

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12612  
研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26870198  
研究課題名(和文)ヘビ型ロボットの不整地踏破制御法の確立

研究課題名(英文)Control of a snake robot on uneven terrain

## 研究代表者

田中 基康 (Tanaka, Motoyasu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：50633442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では生物のヘビを模倣したヘビ型ロボットを対象に、不整地踏破を実現する制御方法の確立を目的として以下の4項目を中心に取り組んだ。(1)障害物が散在する環境においてヘビ型ロボットの全身で障害物を回避する制御方法を提案した。(2)曲面、複数平面環境において目標軌道への追従を実現する制御方法を提案した。(3)不整地環境において自重を利用し環境に適応しながら移動する制御方法を提案した。(4)制御方法を応用し狭所や段差に掃除を行う多連結掃除ロボットの清掃制御方法、能動車輪型多連結ロボットの階段昇降制御方法を提案した。そして、各々についてシミュレーションおよび実機実験にてその有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, to propose a control method moving on uneven terrain for a snake robot, we consider following four main topics. (1) Obstacle avoidance of whole body of a snake robot through a multiple obstacle environment. (2) Trajectory tracking on curved surface and multiple planes. (3) Terrain following method by using the robot's own weight on uneven terrain. (4) As application (1)-(3), cleaning control of an articulated cleaning robot on a narrow path and a step and stair climbing control of an articulated mobile robot.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ヘビ型ロボット 不整地踏破 障害物回避 階段昇降 ハイブリッド 拘束変化

## 1. 研究開始当初の背景

生物のヘビを模倣したヘビ型ロボット(図1)は細長い形状で生物同様の多彩な動作が可能であり、狭所や災害現場の探索活動における活躍が期待できる。ヘビ型ロボットの動作に関する研究においては、主に(a)生物規範、(b)体形曲線に基づく方法、(c)制御理論に基づく方法、(d)自律分散的方法が用いられている。(a)は、生物のヘビの動作を模倣する方法である。生物と同様の動作が可能であるが、生物を超える動作を行うことはできないほか、不整地といった複雑な環境の動作は模倣できていない。(b)は、操縦者または事前に設計者が決めた曲線に従いロボットを動作させる方法である。曲線の離散化時に誤差が生じるほか、幾何学的に動作を決めているために動力学的な影響によってロボットが意図しない挙動を示す場合がある。(c)は、対象を数式モデル化し、制御理論に基づき動作を決定する方法である。正確な位置制御や安定性の保証、生物や操作者に捉われない動作が可能であるが、想定環境は二次元平面に留まっている。(d)は、生物と環境との局所的相互作用に着目し Central Pattern Generator 等を用いて自律分散的に制御を行うものだが、動作は生物の模倣に留まっている。動作環境として不整地もしくは不整地に近い不連続な3次元環境を対象とした研究は、(b)に基づく方法があるが、不整地踏破を理論的に保証するものではない。

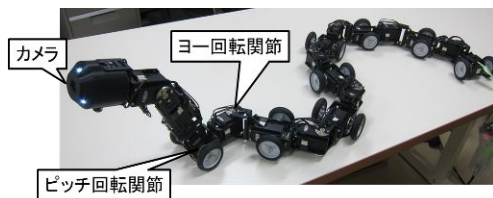


図1 ヘビ型ロボット試作機

## 2. 研究の目的

本研究では、制御理論に基づく手法で不整地環境を取扱い、不整地踏破を理論的に保証するヘビ型ロボットの制御法の確立を目指す。不整地環境では、ロボットの細長い体幹においてどの部分が環境と接触するか、すなわち接地位置の制御が重要となる。この時、ロボットの運動方程式は接地位置によって離散的に切り換えるため、離散量と連続量が混在したハイブリッドシステムとなる。ハイブリッドシステムは扱いが非常に難しく、制御理論は未だ体系化されていない。不整地踏破を保証する制御法を確立するためには、このようなハイブリッドシステムに対して制御法をどう設計するか、という課題だけでなく、複雑な不整地環境をどう扱うか、接地位置をどう設計するか、といった多くの課題がある。

## 3. 研究の方法

### (1) 障害物回避制御

不整地での制御への応用を前提に、ヘビ型ロボットを接地位置が切替わるハイブリッドシステムとしてモデル化し、平面において障害物が散在する環境での推進、その場での体形変化、といった多様な動作を実現する制御方法を確立する。

### (2) 曲面、複数平面環境における制御

環境を曲面、複数平面とし、目標軌道への追従を実現する制御方法を確立し、シミュレーションおよび実機実験によりその有効性を検証する。

### (3) 不整地環境における制御

環境を不整地とした場合の制御方法を確立し、シミュレーションおよび実機実験によりその有効性を検証する。

### (4) 他ロボットへの応用

提案した制御方法を多連結ロボットやレスキューロボットといった他ロボットに適用する。

## 4. 研究成果

### (1) 障害物回避制御

障害物の散在する平面において胴体における接地点を能動的に選択し、切替えるハイブリッドシステムとしてのモデル化と制御設計を行った。障害物が散在する環境での推進制御方法として、2つの制御方法を提案した。1つは先頭が通過した経路を後続部分が近似的に追従する制御則、もう1つは距離センサ情報に基づき全身の障害物回避を行う制御方法(図2)である。それぞれについてシミュレーションおよび実機実験にてその有効性を確認した。また、先頭的位置を固定しその場での体形変化を実現する制御方法についても提案し、実機実験によりその有効性を確認した。



図2 全身の障害物回避

### (2) 曲面、複数平面環境における制御

曲面環境においてうねりまたは螺旋捻転に基づき移動を行う制御方法を提案し、シミュレーションおよび実機にて検証を行った。環境を平行な2平面で構成された段差とした場合について、2平面間を衝突なく移動する自動経路生成方法、目標軌道の追従と平

面間の遷移を実現する制御則を提案し、シミュレーションおよび実機実験によりその有効性を確認した(図3)。

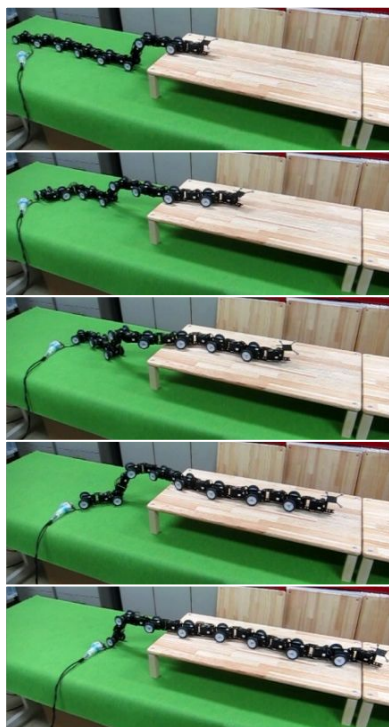


図3 段差登り制御

#### (3) 不整地環境における制御

不整地環境において自重を用いて環境に適応し移動する環境適応制御の提案を行い、実機実験により有効性を確認した(図4)。



図4 自重による環境適応

#### (4) 多連結ロボットやレスキューロボットへの応用

得られた制御方法の応用先として、掃除用多連結ロボットの開発を行った。障害物の散在する狭所や段差であっても移動し掃除を行うことができる。先頭の軌道追従ではなく、「効率的な掃除」を制御目標とした制御系を構築し、シミュレーションおよび実機実験にてその有効性を確認した。

次に、災害現場での被災者探索を目的とする能動車輪型多連結ロボットへの応用を行った。環境として階段を想定し、階段昇降を実現するための制御方法の提案とシミュレーションおよび実機による有効性の確認を行った(図5)。



図5 多連結ロボットの階段登り

#### 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7件)

Motoyasu Tanaka and Kazuo Tanaka, Shape Control of a Snake Robot with Joint Limit and Self-collision Avoidance, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Accepted, 査読有, DOI: 10.1109/TCST.2016.2614832

Motoyasu Tanaka and Kazuo Tanaka, Singularity Analysis of a Snake Robot and an Articulated Mobile Robot with Unconstrained Links, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.24, no.6, pp.2070-2081, 2016, 査読有. DOI: 10.1109/TCST.2016.2528888

Motoyasu Tanaka, Mizuki Nakajima, and Kazuo Tanaka, Smooth Control of an Articulated Mobile Robot with Switching Constraints, Advanced Robotics, vol.30, no.1, pp.29-40, 2016, 査読有. DOI: 10.1080/01691864.2015.1102646

Kazuyuki Kon, Motoyasu Tanaka, and Kazuo Tanaka, Mixed Integer Programming-Based Semi-autonomous Step Climbing of a Snake Robot Considering Sensing Strategy, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.24, no.1, pp.252-264, 2016, 査読有. DOI: 10.1109/TCST.2015.2429615

Motoyasu Tanaka and Kazuo Tanaka, Control of a Snake Robot for Ascending and Descending Steps, IEEE Transactions on Robotics, vol.31, no.2, pp.511-520, 2015, 査読有. DOI: 10.1109/TR0.2015.2400655

Motoyasu Tanaka, Kazuyuki Kon, and Kazuo Tanaka, Range-sensor-based Semiautonomous Whole-body Collision Avoidance of a Snake Robot, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.23, no.5, pp.1927-1934, 2015, 査読有.  
DOI: 10.1109/TCST.2014.2382578

Motoyasu Tanaka, Kazuo Tanaka, and Fumitoshi Matsuno, Approximate Path-Tracking Control of Snake Robot Joints with Switching Constraints, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.20, no.4, pp.1633-1641, 2015, 査読有.  
DOI: 10.1109/TMECH.2014.2367657

〔学会発表〕(計7件)

田中基康, 中島瑞, 田中一男, 階段昇降可能な車輪型索状ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 1P2-Q03, 2017/5/11, ビッグパレットふくしま(福島県郡山市), 査読無

田中基康, 中島瑞, 田中一男, 能動車輪型多連結ロボットの開発と手動環境適応推進, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A2-09a1, 2016/6/9, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 査読無

田中基康, 中島瑞, 田中一男, 多連結移動ロボットのためのタフな通信システムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A2-09a2, 2016/6/9, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 査読無

木村康太, 田中基康, 田中一男, 松野文俊, 多連結清掃ロボットの開発と机上清掃制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A1-14a7, 2016/6/9, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 査読無

Motoyasu Tanaka and Kazuo Tanaka, Stair Climbing of an Articulated Mobile Robot via Sequential Shift, Proc. 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SuE1.3, pp.877-881, 2015/12/13, 名城大学(愛知県名古屋市), 査読有

Motoyasu Tanaka and Kazuo Tanaka, Shape Control for a Snake Robot via Sequential Switching, Proc. SWARM 2015: The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, P2-3, pp.200-202, 2015/10/29, 京都大学(京都府京都市)(Best Poster Award 受賞), 査読有

田中基康, 鈴木兼悟, 田中一男, 松野文俊, 狭所・段差の清掃が可能な多連結掃除ロボットの開発と制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '15, 1P2-R07, 2015/5/18, みやこめっせ(京都府京都市), 査読無

〔図書〕(計1件)

田中基康, 他, パワーアシスト・ロボットに関する材料, 電子機器, 制御と実用化, その最新技術, 技術情報協会, 2015, 324-330.

〔その他〕

ホームページ

<https://sites.google.com/site/motoyasutanakalab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 基康 (TANAKA, Motoyasu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号: 50633442