

称号及び氏名 博士（工学） 山野 彰夫

学位授与の日付 平成 29 年 3 月 31 日

論文名 「流路環境に適応する細管内推進機構の駆動方法に関する研究」

論文審査委員 主査 伊藤 智博
副査 菊田 久雄
副査 大多尾 義弘
副査 新谷 篤彦

論文要旨

本研究は、様々な環境が存在する流路内を推進する手法としてうねり駆動による推進に注目し、(1) スマートマテリアルにより駆動される柔軟推進体の実現と(2) 生物の適応運動を模範とした流路環境に対する適応制御則の両面から、流路内推進体の制御手法について提案を行ったものである。

近年、水道管の点検需要が増大してきている。大和総研による水道管の老朽率の遷移に関する報告では、布設後 40 年の水道管の老朽率が 2007 年度から 2013 年度までの間で単調増加している様子が確認できる。一方で、地方自治体では少子・高齢化による税収の減少に伴い、維持負担がより大きくなることが予測される。

需要を反映して、点検負担を低減する手段として自己推進体による配管内点検への応用の試みが数多くなされている。主な移動手段としては、車輪による方法そしてスクリーによる推進等が挙げられる。しかし、水道管内部環境は水位が変動し、異なる径の配管が接続されている場合には、特定の口径の配管内の移動を前提にした駆動方法では問題が生じる。それぞれの手法は流体が存在しない場合もしくは流体が存在する場合の一方の条件にしか適しない。

ウナギやヘビなどのうねり運動による推進は、陸上から水中までの様々な環境で推進を実現させることが期待できる。うねり運動を実現する推進体にはアクチュエータとして電磁モータ（サーボモータ）を用いることが多く、推進体本体は剛体リンク機構で構成されているのが一般的である。しかし、狭い流路内でのうねり運動による推進を想定した場合、壁面による拘束で関節がロックしてアクチュエータや駆動回路に過負荷がかかることが懸念される。この問題をセンシングと能動的制御に頼らず解決する方法として、推進体およびアクチュエータに柔軟な素材を用いて柔軟性を高めることが考えられ、近年ではアクチュエータに柔軟なスマート素材を用いた例が多く見られるようになってきている。先行研究で主に見られるのがイオン導電性高分子 (IPMC) アクチュエータと形状記憶合金 (SMA) アクチュエータである。SMA アクチュエータは温度に応じて結晶構造が異なる相（マルテンサイト相、オーステナイト相）の割合が変化し、各種特性（ひずみや内部抵抗等）が変化するという特性を持っている。そこで、一般的には素子に電流を流すことで発熱させ、温度変化に伴うひずみ変化を利用することが多い。

SMA アクチュエータは価格面、出力および保守性から IPMC アクチュエータより優れているが、

SMA アクチュエータの動作メカニズムの都合上、動特性がアクチュエータ周辺領域の蓄熱などの影響を受けやすい。蓄熱による温度上昇は、SMA アクチュエータのひずみ量の飽和につながり、振幅減少につながるため、推進力を維持するためには温度管理が重要になる。しかしながら、SMA アクチュエータを用いた水中無人機の先行研究では、これらの問題を定量的に考察した例は未だ見られない。また、複数の SMA アクチュエータを有する推進体の出力低下の防止の観点から、簡易なパラメータ調整で温度制御を実現できる制御手法が好ましい。しかし、先行研究で多用されている PID 制御では複数のゲインと目標値の時刻歴を試行錯誤的に決定する必要があった。

先行研究におけるうねり駆動を推進に用いる推進体に関する研究では、推進体は一定の駆動パターンで駆動される。水位変化・障害物の存在のような環境変化により、うねり駆動を調節する必要がある。実際の生物では環境の変化に応じてうねり運動を変化させることが観察されており、適応運動によって様々な環境で推進を実現していると考えられる。例えば、ウナギは陸上と水中でうねり運動における振幅が異なることが報告されている。ヒルにおいては粘度の増加と共いうねり運動の波長が減少することが報告されている。一方で、ヘビ型ロボットに関する研究は数多くみられるが、環境の情報をうねり運動へ反映させて生物の適応運動を再現させた研究は見られない。

本研究では、小型・軽量・堅牢化が容易な推進体を実現させるアクチュエータとして SMA を用い、推進体の推進特性を向上させる新たな駆動方法を提案した。さらに、様々な環境が存在する流路内の推進において、生物が見せる適応運動を参考にして流路環境変化に能動的に適応する適応制御則を提案した。本研究は、8 章で構成される。

第 1 章では、本研究の背景および研究目的、うねり運動による推進に関する先行研究の概要と本研究の位置づけについて述べた。

第 2 章では、推進体に用いるアクチュエータの候補について比較検討を行った。この章では、形状記憶合金 (SMA) アクチュエータが他のアクチュエータと比べて、質量比出力・変位量および発生応力の観点から小型推進体の実現に有効であることを述べた。

第 3 章では、矩形断面流路内の推進体を想定し、三次元非圧縮性完全流体の仮定の下で、推進体を一次元梁モデルでモデル化し、流体-推進体連成モデルを構築した。また、推進体のアクチュエータ領域についてもモデル化し、推進体モデルと共に拡大系を構築した。

第 4 章では、SMA アクチュエータの大きな消費電力の問題点に注目し、アクチュエータの出力を維持しつつ消費電力を抑える事ができる駆動方法について、数値解析と実験の両面から検討した。この結果、第 3 章のシステム同定の結果得られた SMA アクチュエータの数値解析モデルに対して、消費電力・最大印加電圧・アクチュエータ出力を評価関数に持つ多目的最適化問題を考え、インパルス的な入力波形によりアクチュエータ出力を維持しつつ消費電力を低減できることを確認した。

第 5 章では、構築した推進体の解析モデルにより、推進力を向上させるための適切な駆動条件を探索した。得られた知見から、SMA アクチュエータの性能を維持する適切な駆動方法を提案した。先行研究では PID 制御により温度制御を実現されてきたが、複数のゲインと目標値の時刻歴を試行錯誤的に決定する必要がある。提案手法では、自励発振のメカニズムを適用し、1 つのパラメータ調整のみで過加熱に由来する出力低下を防止することを実現した。

第 6 章では、自励振動子として構成された複数のアクチュエータシステムに対し、結合入力を実験して結合振動子を構成することで、特定の位相差で同期させる手法を導入し、推進体の泳動形態の自由度の向上を試みた。複数の SMA アクチュエータを備えた多自由度推進体において、時間遅れを有する結合入力を導入することで、アクチュエータの性能を発揮させつつうねり運動による推進を実現できることを確認した。

第 7 章では、水道管などの配管内部が様々な流路環境を有していることに注目し、流路環境の変化に由来するアクチュエータへの負担を低減させるような制御手法の構築を試みた。単純な神経回路を有し、数値解析モデルが構築されているヒルが見せる適応運動のメカニズムを参考にし、ヒルの神経モデルを参考にし、局所フィードバックを有する分散制御則を構築した。提案手法を

実装した推進体は、ヒルと同様に関節負荷が大きくなる環境下では、能動的にうねり運動の形態を変化させ関節負荷を低減させることを確認した。

第8章では本研究で得られた主要な知見を列挙し、今後の課題をまとめて本論文の結言とした。

以上の提案手法を統合すれば、SMA アクチュエータで構成された柔軟な小型流路内推進体において、SMA アクチュエータの性能を発揮させつつ環境変化に対して能動的に運動を変化させて推進を実現することが期待できる。これは、従来の剛体で構成されスクリューで推進する推進体では運用が困難な、複雑形状の流路内推進の実現につながると期待できる。

審査結果の要旨

本論文は、配管内部を推進する流路内推進体を対象としており、小型で軽量のスマートマテリアルによる駆動機構と生物の環境適応制御則を模した制御手法を備えた柔軟流路内推進体を提案し、理論的、実験的検証を行ったもので、以下の重要な成果を得ている。

- (1) 推進体に用いるアクチュエータとして、質量比出力および発生応力の観点から形状記憶合金(=SMA)アクチュエータが最適であることを見出した。SMA アクチュエータを内蔵したシリコンチューブの数値解析モデルを構築し、消費電力・最大印加電圧・アクチュエータ出力を評価関数に持つ多目的最適化を行った結果、アクチュエータの出力を維持しつつ消費電力を抑える事ができる駆動方法として、インパルス的な入力波形が最も有効であることを明らかにした。
- (2) SMA アクチュエータを長時間駆動させた場合に生じる過加熱による出力低下を解決する手法として、自励発振のメカニズムの適用を提案し、過加熱に由来する出力低下を防止しうることを理論的および実験的に示した。複数の SMA アクチュエータを備えた多自由度推進体を提案し、複数のアクチュエータを自励振動子として構成し時間遅れを有する結合入力を導入することで、アクチュエータの出力低下を防ぎつつ、うねり運動による推進を実現できることを明らかにした。
- (3) 水道管など内部が様々な流路環境を有する配管系へ適応しうる制御手法として、ヒルが見せる適応運動のメカニズムと神経モデルを模した局所フィードバックを有する分散制御則を提案した。提案手法を実装した柔軟推進体は、周囲環境変化を検知し能動的にうねり運動の形態を変化させることにより、様々な周囲環境に適合できることを明らかにした。

以上の諸成果は、小型かつ柔軟な流路内推進体の開発に対して多くの知見を与えているのみならず、流路環境の変化に能動的に適応する制御手法を提案しており、本分野の学術的・産業的発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。