

ROVテザー管理システムの基礎的検討 Research on ROV Tether Management Systems

○宇野 優作*, 小山 猛*, 三好 扶*
○Yusaku UNO*, Takeshi KOYAMA*, Tasuku MIYOSHI*

*岩手大学大学院
*Graduate School of Iwate University

キーワード : ROV, テザー管理 (Tether Management), 群ロボット (Swarm Robot)

連絡先 : 〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5 岩手大学理工学部機械知能航空コース三好・小山研究室
宇野 優作, Tel: 019-621-6357, E-mail: g0326028@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

ROV(Remotely Operated Vehicle)は、電力供給や通信のためにテザーケーブルによって陸上や船上の基地と接続されており、長時間の運用や深海環境における活動が可能となっている。しかし、テザーケーブルの絡まりやたるみの発生はROVの推進性能の低下や制御系の不安定化を招く要因となるため、テザーケーブルの管理はROV運用において重要な課題となっている⁽¹⁾。

また、潮流や風波の影響が大きい環境では、テザーケーブルが流体力を受けることでROVが進行方向とは異なる方向へ引っ張られ、推進力だけでは姿勢や位置を維持できなくなり、作業効率の低下するため、外乱環境下におけるテザーケーブル管理の重要性が高まっている。

特に、狭隘空間など構造物が密集した環境では、テザーケーブルが障害物に干渉して作業中断や機体の損傷に繋がり深刻である。

近年では、単一のROVの代わりに、複数の水中ロボットやROVを協調させて作業を行うマルチロボットシステムや群ロボットに関する研究が行われている。群ロボットは広範囲の探索、冗長性の確保や協調作業による効率向上といった利点を有しており、水中環境においてもその有用性が期待されている。しかし、従来の群ロボット研究の多くは、自由空間を前提とした編隊制御や障害物の回避を対象としており、テザーケーブルのような物理的拘束を伴う枠組みは十分に確立されていない⁽²⁾。

本研究では、基地から伸長するテザーケーブルを用いて運用されるROVを対象とし、移動に伴い生じるケーブルの絡まりや障害物との干渉

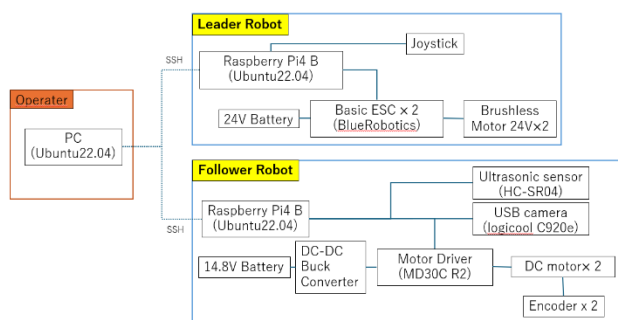
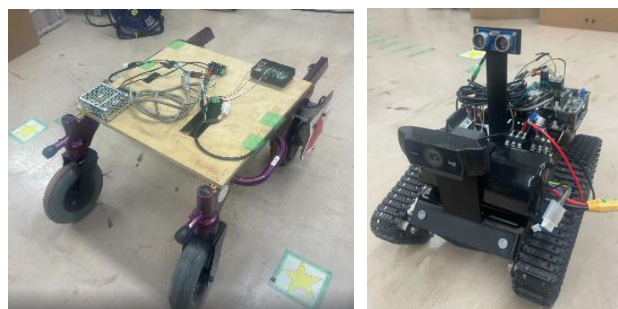


Fig. 1 System configuration diagram

Table 1 Specifications of the robots

	Leader robot	Follower robot
Size	L0.46[m] x W0.75[m] x H0.32[m]	L0.23[m] x W0.30[m] x H0.32[m]
Weight	20[kg]	3[kg]
Sensor		Camera x 1, Ultrasonic sensor x 1, Encoder x 1
OS	Ubuntu22.04	Ubuntu22.04
Controller	Raspberry Pi 4 model B	Raspberry Pi 4 model B
Battery	Lithium-ion Battery 14.8[V]	Switching Power Supply 24[V]



(a) Leader robot (b) Follower robot

Fig. 2 The developed robots

を低減するためケーブル自体を能動的に動かす能動的ケーブルマネジメントシステムについて検討する。ROVであるLeader robotが障害物回避や方向転換を行う際、ケーブルの折点にFollower robotを展開し保持させることで、ケーブルを望ましい位置に維持することを目的とする。Leader robotが障害物回避や方向転換を行うたび基地からFollower robotが出発し、玉突き的に折点の役割を引継ぐ。

本稿では、提案する手法の有効性を検証するため、陸上の狭隘経路を模した環境で実験を行う。現段階では、2台の機体を用い、1台はLeader robotとして操縦により移動し、もう1台はFollower robotとしてLeader robotの動作に応じて自律的に追従する役割を担う。

これらの構成において、Leader robotの直進や旋回といった基本的な動作に対し、Follower robotが遅延や大きな位置誤差を生じることなく追従可能であるか評価する。

2. 陸上環境用実機の開発

はじめに本研究では、陸上環境において、Leader robotの移動に対してFollower robotが追従と位置調整を行う基礎的制御系を構築する。視覚認識を用いた追従制御と、Follower robotの基本的挙動の検証を中心に実験を進める。以下にシステム構成と機体概要について述べる。

2. 1. システム構成

図1にシステム全体の構成図を示す。Leader robotおよびFollower robotの制御には、ROS2 (Robot Operating System 2) を用いている。Follower robotにはカメラ及び超音波センサを搭載する。Follower robotはLeader robotに取り付けられた視覚マーカを認識することで、Leader robotの移動方向を推定する。本システムでは、位置推定と追従制御に着目しており、折点保持機構は搭載していない。

2. 2. 機体概要

図2と表1にそれぞれ、開発した実機の外観と仕様を示す。

図2(a)にROVに相当しケーブルを引きながら走行するLeader robotを示す。実機の移動用に電動スクータ用ブラシレスモータを取り付ける。Leader robotには、Follower robotが追従する視覚マーカを取り付ける。マーカは機体後方正面には円、左右には三角形、四角形の図形がそれぞ

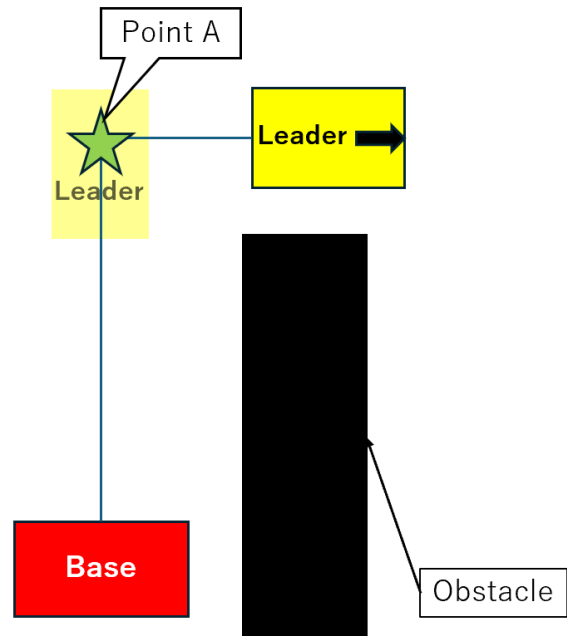


Fig. 3 Trajectory of the leader robot

れ取り付けられている。Leader robotはコントローラによる操作を想定している。しかし現段階では安定した操縦が十分に実現できていないため、本研究の基礎的な動作実験においては、手動で移動させ、Follower robotとの追従動作を観察する方法を採用している。

図2(b)にケーブル折点の保持や追従行動を担うFollower robotの外観を示す。Follower robotにはクローラ走行が可能なROS SLAM Tank Car (XIAOR GEEK社製) を使用している。搭載したカメラでLeader robotの赤色マーカを識別し、重心位置から左右方向のずれを算出し画面上に矢印として可視化する。また超音波センサによりLeader robotとの距離を計測し、目標距離を維持するよう前進及び後退を制御する。

3. 制御方法

Follower Robot群は、視覚情報と近接センサを組み合わせた制御により、追従・旋回・探索といった一連の挙動を段階的に実装しており、これらの挙動は将来的にケーブルの絡まり防止や障害物との干渉防止へと発展させる基盤として機能する。本研究ではその一部として、Follower robotが安定してLeader robotに追従することを目指す。

3. 1. 前後追従

Follower robotは前方カメラと超音波センサを併用し、Leader robotとの相対位置を推定しながら前後追従制御を行う。赤い円がカメラ画像内

に検出されている間、Follower robotは超音波センサを用いてLeader robotとの距離を計測し、その値が一定範囲に収まるように前進または後退を行い、常に目標距離を維持するように制御されている。

3. 2. 左右旋回

旋回方向の判断には視覚情報を用いる。カメラ画像内に映る赤い図形が円から四角形に変化した場合は、Leader robotが右に向いたと判断し、Follower robotは一旦停止した後、前進し、右旋回へ移行する“旋回準備”状態へ移る。一方、円から三角形に変化した場合は左旋回の準備状態へ移る。

四角形を検出した時、Follower robotはその場で待機する。Leader robotの前進により四角形がカメラの画角からフェードアウトした場合、Follower robotは図3に示すように、Leader robotが直前までいた点“Point A”まで前進し、その後右旋回を行いマーカの再検出を試みる。三角形の場合も同様であり、フェードアウトした際には前進したのち、左旋回へ移行する。

Follower robotは、カメラ画面上で検出された図形の重心位置を算出し、その中心からのずれ量を画面上に矢印を表示し可視化している。

4. 予備実験

提案した制御手法の動作を確認するために、予備実験を行った。

4. 1. 前後追従

前後追従実験では、Follower robotの追従挙動を評価するため、前進動作と後退動作に分けて実施した。

図4(a)に前進動作の様子を示す。停止しているLeader robotの後方正面にFollower robotを配置し、視覚マーカの認識限界である2[m]離れた位置を初期位置として前進させた。視覚マーカを安定して認識可能かつ超音波センサの計測可能距離として目標距離を0.85[m]に設定した。

図4(b)に後退動作の様子を示す。Follower robotの初期位置をLeader robotの後方0.2[m]とし、そこから後退させた。

結果として、提案した制御方法により、Follower robotが目標距離を保ちLeader robotへ追従できることを確認した。

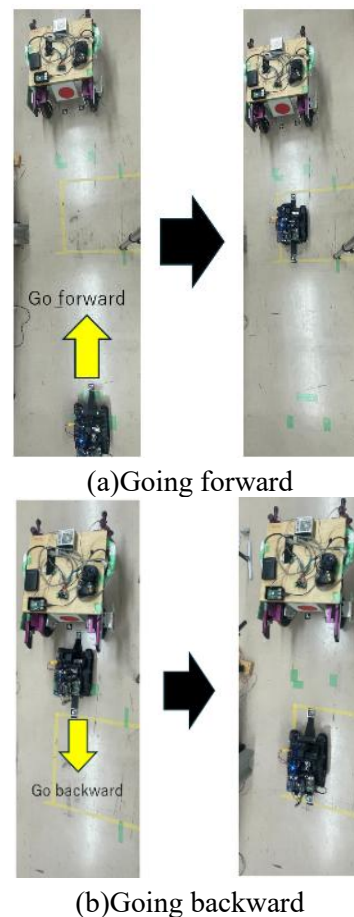
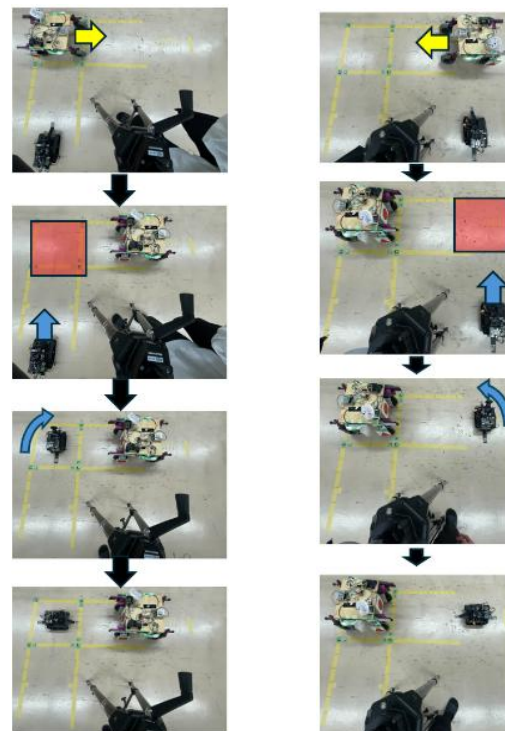


Fig. 4 Preliminary experiments for going forward and backward



(a) Turning right after going forward (b) Turning left after going forward

Fig. 5 Preliminary experiments for turning

4. 2. 左右旋回

旋回実験では、Leader robotが方向転換を行った際の挙動に着目し、Follower robotがその動きに応じて適切に追従可能かを確認する。右旋回動作の様子を図5(a)、左旋回動作の様子を図5(b)に示す。図中の赤い四角は、Leader robotが直前まで居た位置“Point A”を表しており、Follower robotがそこまで前進し、Leader robotの視覚マーカを再認識する過程を実現する。

5. 実機による検証実験

5. 1. 前後追従

図6に、前進動作及び後退動作実験の結果を示す。それぞれ15回試行し、目標距離0.85[m]と設定して、赤色は前進動作、青色は後退動作の結果を表している。実験の結果、前進動作、後退動作どちらにおいても、目標距離付近を比較的安定して維持しながら追従可能であることを確認した。このことからFollower robotは基本的な前後追従動作が成立していると言える。一方で、誤差が発生した要因として、床面との摩擦や、超音波センサの計測誤差などが影響したと考えられる。

5. 2. 左右旋回

図7、図8に左右旋回動作の実験の結果を示す。図7の中心は図3の“Point A”を示し、Follower Robotが“Point A”に到達した後、左右旋回した際にLeader Robotの視覚マーカを認識した旋回角度と距離を示す。図中の黄色はFollower robotがLeader robotの視覚マーカを認識可能な領域、赤色は認識が困難な領域を表している。また、青色は右旋回動作、オレンジ色は左旋回動作の結果を表している。図8の斜線部は認識が困難な領域を表している。実験の結果、Leader robotが旋回後に移動した距離に応じてFollower robotが視覚マーカを再認識するために必要な旋回量が変わることを確認した。Leader robotとの距離が近い場合には大きな旋回量が必要となり、距離が遠い場合には比較的小さな旋回量で再認識可能である傾向が見られた。また視覚マーカを再検出できない領域が存在した。左右旋回で完全な左右対称とはならなかったが、距離に応じて旋回量が変化する傾向は共通して確認された。

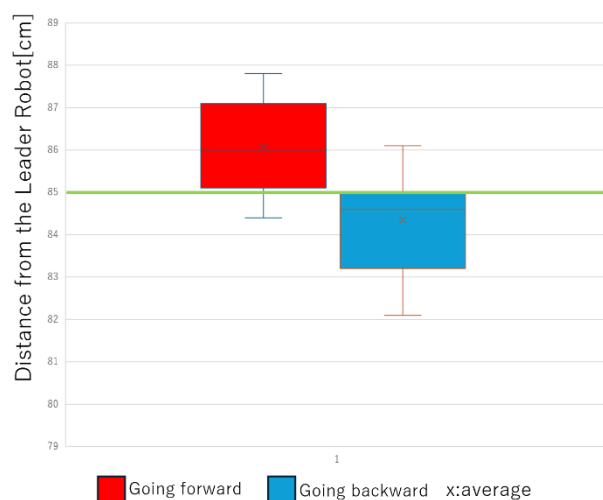


Fig.6 Experimental results of accuracy for going forward and backward

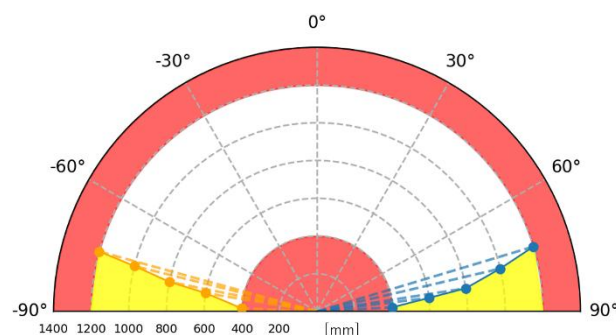


Fig.7 Experimental results of accuracy for turning

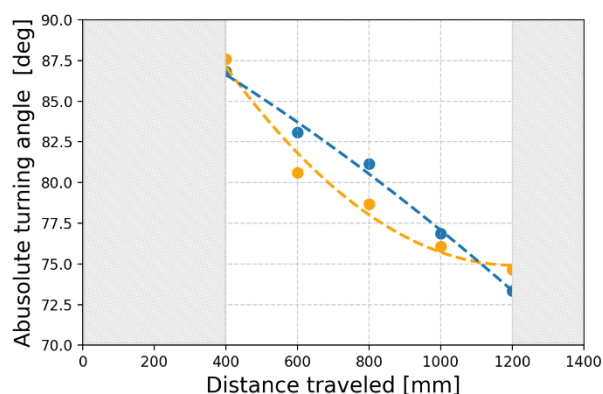


Fig.8 Relationship between traveled distance and absolute distance

6. 結言

本研究では、ケーブルの絡まり防止に向けた基盤構築を目的とし、陸上環境における追従制御の基礎的検証を行った。視覚マーカの識別と超音波センサによる距離計測を組み合わせることで、Follower robotがLeader robotとの相対距離を保ちながら前進・後退する前後追従動作を実現した。

検証実験では、Follower Robotの前後追従性能及び旋回時における再認識性能について評価を行った。その結果、Follower RobotはLeader Robotに対して、目標距離付近を維持しながら追従可能であり、前進・後退の両動作に安定した追従性能を有することを確認した。

また、Leader Robotの旋回により視覚マーカがカメラ画角外へ消失した場合においても、Follower Robotが旋回動作を行うことでLeader Robotを再認識可能であることを確認した。

今後は、視覚情報と距離情報の統合方法を改良し、重心位置推定の精度向上や旋回量の調整により、追従制御の安定化を図る。複数のFollower robotの導入に向け、新たにクローラ型ロボットを追加し、Follower robot同士が干渉せずにケーブル折点を保持できる制御アルゴリズムを構築する。

また、Follower robotが折点となる位置へ移動し、その位置を保持する機能を実装する。さらに、折点の役割を次のFollower robotへ受け渡し、ケーブルと障害物の干渉を防止する機能を構築する。

最終的には、Leader robotが完成した段階で、複数のFollower robotとの同時運用を行い、ケーブルを能動的に制御して絡まりや障害物との干渉を防ぐロボットシステムを完成させる。これらの成果は、水中ROVなどにおける新しいケーブルマネジメント手法として展開できる可能性を持つ。

参考文献

- (1) S. Culter, K. Petersen, "Leveraging Tethers for Distributed Formation Control of Simple Robots", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.10588-10595, 2024.
- (2) K. Eshaghi, A. Roger, G. Nejat, "Closed-Loop Motion Control of Robotic Swarms Tether-Based Strategy", IEEE Transactions on Robotics (TRO), pp.3450-3467, 2022.