

氏名(本籍)	岳春峰(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106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27年3月24日
学位論文題目	Study on a Novel Water-jet-based Father-son Spherical Underwater 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 research

#### 1.1 Background

Underwater vehicles can move underwater freely with vision devices and sensory system, and have abilities to complete various underwater tasks. They play an important part in the ocean explorations. They can work automatically with many various sensory devices and effective control strategies. They can avoid obstacle without interference of people. Some of them can detect the environment they work in and adapt it automatically. Self-detect system can notice the status of all the devices in the underwater vehicles and handle all the emergencies. The shape of traditional underwater vehicles are streamline, and their propel devices are screw thrusters which are fixed outside the vehicle body. Most of them are large in size and high power consumption. They are relatively not so flexible in motion especially in a complex underwater environment. For a manipulation task, a complex and big manipulator is always installed on the underwater vehicle. It is expensive and high waterproof requirement. Therefore, the study on a different type of underwater vehicle with a bio-inspired manipulator, which can overcome these disadvantages, is necessary.

Ionic polymer metal composite (IPMC) is a smart material made of an ionic polymer membrane chemically plated with gold electrodes on both sides. This material is small in size design requirement. The deformation and response time are also controllable. Besides, it also can work in water. Therefore, it is very suitable for making soft underwater robotic actuators. 3D printing technology has been used in manufacturing industry successfully. It is very useful for a complex product. Combined these two

technologies, a small, light, complex construction bio-inspired robot can be designed and developed successfully.

## ***1.2 Research approach***

Due to the good water-pressure resistance and outstanding shock resistance of spherical objects, spherical robots can perform a rotational motion with a 0 degree turn radius. Our robot adopted a spherical shape. We designed and developed vectored water-jet thrusters to implement 4-degrees-of-freedom (4-DOF) underwater motion while saving energy. We also want to design a micro-son-robot as a manipulator which is small size, low cost and no need waterproof. Besides, the son robot must have ability to grasp an irregular shape object. Based on the father-son robotic system, we can realize underwater manipulation tasks. My Ph. D thesis is structured as the following:

- ◇ Design the spherical underwater robot as father robot which can deliver and recover the son robot;
- ◇ Dynamic analysis for the father robot to enhance the stiffness;
- ◇ Hydrodynamic analysis for the father robot and the thruster;
- ◇ Design a bio-inspired micro-robot as a manipulator which is driven by 8 ICPF actuators;
- ◇ Carry out underwater experiments to evaluate the performance of the underwater robotic system.

## **2. Research results**

### ***2.1 Design of a spherical underwater robot with son robot launching system***

The spherical underwater robot was designed and developed as a father robot. The diameter of the robot is 400mm. The weight is about 6.5kg. The robot is driven by 3 vectored water-jet thrusters. The propulsion system is assembled inside the spherical hull to reduce its effects on the robot's flexibility and to limit damage from possible impacts. A launching system was also designed for docking the son robot. The launching system is fixed on the bottom of the father robot. The electrical system and control algorithm were designed and realized by a DSP processor. The launching system can deliver the son robot when the robot is carrying out a manipulation task and also can take back the son robot when the son robot finish the task.

### ***2.2 Hydrodynamic analysis for the spherical underwater robot***

Hydrodynamic characteristics are very important to investigate the interaction between the robot and flow field. The statical analysis was carried out to improve the stiffness of the propulsion system. We also did the

hydrodynamic analysis for the whole robot and the water-jet thrusters. The 3D model of father robot and flow field was established by CATIA. ANSYS ICEM was used to mesh the 3D model. Finally, ANSYS FLUENT was employed to finish the hydrodynamic analysis. Based on the analysis results, we have gotten the real static when the robot moved in water and the interaction between the robot and the flow field.

### ***2.3 Design of a son robot***

According to the underwater manipulation requirements, the son robot was designed and developed which was driven by 8 IPMC actuators. The robot frame was printed by 3D printer. The actuators were installed on the frame. The size of the robot is about  $25 \times \varphi 55$ mm. Based on the 8 IPMC actuators, the robot can realize swimming and grasping motion. The size of the target object is limited by the size of the son robot. In this research, the typical target object is about  $20 \times 20 \times 30$ mm. The maximum size of manipulation target is about  $30 \times 30 \times 20$ mm (The maximum space between the actuators). We used 8 IPMC actuators to form a hand and a proximity sensor to detect the distance between the target and the son robot.

### ***2.4 Underwater manipulation experiments for characteristics evaluation***

To test the performance of the son robot and evaluate the father-son underwater robotic system, three underwater manipulation experiments were carried out. First, we designed 3 target objects by 3D printer. One cuboid ( $25 \times 25 \times 20$ mm), one cylinder ( $20 \times \varphi 25$ mm) and one sphere ( $\varphi 20$ mm). A proximity sensor was used to detect the target objects. We used the launching system to deliver the son robot when the target is detected. Finally, the son robot grasped the target objects successfully and went back to the launching system. In these target objects, the cylinder object is the most difficult task for the son robot.

## **3. Conclusions and future work**

In order to realize underwater manipulation tasks, we developed a father-son robot system. The father robot adopted spherical shape and vectored water-jet thrusters as propulsion system. To enhance the stiffness and verify the performance, hydrodynamic analysis and statical analysis were carried out. Hydrodynamic characteristics are benefit for investigating the interaction between the robot and flow field. To realize underwater manipulation task, a bio-inspired son robot was designed and developed, 8

IPMC actuators arranged on an ABS frame to form a hand. The son robot can detect the target and adjust the distance between the son robot and target by proximity sensor. We also carried out a series of underwater experiments to evaluate the performance of the launching system and son robot. Finally, the son robot finished the tasks successfully.

In the future, we will combine the son robot 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「ウォータージェット推進器を用いた親子球形水中ロボットシステムに関する研究」(**Study on a Novel Water-Jet-based Father-son Spherical Underwater Robotic System**)について、本審査委員会にて審査を行った。その結果、本論文は球形水中ロボット SUR-II を親ロボットとし、IPMC アクチュエータを用いたマイクロバイオミメティックロボットを子ロボットとする親子ロボットシステムを提案、構築した。そして、親子球形水中ロボットシステムの動力学モデリングと基本動作制御手法を提案し、運動精度を向上させた。また、IPMC アクチュエータの作成と特性評価などの基礎研究に基づいて、数々の生体機構を解析し、さらに生体機構を模倣した新型水中マイクロロボットの機構を提案、それによる歩行動作、回転動作、浮上動作、遊泳動作、ハンドリング動作を実現した。それらに加えて、さらに球形ロボットの基本運動機能、子ロボットが異なる形状や重量のサンプルを採集する機能らが実験により検証され、親子ロボットシステムの制御手法も開発された。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. 本研究室で開発された球形水中ロボットSURをもとにして、親ロボットとして球形水中ロボットSUR-IIを提案し、試作した。SUR-IIの性能を向上させるために、ウォータージェットのベクトル化や推進機構を再構築した。親ロボットは、子ロボットのキャビンとして、子ロボットの発射機能を可能にした。さらに、マルチウォータージェット推進器と球形構造の両方の特徴を組み合わせた最終構造を決定した。
2. 流体の抵抗影響は親子ロボットの制御にとって非常に重要である。球形水中ロボットを運動学、動力学的に解析し、ロボットの流体動力学モデルを確立した。それとシェルの穴はロボットへの影響を解析した。まずは、モデルのパラメータを認識するモデリング実験をおこなうため、新しい3次元空間で推進特性が判定できる実験方法を提案し、モデルパラメータ認識実験を行った。それを応用し、ロボットとウォータージェット推進器の流体動力学モデルを確立した。
3. ここでは、水中ロボットを試作し、水中走行の制御方法の構築を以下のように実施し

た。まず、球形水中ロボットの基本動作を水平、垂直と回転の三種類にわけて、基本動作を実現するための動作制御方法を開発した。親子ロボットを制御するために、SUR-IIの制御システムについて改良を行った。ジャイロセンサーの代わりにMEMSIMUを使用した。このMEMSIMUに得られるデータによって3つの方向 (Yaw, Pitch, Roll) の角度を計算することができ、速度と位置制御の最適化を実現した。それに基づいて実際に水中実験を行った。速度と位置制御の実験結果とシミュレーション結果との比較をおこない、良好な類似性を確認した。

4. また、球形水中ロボットの設計指針、および2階層型の制御ハードウェア・ソフトウェア構造を確立した。モジュール化により、多用途球形水中ロボットの設計・開発、機能増設などを可能にした。
5. 水中で異なる形状、サイズのオブジェクトを回収するために、タコのような子ロボットを提案した。子ロボットの開発では、技術の構築は以下のように実施した。まず、バイオメテック動作の設計とマイクロロボット・プロトタイプ製作からはじまり、微小なスペースでの複雑な動作、フレキシブルロコモーション、精密な位置制御を実現するため歩行・浮上・遊泳・ハンドリングなどの機能を持つハイブリッドマイクロロボットの提案と試作を行った。そして、近接センサーを利用して、目標物のハンドリング、障害物の検出と回避などのタスクを実現した。
6. 水中遊泳実験を行い、先行研究の球型ロボットSURと比べ、SUR-IIの運動精度が向上させたことを実証した。そして子ロボットがタコの動作を模倣し、水中での運動機能やサンプルの採集機能を実現できた。実験により、親子ロボットの協調作業の動作を実現し、そ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. 本研究では、マルチウオータージェット推進器を持ち、柔軟な運動ができる小型化が可能な球形水中ロボットを開発し、特性評価モデルを提案した。球形水中ロボットの設計指針、水平、垂直、回転運動のための推進器最適制御方法と、2階層型の制御ハードウェア・ソフトウェア構造を確立した。モジュール化により、多用途球形水中ロボットの設計・開発、機能増設などを可能にした。
2. ベクター化ウオータージェット推進システムを開発し、流体動力学評価モデルを提案した。3次元的に流体モデルのパラメータを検討できるモデリング方法を提案し、新しい認識実験システムを設計、水平、垂直、回転運動制御時の、個々の推進システムの制御信号に対する出力の関数モデルを確立した。
3. 生物からアイデアを得て、生体機構を模倣した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、これを利用したバイオ・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、親球型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ヤ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**6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] **Chunfeng Yue**, Shuxiang Guo, Liwei Shi, “Hydrodynamic Analysis of a Spherical Underwater Robot: SUR-II,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.10, DOI: 10.5772/56524, 2013.
- [2] **Chunfeng Yue**, Shuxiang Guo, Maoxun Li, Yaxin Li, Hideyuki Hirata, Hidenori Ishihara, “Mechantronic System and Experiments of a Spherical Underwater Robot: SUR-II”, *Journal of Intelligent and robotic systems*, DOI: 10.1007/s10846-015-0177-3, 2015.
- [3] **Chunfeng Yue**, Shuxiang Guo, Design and Performance Evaluation of a Biomimetic Microrobot for the Father-son Underwater Intervention Robotic System, *Microsystem Technologies*, DOI: 10.1007/s00542-015-2457-z, 2015.
- [4] **Chunfeng Yue**, Shuxiang Guo, Maoxun Li, Yaxin Li, “Passive and Active Attitude Stabilization Method for the Spherical Underwater Robot (SUR-II)” *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.1019-1023, 2013.

## 最終試験結果の要旨

平成 27 年 2 月 12 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、新型親子球形水中ロボットシステムの設計手法、特性評価の基礎研究成果、上昇、下降及び回転できる親子球形水中ロボットシステムの推進器システムについて、その開発経緯、設計概念と理論モデル、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。

- 球形水中ロボットの球形水中親子ロボットシステムの新規性とは何か  
(回答)今まで世界中で開発された水中ロボットは主に高速巡航することを目指している。

本研究では、開発した球形水中ロボットは、柔軟な動作ができるロボットである。また、提案・開発したマルチウォータージェット推進システムは、その構成が他の研究と比べても新しい、ユニークな設計である。さらに、柔軟な子ロボットを搭載させて、水中での操作作業ができて、応用が期待されている。

- 複雑な動作を実現するための方法は何か

(回答) 本研究の制御機能は基本動作を実現するものになっている。まず基本動作の制御と安定性が重要であり、上昇、下降及び回転の基本動作を完成した上で、それらを組み合わせることにより、複雑な動作を実現できる。

- 親子ロボットを制御するために使用しているコンピュータの実時間OSは何か

(回答) 本研究では、uCOS II という組み込み型実時間 OS が使用されている。

- 開発した水中子ロボットの基本動作の中で一番優れた運動は何か

(回答) 今まで実現された基本動作の中では、浮上と下降動作が一番優れた運動だと考えられる。また、オブジェクトを検知でき、掴む運動安定性が確保できるようになった。

- マルチロボット制御に使う方法は何か

(回答) 実験する場所であるプールによって、運動地図を構築し、複数台のロボットがプール地図の縦横軸にそった位置・速度制御方法を実現した。

- 本研究の応用について具体的な例を紹介してください

(回答) 例えば、安全点検のため水中パイプの中で移動するとき、管内の曲がるころでは、本研究で開発した球形水中ロボットは、普通的水中ロボットより、柔軟な動作ができるため、曲がるころを通過し安い。さらに狭い所にて、子ロボットを放出し、サンプルなどを獲得し、回収できるようになった。

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。