

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	神戸大学
職 位 または 役 職	准教授
氏 名	元井 直樹

1. 研究題目

遠隔操作型無人探査機における力覚伝送を伴う遠隔制御技術の開発

2. 研究目的

我が国におけるエネルギー資源の自給率はわずか4%であり、かつこれらのエネルギー資源は少数国に生産が偏っているため、その供給構造は脆弱と言える。この脆弱性の打開策の一つとして、排他的経済水域に存在が確認されているメタンハイドレート等の豊富なエネルギー資源の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・保守点検のために **Remotely Operated Vehicle(ROV)**の研究が行われている。ROVとは遠隔操作型無人潜水機であり、カメラ等の視覚センサを設置し、これらの視覚情報をもとに操作者が ROV の遠隔操作を行う。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。

申請者はこれまでの研究において、力覚伝送を可能とする遠隔制御技術であるバイラテラル制御についての研究を行っている。また、上記研究成果を水中マニピュレータへ発展応用し、水中マニピュレータ単体による水中バイラテラル制御技術の研究を行っている。これらの水中マニピュレータ動作は ROV における腕動作の遠隔制御を想定している。一方で、海洋資源の活用や海洋ケーブル等の海洋設備の敷設・埋設、保守点検等の実現のためには、水中マニピュレータ単体の動作のみならず ROV としての移動制御や、移動と腕動作の協調制御の構築が必要となる。特に、水中の浮遊状態での ROV の腕動作は接触環境からの反作用力により、ROV の位置が大きく変化し、腕動作のタスク精度に大きく影響を与える。そこで本研究においては、1)腕動作としての水中バイラテラル制御、2)ROV の移動制御、3)腕動作と移動の協調制御を逐次行う。本研究の遂行により、ROV を用いた水中タスク実現の高効率化につながる。

3. 研究内容及び成果

本研究では水中ロボットの遠隔操作における操作性の向上による ROV を用いた水中タスク実現の効率化を目指した。そのために、水中マニピュレータ単体の動作のみならず ROV としての移動制御や、移動と腕動作の協調制御の構築を行う。

まず、腕動作としての水中マニピュレータの制御の効率化のためにバイラテラル制御の高精度化を行った。本研究における水中マニピュレータでは防水性の確保のためにマグネットカップリングを用い、モータ部を防水エリアに設置し、マグネットカップリングによる磁気力によってモータトルクを負荷側へ伝達する。このマグネットカップリングの特性により、制御性能の劣化が生じていた。そこで図 1 に示す水中マニピュレータの単体モジュールとしてのテストベンチを作成し、周波数応答や負荷試験時における滑り等を同定した。また、同定データをもとに水中バイラテラル制御技術の高精度化を試み、図 2 に示す実験システムにおいて水中バイラテラル制御の実証を行った。

次に ROV を用いた水中タスクの実現のためには、腕動作である水中マニピュレータの制御のみではなく、水中における操作対象物への接近のためにタスク実施場所への ROV の移動制御が必要不可欠である。ROV における移動制御技術の開発・研究の効率化のために図 3 に示す ROV シミュレータを構築し、海流等が生じる環境下での移動制御の評価を行った。ROV においては、加速度センサの積算や LBL (Long Base Line) 法を用いた自己位置推定法が一般的である。しかしながら、その自己位置推定精度は極めて低く、多くの観測誤差を含有した情報となる。そこでカルマンフィルタおよびパーティクルフィルタを用いた自己位置推定法についての検討を行った。一方で、運動制御器として観測誤差を考慮したスライディングモード制御を開発し、図 4 に示す実機 OpenROV を用いて精度検証を行った。

最後に実際の水中タスクを浮遊状態で実施する際には、接触環境からの反作用力を ROV が受けるため、定点保持が必要不可欠となる。そこで水中タスクの実施を想定し、腕制御と移動制御の協調を考慮した定点保持制御についての検討を行った。水中タスクを実施する際には、接触環境に対する相対的な距離の保持が必要となる。そのため ROV に設置されているカメラ情報もとにビジュアルサーボ技術を用いることで水中タスクにおける定点保持制御について検討を行った。

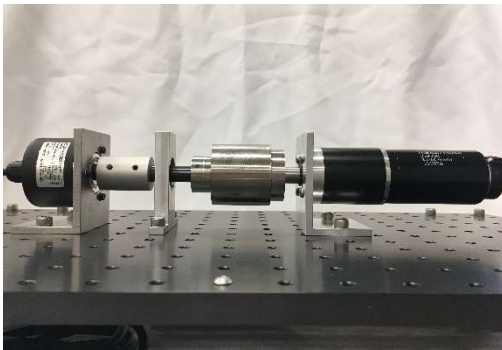


図 1 単体モジュールのテストベンチ

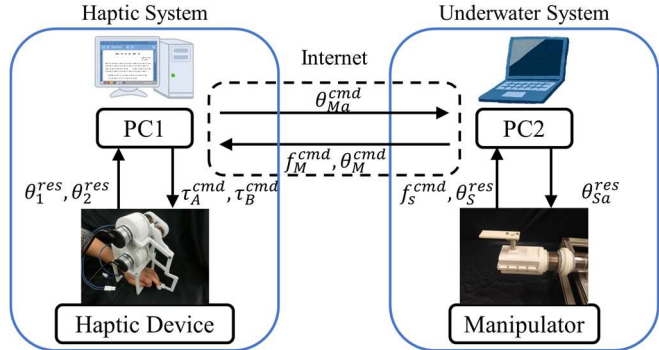


図 2 水中バイラテラル制御のシステム概要

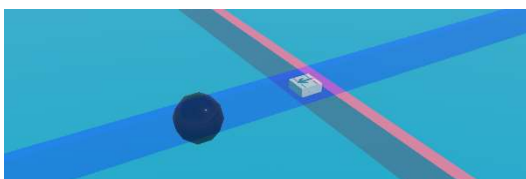
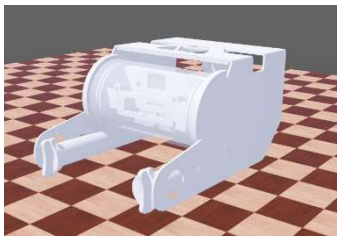


図 3 ROV シミュレータ



図 4 OpenROV による実験

4. 今後の研究の見通し

今後の研究の見通しとして、ROV による水中タスクの高度化・高効率化および実用化という観点から述べる。まず、水中タスク実現のための水中マニピュレータの遠隔制御では、そのハードウェア構成が運動性能に大きく影響を与える。特に本研究で用いているマグネットカップリングは、負荷時に滑りが生じるなど運動性能の高精度化において大きな足かせとなる。そのため、本研究では負荷側の状態量を推定し補償を試みているが、推定ではなく負荷側を実際に観測することでより高精度な運動制御が可能となる。例えばカメラ等で水中マニピュレータのエンドエフェクタ部を観測しその情報を用いるなど、内界センサの情報のみならず、外界センサの情報を用いることが更なる精度向上につながる。一方で、水中タスクの具体化によりアクチュエータ等の仕様を明確にし、マグネットカップリングを用いない防水型のアクチュエータによる水中マニピュレータの構成の検討も、その運動制御の簡略化による利点の観点から考慮すべきである。

ROV の移動制御に関しては、図4に示す OpenROV の構成を基準として研究・開発を行った。しかしながら、OpenROV は簡易的な ROV システムであり、確立した技術の有効性を検証するための基礎検証システムである。そのため、本研究の実用化の際には ROV の構成やスラスト数、搭載センサ等の状況が異なる。そこで実運用を考慮した ROV の詳細な仕様を確定し、適切な構成による高精度な位置制御手法に関して検討を行う必要がある。

最後に、水中マニピュレータの腕動作と ROV の移動制御における協調制御に関しては、マスタシステムとしての操作システムと、スレーブシステムとしての ROV の移動動作と水中マニピュレータ動作においては、自由度・構造が異なるため、操作性の向上のために異自由度・異構造型の遠隔制御技術の構築が重要となる。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読有)

1. 中村 昇暉, 元井 直樹, “パウダブレーキと定トルクばねを用いた外骨格型ハプティックデバイスの開発,” 電気学会産業応用部門誌, Vol. 140, No. 9, pp. 651-661, 2020.

国際会議論文(査読有)

2. N. Motoi, and S. Nakamura, “Remote Control Method with Tactile Sensation for Underwater Robot with Magnetic Coupling,” *Proceedings of IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 349-354, 2020.

国内会議(査読無)

3. 平山 大悟, 吉村 郁人, 元井 直樹, “水中ロボットによる外乱推定を付加したスライディングモード制御による定点保持制御手法の研究”, マリンエンジニアリング学術講演会, 304, 2020.
4. 吉村 郁人, 平山 大悟, 元井 直樹, “観測ノイズを考慮した外乱オブザーバに基づく水中ロボットの定点保持制御に関する研究”, マリンエンジニアリング学術講演会, 305, 2020.