

氏名(本籍)	王 梓旭 (中華人民共和国)
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第150号
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当者
学位授与の年月日	令和3年3月24日
学位論文題目	Study on a Novel Type of Magnetic Actuated Microrobot
論文審査委員	(主査) 郭 書祥 (副査) 平田 英之 (副査) 鈴木 桂輔

論文内容の要旨

1. Background

Wireless capsule endoscopes (WCE) are favored in modern surgical procedures for the treatment of disease in clinical surgery and examination. The patients are willing to choose only simply swallowing a pill to do the early screening and medical examinations without anesthesia. WCE offers a promising method for precision medicine for minimally or non-invasive procedures in the gastrointestinal (GI) tract. Microrobots have the potential to revolutionize many aspects of medicine. It benefits from untethered, wirelessly controlled performance and diversified powered devices, which will make existing therapeutic and diagnostic procedures less invasive that can cause new procedures possible. Moreover, most traditional CEs rely on their gravity and intestinal peristalsis to move forward passively. Generally, the time required for such a medical procedure is about 8 hr. Further, these CEs can't achieve active locomotion may cause undesired effects, such as the risk factor for capsule retention. In view of the above problems, the development of the active capsule endoscope (ACE) is required. Among them, the magnetically manipulation ACE is a method accompanying the invention of the ACE.

2. Challenges

- 1) According to the standard of US Food and Drug Administration (FDA), the size of capsule endoscope should be less than (12mm×33mm). This puts forward a high requirement for researchers to develop the CEs with integrate various modules under the above size limitation.

- 2) In clinical application, doctors will inject a certain amount of liquid into the intestinal tract of patients in advance, so as to fill the intestinal tract and reduce the resistance of CE's movement. Therefore, different CEs need to be evaluated for their different motion performance in the fluid.
- 3) The current CEs are lack of functional modules, meanwhile, the CEs with single function can't meet the requirements of the clinical surgery.

3. Research purposes and approaches

- 1) To develop the new type magnetic actuated microrobot with active motion ability and propose the prototype microrobot which is based on the clinical applications.
- 2) Focus on the development and evaluation of the performance prototype microrobot with different modules.
- 3) To realize high accuracy drug delivery function module of the microrobot and focus on the multiple ACEs cooperative locomotion.

4. Research topics

Topic 1: Development of the active microrobot actuated by electromagnetic field.

Topic 2: Development and evaluation of the multi-functional microrobot.

5. Conclusions and future work

In this paper, a novel type microrobot actuated by electromagnetic field is proposed, which provides the feasibility of similar CEs in the practical clinical applications.

- 1) The type of screw jet microrobot is actuated by the propulsive force which is created by the pitch of the screw. The experimental results of evaluation of the motion performance shows that the 2 pitch structure can provide the highest velocity for the screw jet microrobot. When the actuation frequency of the electromagnetic field at 10Hz, the velocity reached the peak at 5mm/s.
- 2) During the experiment, due to the resonance frequency of the magnet's individual performance. The proposed different types of microrobots have different starting frequency and step-out frequency at 3Hz and 10Hz, respectively.
- 3) The highest velocity of the drug sustained-release microrobot (DSM) can achieve 7mm/s in the static flow. According to the starting frequency of the microrobot, the frequency at 1-2Hz is used to realize the drug delivery function. Therefore, the experiment to evaluate the drug delivery rate shows that at 1-2Hz the flow rate of the discharged drugs are 0.015ml/s and 0.028ml/s.
- 4) In addition, we used cylinder shape fixed cow intestine as the operation environment to do the in vitro test. During the experiment, the DSM can move toward the target two points in the curve intestine pipe, and the cooperative

locomotion of drug delivery has also been achieved.

In the future works, the developed DSM prototype will correspond with the criteria. The smaller size not only means that DSM can better adapt to the fluid environment, but also can function easily in some special cases, such as the discomfort of aged patients, or the narrow intestinal tract of young children. The working environments, which affect a lot on the motion performance, will be analyzed for more complex environments such as in-vivo tests. Some existing methods, such as injecting gas or liquid into the intestinal tract have been applied in practical detection. However, how to deal with the problems of insufficient propulsion force in the fluid caused by various factors will be the main challenge we need to overcome. Besides, in minimally invasive surgery, the surgeons need to customize treatment with different types of functions robots, several multi-module capsule robots with different functions or different drugs will be the trend and direction of our research.

審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「新型磁気制御マイクロロボットに関する研究」(Study on a Novel Type of Magnetic Actuated Microrobot) について、本審査委員会にて審査を行った。その結果として、本論文は、外部磁場を利用し、内部駆動の新型ロボットを提案した。管内ロボットの分野において、既存のロボットと比較して、このロボットのメリットは安全、安定および多機能である。磁気駆動カプセルロボットに関する研究に基づいて、数学モデルを確立した。また、運動効率を向上できるロボット構造を設計し、カプセルロボットシミュレーションと一連の実験を通じて、この新型ロボットの有効性、性能と機能をも検証した。この種のカプセルロボットは高く評価されており、その中で高性能を実現すると同時に、ロボットの駆動も実現できた。この分野では、特定の場所へ定量的な薬物送達機能を初めて提案し、検証・実証した。開発したロボットは複雑な環境でも活用でき、プロトタイプに基づく実験により、商業医療分野での実現の可能性が実証された。

以下に本論文の特徴的な成果を要約する。

1. 本研究では、3軸ヘルムヘルツ磁場を利用して、力の伝達を通じて内部駆動カプセルロボットの制御を実現できた。内部駆動カプセルロボットの最大の利点は、人間の腸をより保護できることである。外殻の最適化により、手術中の突然の腸穿孔などの望ましくないリスクをより減らすことができる。静的および動的な流体力学シミュレーションを通じて、ロボットの構造を最適化して、パフォーマンスと安定性を向上させた。また、CFDシミュレーションの結果は、新型ロボットの優れた流体力学的性能を示している。

2. 本研究では、推進力と安定性に優れたスクリージェットロボットを提案した。

ロボットの駆動機構は、回転している内蔵の O 型マグネットによってトルクが供給され、スクリューを回転させて推進力を発生する。また、流体中のロボットの動きを分析することにより、さまざまな構造の性能を評価した。実験とシミュレーション結果を通じて、さまざまな環境でのロボットの動作性能を検証し、ロボットに最適な構造の設計を実現できた。

3. 磁気駆動カプセルロボットの分野では、サイズ制限を克服するのが常に困難である。そのため、DSM の構造は主に外殻、内部推進機構、薬室の 3 つの部分に分かれている。外殻は腸を効果的に保護し、作業中のさまざまな抵抗を減らすことができる。内蔵のプロペラは自主運動を実現するだけでなく、内部スペースを節約し、ロボット機能モジュールの開発も実現できるようになった。薬室は注射器のように、薬物を薬室から押し出すことができる。構造の最適化により、磁石の始動周波数とピッチ関連の計算の特性に応じて、薬物の持続的かつ定量的な放出を実現した。

4. 一連のシミュレーションと実験を通じ、DSM の運動性能、薬物送達機能、および薬物送達中の用量制御を評価した。実験では、まず、2 つの異なる投与目標が設定され、DSM が 2 つの目標に 2 回噴霧することができた。また、新鮮な豚の腸でインビボ (in-vitro) 実験を行った。本研究は、同様の内部駆動ロボットの開発と応用の実現の可能性を実証し、薬物送達機能の研究において主導的な役割を果たしている。

本論文の特徴的な成果とこの分野の技術進化に対する貢献は以下のようにまとめられる。

1. 本研究で提案するスクリュージェットロボットは、内部駆動のカプセルロボットである。外部磁場で制御することで、高精度、多自由度、可変速を実現できる。そして、さまざまな液体環境に適用できる。また、流体力学シミュレーション分析を通じて、信頼性、汎用性が高い機械構造は、関連するロボットの領域で主導的な役割を果たしている。

2. 数学モデルの確立によって、内部駆動ロボットの構造設計のモデルを提供した。また、ロボットの構造を評価および改善して、さまざまな環境に適応可能にするための一連のシミュレーション分析方法を提案した。これは、内部駆動カプセルロボットの分野に理論的な基礎を提供した。

3. 本研究では、内部駆動カプセルロボットの分野において、特定の目標への定量的な薬物送達概念を最初に提案し、検証した。この分野では常にサイズ制限の問題があり、機能モジュールなどのアイデアをロボットに埋め込むことが困難である。一連の検証の結果、本研究で提案した DSM は、マルチモジュール協調動作を実現でき、指定位置に到達した時点で、指定された場所に到達した際に複数回の投薬が可能であることを確認した。

以上により、本論文はその新規性、発展性が高く評価され、本審査委員会は審査申請者が香川大学大学院から博士（工学）学位授与に値するものと判定した。

本学位論文に関する内容として、学会誌に英文 2 編、および国際会議論文 2 編を含む複

数の学術論文を掲載された。研究成果はいずれも独自に完成したものである。

[1] **Zixu Wang**, Shuxiang Guo, Lingling Zheng and Takashi Tamiya, “Selective Motion Control of a Novel Magnetic Driven Microrobot with Targeted Drug Sustained-release Function”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, in Press, 2021.SCI, Impact Factor (IF): 5.673.

[2] **Zixu Wang**, Shuxiang Guo, Qiang Fu and Jian Guo, “Characteristic evaluation of a magnetic actuated microrobot in pipe with screw jet motion”, Microsystem Technologies, Vol.25, No.2, pp. 719-727, 2018. SCI, Impact Factor (IF): 1.513.

[3] **Zixu Wang**, Shuxiang Guo and Wei Wei, “Motion Performance of a Novel Fan Type Magnetic Microrobot in Pipe”, in Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1409-1413, 2019. (EI)

[4] **Zixu Wang**, Shuxiang Guo and Wei Wei, “Characteristic Evaluation of the Shell Outlet Mechanism for a Magnetic-actuated Screw Jet Microrobot in pipe”, in Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1688-1692, 2018. (EI)

最終試験結果の要旨

令和3年1月26日に公聴会の開催を行った。公聴会では、審査申請者は、学位論文の内容に関する発表を約50分間行い、引き続き口述試験による審査委員および参加者からの質疑に的確に回答することを求めた。また、公聴会后、口述試験により、磁気駆動カプセルロボットの構造設計と特性評価、および多機能磁気カプセルロボットの多モジュール連携の調整、評価結果及び専門知識の確認を実施し、本審査委員会において、最終試験とした。

最終試験における学位論文に対する質疑応答の概要は以下のとおりであり、審査申請者はすべての的確に回答した。

1. トピックⅡについて、新規性は何ですか、その応用は何ですか。

(回答) 関連する文献の情報に基づいて、本研究の提案したDSMは、磁気駆動カプセルの分野で最初に標的薬物投与の機能モジュールを提案し、検証したと言える。

2. 流体力学解析の役割とは何ですか。

(回答) 流体力学的特性は、流動環境下でのカプセルロボットの制御アルゴリズムの効率と精度を決定する重要なパラメータである。さらに、カプセルロボットの構造を最適化するためには、カプセルロボットの流体力学的特性が動作ごとに異なることを考慮して、3次元樹脂印刷用カプセルロボットは、独自の推進システムが必要となる。シミュレーション解析を行うことで、重要な流体力学的パラメータを得ることができる。また、シミュレーション結果の信頼性を高めるために、シミュレーション結果の差が8%以下になるまで複数の結果を比較し、グリッド独立性の検討を行った。

3. マルチモジュールロボットについて説明してください。

(回答) このロボットは自律的に動くことができるカプセルロボットだが、このタイプのロボットは機能性に欠け、研究の難関とされている。自律移動カプセルロボットでは、機能モジュールの開発が常にこの分野での研究の焦点となっている。提案したロボットは、腸管穿孔のリスクを軽減するために外殻を設計しており、内部駆動型と呼ばれることもある。駆動モジュールは、円筒形の磁石でプロペラを駆動することで、省スペース化と自律移動を実現する。節約により生じたスペースには、注射器のように O 型磁石の回転で薬物を押し出す機能モジュール、すなわち薬剤室を追加した。構造の最適化により、磁石の始動周波数とピッチ関連の計算に応じて、薬物の持続的かつ定量的な放出が実現した。これらの機能を実現するための主な課題は同じ磁場内にある 2 つの磁石を駆動する際、2 つの磁石間で相互干渉させないように、それぞれの機能モジュールを駆動することである。

本審査委員会における審査は、学位論文の内容、研究方法論を確認しようとするものである。

本審査委員会は、提出された博士学位請求論文が博士（工学）の学位に値するものであり、かつ審査申請者は専門領域に関する十分な学識と研究能力を有するものと判断した。以上より、本最終試験の評価を合格とする。