

**2017 年度 永守財団 研究助成 研究報告書**

所属機関名 (大学、大学院、研究所名)	神戸大学大学院
職位または役職	准教授
氏名	元井 直樹

**1. 研究題目**

モータ駆動型水中マニピュレータにおける力覚伝達のための高精度運動制御

**2. 研究目的**

近年、我が国は大規模なプラント事故を経験し、電気エネルギー生成に対して大きな疑問が投げかけられている。一方で、我が国におけるエネルギー資源の自給率はわずか4%である。これらのエネルギー資源は少数国に生産が偏っており、我が国への供給構造は極めて脆弱と言える。この脆弱性の打開策の一つとして海底資源が挙げられる。我が国の排他的経済水域は世界6位であり、メタンハイドレート等の豊富なエネルギー資源の存在が確認されており、その有効的な活用が望まれている。一方で、海洋資源の活用においては海洋ケーブル等の海洋設備の敷設・埋設や保守点検も必須となる。

このような海洋資源探索や海洋設備の敷設・埋設や保守点検において Remotely Operated Vehicle(ROV)の研究が行われている。ROVとは遠隔操作型の無人潜水機であり、カメラ等の視覚センサを ROV に設置し、これらの視覚情報をもとに操作者が遠隔操作を行うことで所望動作を実現する。しかし、ROV の遠隔操作においては視覚情報のみを用いているため、操作性が著しく悪く、操作に熟練を要する。そのため、視覚情報のみならず力覚情報等の複合的な感覚情報を用いた直接的な環境への遠隔操作を実現する制御手法の確立が必要である。

申請者はこれまでに力覚伝送を可能とする遠隔操作技術であるバイラテラル制御の研究を行っている。本研究課題では、本バイラテラル技術を水中マニピュレータへ発展応用し、水中でのバイラテラル制御技術の実現を目指す。そのために、防水性を有する水中マニピュレータの設計試作を行う。本設計試作においては、防水性獲得のためのマグネットカップリングを用い、多自由度化のためにモジュール構造型の設計を行う。また、本試作システムを用いた水中バイラテラル制御技術を実現し、その有効性の検証を行う。

3. 研究内容及び成果

水中マニピュレータの試作開発では、磁気カップリングを用いることで防水性を獲得する。磁気カップリングの選定においては、最大伝達可能トルクを考慮し、従来研究のディスクタイプと異なるイン・アウトタイプを選定した。また、多自由度化を考慮し、駆動側のモータ・エンコーダから磁気カップリングを通じて負荷側までを単体モジュールとする構造を採用した。図1に設計したモジュール構造を有する水中マニピュレータを示す。本単体モジュールを複数組み合わせることにより、多自由度マニピュレータを構築することが可能となる。また、所望の自由度配置に関しては、かさ歯車の出力方向を変更するのみで対応可能であり、汎用性の向上へとつながる。図2に本モジュール構造を用いた多自由度システムの概念図を示す。

試作設計した本モジュールを用いて水中バイラテラル制御技術の実証を行った。図3に水中バイラテラル実験の様子を示す。2台のモジュールをそれぞれマスタ・スレーブシステムとして用いる。また、マスタシステムは大気中に、スレーブシステムは水中に設置する。また、これまでの多くの研究が行われているバイラテラル制御理論と同様に、水中バイラテラル制御理論においてもセンサレスでの外力推定が望まれる。そこで、事前にシステム全体の摩擦力および定速動作における流体力を測定し、外力推定に用いる。図4に水中バイラテラル制御における実験結果を示す。図4に示すようにマスタ・スレーブシステム間において位置の一致、および作用反作用の法則の人工実現が行われている。換言すると、力覚情報を伝達するための位置・力の制御目標の同時実現が実証され、遠隔操作による水中での力覚伝送を確認した。

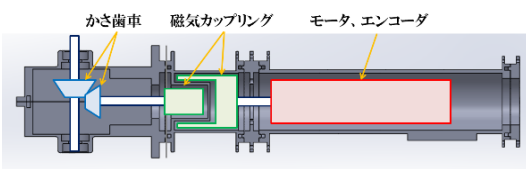
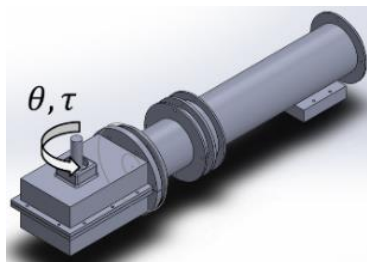


図1 単体モジュール構造

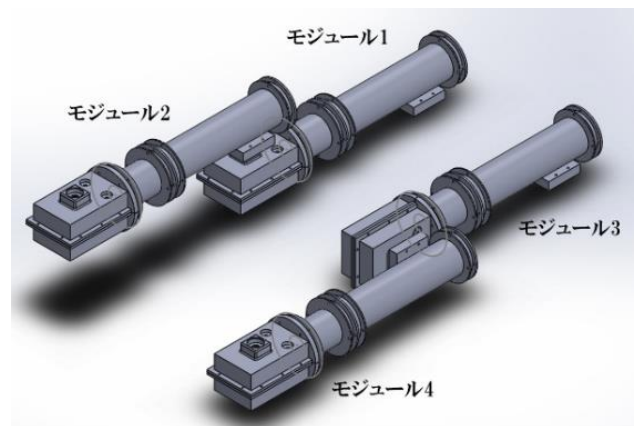


図2 多自由度水中マニピュレータ

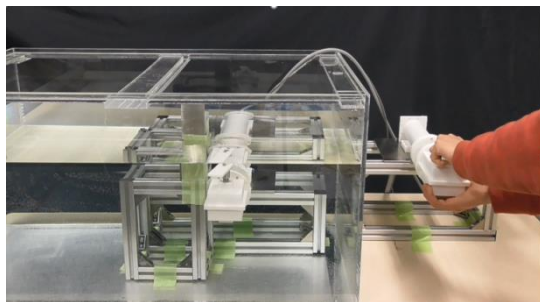
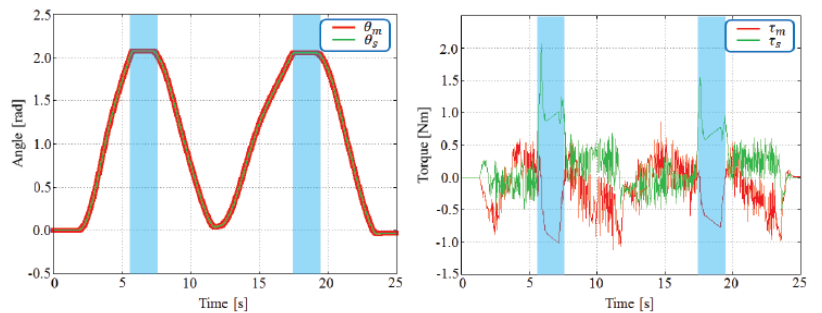


図3 水中バイラテラル実験システム



(a) Position response

(b) Torque response

図4 水中バイラテラル実験結果

#### 4. 今後の研究の見通し

---

今後の研究の見通しとしてハードウェア、制御理論、操作性の観点より述べる。まず、ハードウェアにおいては、本研究では防水性のみを考慮している。しかしながら、3Dプリンタでは試作精度に問題があり、一部浸水等が見受けられた。また、実運用を考えるとシステムの防水のみならず防圧も考慮する必要がある。以上より、防水・防圧を考慮したシステム材料等の検討が必要である。次に、制御理論において考える。本研究課題では、水槽という静的な環境で実験を行った。一方、深海等は流速等が時々刻々と変化する動的な環境である。そのため、動的に変化する外乱下における高精度な力推定手法の確立が望まれる。最後に、操作性の観点においては、図3に示した実験においては、マスタ・スレーブシステムともに同構造の試作機を用いた。しかし、マスタシステムにおいては操作者の操作性を考慮したインターフェースを設計すべきである。また、実際の遠隔操作では力覚情報のみならず、視覚情報の伝送も重要となる。これらの観点より、人間工学に基づくマスタシステムの開発および視覚・力覚情報の融合制御理論の構築が、操作性の改善に直結する。

#### 5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

---

- 【1】 瀧澤 健太, 元井 直樹, "モジュール構造を有する水中マニピュレータの開発", 電気学会産業計測制御研究会, IIC-17-009, pp. 1-4, 2017.
- 【2】 瀧澤 健太, 元井 直樹, "モジュール構造を有するマニピュレータを用いた水中バイラテラル制御実験", 電気学会全国大会, 4-171, 2018.
- 【3】 N. Motoi, K. Takizawa, and J. Sakiyama, "Development of Underwater Bilateral Control by Using Manipulator with Module Structure," Proceedings of IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, pp. 122-127, 2018.