

令和元年6月26日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06175

研究課題名(和文) 環境適応機能を有した変形移動可能な扁平ロボットの開発と移動作業体への応用展開

研究課題名(英文) Development of flat-formed mobile robots with transformability that adapt to the environment and some applications to robotics

研究代表者

程島 竜一 (HODOSHIMA, Ryuichi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10432006

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヒラムシなどに代表される扁平生物の推進メカニズムを応用した新しいロコモーションの開発と産業応用に向けての移動作業体の検討のため、次の研究テーマを実施した。(1)扁平ロボットの運動生成法の構築、(2)扁平ロボットの実験機の開発と検証実験、(3)扁平ロボットの作業機能に関する制御則の開発、(4)移動作業体としての産業応用への検討。

これらの結果からシミュレーションや実験機による実験において、扁平ロボットの複数の進行波に基づく環境適応的な推進性能や包み込み把持などの柔軟な作業機能を確認した。またインフラ点検などの産業応用への展開についても検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

扁平生物の推進メカニズムを応用した移動方法により動き回る扁平形状の移動体を実際に開発し、柔軟な推進や移動体の変形を伴う新しいロコモーションを実現した。そして、この移動体が環境適応性を発揮できるような制御則の枠組みを構築し、未知の環境の中を動き回る、または未知の対象を操ることが可能なロボットの形態であることを示した。

また、扁平で柔軟な構造をしており作業性能も有していることから、インフラ点検、探査、情報収集などの種々の作業が行える移動作業ロボットとしての応用が期待でき、実際に狭隘空間内での移動が可能であることを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：The following research themes were conducted for development of new locomotion adopting the propulsion mechanism of flatworms and industrial application to robotics: (1) Motion generation of a flat-formed robot, (2) Development of mechanical model and verification experiment, (3) Control method for manipulability, (4) Some trial for application to robotics. The result showed that propulsive performance with adaptability to mobile environments using traveling waves and manipulating performance with flexibility such as enveloping grasp. Some applications to robotics such as infrastructure inspection were also tested.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス、バイオミメティクス、生物規範型ロボット、移動ロボット

キーワード：板状機能体 扁平生物 生物規範型ロボット 環境適応性 触覚センサ 進行波 Pedal-wave推進 作業機能

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットへ積極的に柔軟性を導入し、生物らしい運動を採求する柔軟生物ロボットの研究が世界中で行われてきた。生物のような柔らかな動きの実現と変動する環境下であっても合目的に振る舞える環境適応性が期待されている。その柔軟生物ロボットの中でも移動機能に注力したロボットとして、ヘビ型ロボット(広瀬ら, 計測自動制御学会誌, 1972)やヒラムシ型ロボット(Ishiguro et al., *Advanced Robotics*, 2014)などが開発されてきた。世界中で研究されている移動型柔軟生物ロボットであるが、多自由度の場合その構造は一次元の索状構造のものがほとんどである。そして、その多くのロボットが二次元平面の運動に限られ、未知の複雑な環境に適応するには検討する項目が多い。加えて従来研究では生物システムを機械的に実現することに重点が置かれており、現実世界での応用例が少ない。

本研究者はこれまで生物を規範として、トカゲ型ロボット(程島ら, 計測自動制御学会, 2014)やザトウグモ型ロボット(Hodoshima et al., *IROS*, 2013)などを開発し理論・実験の両面から研究を行い、移動型生物ロボットに関する機構設計、運動生成、センサ系に関して知見を蓄積してきた。そこで本研究では、柔軟な膜(薄板)構造を有する扁形動物(プラナリア、ウミウシ等)の環境適応性に着目し、一次元の索状構造を発展させた縦横に二次元的に体節を連結した膜状構造の移動体である扁形ロボットの基盤研究を行う(図1)。提案する扁形ロボットでは、三次元的な柔らかい運動だけでなく環境との相互作用を利用した環境適応動作が可能で新たな移動作業ロボットを目指す。扁形動物は節足動物や環形動物よりも単純な膜状の構造である。膜状の構造は移動体の運動・形態において基本単位(本多, 共立出版, 2000)であるだけでなく、作業体として活用(Felton, et al., *CASE*, 2014)することも期待できるため、移動作業体として探査ロボットなどの工学的応用が考えられる。さらに広範な生物に共通する柔軟な膜構造を対象とする制御方法は、既存の大自由度制御法における個別対応的な方法論を一般論へと拡張できる可能性がある。

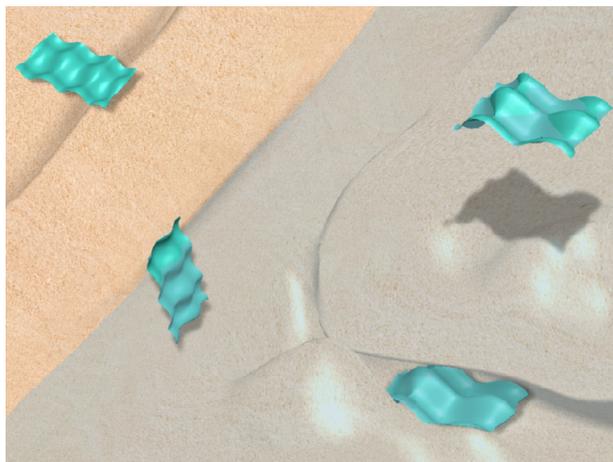


図1 扁形ロボットの概念

### 2. 研究の目的

移動ロボットに柔軟構造を取り入れる研究は世界中で研究が行われており、生物の柔らかさに学ぶ機構や制御の研究が盛んに行われている。これまで大自由度の柔軟移動ロボットの研究では、一自由度関節による一次元の索状構造が主であった。また近年の移動ロボットの分野では、身体性認知科学や **Behavior-Based Robotics** と呼ばれる手法により、環境との相互作用情報を用いて実環境に実時間に適応して行動するロボット制御の枠組みが提案され、市販の掃除ロボットなどに実装され実用化を果たしている。そこで本研究では、本研究者が行った生物型移動ロボット研究の知見や上記の新技術を活用し、以下の研究を行う。

- (1) ヘビ型ロボットのような一次元の索状構造を発展させた二次元の膜上構造により、より環境に適応した柔らかい動作や変形を伴う新しいロコモーションの創成
- (2) ロコモーションの切り替えなど扁形動物に関する生物学的な知見や、環境との相互作用を活用する局所フィードバック制御など工学的な技術を結集し融合学的な研究を行うことで、柔軟性と環境適応性を有するロボットの実現
- (3) 広範な生物に共通する膜のような扁形構造の制御則を開発することで既存の個別対応的な大自由度制御方法論を一般論へと拡張
- (4) 扁形構造で多様な運動生成能力があることから、狭隘空間探査ロボットや海難救助ロボットなど移動・作業体としての応用

これらの研究課題をソフトウェアおよびハードウェアの両面から相補的に進めていくことで、扁形生物のロコモーションを具現化し、インフラ点検ロボットなどロボット工学に応用することで、産業にも寄与できる新しい研究分野を構築することも目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、関節を介して体節を連結し膜状構造とした扁形ロボットの機構構成と運動生成、応用展開についての基盤研究を行う。まず身体変形を伴う移動に関する運動生成法、触覚センサによる環境適応推進法を確立し、次に関節機構や身体構造を設計して試作機を開発し運動生成法の妥当性を実験的に確認する。最後に作業機能に関する制御則、探査ロボットなど産業への応用展開の基盤を構築する。

### (1) 扁形ロボットの数理モデルと運動生成方法の構築

提案する扁形ロボットの運動生成法に関して、基礎的な移動運動と成り得る扁形動物が行う這行運動や遊泳運動などを基にした運動生成手法を開発する。またその妥当性を図2に示すような動力学シミュレータで検証する。

駆動関節を介して体節を縦横に多重連結した離散モデルで扁形ロボットを表し、ウミウシやヒラムシなどの扁形動物に関する這行運動の報告 (E. E. Ruppert et al., BROOKS/COLE, 2004) を参考にし、新しく提案する二次元膜状の扁形ロボットの基本的な移動メカニズムを定式化する。

さらに、動力学シミュレータ上に構築した扁形ロボットのモデルを利用して、触覚センサ情報を利用した環境適応推進アルゴリズムの開発を行う。この環境適応推進アルゴリズムに関しては、神経回路の分野で使われている側抑制の原理を基に構築する計画である。

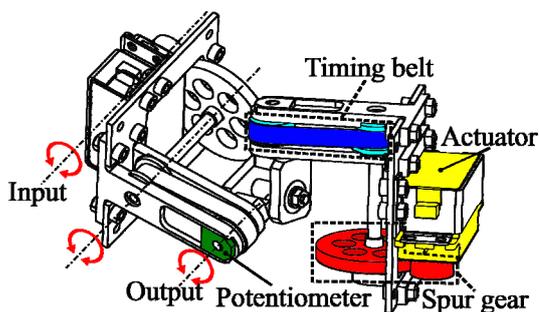


図2 シミュレーション例

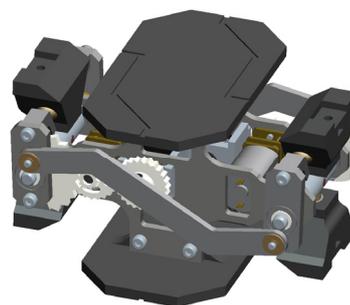
### (2) 柔軟な二次元膜状構造を実現する関節の機構構成の検討と試作機による実験的な検証

前年度の試験機の試験結果を基に、自立動作可能な扁形ロボットの試作機を開発する。

関節機構としては、図3に示す「能動2自由度+受動1自由度」および「連動2自由度」の関節構造により試作機を開発する計画である。



(a) 能動2自由度+受動1自由度



(b) 連動2自由度

図3 扁形ロボットの関節構造案

また扁形ロボットに実装し環境との相互作用力を計測するための触覚センサとして、市販の圧力センサを2つ組み合わせて、接触力の大きさと力の加わる位置を測定するセンサを新たに設計・製作する予定である。

### (3) 多自由度を活かした扁形ロボットの作業機能のための制御則の開発

扁形ロボットが作業機能を発揮するための制御則を開発する。作業機能の実現には検討すべき項目が多いため、まずは把持と操りの実現を目指し柔軟構造の弾性的な性質を利用した位置制御による把持動作を検討する。この時に環境適応推進で用いた触覚センサも利用し、作業対象物との触覚情報によるフィードバックも利用する。

### (4) 探査ロボットなどの産業応用への展開と実証

提案する扁形ロボットはシンプルな形態であるにも関わらず、多様な運動生成能力が期待できる。そこで狭隘環境を探査するロボット、建築物の床下点検を行うロボットや、水難救助ロボットなど産業応用への現実的な用途を検討する。最終的には市場を調査し有望なアプリケーションを選定し、応用例の実証試験を行う。

## 4. 研究成果

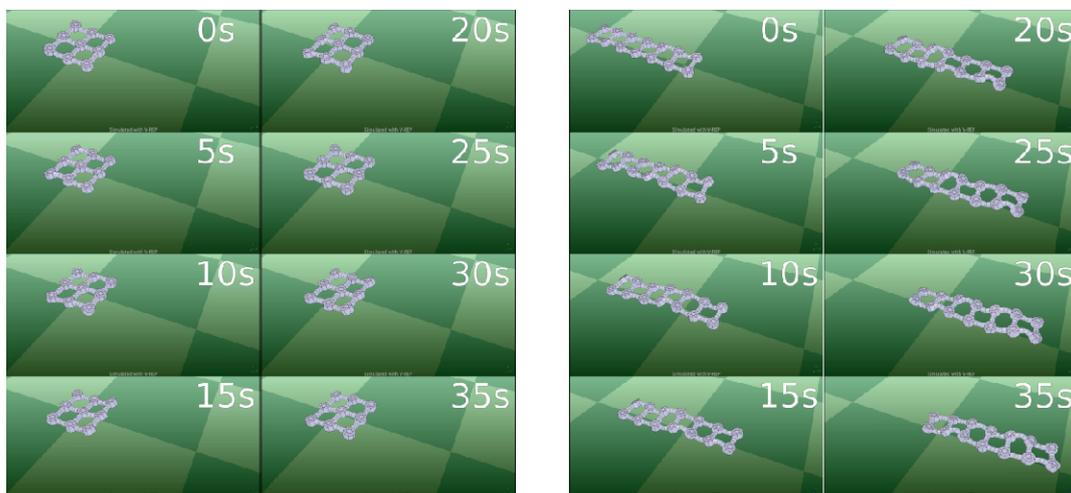
### (1) 扁形ロボットの数理モデルと運動生成方法の構築

扁形ロボットの基本的な移動メカニズムを検討し、シミュレーションや実験によりその妥当

性を検証した。まず関節を介して、ユニットである体節を縦横に連結した数理モデルを用いて、扁形動物や軟体動物で観察できる代表的な這行運動の Pedal-wave 推進を基本的な移動方法に採用し、扁形ロボットに適用する場合の運動生成法を検討し定式化した。具体的には、三角関数を基本とした時間関数で関節角度等を表現することで、数種類のパラメータを変更するだけで様々な運動の生成を可能にした。

次に腹足類における波形を伝播させる移動メカニズムに注目した。これらの移動メカニズムは波形の生成原理が収縮か伸展であるか、進行方向に対して単列で行うか複列で行うかの特徴により4種類に分類されている。そこで4種類の波形伝播方式を Pedal-wave 推進に反映し動力学シミュレーションを行い(図4)、提案する扁形ロボットにおいても腹足類の波形伝播方法による移動を実現できることを確認し、その後の簡易モデルを用いた実験においてもその妥当性を確認した。この腹足類を参考とした移動メカニズムを検討する際に、ロボットの構造に等方性がある正方形構造(3×3構造)と異方性がある長方形構造(5×2構造)でも動力学シミュレーションと実験を行い、それぞれの構造における移動特性を調査した。

また薄型圧力センサをロボットの機体表面に取り付け、側抑制の原理を基に開発したアルゴリズムを開発し、環境適応推進システムを構築した。扁形ロボットが地形に応じて推進方法を変化させ移動していく様子を動力学シミュレーションで確認し、簡易モデルにおいても同様の運動を行えることを確認した。最後に、ユニットの連結構造により運動の特性が変化することを確認し、ユニットを頂点とする三角形か四角形構造が基本的な構造となり得ることを確認した。



(a) 正方形構造 (3×3 構造)

(b) 長方形構造 (5×2 構造)

図4 進行波の生成による推進シミュレーション

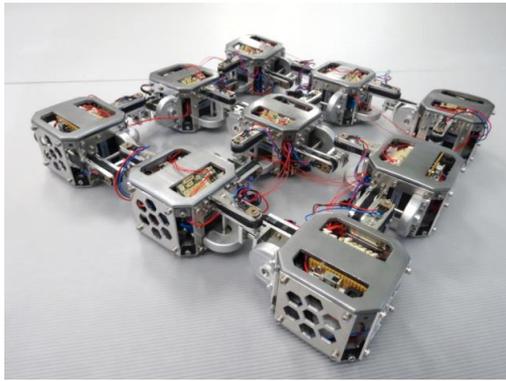
## (2) 柔軟な二次元膜状構造を実現する関節の機構構成の検討と試作機による実験的な検証

開発する扁形ロボットに導入する関節構造としては、「能動3自由度」、「能動2自由度+受動1自由度」、「能動1自由度+受動2自由度」の関節構成を検討した。柔軟性の向上を目的とした体節の増設を考慮した結果、「能動2自由度+受動1自由度」、「能動1自由度+受動2自由度」および「連動2自由度」の関節構成を検討することとした。

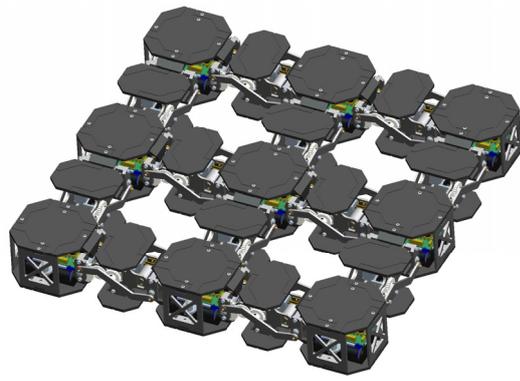
まず「能動1自由度+受動2自由度」関節では、サーボモータによる能動1自由度+回転自由な受動1自由度+バネによるコンプライアンスを導入した受動1自由度で関節を検討した。これは既に試作した関節構造の能動1自由度を置換した構造である。この構造を採用すると体節間の能動自由度は現象するが、体節の小型化と体節の増設が期待できるためロボットとしての運動性能は制限されないと考えた。実際に関節と試作し検証実験を行った結果、前年度の試作機と比較して小型・軽量化に成功し、体節を増設すればロボット単体としての運動性能が損なわれない見込みが高いことを確認した。

次に「能動2自由度+受動1自由度」関節については、当初から検討していた関節構造であり、良好な結果が得られた簡易モデルでも採用した関節構造であったことから、まずは簡易モデルを発展させ、試作1号機を開発した(図5a)。

最後に「連動2自由度」関節では、差動機構を用いてこれまで独立に駆動していた2つの関節軸を協調駆動するものであり、この機構によりアクチュエータの小型化および体節の増設が期待できる。この設計に関しても実際に試作を行い、所期の性能を発揮できることを確認した。試作した結果により、さらなる小型軽量化が可能であると期待できる「連動2自由度」関節を用いた試作2号機も開発した(図5b)。



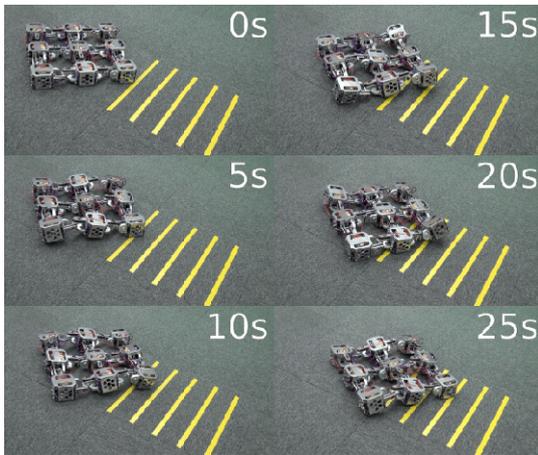
(a) 能動 2 自由度と受動 1 自由度関節



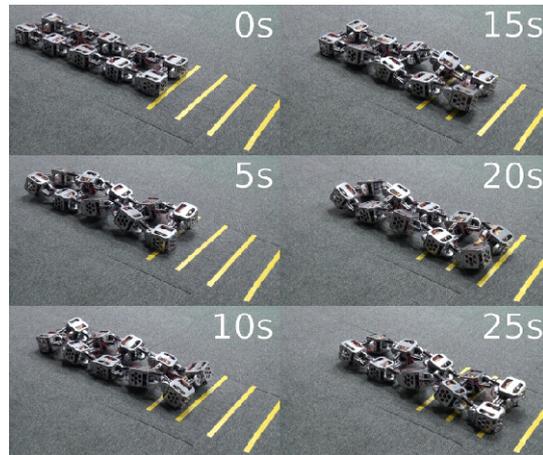
(b) 連動 2 自由度

図 5 試作した扁形ロボット

そして移動時の対地適応性の向上を図るため、ロボットの構造材や駆動系に積極的に柔軟材を導入し、市販の安価な圧力センサを複数組み合わせ合わせた接触力の大きさや位置を測定する複合センサも試作した。試作機を用いて推進実験を行い、動力学シミュレーションで得られた結果と定性的に同等な結果が得られたことを確認した (図 6)。



(a) 正方形構造 (3×3 構造)



(b) 長方形構造 (5×2 構造)

図 6 扁形ロボットによる推進実験

### (3) 多自由度を活かした扁形ロボットの作業機能のための制御則の開発

前年度までに開発した試作ロボットおよび環境適応推進手法の成果を基に、研究計画で予定していた通りに扁形ロボットの作業機能と産業応用への展開を検討した。

まず、扁形ロボットの作業機能についてであるが、大自由度を有する扁形ロボットの場合の把持と繰り動作についてシミュレーションを行った。この場合は、従来のロボットハンドのように物体の形状に合わせて、ロボットの各関節を位置制御することにより把持と繰り動作を実現できることが確認できた。また触覚センサによる情報を用いることにより、側抑制の原理を導入して物体を包み込むような動作を実現できた。ただ触覚センサによるフィードバック制御次第では把持が不安定になる状態があることも確認できたので、確実に安定な包み込み把持を実現するためには、今後も従来のロボットハンドの研究で行われている議論が必要である。

### (4) 探査ロボットなどの産業応用への展開と実証

扁形ロボットの産業応用への展開として、床下点検や配管検査などのインフラ点検への応用を視野に入れた狭隘環境や不整地での探査を模擬した実験を行った。実験の内容としてブロックや木材などで擬似的な狭隘環境や不整地を作り出し、操縦者がロボットの動作を直接観察しながら扁形ロボットをジョイスティックで操縦する内容である。これにより、開発したロボットが持つ機構的な移動性能が応用展開への可能性を有しているか確かめようとした。実験では操縦者の試行錯誤しながらの操縦によるものではあるが、扁形ロボット自身の機体高さより低い凹凸のある路面条件においては路面を踏破できることを確認した (図 7)。

実際に産業に応用するには自律的な動作や遠隔操縦システムなどのインターフェースの充実

を図る必要があるが、移動機能としては予想した能力を有していると判断できる結果である。



図 7 扁形ロボットの瓦礫上移動実験

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

1. 佐藤邦彦, 程島竜一, 琴坂信哉, “板状機能体の研究 —第 2 報: 試作機の開発と推進実験—”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 1G3-06, 2016.
2. 佐藤邦彦, 程島竜一, 琴坂信哉, “板状機能体の研究 —第 1 報: 機械モデルの構成法と移動法の提案—”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A1-12a1, 2016.

[その他]

埼玉大学大学院理工学研究科 機械科学系専攻 設計工学研究室,  
<http://design.mech.saitama-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 琴坂 信哉

ローマ字氏名: KOTOSAKA, Shinya

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。