

[研究助成 (A)]

鋼管柱目視検査の省力化に向けた水中ロボットの制御および
自己位置推定手法の構築Control and Self-localization methods of an Underwater Vehicle for Support of
Visual Inspections of Steel Pipes

2231009



研究代表者

奈良先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科 情報科学領域

助 教

織 田 泰 彰

[研究の目的]

遠隔操縦型水中ビークル：remotely operated underwater vehicles (ROVs) を水中構造物や船舶などの検査、特に目視検査の段階において導入される事例が増加している。ROV は、テザーケーブルを介した通信により、操縦者にリアルタイムで映像を転送し、操縦者はその映像を基に遠隔操縦を行う。従来はダイバーを雇用し、危険な作業となっていた水中での検査作業を、ROV に置き換えることで、省力化が期待できる。近年、市販の ROV が比較的低価格で一般的に入手できるようになり、操縦形態と運用面での利点から今後もこの傾向は続くと思える。

しかし、ROV を導入しても課題は残る。ROV の遠隔操縦は、訓練された操縦者にとってさえ難しく負担が大きいものとなっている。そのため、操縦者と目視検査者の2名体制で検査を行っている事例もある。ROV 遠隔操縦時の難しさとして、以下の2点が挙げられる。

- ・通信遅延の影響や水中での外乱の影響により、目標の制御精度を達成するのが難しい。
- ・ROV が揺れることで、操縦者に提示される映像も揺れることから（場合によっては操縦場所も揺れる）、操縦者が操縦酔いを引き起こす。

上述のような操縦者の負担を軽減する支援が実

現できれば、さらなる省力化が可能となる。

そこで、本研究では、ROV の自動化を主軸として、操縦・目視検査中の作業員への負荷の軽減を図る。その中で、以下の3点を本研究の目的に設定した。

- ・ロバスト制御理論に基づく水中ロボットの制御精度の実環境での実証
- ・人間の操縦負荷を軽減する協調制御手法の構築
- ・水中構造物周辺での局所的な自己位置推定手法の構築

本研究の遂行にあたり、市販の ROV の改造から始め、奈良先端科学技術大学院大学内の実験水槽や実践的環境での実験を通して、手法の有効性を評価した。

[研究の内容、成果]

1. ROV の構築

本研究で構築した ROV を図1に示す。本 ROV のベースは、市販の BlueROV2 heavy



図1 本研究で使用した ROV

(BlueRobotics Inc.) である。ROV は、数百メートル単位のテザーケーブルで、ROV 本体と陸上や船上の操縦用端末を接続し、遠隔地からリアルタイムで操縦を行う。特に小型・軽量の ROV は可搬性が高く、未知環境でもすぐに投入して利用できるため、運用面で大きな利点を持つ。

市販の ROV の多くは、航行および遠隔操縦のために Pixhawk, ArduSub, Audupilot などのフライトナビゲーションシステムがあらかじめ搭載されている。本研究では、より高い制御精度を追求するため、それらのナビゲーションシステムを Raspberry Pi, Arduino で置き換えた。これにより、8 基のスラスタに対して個々に PWM 制御を行い、細かく推力を調整することを可能とした。また、センサ系として、ROV の両側に 1 次元のソナーセンサを 2 基搭載した。さらに、前方に RGB カメラ、IMU と地磁気センサを搭載している。これらのセンサ系はすべて安価で搭載可能であり、ROV の運用面での利点を損なわせない。本研究では、陸上の操縦端末を含めたすべてのシステムを Robot operating system (ROS) を用いて統合した。

2. 制御手法

2.1. 自律制御手法

水中ロボットの制御に関する手法評価の多くは、シミュレータや数値解析によるものである。これらはモデル化困難な外乱の影響が考慮されておらず、実際の海でどれほどの精度を発揮するかは未知数である。さらに、実環境に導入されている水中ロボットの多くが単純な PID 制御を採用している。ゆえに、水中ロボット分野では、実環境での制御に関する知見が不足している。

本研究では、水中でのモデル化困難な外乱の中でも高い制御精度を達成するために、非線形制御理論である逆最適制御を実装した [成果 1]。逆最適制御は入力に関する不確定性に対し

てロバストであることが数学的に証明される。ROV は実際の速度角速度とスラスタ推力の間の関係は正確に測定することが困難である。さらに、ダイナミクスパラメータも改造や深度・環境によって変化する。そのため、逆最適制御のロバスト性はそれらの入力に関する不確定性に対して効果を発揮することが期待できる。

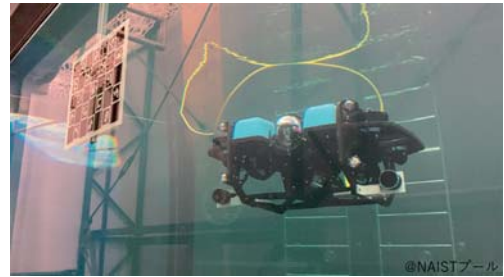


図2 実験水槽での定点保持制御（静水中）

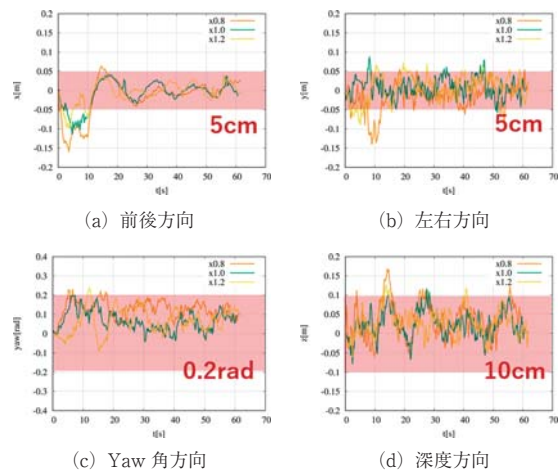


図3 定点保持での制御精度（静水中）

図2に示すように、実験水槽で定点保持制御を行い、その制御精度を評価した。定点保持では、図3に示すように、目標物の正面で位置誤差を 5 cm 程度以内、角度誤差を 10 度以内で制御できることを実証した。

さらに、図4に実践的環境（和歌山県広川町の湾港）での実験の様子を示す。ここでは、経路追従シナリオを用いて制御精度を評価した。防波堤からの距離と姿勢を人間が指示する。逆最適制御によりその距離と姿勢を維持しながら秒速 12 cm で図中右方向へ進む。制御精度に関する結果を図5に示す。実験水槽での定点保

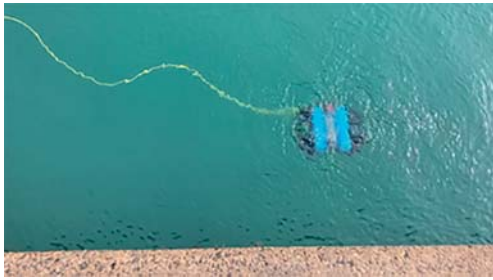


図4 実践的環境での経路追従制御

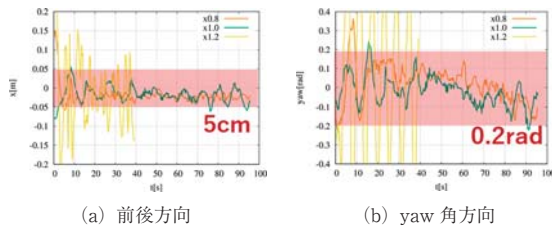


図5 経路追従での制御精度

持タスクと同様に、位置誤差を 5 cm 程度以内、角度誤差を 10 度以内で制御できることを実証した（実験実施日は快晴かつ海面は穏やか）。これは、人間の遠隔操縦では達成することが難しい精度である。

さらに、比較的穏やかな海の状況では、水流よりもテザーケーブルの張力が制御性能に大きな影響を与えることが判明した [成果 2]。

2.2. 協調制御手法

逆最適制御により高い制御精度を得られることを示したが、前節で述べた実験は、センサが常に制御に必要な情報を計測できる状況で行われた。しかし、

- ・センサの計測可能距離や視野角に制限があり、対象物を常にセンサの視野内に捉えることができるとは限らない。
- ・センサの視野内であっても、予測不可能な外乱によって常に対象物を正確に計測できるとは限らない。

という実際上の問題が存在する。センサが制御に必要な情報を正確に計測できない状況では、制御精度が低下、もしくはシステムが制御できない状況となるため、操縦者が操縦を引き継ぐ必要がある。

ここでの重要な課題は、操縦者がいつシステ

ムに制御を任せていいのか判断するのが困難な点である。システムに任せるべき時に人間が介入すれば、結果として制御精度を低下させる可能性もある。

この課題に対して、haptic shared control (HSC) を導入した。HSC とは、1つの操縦端末をシステム（制御）と人間が共有して制御を行う形態である。本研究では、センサの信頼度に応じて操縦端末である Joystick の硬さを変化させる手法を構築した [成果 3, 成果 4]。センサ情報が信頼できる（つまり、制御に必要な情報が正確に計算できる）場合には、Joystick を硬くして操縦者に介入させない。センサ情報が信頼できない場合は Joystick を柔らかくして操縦者に介入を促す。操縦者は、Joystick の硬さを介して操縦の主導権をどちらが握るべきか感じる事が可能である。図 6 に提案した HSC の概要を示す。

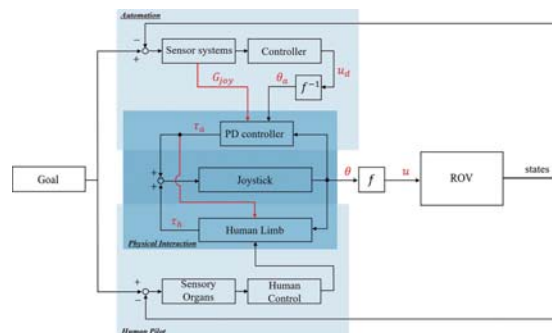
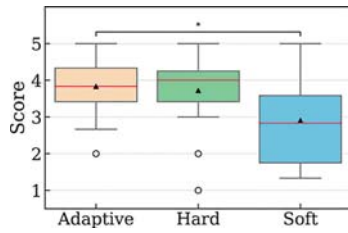
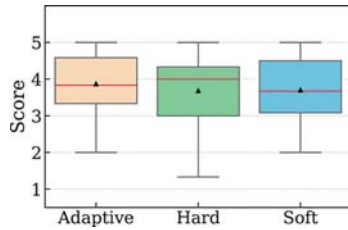


図6 HSC の概要

実験水槽において、外乱として水流を発生させ、その中で図 2 と同様の定点保持を行う操縦を 20 名の実験参加者が行った。その結果、提案手法により自動化機能に操縦を任せていいタイミングを操縦者が理解できることを確認した (図 7)。また、制御精度に関する一部指標にも改善が見られ、Joystick の硬さを変化させることによる負荷の増加は確認されなかった (図 8)。



(a) Q1 "Did you understand when maneuvering is unnecessary?".



(b) Q2 "Did you understand when you should assist with maneuvering?".

図7 操縦の主体に関するアンケート結果

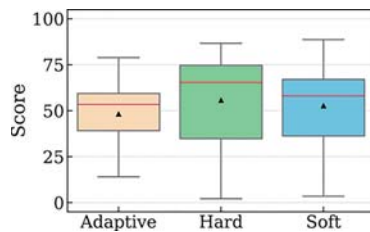


図8 NASA-TLX WWL スコアによる作業負荷

3. 自己位置推定手法とその応用

3.1. 鋼管柱周りでの自己位置推定手法

ランドマークや特徴点が少ない環境では、ROV から提示される映像はほとんど変化がないため、操縦者が ROV の移動量や方向に関する感覚を失いやすく、ROV の位置・姿勢を正確に把握できない。例えば、鋼管柱を周回するようなシナリオでは、図9のような映像が続き、一度検査した部分を重複して検査するなど、作



図9 ROV で撮影されたカメラ映像の例

業効率の低下を招く。さらに、過剰な周回はテザーケーブルが絡まるリスクを高める。作業効率向上とリスク回避のために、ROV の位置・姿勢に関する情報を操縦者に提示することは重要である。

一般的に、水中ビークルの位置・姿勢を推定するためには、あらかじめ環境にセンサ類の敷設する、ドップラ速度ログなどの高額なセンサを搭載するなどの手法が挙げられる。しかし、それらを用いても高精度に水中ビークルの位置・姿勢を推定することは難しく、大域的な自己位置推定手法は未だに確立されていない。

本研究では、人間とシステムが情報を互いに提供することで、水中構造物周辺において局所的に自己位置推定を可能とする手法を構築した[成果5]。本手法の目標精度は、操縦者による意思決定を支援できる程度の精度とする。図10を用いて手法の概要を説明する。人間が映像中から目視検査対象物を特定する(例:図9中のカーソル)。システムは ROV から見た対象物が存在する方位(図中 θ [rad])を推定する。さらに、システムが地磁気センサを用いて磁北からの偏角(図中 δ [rad])を計測する。これらの角度情報から、鋼管柱に固定された NE 座標系において ROV が存在する方位を推定する。

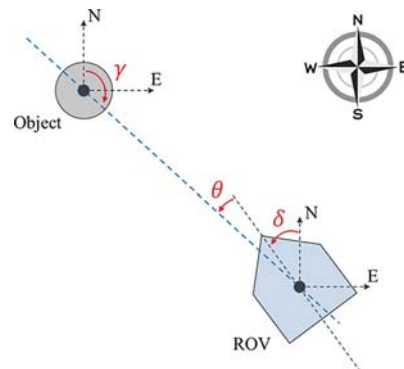


図10 人間とシステムによる局所的な自己位置推定

本手法の有効性を検証するために、和歌山県広川町の湾港で実験を行った。その結果、図11のように、水中構造物の周りで局所的に自

己位置を推定することを可能とした。未だに解像度は低いが、操縦者は検査を完了するためにどちらに ROV が進むべきか選択することが可能となる。さらに、本手法は操縦者を活用することで、高価なセンサ系を必要としない。

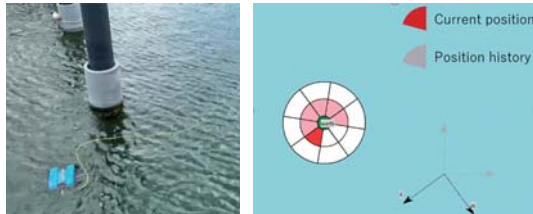


図 11 鋼管柱周りでの自己位置推定

3.2. テザーケーブルの絡まりを考慮した経路生成手法

水中インフラの検査に ROV を導入する場合、テザーケーブルの絡まりが問題となる。ROV 回収時には、テザーケーブルが絡まらないような経路を選択する必要がある。

本研究では A^* とホモトピークラス概念を組み合わせたグリッドベースの経路探索手法を構築した [成果 6]。本手法は、ホモトピー拡張グラフによって計算した値で各グリッドのコストを決定しており、そのコストをもとに経路を探索する。そのため、従来研究と比較して必要計算時間が短く、障害物間の経路の組み合わせ候補にも依存しない。数値シミュレーションの結果、図 12 のように複雑な形状にテザーケーブルが配置されていても（図 12 青線）、絡まらずに操縦者の元へ帰るための経路（図 12

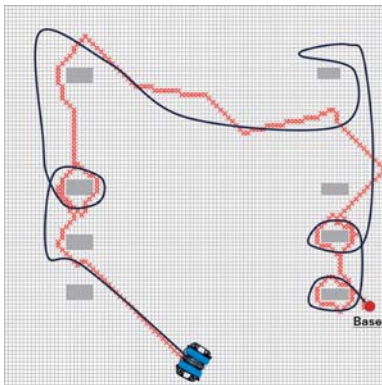


図 12 絡まりを考慮した経路探索の結果

赤線) を、十数秒程度の短時間で探索できることを確認した。

本手法は、テザーケーブルの形状（ホモトピークラス）を正確に追跡できることを前提としている。前節で述べた自己位置推定手法は、テザーケーブルのホモトピークラスの推定に役立つ可能性を持つ。

[今後の研究の方向性, 課題]

本研究では、水中構造物の目視検査に焦点を当てたが、物体把持・操作などの高度な作業への発展を考える必要がある。本研究で利用したソナーセンサは、0.5 m 以内のような近距離に存在する物体の検出には適していない。さらに近距離まで対象物体へ接近するため、より高解像度で自己位置推定を行うためには、近距離で距離を計測できるセンサ系が必要である。また、本研究で実装した制御則は水流の影響を考慮していないが、気象状況の変化などにより水流の影響は無視できなくなる可能性が高い。流速を推定するセンサ系や手法、水流下でも制御精度を維持できる制御則、それらの実環境での精度検証が、実践的な知見を拡充するために必要である。

[成果の発表, 論文など]

- [1] 織田泰彰, 藤江謙伸, 小國隼介, “逆最適制御の ROV への応用とロバスト性検証,” 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023), pp. 1900-1904, 2023.
- [2] Yasuaki Orita, “Impact of Positively Buoyant Tethers on Control of a Tethered Underwater Vehicle,” *In Proc. 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 1511-1517, 2024.
- [3] 藤江謙伸, 織田泰彰, 坂上憲光, 和田隆広, “センサ信頼度に応じて操作端のインピーダンスを調整する ROV の触力覚共有制御,” 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023), pp. 1885-1890, 2023.
- [4] Kenshin Fujie, Yasuaki Orita, Eito Sato, Norimitsu Sakagami and Takahiro Wada, “Haptic

- Shared Control by Adjusting the Stiffness of a Joystick Based on Sensor Systems Reliability for Underwater Vehicles,” IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2004 (under review).
- [5] 織田泰彰, 小國隼介, “ROV 操縦支援のための水中構造物周りでの自己位置推定,” 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023) pp.1895-1899, 2023.
- [6] 小國隼介, 織田泰彰, 和田隆広, “水中構造物検査におけるテザーケーブルが絡まらない経路の再生成,” 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023), pp.1867-1870, 2023.