

令和 2年 2月 26日

豊橋技術科学大学長 殿

機械工学 専攻
学位審査委員会
委員長 三浦 博己

論文審査及び最終試験の結果報告

このことについて、博士学位論文審査を実施し、下記の結果を得ましたので報告いたします。

学位申請者	金田 礼人		学籍番号	第111816号	
申請学位	博士(工学)	専攻名	大学院工学研究科博士後期課程 機械工学 専攻		
博士学位論文名	Flexible Linear Motors for Mobile Continuum Robots (移動連続体ロボットのための柔軟直動モータに関する研究)				
論文審査の期間	令和 2年 1月 16日 ~ 令和 2年 2月 19日				
公開審査会の日	令和 2年 2月 19日		最終試験の実施日	令和 2年 2月 19日	
論文審査の結果*	合格		最終試験の結果*	合格	
審査委員会(学位規程第6条)					
学位申請者にかかる博士学位論文について、論文審査、公開審査会及び最終試験を行い、別紙論文内容の要旨及び審査結果の要旨のとおり確認したので、学位審査委員会に報告します。					
委員長	内山 直樹				
委員	真下 智昭			章 忠	
			印		印
			印		印

*論文審査の結果及び最終試験の結果は「合格」又は「不合格」の評語で記入すること。

論文内容の要旨

本論文は、連続的に形状を変えることのできる連続体ロボットへの適用を目的とし、柔軟性を有するリニア型アクチュエータに関連する技術を提案し、研究を行い、その成果をまとめたものである。連続体ロボットは、柔軟性、器用さ、安全性などの理由から、医療、工業検査分野などにおける期待が大きい。本論文では、1章に、連続体ロボットならびにそれらを駆動するアクチュエータの先行研究を引用し、研究背景を述べ、研究目的を明らかにする。2章では、超音波振動を用いてコイルバネを駆動することのできる、フレキシブル超音波モータを提案した。このモータは、他の原理のアクチュエータと比べ、約15mmの小型サイズであり、柔らかなコイルバネを送り出して直進させることが可能という特長を有する。コイルバネの弾性力学に基づいてモータの設計手法を明らかにし、コイルバネの運動を表す動力学モデルを構築して実験を行い、モデルの検証を行った。モータの制御を実現するためには、コイルバネを用いた抵抗式センサを採用した。2個のフレキシブル超音波モータを組み合わせた2自由度の連続体ロボットの開発を行い、フィードバック制御システムを考案し、実験検証を行った。3章では、柔軟性を有するチューブを3本用いた連続体ロボットを開発した。3本のチューブは先端で互いにつながれており、3本は自由に直進可能であり、それらの相対的位置により、ロボット先端は自由な姿勢を取ることができ、このロボットの運動をモデル化し、実験でモデルを検証した。その連続体ロボットを電磁モータで駆動できるようにし、吸盤機構を取り付け、壁面移動ロボットとしてのデモを実施した。移動ロボットのタスクとして最も難しいと言われる、壁面裏面への移動のデモに成功した。第4章では、本研究の成果についてまとめ、今後の連続体ロボット開発におけるアクチュエータの可能性について言及する。

審査結果の要旨

超音波モータの原理を用いてコイルバネを駆動することのできるフレキシブル超音波モータは、小型サイズで、バネの柔軟性を有する独創的なアクチュエータである。モータの試作について、いくつかの課題を解決して安定した性能を得られるようになった。例えば、コイルバネとステータの接触圧（予圧）は、モータの性能を向上するための重要なパラメータであるが、予圧を推定する方法が無かった。弾性力学に基づいて、ばねのたわみ量から、予圧の発生量を推定し、予圧の最適設計手法を明らかにし、性能を向上させた。コイルバネは柔らかいという特長を有する一方で、振動しやすく評価が難しいという問題があったが、コイルバネが発生する直進運動を動力学モデルで表し同定に成功した。コイルバネを強制的に変形させた状態でも、モータは安定して駆動する（コイルバネを送り出す）ことに成功している。

制御を行うにはセンサが必要であるが、コイルバネ自身の内部抵抗をもちいて変位量を検出するセンシング手法の開発を行った。シンプルだが、部品を追加することなくセンシングを可能にする独自のアイデアである。このセンサを搭載することによって、フィードバック制御ができるようになり、応答性や位置決め精度を明らかにした。センサを搭載したフレキシブル超音波モータ2式を組み合わせた、2自由度の連続体ロボットを用いて位置追従実験、移動のデモを実施した。

提案する連続体ロボットが3自由度有する場合を想定し、3本のチューブを備えた連続体ロボットを開発した。これらのチューブは先端でつながれており、相対的な位置によって、ロボット先端の姿勢を制御することができる。ここでは安定して駆動ができるDCモータを用いた。3本のチューブの相対的な運動を、一定曲率モデルで表すことで制御できるようにし、実験を行ってモデルの精度を明らかにした。連続体ロボットの移動能力を調査するために、壁面移動ロボットの開発を行い、壁面移動ならびに、180度曲がることで壁面裏面への移動も成功した。この裏面への移動タスクは、壁面ロボットでは最も難しいと言われるものであった。

以上の研究成果は、当該学生が考案したオリジナルのアクチュエータと機構であり、創造性、完成度向上のための工夫は十分に認められる。また、以上の研究成果は、分野で著名な国際論文誌に掲載され、国内外の学会から複数の賞も受けるなどしており、客観的にも評価されている。以上より、本論文は博士（工学）の学位論文に相当するものと判定した。