

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	腹足類の運動に着目した進行波で推進するシート形移動体の機構と制御
Title(English)	Mechanism and Control of Sheet-type Mobile Robots Propelled by Traveling Waves Focused on the Movement of Gastropods
著者(和文)	渡辺将広
Author(English)	Masahiro Watanabe
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10792号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:塚越 秀行,鈴森 康一,蜂屋 弘之,山北 昌毅,遠藤 玄
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10792号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

平成 29 年度 学位論文の要約

腹足類の運動に着目した
進行波で推進するシート形移動体の機構と制御

指導教員：塚越 秀行 准教授

東京工業大学
理工学研究科 機械制御システム専攻

渡辺 将広

論文要旨

本論文の目的は、進行波で推進するシート形移動体を具現化するための機構と制御を検討し、その有効性を検証することである。腹足類がシート状の腹足に Pedal waves と呼ばれる筋収縮の進行波を生成しながら移動する現象に着目し、これを工学的に再現する手段を確立することで、移動ロボットの適用領域の拡張を目指す。なかでも、i) 粘液と進行波との相互作用で壁面や天井面へ吸着したまま推進する手段、および ii) 進行波を生成する薄型柔軟なシート構造で狭隘空間を移動する手段は、移動ロボットの機動性を高める有用な移動方法となり得ること、一方でこれらを工学的に再現するうえで設計上の知見が十分に得られていなかったこと、さらに生物学的にも未解明な現象が残されている。そのため、上記課題の解決を図るとともに、進行波で推進するシート形移動体を具現化するための機構と制御を検討し、その有効性を検証することとする。

本論文では、その進行波を波の伝播方向と同方向に振動する「縦波型」と、波の伝播方向と直角に振動する「準横波型」の 2 つに大別し、それぞれの工学的特性を明らかにする。第一に目指す粘液吸着式移動体は、本研究の着想に至った粘液で吸着しながら移動するカタツムリの移動原理を調べ、得られた知見を縦波型と準横波型の進行波を生成する 2 つの移動体に適用する。これまで不明確であったカタツムリの吸着移動の原理を明らかにするため、ミスジマイマイの粘液特性および吸着力の異方性と材質と吸着力の関係を調べる。壁面への吸着移動条件を明らかにし、実験により実証する。第二に目指す柔軟シート構造で進行波を生成する装置は準横波型を主眼とする。その進行波を利用した推進速度の解析解の導出や、波の表面の軌道の数値シミュレーション、実機実験を行い、理論の妥当性を検証する。また空気圧駆動の進行波を生成する 2 つの柔軟構造のアクチュエータを提案し、動作原理、波形の設計、製作方法、制御方法、力学的検討、評価実験を行い、工学的特性を明らかにする。最後に、これらの実験を通じて得られた結果から進行波移動体の吸着力と推進速度の双方から評価し、目的によってどのような進行波が適するのか論ずる。

第7章 結論

7.1 本論文の結論

本論文では、自然界に存在する腹足類の移動原理に着目し、その独特な移動形態にみられる i) 粘液による吸着と這行運動を組み合わせた接地しながらの移動、ii) 構造の柔軟性と進行波による推進、などの特徴を生かし、コンクリート面を登る壁面移動ロボットや狭隘地形内を探索するロボット、物体の搬送装置へ適用する方法を論じることを通じて、進行波の推進を利用した推進の応用の可能性を示すことを目的とした。

第1章「序論」では、本研究の背景と意義、目的を述べた。まず、生物の這行運動は波の振幅の方向や波の伝播方向によって分類できることを示し、その特徴や有効性について述べた。そのうち、腹足類のようなシート状の足で進行波を生成させて移動する **Pedal wave** に着目し、波の数や方向によって様々分類できることを示した。さらに、この工学的な応用として従来までに提案されてきた進行波生成装置の開発事例を紹介し、これらに共通してみられる課題の克服や不明点の解明のための研究を本論文で扱うことを示した。

第2章「粘液吸着式這行運動の原理」では、カタツムリの移動と吸着原理に着目し、その吸着と移動原理を明らかにすることを目指した。まず、本研究の着想に至ったカタツムリの這行運動を調べ、粘液のレオロジー特性の測定や吸着力の測定から粘液吸着式這行運動の原理を明らかにした。次に、流体が関与した吸着の力学モデルを導出した。

第3章「剛体移動体による粘液吸着式這行運動の検証」では、剛体構造を基本とした2つの進行波生成装置を提案し、粘液吸着式壁面移動ロボットに応用した結果を述べた。1つ目は連続的な横波を生成できる波伝播型ロボットであり、2つ目は足を擦りながら縦波で移動する Rim 等速型ロボットであった。それぞれのロボットの構成や動作原理を述べたのち、粘液による吸着で壁面や天井面を移動するための条件を示した。さらに、人工粘液による吸着と摩擦の異方性を利用し、従来では吸着困難なコンクリート面で移動するロボットに応用した結果を述べた。

第4章「進行波の運動解析」では、進行波による推進原理を運動学から明らかにした。はじめに、従来の進行波の推進速度式の記述方式について述べ、不正確な点を明らかにした。そして、これらを解決するため、解析解と数値シミュレーションを併用し実際の進行波の運動を明らかにした。推進速度の計算はキネマティクスに基づき、平面内を移動する正弦波2次元運動学解析を行った。微小時間における移動量から計算すると、シートの厚さや振幅、波長、時間などの波パラメータで推進速度式が一般化できることを示した。さらに、波の表面の動作のシミュレーションを行い、進行波の表面の運動を解析した。そして、シミュレーション結果と計算した推進速度式が、シートの位置によって推進速度が異なるという同様な結果を示すことを述べた。

第5章「柔軟シート形進行波生成アクチュエータ」では、進行波の生成と構造の柔軟性を両立させた空気圧アクチュエータを具現化する手法を示した。まず、従来の空圧駆動の進行波生成アクチュエータを構造の違いから分類し、問題点を明らかにした。次に離散的な節で構成されるアクチュエータの波形パターン数と数学的に導き、波形の候補を明らかにした。次に、柔軟構造で正弦波を生成できるシートの「柔軟変形型」アクチュエータを提案し、その動作原理と構造、製作方法を示した。そして、アクチュエータの速度や振幅、力学的な特性などの理論特性を導出し、基礎実験によりその妥当性を検証した。また、アクチュエータを様々な環境で動作させ、狭隘地形内の移動や物体の搬送など、提案したアクチュエータの設計手法の有効性を示した。

第6章「ペイロード向上のための方策」では、よりペイロード性能を向上させたシート状の進行波生成アクチュエータを提案した。まず、アクチュエータの波の生成の原理、構成、製作方法を示した。そして、動作実験を行い、振幅、推進速度、ペイロード、牽引力などの諸特性を明らかにし、本手法によりペイロードに加えて推進速度の向上を実現できることを示した。また、圧力室を直交配置することでX-Y方向の2方向への進行波の生成ができることを動作実験で示した。さらに、これまで開発した進行波を生成するアクチュエータとミスジマイマイについて、吸着力と推進速度の双方から評価した結果、速度を重視するとシート厚さを大きくした準横波型が適し、吸着力を重視すると縦波型が適することが示された。

以上のように、進行波を利用した推進の原理とその動作を生成する剛体および柔軟構造のアクチュエータの提案、設計手法の確立ができたこと、および多くの用途に適用可能であることを示せたことが本論文の結論である。

7.2 今後の展開

粘液吸着式壁面移動ロボットの今後の展開として、次のような課題が挙げられる。

①粘液

本文中で何度も述べたが、使用したビンガム流体の降伏値は大きかったが流動性は不十分であった。この問題に対処するための方法は2つ挙げられる。1つはカタツムリの粘液のように大きな降伏値があるチキソトロピー流体を模索することである。2つ目は、外部からエネルギーを投入することで急激に特性が変化する機能性流体の利用である。機能性流体には、電界を印加することで粘度を可逆的に変化するER流体や、磁界を印加することで変化するMR流体などが存在する。

また、粘液の消費量を抑えながら吸着に必要な最小限の流体を吐出できる機構が必要である。現在までに粘液腺を搭載したロボットはほとんど存在していないため、一から検討する必要がある。粘液を足裏全体に均一に塗付できる機構が望まれる。

②柔軟性がある縦波型の進行波を生成する移動体

凹凸のある立体的な面を移動するためにはロボット自身の柔軟性が必要となる。本研究

で開発した剛体ロボットでは移動能力に限界がある。カタツムリのように柔軟性と縦波型の進行波を生成できるロボットが実現できれば、多様な環境を移動することが可能になりブレークスルーが期待できる。粘液の抵抗に打ち勝てる力と構造の柔軟性をいかに両立させるかが課題である。

柔軟な進行波生成アクチュエータの今後の展開として、次のような課題が挙げられる。

①湾曲動作

提案したアクチュエータは受動的な変形によって構造全体が湾曲することができるが、能動的な湾曲は行えない。したがって、振幅より大きな段差を踏破することができない。

②無線化

自立駆動のためには、駆動に必要な消費流量を抑え、アクチュエータに搭載できる小型ポンプや小型バルブを開発することなどが必要である