

## 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 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22246032

研究課題名（和文）ヘビ型ロボットの学理の確立と狭隘地点検機能を有する実用機の開発

研究課題名（英文）Establishment of the theory of Snake-Like Robots and Development of Practical Inspection Robots for Cramped Sites

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・卓越教授

研究者番号：70108215

研究成果の概要（和文）：

本研究では、(1)ヘビ型ロボットの学術的理論体系の構築、(2)革新的な機構の導入、(3)実用的な狭所点検用ロボットの開発、の3つの目的を持ってヘビ型ロボットの研究を行った。その成果として、連続曲線に基づいた実用的なヘビの運動制御法を確立し、革新的な機構によって3次元的な狭所に適応して活動できる実用的なヘビ型ロボットの開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：

We conducted the research on snake-like robots toward the following goals: (1) establishment of theory on control, (2) invention of novel mechanisms and (3) development of practical robots for narrow space investigations. As a result of our study, we built up a practical control system based on continuous curve model, and successfully developed practical snake-like robots by introducing innovative mechanisms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	12,700,000	3,810,000	16,510,000
2011年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2012年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
年度			0
年度			0
総計	32,700,000	9,810,000	42,510,000

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：ロボティクス

## 1. 研究開始当初の背景

申請者は1972年に世界で初めてヘビ型ロボットによるほふく推進実験に成功してから現在に至る37年間、多様な形態のヘビ型ロボットを持続的に開発しながらその機構と制御に関する研究を続けて来た。近年は、米国CMUのChoset、PenStateのYimら、

さらにスイスEPFL、ドイツKarlsruhe、中国瀋陽自動化研究所、ノルウェーSINTEFなどの研究者が同様の研究を始めているが、常に我々の研究は世界をリードしこの研究分野は我々が始め、我々がトップランナーで有り続けたことは、世界的にも広く認識されている。

しかしながら、ヘビ型ロボットが本来持つ多様な能力はまだ十分引き出されておらず、実用例も未だ存在しない。このため、機構・制御を高度に統合し、ヘビ型ロボットの性能を高める方法が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究は、申請者のヘビ型ロボットに関する学術的な成果の蓄積を基に、申請者の東工大の研究者としての最後の3年間にヘビ型ロボットの学術的理論体系を確立すると同時に、これまでになかった革新的な機構の導入もさらに実施し、実社会に活用できる狭隘地点検機能を有するヘビ型ロボットを複数世の中に提供していこうとするものである。

## 3. 研究の方法

本研究は、以下の3つの方法によって行った。

- (1) 実用上重要なヘビ型ロボットの推進様式を見出し、それを連続モデルによって定式化していくことで、ヘビ型ロボットの統一的な制御システムを構築する。
- (2) ロボットの移動能力・コンパクトさ・柔軟性を高めるための新規な機構を考案し、試作実験を通して洗練された革新的機構を実現する。
- (3) センサ機能、関節駆動系、3次元的な狭隘地形に適応して推進するための制御法を開発・統合し、実環境で活動できるロボットを実現する。

## 4. 研究成果

研究成果は、以下の用に、(1)学術的理論体系の構築、(2)革新的機構の導入による実用機の開発、の2点にまとめられる。

### (1) 学術的理論体系の構築

これまで申請者らは、離散的なヘビ型ロボットの運動学と力学を空間的な連続曲線モデルで表現できることを示してきたが、これをさらに拡張し、ヘビ型ロボットを統一的に制御できる実用性の高い制御システムを確立した。これは、図1のように、入力（オペレータの操作や接触センサの出力）によってコンピュータ内の連続曲線モデルの運動を生成し、そのモデルに基づいて実際のロボットを制御するシステムである。

本研究により、新たに円弧状屈曲関節又は二重関節で構成されるロボットもこのシステムでの制御が可能となった(図2)。また、これまで知られていなかった、ヘビがループとなって推進する運動の旋回法(図3)と、ペダル・ウェーブ推進と呼ばれる尺取り虫式の運動の旋回法(図4)とを定式化し、本システムに加えた。さらに、連続曲線の力学モデルを利用して、ロボットが環境から受ける接触力をトルク分布から推定できることを

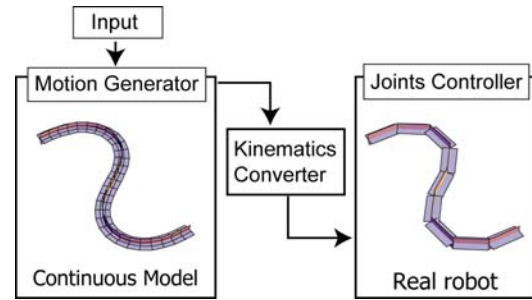


図1 ヘビ型ロボットの制御系

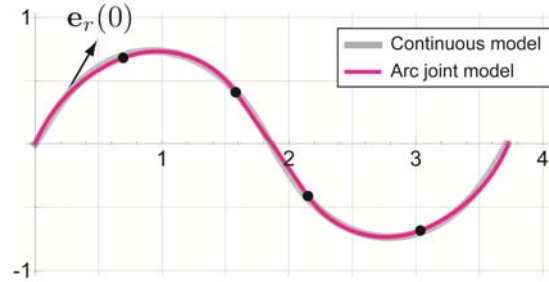


図2 円弧による連続曲線の近似

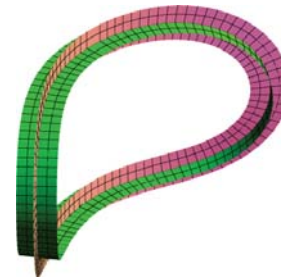


図3 ループ推進の旋回形状

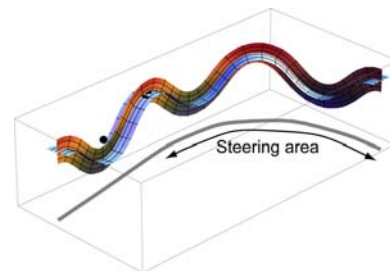


図4 ペダル・ウェーブの旋回形状



図5 トルクセンサを用いた地形適応  
(ロボットは ACM-R4.2)

示し、トルクセンサによって地形に適応して推進するシステムを実現した(図5)。これにより、通常の接触センサが抱えていた脆弱性を解決し、頑健で実用性の高いセンサ系を実現した。

## (2) 革新的機構の導入による実用機の開発

本研究では、革新的機構を導入した試作機の開発を積極的に行った。中でも最も重要な成果は、以下の2種類の実用的なヘビ型ロボットを実現したことである。

### ① ACM-R4.1 及び ACM-R4.2

ヘビ型ロボットの柔軟性と地形適応能力の高さは従来から注目されてきた。しかし、実際に未知の環境下で活動するためには、高性能な関節機構と接触センサ系の両立が必要であり、その実用的な構成法が求められていた。そこで、駆動系の中にコンパクトに収まるトルクセンサを新たに開発し、試作機 ACM-R4.1 (図6) に採用した。

通常、接触の検知には接触センサを用いるが、この方式では全身のカバーが難しく、また耐環境性のある接触センサの実現も容易ではなかった。ACM-R4.1 では、接触センサがトルクセンサで代用できることを利用し、この問題を解決した。トルクセンサに基づくコンプライアンス制御と地形適応制御により、ACM-R4.1 は遠隔操作による狭所移動を実現した。

ACM-R4.2 (図5) は、ACM-R4.1 をベースにして、形状の改善と軽量化を行った試作機であり、360mm の段差の踏破など、不整地での高い運動性能を実現した。

### ② Thes V (図7)

パイプ内の点検作業ロボットは長年に渡って求められていながら、コンパクトさ・速度・牽引力の要求を満たすことの難しさから、実用化が進んでいなかった。Thes V は、多数の大型車輪で覆われた細長い機体を2本のワイヤでジグザグに屈曲することで、牽引力確保とパイプ内でのロール回転を可能にした実用的な配管内検査用ロボットである。エルボや分岐の存在する内径 78mm の配管内を、3kg のセンサを牽引して移動することが可能であり、実際の工場のパイプラインでの試験にも成功し、現在実用化を進めている。

これら以外に、革新的な機構を取り入れた試作機を6体開発した。これらはそれぞれ優れた特徴を有しており、将来的な応用の可能性は十分高い。

### ③ ACM-R7 (図8)

ヘビ型ロボットの移動方式の中で、不整地でも確実に推進力を生み出す移動方式として、体の縦にくねらせるペダル・ウェーブ推



図6 トルクセンサ搭載モデル ACM-R4.1

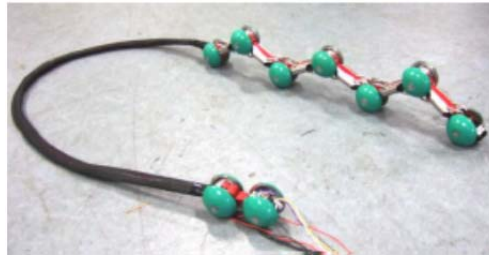


図7 配管内移動ロボット Thes V



図8 ループ推進モデル ACM-R7



図9 小型多自由度モデル ACM-L2n

進と、体をループ上に行うループ推進がある。ACM-R7 は、この2つに特化したヘビ型ロボットとして開発した。これら2つの運動では体を上に持ち上げる必要があることから、体を上げる際に全てのモータを効率的に利用できる干渉駆動機構を採用した。また、防塵防水の機体とすることで屋外環境下での運動を実現している。



ACM-L2n (図9)

生物のへびに近い柔軟性と大きさを実現するため、通常の関節の2倍の可動範囲を持つ二重関節機構を開発し、ACM-L2nに採用した。1kg未満の機体に30自由度を有し、車輪を使うことなくへびの蛇行推進を再現することに成功した。

⑤蒼龍8及び蒼龍9(図10)

従来、不整地移動ロボットにはクローラが採用されてきたが、クローラ機構の複雑さやサイズがロボットの低コスト化や小型化を阻んできた。そこで、柔軟な体幹に多数の車輪を持つ新しい形式の災害救助ロボット蒼龍8及びその改良機である蒼龍9を開発した。柔軟素材で構成した体幹をワイヤで引っ張って屈曲させる機構を導入することで、柔軟な関節機構を実現した。単純な機構ながら、不整地移動能力を有することを確認した。

⑥Surface wave mechanism (図11)

車輪やクローラを利用した移動ロボットは、それらが地面から浮いてしまうと移動力を失ってしまう。この問題を完全に解決する方法として、機体のあらゆる場所が推進力を生み出す「動的外皮」を検討した。最終的に、偏心カムの位相差によって、地面を蹴るように表皮を回転運動させる Surface wave mechanism を提案した。試作機を開発し、推進力が発生することを確認した。

⑦3D CT-Arm (図12)

福島第一原子力発電所の収束作業のため、10mを越す長大な超冗長アームが必要とされている。従来知られている設計法ではこの実現は困難なため、ワイヤ干渉駆動式の超冗長アーム 3D-CT Arm を提案し、小型試作機を開発した。ワイヤ干渉駆動とは、ワイヤの経路を工夫することで、最もトルクの必要な根本に近い関節を複数のモータで支える駆動方式である。3D-CT Arm では、従来2次元だったアームを3次元に改良し、駆動系が期待通り機能することを確認した。

⑧ACM-R8 (図13)

従来、へび型ロボットは狭隘環境探索のため可能な限りの小型化を目指してきたが、不整地移動という観点から見ると、ある程度の大きさはむしろ有利に働く。そのため、クローラタイプの移動ロボットよりやや横幅が小さい程度のスケールならば、へび型ロボットとしての長所を失うことなく、従来よりも高い不整地移動能力を持つロボットを実現できる。そこで、関節駆動系を内蔵した直径300mmの車輪を有するへび型ロボット ACM-R8 を提案し、1節の試作を行った。

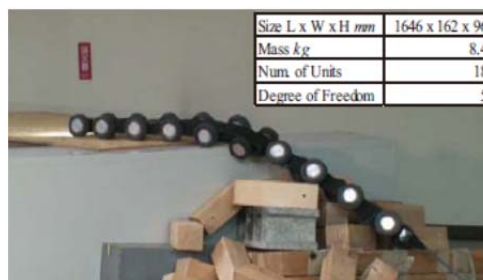


図10 多車輪柔軟体幹モデル 蒼龍 IX



図11 推進力を全身で発生する「Surface wave mechanism」



図12 長大アーム 3D CT-Arm



図13 大径能動車輪モデル ACM-R8

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 8 件)

- ① K. Kouno, H. Yamada, S. Hirose, “Development of Active-Joint Active-Wheel High Traversability Snake-like Robot ACM-R4.2,” Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, 2013 (採録決定) .
- ② H. Yamada, S. Takaoka, S. Hirose, “A Snake-Like Robot for Real-World Inspection Applications (The Design and Control of a Practical Active Cord Mechanism),” Advanced Robotics, 査読有, Vol.27, pp.47-60, 2013, DOI: 10.1080/01691864.2013.752318
- ③ K.Suzuki, A. Nakano, G. Endo, S. Hirose, “Development of Multi-wheeled Snake-like Rescue Robots with Active Elastic Trunk,” Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp.4602-4607, 2012, DOI: 10.1109/IRROS.2012.6385757
- ④ S. Takaoka, H. Yamada, S. Hirose, “Snake-like Active Wheel Robot ACM-R4.1 with Joint Torque Sensor and Limiter,” Proceeding of 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp.1081-1086, 2011, DOI: 10.1109/IRROS.2011.6094475
- ⑤ 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体 ACM-R7 の機構と制御の研究,” 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol.28, pp.860-888, 2010 DOI: 10.7210/jrsj.28.880
- ⑥ 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, 査読有, pp. 703-708, 2010, DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509938
- ⑦ H. Yamada, S. Hirose, “Steering of Pedal Wave of a Snake-like Robot by Superposition of Curvatures,” Proceeding of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査

読有, pp.419-424, 2020, DOI: 10.1109/IRROS.2010.5652118

- ⑧ T. Ohashi, H. Yamada, S. Hirose, “Loop Forming Snake-like Robot ACM-R7 and Its Serpenoid Oval Control,” Proceeding of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp.413-418, 2010, DOI: 10.1109/IRROS.2010.5651467

[学会発表] (計 15 件)

- ① 洗津, 山田浩也, 遠藤玄, パウロ・デベネスト, ミケーレ・グアラニエリ, 風間裕人, 長友一郎, 広瀬茂男, “原発の空中点検を行う干渉ワイヤ駆動型多関節アームの開発—立体関節機構の導入と小型モデル機の試作—,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 茨城県つくば市, 2013/5/23.
- ② 古村博隆, 山田浩也, 広瀬茂男, “原発等の狭隘環境で作業を行う能動車輪ヘビ型ロボットの開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 茨城県つくば市, 2013/5/23.
- ③ K. Suzuki, A. Nakano, G. Endo, S. Hirose, “Development of Multi-wheeled Snake-like Rescue Robots with Active Elastic Trunk,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012/10/10.
- ④ 磯村一樹, Guarnieri Michele, Debenest Paulo, 鷹巣征行, 広瀬茂男, “連結球形車輪型管内移動ロボット「ThesV」の開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 静岡県浜松市, 2012/5/29
- ⑤ 河野健太郎, 山田浩也, 広瀬茂男, “高い荒地踏破性を有する能動節能動車輪型ヘビ型ロボット ACM-R4.2 の開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 静岡県浜松市, 2012//5/28
- ⑥ Fu Yu-Chun, 広瀬茂男, “Surface Wave Mechanism --Basic Concept and Experiment of Prototype Models--,” 第 17 回ロボティクスシンポジウム, 山口県萩市, 2012/3/14
- ⑦ S. Takaoka, H. Yamada, S. Hirose, “Snake-like Active Wheel Robot ACM-R4.1 with Joint Torque Sensor and Limiter,” 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA. 2011/9/27.

- ⑧ 山田浩也, 広瀬茂男, ” トルク制御を応用した能動車輪型へび型ロボットの地形適応推進,” 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 東京都江東区, 2011/9/8.
- ⑨ 磯村一樹, 広瀬茂男, “連結球形車輪型管内移動ロボット「ThesV」の開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山県岡山市, 2011/5/28.
- ⑩ Fu Yu-Chun, 広瀬茂男, “Proposition of Surface Wave Mechanism and Its Application for Watertight Mobile Robots,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山県岡山市, 2011/5/28.
- ⑪ 高岡峻一, 山田浩也, 広瀬茂男, “リミッタ付きトルク計測関節を有するへび型ロボット ACM-R4n の開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山県岡山市, 2011/5/28.
- ⑫ T. Ohashi, H. Yamada, S. Hirose, “Loop Forming Snake-like Robot ACM-R7 and Its Serpenoid Oval Control,” 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 台湾台北市, 2010/10/19.
- ⑬ H. Yamada, S. Hirose, “Steering of Pedal Wave of a Snake-like Robot by Superposition of Curvatures,” 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 台湾台北市, 2010/10/18.
- ⑭ 高岡峻一, 山田浩也, 広瀬茂男, “索状能動体のための OLE 型トルクセンサの開発,” 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 愛知県名古屋市, 2010/9/24.
- ⑮ 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, Anchorage, USA, 2010/5/4.

[その他]

ホームページ等

<http://www-robot.mes.titech.ac.jp/hirose/robot.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・卓越教授

研究者番号：70108215

### (2) 研究分担者

山田 浩也 (YAMADA HIROYA)

東京工業大学・グローバルエッジ研究院・テニアトラック助教

研究者番号：20550536