

氏名(本籍)	Maoxun Li (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123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 an Amphibious Father-son Robotic System
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

1.1 Background

Underwater vehicles have been extensively applied to underwater intervention missions instead of human in recent years, such as underwater search-and-rescue, pipeline inspection, deep ocean exploration, seabottom terrain mapping, object recovery and seafloor soil sampling. According to different applications, the underwater vehicles have been designed and developed with different mechanical structure, shape, size and equipment. As the crucial equipment of the underwater vehicles, underwater manipulators typically play an important role in the underwater tasks. Generally, the manipulators are operated manually by human with ROVs (remotely operated vehicles). However, a ROV equipped with a rigid multi-link arm requires a depot ship for the operations and the tether connected to the depot ship also restricts its positioning and manipulation performance. On the contrary, AUVs (autonomous underwater vehicles) do not require the depot ship and the tether. Thus, AUVs can achieve a better positioning performance and a higher flexibility than ROVs. Generally, underwater vehicles need to be shipped to the operation waters and recycled after underwater tasks. Compared with the autonomous underwater robots, autonomous amphibious robots can walk from the ground to the water without manpower, and vice versa.

Nowadays, only few autonomous underwater robots are equipped with the underwater manipulators. Most of these robots are relying on the multi-link arms to implement underwater missions. As a traditional manipulation system, the multi-link arm is appropriate for heavy-type work and continuous manipulation. However, underwater mechanical arms are commonly enormous and they are mounted on a free

floating vehicle platform. The weightlessness of a vehicle underwater is similar to that in space. During the underwater manipulation tasks, the underwater vehicle has to overcome the reaction from the mechanical arm in order to keep it in its position. Furthermore, considering the nonlinear and hydrodynamic coupling between the underwater vehicle and the mechanical arm, developing a control scheme is required to compensate for the movement of the vehicle induced by the movement of the arm, which increases the complexity of the control system. To overcome these difficulties, using a small, deployable and highly maneuverable ROV as the manipulator shows a better performance.

1.2 Research approach

The objective of my research is to present a novel father-son robotic system for underwater intervention missions. In this system, an amphibious spherical robot is designed and developed as the father robot, which has three actuating modes. Two kinds of smart actuator-based biomimetic microrobots are developed as the son robots of the father-son robotic system, which are mounted on the plastic plate in the lower hemisphere of the father robot to be used as the manipulators of the father robot.

1) To adapt to the complex underwater environments, an amphibious spherical father robot was developed with three actuating modes: quadruped walking mode, roller-skating mode and water-jet propulsion mode. To improve the walking stability, a closed-loop control method was employed to control the stability of the direction of movement.

2) To implement the underwater missions, two kinds of biomimetic son microrobots driven by smart actuators were developed as the manipulators of the father-son robotic system. Additionally, the launching and recovery mechanisms of the manipulators were designed.

3) To realize the communication between the father robot and the wireless son robot, a blue LED-based underwater optical communication system was designed.

2. Research results

2.1 Development of an amphibious spherical robot with three actuating modes

To adapt to various complex environments, on land and underwater, an amphibious spherical father robot was designed and developed with three actuating modes: quadruped walking mode, roller-skating mode and water-jet propulsion mode. The amphibious robot consists of a sealed transparent upper hemispheroid, two transparent quarter spherical shells that can be opened, a plastic plate for carrying the son robots, and four actuating units installed with four passive wheels. The diameter of the upper

and lower hemisphere is 234 mm and 250 mm respectively. The robot is able to negotiate a variety of terrains. A closed-loop control system was developed to control the stability of moving direction during the walking motion. The robot can move from the ground to the water and realize surge, heave and yaw motions underwater.

2.2 Development of a biomimetic cable son microrobot used as the manipulator of the father-son robot system

An ICPF (ionic conducting polymer film) actuator-based cable son robot was developed as the manipulator of the father robot, which was controlled by the father robot by the signal cables. Two ICPF actuators in front of the robot were used to mimic the claw of the crayfish for grasping object. Two photodiodes were mounted in front of the microrobot to implement the blue LED tracking motion for microrobot recovery.

2.3 Development of a biomimetic cableless son microrobot used as the manipulator of the father-son robot system

An ICPF actuator-based cableless son robot was designed and developed as the manipulator of the father robot for recovering objects at the bottom of water. A blue LED-based underwater optical communication system was designed to implement the underwater communication between the father robot and the son robot. A new communication protocol was proposed for the father robot to remotely control the motion of the son robot. With the fixture mechanism and the LED tracking mechanism, the father robot can send out and receive the manipulator.

3. Conclusions and future work

In this research, firstly, we developed an amphibious spherical robot with three actuating modes as the father robot of the father-son robotic system to adapt to various underwater environments. The performance evaluation of the motions of the father robot in three actuating modes was carried out. A closed-loop control system was developed to improve the stability of moving direction during walking. To implement the underwater mission of object recovery, two kinds of biomimetic son microrobot were developed as the manipulators of the father-son robotic system. Additionally, the launching and recovery mechanisms of the manipulators were designed. A blue LED-based underwater optical communication system was designed to realize the communication between the father robot and the wireless son robot.

In the future, we will combine the son robots with the father robot and carry out a series of underwater manipulation tasks.

審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「水陸両用な親子ロボットシステムに関する研究」(Study on an Amphibious Father-son Robotic System)について、審査を行った。本論文は、その成果として、水中作業を行うための水陸両用な親子ロボットシステムを提案、構築した。提案したロボットシステムは、親ロボットである新型水陸両用な球型ロボット、子ロボットである複数のマイクロロボットにより構成される。子ロボットは親ロボットの下半球に搭載され、親ロボットのマニピュレータとして水中作業を可能にした。開発した水陸両用な球型親ロボットは、四足歩行モードとローラースケートモード及びウォータージェット推進モードという三つの駆動モードがあり、様々な作業環境に適応できる。また、多様な水中環境に対して、マニピュレータとする有線と無線の二種類のマイクロ子ロボットを開発した。さらに親ロボットから子ロボットを放出・回収するメカニズムを提案し、その装置を開発し、光通信を利用して、親ロボットと無線子ロボットとの通信方法も開発された。これらの成果は研究として、高く評価できると考えられる。

以下に本論文の成果を要約する。

1. 水中作業を行うために、新型水陸両用親子ロボットシステムを提案し、試作した。子ロボットは親ロボットに搭載されて、親ロボットのマニピュレータとして、水中で微細な回収作業を可能にした。また、親ロボットから子ロボットを放出する装置も開発し、提案した青い LED で追跡するメカニズムを利用し、子ロボットの回収機能を実現した。
2. 三つの駆動モードを持つ水陸両用な球型親ロボットを設計し、開発した。開発したロボットは四足歩行モード、ローラースケートモードとウォータージェット推進モードとの三つの駆動モードがあり、陸上では歩行運動と滑り運動を実現し、水中では前進、後退、回転、浮上、沈下などの複合動作を実現できた。
3. ウォータージェット駆動システムと、足及び車輪とのハイブリッド駆動システムを構築した。また、球型親ロボットの陸上と水中での運動学と動力学を解析し、運動メカニズムを解析し、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。ロボットの設計指針と理論計算の方法を確立した。
4. 親ロボットの陸上での性能を向上するために、八つの近接センサと一つのジャイロスコープ・センサーを親ロボットに搭載して、障害物の回避および歩行運動の方向制御方法を確立した。
5. 親子ロボットシステムのマニピュレータとする有線のマイクロ子ロボットを設計し、試作した。青色 LED 追跡システムの性能評価を行った。さらに、有線子ロボットを放

出する実験および回収する実験により、その有効性を実証した。

6. 親子ロボットシステムのマニピュレータとする無線のマイクロ子ロボットを設計し、試作した。また、青色 LED に基づく水中光通信システムを構築し、親ロボットと無線子ロボットとの通信方法を確立し、子ロボットの遠距離操作ができる水陸両用な親子ロボットシステムの有効性と応用の可能性を実証した。

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. 複雑な水中環境で微細作業をするための水陸両用な親子ロボットシステムを開発した。水陸両用な球型親ロボットに、いくつかのマイクロ子ロボットを搭載し、親子ロボットシステムのマニピュレータとして小さい物の操作を可能にした。
2. 水中ロボットとして、開発した親ロボットは陸上でも運動が可能であり、作業する前に水中に運ぶ必要がない。親ロボットは四足歩行駆動とローラースケートモードで陸上から水中に移動することが可能になった。
3. 生物からアイデアを得て、生体機構を模倣したハイブリッド駆動システムを開発し、水中マイクロロボットの歩行形態、浮上形態、ハンドリング形態を構成し、これらを利用したバイオ・インスパイアードロボットの設計指針を提示、学術研究領域への応用を可能にした。
4. 水中親子ロボットシステムを提案し、球型親ロボットの水中長距離作業とマイクロ子ロボットの微小スペースでの精密作業を組み合わせ、さらに親ロボットはキャリアとして複数のマイクロ子ロボットを輸送することにより、広域的な水中環境の調査と局所的な水中生物の監視などの作業を可能にした。

以上により、本論文はその新規性、発展性を高く評価できる。本審査委員会は申請者が香川大学大学院の博士（工学）の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 **3 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] **Maoxun Li**, Shuxiang Guo, Hideyuki Hirata, Hidenori Ishihara, "A Roller-skating/Walking Mode-based Amphibious Robot", Robotics and Computer Integrated Manufacturing, doi:10.1016/j.rcim.2016.06.005, Vol. 44, pp. 17-29, 2017. SCI, Impact Factor (IF): 2.077.
- [2] **Maoxun Li**, Shuxiang Guo, Jin Guo, Hideyuki Hirata, Hidenori Ishihara, "Development of a Biomimetic Underwater Microrobot for a Father-son Robot System", Microsystem Technologies, DOI 10.1007/s00542-016-2817-3, 2016. SCI, Impact Factor (IF): 0.952.

- [3] **Maoxun Li**, Shuxiang Guo, Hideyuki Hirata, Hidenori Ishihara, "Design and Performance Evaluation of an Amphibious Spherical Robot", Robotics and Autonomous Systems, doi:10.1016/j.robot.2014.11.007, Vol. 64, pp. 21–34, 2015. SCI, Impact Factor (IF): 1.256.
- [4] **Maoxun Li**, Shuxiang Guo, Kazuhiro Yamashita, "Insect-inspired Biomimetic Underwater Microrobots for a Father-son Robot System", Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.964-969, August 2-5, 2015. (EI)
- [5] **Maoxun Li**, Shuxiang Guo, Chunfeng Yue, "A Roller Skating Mode-based Amphibious Spherical Robot", Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1957-1961, August 3-6, 2014. (EI)
- [6] **Maoxun Li**, Shuxiang Guo, "A Wireless Biomimetic Underwater Microrobot for a Father-son Robot System", Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 392-397, 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、水陸両用球型親ロボットの設計、駆動システム、クローズループ制御、陸上と水中での性能評価の基礎研究成果、マニピュレータとする二種類のマイクロ子ロボットの設計と動作評価およびマニピュレータの放出・回収システム、無線の通信方法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、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。

- 開発した親ロボットは従来の水中ロボットと比べて、どのようなメリットがあるか。最適化したところはどこか。

(回答)水中での微細な作業を行うために、水陸両用な親子ロボットシステムを開発した。親ロボットとする水陸両用な球型ロボットを設計し、開発した。従来の水中ロボットと比べ、設計したロボットはコンパクトな構造を持ち、陸上と水中での三つの駆動モードがあり、陸上から水中に移動することができる。ハイブリッド駆動システムの構築により、二自由度の駆動ユニットを持つ水陸両用の親ロボットは陸上での滑り動作と歩行動作を実現した。サーボモーターの使用数を最低限にして、水中モードと歩行モードとローラースケー

トモードを実現した。

- 提案した青色LEDに基づく光通信システムの最大通信距離は120センチであり、それはこのロボットシステムに対しては十分か。

(回答)マイクロ子ロボットはロボットシステムのマニピュレータとして開発されて、親ロボットの周りのものの回収を目的とする。親ロボットの最大の直径は25センチである。だから、120センチの最大通信距離はロボットシステムに対しては十分である。

- 実現した親ロボットの陸上での移動方向制御は水中でもできるか。

(回答)親ロボットにジャイロスコープ・センサーを搭載し、ロボットの陸上での移動方向を制御する。ジャイロスコープ・センサーにより、ロボットが左右に揺れる角度を計算して、回転動作で元の方向に戻って、歩き続ける。そのため、水中でもこの制御システムは使える。

本審査委員会においては、学位論文の内容、研究方法について審査、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。