

2023年 8月 21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 佐藤 海二



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	Mohamed Mostafa Abdelaziem Khalil		学籍番号	第 209106 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	Design and Control of a Micro Ultrasonic Motor-Based Insect-Scale Robot for Inspection Purposes (検査を目的としたマイクロ超音波モータベースのインセクトスケールロボットの設計と制御)			
論文審査の 期間	2023年 7月 13日 ~ 2023年 8月 21日			
公開審査会 の日	2023年 8月 21日	最終試験の 実施日	2023年 8月 21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	高木 賢太郎		高山 弘太郎	
	真下 智昭			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

航空機エンジン内やインフラ配管内など狭隘部での検査やメンテナンスを目的として、昆虫サイズロボットの活用が期待されている。これを実現するには、小型のモータ、センサ、および制御システムの開発が不可欠である。本論文は、このような要求に対し、マイクロ超音波モータを用いて昆虫サイズロボットの研究開発に取り組み、その成果をまとめたものである。

第1章では、狭隘部における検査技術の先行研究を調査し、研究背景、研究目的について述べている。第2章では、マイクロ超音波モータの入出力や物性に関するモデル化を行い、実験で検証している。小型の磁気式角度センサを用いてフィードバック制御システムを構成し、極値探索制御を用いてマイクロ超音波モータの定常特性の改善や目標軌道の追従制御を実現している。第3章では、マイクロ超音波モータに遊星歯車を取り付けたマイクロギアードモータを用いて、前輪と後輪を独自に駆動する昆虫サイズの車輪型ロボットの開発を行い、ギアやロボットの性能評価を行っている。ロボットが細径管内を移動するためのアルゴリズムを開発し、ロボットを用いて実証実験を行っている。第4章では、壁面と車輪にはたらく粘着力を実験ベースでモデル化し、ロボットに適切な粘着力を持たせている。前輪と後輪を交互に動かす尺取虫の運動を模倣したことで粘着力を維持したまま移動することが可能になり、壁面移動や段差乗り越えに成功している。第5章では、研究成果についてまとめ、今後の課題と展望について述べている。

審査結果の要旨

本研究の特徴は、アクチュエータとして、シンプルな構造で高いエネルギー密度を有するマイクロ超音波モータと、小型の遊星歯車を採用したことである。これにより、1mNm以上のトルクを発生することが可能になり、長さ約40mmの車輪型ロボットを設計開発できるようになった。従来のロボット技術では難しいとされていた細径の管内移動や壁面移動などのロコモーションに成功している。本論文の主要な成果は以下のとおりである。

- 1) 約1.5mmの磁気式角度センサを用いたフィードバック制御システムを新しく提案し、モータ駆動システムの開発に成功した。マイクロ超音波モータの特性をモデル化し、実験検証により、モデルと実験が一致することを確認した。モデルに基づいた極値探索制御を用いることで、モータの角速度制御を可能にした。
- 2) 遊星歯車を取り付けたマイクロギアードモータを用いて出力トルクを向上し、それらを用いた配管検査ロボットの設計開発を行い、実験でロボットの性能を明らかにした。内径の異なる配管内や、90度のエルボー配管内を移動できるアルゴリズムを提案し、試作したロボットで移動できることを実証した。
- 3) ロボットの車輪と壁面にはたらく粘着力をモデル化し、実験検証を行った。ロボットの制御方法に、尺取虫を模倣した動きを採用することで、壁面移動、段差乗り越え、天井面移動などの運動が可能になった。

マイクロ超音波モータと小型角度センサから構成されたフィードバック制御システムは、サイズや制御性能の点で学術的に独創性が高い。開発されたロボットは、2個のアクチュエータを搭載したロボットとして世界最小級であり、その設計論や計測制御方法は、新規性も高い。また、同ロボットでの管内移動や壁面移動の実証によって、狭隘部の検査装置としての実現可能性も示された。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。

(各要旨は1ページ以上可)