

氏 名 (本籍)	付 強 (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 121 号
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学位授与の年月日	平成 29 年 3 月 24 日
学 位 論 文 題 目	Study on the Structure and Control of Novel Type of Magnetic Microrobotic Systems
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. Outline of the research

Wireless microrobots have great potential in industrial applications and medical applications. In recent years, many kinds of microrobots have been developed to achieve various tasks due to technical advancements in manufacturing and further progress is expected in this field. The wireless microrobots are both safe, reliable and can be carried deeply within the tissue of living organisms in the human body. For example, the wireless capsule microrobot can be used to diagnose various diseases throughout the gastrointestinal tract. The microrobot is also used in medicine to avoid unnecessary incisions during surgical operations. Some researchers have proposed a kind of capsule endoscope, which is swallowed by the patient to diagnose the intestinal organs of the human body. However, this kind of robot is uncontrollable due to involuntary muscle movements known as peristalsis. To solve this problem, many microrobots have been developed with traditional motors and smart materials as actuators. These microrobots look perfect in theory and design, but are more or less ineffective. There are diagnostic problems due to the cable or wire and it is very difficult to reach a position accurately or operate in a very narrow and deep space.

Recently, remote control of the magnetic actuated microrobot using a magnetic field has been popular and developed due to realize external wireless energy supply. However, further clinical application is needed in order to produce a robot that is capable of treating disease, diagnosing intestinal problems and conducting minimal invasive surgery. As well, the robot needs to be able to install actuating elements (e.g. drug delivery mechanism), a camera (e.g. endoscope) and sensing elements for

achieving medical tasks. Therefore, medical safety, loading abilities and an effective propulsive performance is extremely important and challenging. We have developed a novel type of magnetic microrobotic systems to realize the energy supply by wireless and flexibility movement. The microrobots with several locomotion and the experimental results show the locomotion can be widely used in microrobot design.

2. Research results

2.1 Design of a magnetically actuated hybrid microrobot

The magnetically actuated hybrid microrobot (MAHM) has two motion mechanisms. One is the spiral jet motion which can move by rotating the spiral propeller. The other is fin motion which can move by vibrating the fin. The MAHM can switch between the two motions to realize movement in various working environments. The spiral jet motion is used when the microrobot needs precision operation and stable movement. The fin motion is used when the high propulsive force is needed. Due to just only use one magnet inside the MAHM, two motions can be controlled separately without any interference. An o-ring type permanent magnet is assembled at the front end of the tube and a bearing is assembled at the back end of the tube. Inner ring of bearing connects to the tube and outer ring of bearing is fastened inside the body. The fin is connected to the back end of the propeller with a bearing and a shaft. When the microrobot moves with the spiral jet motion, the outer shell of the microrobot is not rotates, it can be reduce damage for the intestinal wall and the fin can improve the dynamic characteristic and reduce the shake caused by the axial traction force at the spiral jet motion.

2.2 Development and evaluation of an electromagnetic actuation system

To provide the magnetic torque to the microrobot, an electromagnetic actuation (EMA) system which mainly consists of stationary 3 axes Helmholtz coils is proposed. It has a simple control method, because each Helmholtz coils is independent control. The 3 axes Helmholtz coils can produce a 3-D magnetic field vector in any direction and provide a magnetic torque for controlling the microrobot.

2.3 Development of a novel type of magnetic microrobotic system

Based on previous researches, a magnetic microrobotic system is developed to allow a doctor to remotely control a wireless capsule microrobot through a master device. This causes less pain to the patients and there will be less tissue trauma. Thus reducing hospitalization time and enhancing recovery. On the master side, the doctor views a monitor which is produced by a CT-scan and operates the wireless microrobot to detect or treat the disease with an unknown and dynamic environment. The control instructions are transmitted to the slave side. On receiving instructions, the slave

mechanisms control the wireless capsule microrobot. The monitor can also show the data calculated from the magnetic sensor array for obtaining the real-time position of the microrobot.

3. Conclusions and future works

In this thesis, a novel type of magnetic microrobotic system was proposed. The contribution of our work is summarized as follows: First, a novel magnetically actuated hybrid microrobot with screw jet motion and fin motion is proposed. Second, an electromagnetic actuation system is proposed for realizing the flexible motion in any direction. At last, a tele-operation control system is developed and evaluated. The experimental results indicated that the hybrid motion can be controlled separated without any interference. The hybrid microrobot realizes flexible motion in pipe by adjusting the magnetic field changing direction. In future studies, the microrobot can be fitted with devices for medical applications.

審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「新型磁気マイクロロボットシステムの構造及び制御に関する研究」(Study on the Structure and Control of Novel Type of Magnetic Microrobotic Systems) について、審査委員会にて審査を行った。本論文では、特に生体医工学的応用に絞り、生物機能を模擬した新型磁気ハイブリッドマイクロロボットシステムを提案・試作し、その有効性を動作実験で実証した。さらにモジュール型マイクロロボットシステムの構築とその制御手法に関する検討を行ったもので、高く評価できると考えられる。

以下に本論文の特徴的な成果を要約する。

- 1) 管内で走行可能なスクリュー型マイクロロボットの提案と試作として、長距離で移動できるための安定した移動手段を考慮し、磁石を用いて外部から変動磁界を与えることにより、推進力を得る駆動法を提案した。また、外部から回転する磁界を印加することで、ロボットを回転させて、スパイラル部分が流体を後方に押し出すことにより、安全性が高い駆動メカニズムを開発した。
- 2) 多機能性・多用途性を持ち、より大きな推進力と高い安定性を得られるハイブリッド型マイクロロボットを提案・試作した。ロボットの駆動メカニズムはスパイラルスクリュー及びヒレにより構成された。その動きの解析を通じて、その性能評価を行った。また、スパイラル及びヒレによる各駆動方式を組み合わせる制御方法を提案した。実験により、ハイブリッド型マイクロロボットが大きな推進力と高い安定性を得られる

有効性を検証した。

- 3) 3軸ヘルムホルツコイル装置を提案と試作した。このヘルムホルツコイルを使うことにより、移動するロボットに一定の安定した磁場を供給することが可能であり、安定した動作が実現できた。また、この装置は3軸を有しているため、それらの磁場を合成させることで、ロボットは水平方向や垂直方向といった3自由度の動作が可能となることが検証された。
- 4) ロボット内部に取り付けられている磁石から発生する磁場の強度をもとに、位置を検出する手法を提案し、その評価を行った。そして、磁場センサーを構成し、その特性評価を行った上に位置検出の精度を高めて、ロボットの位置制御の方法を確立した。
- 5) ハイブリッド型ワイヤレスロボットの駆動メカニズムに対して、モデルの構築と理論計算法の導出により、開発したものを検証できるだけでなく、さまざまな寸法にも通用できることを検証した。更に、この理論を付与する制御技術を開発し、具体的に検証し、ロボットの設計指針と理論計算法を確立した。

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) 本研究では、ワイヤレスの制御が可能で、汎用性の高いロボットを実現するため、さまざまな移動機構を複合したハイブリッド型ワイヤレスロボットを提案・試作した。提案したロボットは外部からの磁界を制御することで速度および方向の変更が可能であり、また移動機構を複合していることで幅広い推進動作と、ロボットの多自由度な動作が可能であることを実証した。本研究は工業や医療分野の中でも、特にカプセル型内視鏡の応用に大きく役立つ成果が得られたと考えられる。
- 2) バイオミメティックメカニズム設計法の導出と、ワイヤレスマイクロロボットの設計と、その実用的プロトタイプを試作を容易にしたこと。
- 3) 当該マイクロロボットの駆動メカニズムに対して、モデルの構築と理論計算法の導出により、開発したものを検証できるだけでなく、さまざまな寸法にも通用できることを実証した。更に、この理論を付与する制御技術を開発し、具体的に検証したこと。
- 4) 管内水中において、水平運動、上昇、下降及び停止モーションを実現する機構と制御方法の提案をしたこと。
- 5) 上記を総合的に試作構築し、スパイラルスクリュー及びヒレ駆動によるワイヤレスハイブリッドマイクロロボットシステムを完成したこと。

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であると判定した。

本学位論文に関する内容として、学会誌に英文**3**編、および国際会議論文**1**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] **Qiang Fu**, Shuxiang Guo, Yasuhiro Yamauchi, Hideyuki Hirata and Hidenori Ishihara, “A Novel Hybrid Microrobot using Rotational Magnetic Field for Medical Applications”, *Biomedical Microdevices*, VOL. 17, NO. 2, pp.1-12, 2015. SCI, Impact Factor (IF): 2.227.
- [2] **Qiang Fu**, Shuxiang Guo, Songyuan Zhang, Hideyuki Hirata and Hidenori Ishihara, “Characteristic Evaluation of a Shrouded Propeller Mechanism for a Magnetic Actuated Microrobot in Medical Application”, *Micromachines*, VOL. 6, No. 9, pp. 1272-1288, 2015. SCI, Impact Factor (IF): 1.295.
- [3] **Qiang Fu**, Shuxiang Guo, Songyuan Zhang, Qiang Huang, Hideyuki Hirata and Hidenori Ishihara, “Development and Evaluation of a Novel Magnetic Actuated Microrobot with Spiral Motion using Electromagnetic Actuation System”, *Journal of Medical and Biological Engineering*, Vol. 36, No. 4, pp. 506-514, 2016. SCI, Impact Factor (IF): 1.018.
- [4] **Qiang Fu** and Shuxiang Guo, “Design and Performance Evaluation of a Novel Mechanism with Screw Jet Motion for a Hybrid Microrobot Driven by Rotational Magnetic Field”, *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 2376-2380, 2016. (EI)

最終試験結果の要旨

平成29年2月7日に公聴会を開催した。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外部専門家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、新型磁気マイクロロボットシステムの構造及び制御に関する研究について、その開発経緯、設計概念と理論モデル、及び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。

- 研究の目的に関して、最終の応用目的は何か。
(回答) 本研究の目的は、人間の血管内を自由に移動し制御可能である実用的なマイクロロボットの開発を目的とし、いくつかのマイクロロボットを提案・試作した。最終の応用目的は生体内組織などバイオ医療応用への検討を行う予定である。
- ハイブリッド型機構の動作切り替えはどのような仕組みか。

(回答) 駆動方法を複合したハイブリッドロボットは、魚のような柔らかいヒレの動きを基本推進機構として、螺旋機構やジェット推進機構により、前進に加速力が必要な時や、行き過ぎた場合に後退する時などの幅広い動作が実現できることも実験により検証された。

- 螺旋ジェット駆動とヒレ駆動の長所短所は何か。

(回答) 螺旋ジェット型機構ロボットのジェット推進機構は高い推進性能を有し、また回転部分は内部に収納されているので管の内壁を損傷させるという危険性も軽減できると考えられるため、有用であるということが分かった。ヒレ駆動には共振することで、振幅が大きくなる周波数域があり、それを利用することで、10[Hz]以降でも動作が可能となる場合がある。

- 導出した理論計算数式は他の寸法のロボットに適用か。

(回答) 導出した理論計算数式は、他の寸法のロボットに適用できる。ロボットの設計および全体評価に役立てると考えられる。

- 本論文で提案しているロボットの性能・小型化及び実用化への課題は何か。今後の課題は何か。

(回答) 今後の研究課題として、ロボットの全体構造、制御システム特性向上及びバイオ医療応用への検討を行う予定である。これにより、ロボットを安定化・小型化する際にも非常に有利になると考えられる。

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。