題番号：18206026

研究課題名（和文）

環境適応推進を行う水陸両用ヘビ型ロボットの機構と制御の研究

研究課題名（英文）

Study of Mechanism and Control of Terrain-Adaptive Amphibious Snake-like Robots

研究代表者

広瀬 茂男（HIROSE SHIGEO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70108215

研究成果の概要（和文）：

本研究では、申請者のこの分野における 30 年以上にわたる研究の蓄積と近年の技術的革新を踏まえ、ヘビ型ロボットに関する研究の体系化と、実用に耐えるシステムの開発を目指した。結果として、形態学・力学の体系化をほぼ終了し、設計論と制御論の体系化は、基礎部分は終了した。また、実用システムの開発は果たせなかったが、新たな関節機構・センサーを複数開発し、実用に至る途上に位置する 3 体のロボットを完成させた。

研究成果の概要（英文）：

This project aimed at systematization of the applicant's over 30 years of research on snake-like robots and development of a system of practical use which reflects both recent technological innovations and our past research achievements. We have successfully developed its morphological and mechanical theoretical frameworks, and have laid out the basis for its design and control frameworks. We also developed several multi-joint sensors and three robots that will provide the basis for the system of practical use which we aim to develop.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2007年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2008年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2009年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
総計	37,500,000	11,250,000	48,750,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ヘビ型ロボット、水陸両用ロボット、環境適応、索状体能動体、配管検査、レスキューロボット、多関節機構、蛇行推進

1. 研究開始当初の背景

申請者は 1971 年から実際のヘビを用いたヘビの運動解析、また 1972 年からヘビ型ロ

ボットの研究を推進し、世界初のヘビ型ロボットを開発した。これら初期の研究は世界的にも高く評価された。さらに 30 年以上にわ

たる研究により多数のヘビ型ロボットを開発し、理論と技術を蓄積してきた。

2000年以降は、米国CMUのChosetや中国瀋陽自動化研究所のMaなどがヘビ型ロボットの研究を活発化させていた。一方申請者らも、3次元曲線の取り扱いに通常使われるFrenet-Serret標構が曲線の表面の向きを扱えないことから、申請者ら独自のdorsal（背びれ）座標系を定義する3次元運動学の理論体系を提案し、新たな形態論と制御理論の構築を試みていた。2005年には水陸両用ヘビ型ロボットの開発に成功し、愛知万博に出展して注目を得た。このように2000年以降、理論的・技術的な進展が急速に進んでいた。

これを受けて申請者は、ヘビ型ロボットに関する研究を整理して体系化すると同時に、実用ヘビ型ロボットの開発を行う準備が整ったと考え、本研究を開始した。

2. 研究の目的

(1) (研究の体系化) ヘビ型ロボットの機構・制御・センサ系に関する研究を集大成し、設計論と制御理論を体系化する。

(2) (実用ロボットの開発) 上の成果を元に、現実的な用途に利用可能な実用型ヘビ型ロボットを開発する

(3) 具体的な検討項目は、以下の8つである。

①水陸両用で、凹凸のある地形に対応できる新しいヘビ型ロボット用関節を開発する。

②直径20mmオーダーの超小型ヘビ型ロボットを開発する。

③計算機・通信系・駆動アンプなどを内蔵した超小型の制御用ユニットの開発

④障害物回避のためのインテリジェントなシステムの開発

⑤ロボット先端搭載カメラの画像の安定化技術の開発、及び画像伝送のための光ファイバー通信機器の開発

⑥研究背景で述べた3次元運動学を利用した理論の構築と応用の研究

⑦水中遊泳の運動の最適化

⑧汎用的なヘビ型検査ロボットの実用化

3. 研究の方法

(1) (研究の体系化) 3次元運動学を基礎として形態学、力学、制御論を統一的に記述することでこれらを体系化する。その上で設計

論を構築する。

(2) (実用ロボットの開発) 上記理論研究の成果も取り入れながら、試作機的设计・製作と実証試験のサイクルを実施する中で有効なシステムを開発する。

4. 研究成果

(1) (研究の体系化) 3次元運動学を基礎として、以下のように形態学・力学・制御論・設計論の体系化を進めた。

① (形態学) 蛇行曲線の一部を浮上させて移動するヘビ型ロボットの移動様式を分類し、3次元運動学によりその形態を定式化した。特に、自然界でも見られない、蛇行曲線の中心部分を浮上させて移動するCenter-lifting運動を新たに発見したことは特筆すべき成果である(図1)。

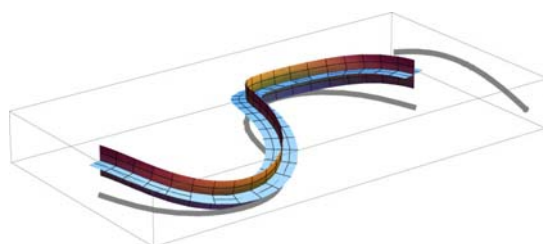


図1. Center-liftingの形態モデル
中央部分のみを浮上させて蛇行すると、体は波形の伝播する方向に進む。

② (力学) 3次元運動学を利用して連続体内での力の釣り合いを背びれ座標系で表した。これを利用して、蛇行曲線の屈曲部を浮上させて移動するsinus-liftingの力学を解析し、著しく移動効率を向上させる効果があることを明らかにした(図2)。この結果は、従来のように車輪を使わなくとも、効率よく抱こう推進するヘビ型ロボットを実現できる可能性が高いことを明らかにした。

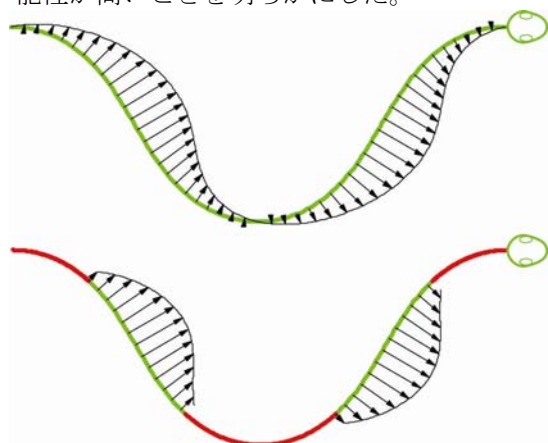


図2. ヘビが受ける法線方向外力の解析結果
上: 通常の蛇行、下: sinus-lifting (赤い部分が浮上部分)。Sinus-liftingでは地面垂直反力が接地部分に集中するため、相対的に法線方向外力が小さくなって滑りにくくなる。

③（制御論）運動学の成果を基に、実際のロボットを連続曲線と見なして運動を生成する方法を確立した（図3）。これにより、異なるロボットでも運動生成は同じように記述することが可能となった。また、連続的な滑らかな運動の生成が可能となった。

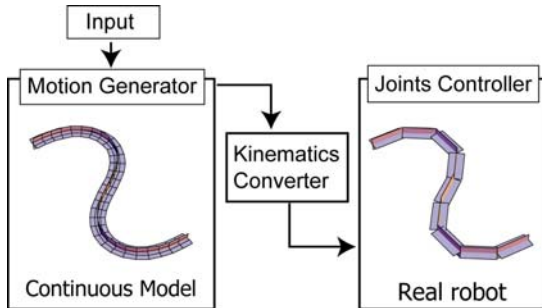


図3. 運動学を利用した制御システム
ロボットの運動は最初連続曲線として生成され、それを実際のロボットの運動学に変換する。

④（設計論）3次元運動学の解析の結果、2方向の屈曲が可能な関節を持つヘビ型ロボットが、ヘビの動作の再現に最も適していることが明らかになった。さらに、関節の可動範囲が大きく、かつ単位長さ当たりの関節数が多いほど、滑らかな運動が可能となることが分かった。これらの事実から、無数に存在するヘビ型ロボットの構成法から、目的に適したものを選ぶことが可能となった。また、新しい設計法として、2自由度の干渉駆動（図4）を用いた設計、及びそれを2つ用いて可動範囲角度を増幅した二重関節機構を用いた設計を考案した。

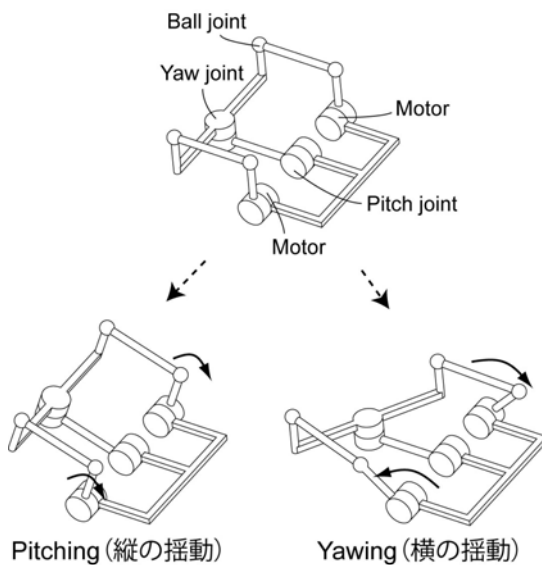


図4. 2自由度干渉駆動機構
PitchingとYawingでは2つのモータの出力が合計される特徴を持つ。

(2)（実用ロボットの開発）残念ながら実際に使用できるシステムの実現には至らなかったが、実用化への道筋を付ける以下の3体のロボットを完成させた。

①図5に示すACM-S1は、2方向の屈曲に加えて伸縮を可能とする関節機構を特徴とする。これにより、蛇行運動では推進できない直線経路や滑りやすい路面上でも運動が可能である。3本の弾性棒と直動機構を用いた閉ループ機構により関節を駆動することで、大きな可動範囲と耐衝撃性を実現し、さらにジャバラによって防水性をも与えた。

移動効率が低かったこと、また推進用の足がかりとして耐環境性の低いワンウェイクラッチを使用せざるを得なかったことから実用化に至らなかったが、移動性能と制御法の実証は終了しており、上記2点を解決できれば実用化に近づく。



図5. ACM-S1

②図6に示すACM-R7は、図4に示した干渉駆動機構を採用した関節を特徴とする。これにより、大きな可動範囲と高い出力を実現した。この特性を最大に利用したのが図に示すループ推進であり、ヘビ型ロボットとしては高速な秒速1mでの移動を実現した。ループ生成と解除を自ら行う能力を持ち、通常のヘビ型ロボットの運動も可能なため、広い場所ではループ推進を行い、狭い場所では尺取り虫的運動を行うというように、状況に適した移動方法を選択できる。さらに関節は防水式であり、実際に屋外環境での動作を確認した。今後の実用化に向けては、センサ・カメラを加えた制御系の構築と機械的信頼性の向上が必要である。

③図7に示すACM-L2は二重関節を採用した小型のロボットである。この関節機構は幅50mm、長さ78mmと小型ながら2方向に75度まで屈曲可能であり、これによってACM-L2はこれまでのロボットの中でも最もヘビに近いロボットの一つとなった。尺取り虫型運動や横ばい運動など様々な動きを実現しており、シンプルで小型ながら多様な運動を行うというヘビ型ロボットの特徴を実現した。

実用化への課題としては軽量で伸縮自在な外皮の開発が挙げられる。



図 6. ACM-R7



図 7. ACM-L2

(3)「2. 研究の目的(3)」で述べた8つの具体的な検討項目については、以下の成果を得た。

①新しい関節として、前項で述べた ACM-S1、ACM-R7、ACM-L2 用の関節を開発した。特に前者2つは防水性能も有しており、実用に近い性能である。

②直径 20mm オーダーのロボットの開発は果たせなかった。ACM-L2 により、60mm オーダーまで実現した。

③小型の制御ユニットとして、ルネサステクノロジ SH2/7047 と駆動アンプ 2 個を配した 20mmx40mm のボードを開発し、ACM-R7、ACM-L2 に使用した。

④インテリジェントなシステムとして、能動車輪式のヘビ型ロボットを対称として、車輪に加わる外力を測定できるセンサの開発を行った。弾性変形部材と光学式位置センサを使用したこのシステムは3方向の力を計測可能であり、これを搭載したロボットの試作も行った。結果として、車輪に加わる外力をフィードバックして屈曲形状を変化させることで障害物回避が可能であることを確認し

た。ただし、外力を計測する方式は、センサの隙間に障害物が接触した場合に機能しないので、現在はむしろ内力、中でもトルクをフィードバックして障害物を回避するシステムを検討している。

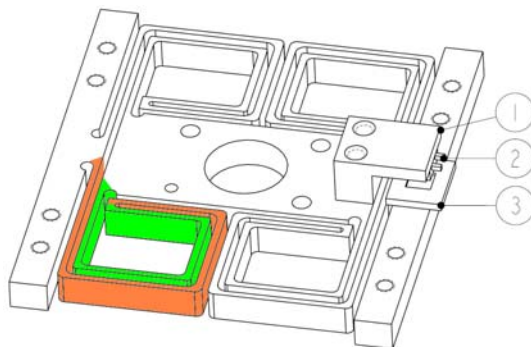


図 8. 外力センサ

中央の車軸部分は弾性体で支えられている。車輪が外力を受けると中央部分が変位し、①に固定された LED の位置が変化する。これを②の受光素子が読み取る。

⑤画像の安定化は、現在はその機能を有する市販のカメラが入手可能なので、これを採用することで解決された。また現在は、パソコンでの画像処理による安定化も現実的となっている。光ファイバーによる画像転送は実際に開発して ACM-S1 に使用した。

⑥3 次元運動学の応用については本章(1)で述べた通りである。

⑦既にある程度効率よく動いているので他の課題を優先した結果、残念ながら特別な検討には至らなかった。

⑧現在、防塵防水機能、トルク計測機能を有する能動車輪式の小型ヘビ型ロボットの設計をほぼ終えており、開発を継続中である。

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)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 大橋太朗、山田浩也、広瀬茂男、ループ型移動が可能な索状能動 ACM-R7 の機構と制御の研究、日本ロボット学会誌、印刷中、Vol. 28, 2010. 査読有り
- ② 広瀬茂男、ヘビ型ロボットの移動機構、日本ロボット学会誌、Vol. 28, pp. 151-155, 2010. 査読無し
- ③ H. Yamada, S. Hirose, Approximations to Continuous Curves of Active Cord Mechanism Made of Arc-shaped joints or

Double Joints, Proceeding of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automations, pp.703-708, 2010. 査読有り

- ④ H. Yamada, S. Hirose, Study of 2-DOF Joint for the Small Active Cord Mechanism, Proceeding of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automations, pp.3827-3832, 2009. 査読有り
- ⑤ S. Taal, H. Yamada, S. Hirose, 3 Axial Force Sensor for a Semi-Autonomous Snake Robot, Proceeding of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automations, pp.4057-4062, 2009. 査読有り
- ⑥ S. Hirose, H. Yamada, Snake-Like Robots -Machine Design of Biologically Inspired Robots-, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol.16, pp.88-98, 2009. 査読有り
- ⑦ 山田浩也、広瀬茂男、索状能動体の研究—一般化された ACM 移動力学の基礎式と sinus-lifting 滑走の解析—、日本ロボット学会誌、Vol.26, pp.801-811, 2008. 査読有り
- ⑧ S. Sugita, K. Ogami, G. Michele, S. Hirose, K. Takita, A Study on the Mechanism and Locomotion Strategy for New Snake-Like Robot Active Cord Mechanism - Slime model 1 ACM-S1, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.20, pp.302-310, 2008. 査読有り
- ⑨ 山田浩也、広瀬茂男、索状能動体の研究—多関節体幹による連続曲線近似法—、日本ロボット学会誌、Vol.26, pp.110-120, 2008. 査読有り
- ⑩ H. Yamada, S. Hirose, Stabilization of the head of an undulating snake-like robot, Proceeding of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3566-3571, 2007. 査読有り

[学会発表] (計9件)

- ① H. Yamada, S. Hirose, Approximations to Continuous Curves of Active Cord

Mechanism Made of Arc-shaped joints or Double Joints, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automations, 2010/5/4, Anchorage, U. S. A.

- ② 大橋太朗、山田浩也、広瀬茂男、へび型ロボットの Loop-Gait 推進とその操舵制御の研究、第27階日本ロボット学会学術講演会、2009/9/17、神奈川県横浜市
- ③ H. Yamada, S. Hirose, Study of 2-DOF Joint for the Small Active Cord Mechanism, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automations, 2009/5/16, Kobe, Japan
- ④ S. Taal, H. Yamada, S. Hirose, 3 Axial Force Sensor for a Semi-Autonomous Snake Robot, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automations, 2009/5/16, Kobe, Japan
- ⑤ 山田浩也、広瀬茂男、へび型ロボットの部分体幹浮上型推進の研究と center-lifting の提案、第13回ロボティクスシンポジウム、2009/3/17、北海道登別市
- ⑥ S. Sugita, K. Ogami, G. Michele, K. Takita, S. Hirose, Mechanism and basic motion control of Slime-type Active Cord Mechanism ACM-S1, 17th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control, 2008/7/6, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan
- ⑦ 山田浩也、広瀬茂男、二重関節を有するへび型ロボットの研究、第12回ロボティクスシンポジウム、2008/3/17、香川県琴平町
- ⑧ H. Yamada, S. Hirose, Stabilization of the head of an undulating snake-like robot, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007/11/1, San Diego, U. S. A.

[その他]

ホームページ等

<http://www-robot.mes.titech.ac.jp/home.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

広瀬 茂男 (HIROSE SHIGEO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：70108215

(2) 研究分担者

福島 E. 文彦 (FUKUSHIMA E. FUMIHIKO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：80262301