

ARマーカを用いた位置推定に基づくクアッドコプター型ROV の位置決め精度向上に関する研究

Research on Improving the Positioning Accuracy of a Quadcopter-Type ROV Based on Position Estimation Using AR Markers

○ZHANG HAN*, 小山 猛*, 三好 扶*

○ZHANG HAN*, Takeshi KOYAMA*, Tasuku MIYOSHI*

*岩手大学大学院

*Graduate School of Iwate University

キーワード：ROV(Remotely Operated Vehicle), 粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization), AR
marker

連絡先：〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5 岩手大学院 総合科学研究科 理工学専攻
三好・小山研究室 ZHANG HAN, Tel: 019-621-6357, E-mail: g0324130@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

海洋は地球の面積の7割を占めており、人類の次世代開発の重点領域となっている。特に水中ケーブルの敷設や洋上風力発電の建設などの分野においては特にその傾向がある。しかし、現在は主に潜水士による作業が行われており、作業範囲が狭く効率が低い上、安全性も低いという問題がある。さらに、長時間や低温下での作業が非常に難しいという問題もある。このような背景から、水中ロボットの研究開発は非常に必要である。

現在の水中ロボットは、海洋開発分野で主に海底地形マップ作成や海洋生物観察などの用途で利用されている。水中ロボットの中でも、AUV (Autonomous Underwater Vehicle) はリアルタイムの情報伝達が難しく、ROV (Remotely Operated Vehicle) は主に観測用に使用されている。水中建設作業における資材運搬、特に長尺資材の運搬は依然として大きな課題となっている。さらに高重量、長寸法の材料を対象に作業を行う際、1台のロボットを使用することは、その体積の大きさや構造の複雑さなどの問題に直面する。本研究には、機体が荷物を所定の位置に搬送した後、ARマーカを認識することで、自律的に目標との相対位置を固定して保持できるようにすることを目指している。

本研究では、4つのスラスタのうち同方向のものを対角線上に配置した、クアッドコプターを模したROVを提案する。この設計により、ROVの機動性が向上するとともに、水中での荷重能力が強化され、様々な建設資材の運搬にも対応できるようになる。さらに、荷物を把持する必要

があるため、機体の下部にはグリップパーを搭載している。移動中に機体が傾く可能性があることから、グリップパーと機体の接続部には横方向および縦方向の2つの関節を設け、機体が傾いてもグリップパーが常に垂直方向を保てるようにしている。より大きな開閉角度を得るために、2段階の展開構造を採用した。

2. 機体概要

2.1 本体

作製した機体をFig.1に、ROVの寸法は、長さ500[mm]、幅500[mm]、高さ550[mm]である。上部には制御装置用の防水ケース長さ125[mm]、幅125[mm]、高さ125[mm]が搭載された。下部にはバッテリー用の防水ケースが搭載されており、サイズは長さ350[mm]、幅150[mm]、高さ150[mm]である。ROVは4つのスラスタ (Blue Robotics T-200) を使用しており、T200の最大推力は5.25[kgf]である。本機はホバリング時の水平方向の安定性を高めるため、スラスタを外側に20度傾けて配置している。自由度はXYZ軸方向の移動およびZ軸の回転を含む4自由度を持っている。電源にはリチウムイオンバッテリー (14.8V) を使用している。機体の両側には重りを搭載してバランスを確保した。アームは機体の底部中央に配置されている。

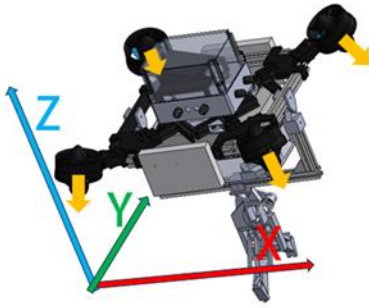


Fig.1 Overall View of ROV

2.2 アーム

機体が移動する際に搬送中の荷物の影響を受けないようにするため、グripper部を常に垂直に保つジンバルの採用が必要である。Fig.2に示すように、青色の部分にあるX方向およびY方向の2つの関節の組み合わせによって、ジンバルに類似した構造を形成しており、グripperおよび荷物自体の重さによって、グripperの向きを常に垂直に保つ仕組みとなっている。グripper部にはサーボモーターを搭載しており、ギア駆動およびリンク機構によって開閉を制御している。Fig.3に示すように、グripperの寸法は長さ100[mm]、高さ210[mm]、先端の最大開口距離は125[mm]、最大で直径100[mm]の物体を把持することができる。

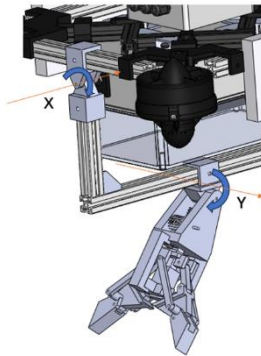


Fig.2 Gimbal

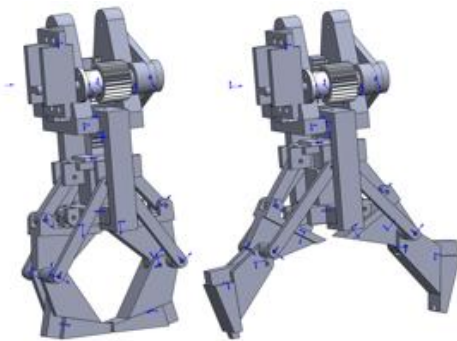


Fig.3 Arm design

3. 制御系

本研究では、機体に搭載したカメラによりARマーカを認識し、ARマーカとカメラ間の相

対姿勢関係を用いて制御入力を算出する。具体的には、Roll, Pitch, カメラからARマーカまでの直線距離の3つの計測値に対してPID制御を行い、推力配分行列を用いて各スラスタのPWM (Pulse Width Modulation) 出力値を決定している。

4基のスラスタに与えるPWM出力ベクトルを $\mathbf{T} = [T_4, T_5, T_6, T_{13}]^T$, 仮想制御入力ベクトルを $\mathbf{u} = [u_r, u_p, u_d]^T$ と定義する。 u_r はRoll制御入力, u_p はPitch制御入力, u_d は直線距離の入力。機体が基準状態を維持するためのPWM出力を \mathbf{T}_{base} とすると、各スラスタへの出力は式(1)のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_4 &= \mathbf{T}_{\text{base}} + \mathbf{u}_r - \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_d \\ \mathbf{T}_5 &= \mathbf{T}_{\text{base}} - \mathbf{u}_r - \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_d \\ \mathbf{T}_6 &= \mathbf{T}_{\text{base}} - \mathbf{u}_r + \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_d \\ \mathbf{T}_{13} &= \mathbf{T}_{\text{base}} + \mathbf{u}_r + \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_d \end{aligned} \quad (1)$$

このように、ARマーカから得られる相対的なRoll, Pitch, 距離情報を用いることで、外部の深度センサやIMUに依存せず、カメラ画像に基づいた機体の姿勢および相対位置制御を行う。

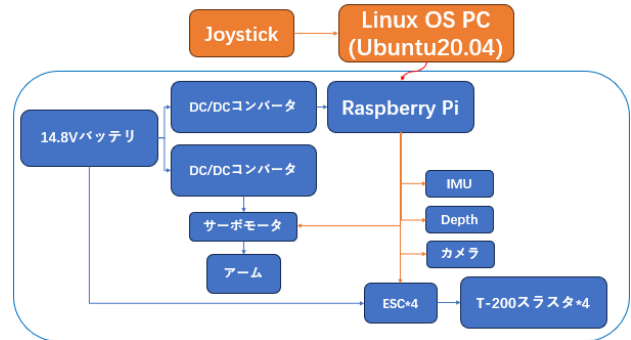


Fig.4 System Configuration

4. PSOによるゲイン決定

本研究では、ROVの応答特性を二次遅れ系モデルとして近似した。PWM入力変化量を Δu , 機体応答の変化量を Δy とすると、モデル応答 Δy_m は式(2)で表される。

$$\Delta y_m(t; K, \zeta, \omega_n) = \Delta u \cdot K \cdot \left(1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_d t + \phi)\right) \quad (2)$$

$$\min_{K, \zeta, \omega_n} \sum_k (\Delta y_m(t_k) - \Delta y(t_k))^2 \quad (3)$$

実験では、各スラスタにPWM入力を与え、そのときのARマーカとカメラ間の相対姿勢および距離の変化を記録した。得られた実験データに対して、モデル応答と実測値の二乗誤差

が最小となるように、式(2)により K , ζ , ω_n を同定した。ここで、 K はシステムゲイン、 ζ は減衰比、 ω_n は固有角周波数である。また、 ω_d は減衰固有角周波数、 φ は位相項を表す。

最適化の評価指標となるコスト関数 J は、評価基準応答 $\eta(t)$ とシミュレーション結果 $y(t)$ との二乗誤差を基本とし、制御の安定性および応答性を考慮するため、オーバーシュート量、最大制御入力、制御入力の変化量、整定時間、立ち上がり時間に対するペナルティ項を加算することで定義した。評価基準応答 $\eta(t)$ を式(4)に、コスト関数 J を式(5)に示す。

$$\eta(t) = \frac{\omega_r^2}{s^2 + 2\zeta_r\omega_r s + \omega_r^2} \quad (4)$$

$$J = \sum_{t=0}^T (y(t) - \eta(t))^2 \omega_1 + \omega_2 e_f^2 + \omega_3 M_p^2 + \omega_4 \sum_{t=0}^T (\Delta u(t))^2 + \omega_5 T_s + \omega_6 T_r \quad (5)$$

5. 実機による制御ゲインの検証

5.1 実験環境

PIDゲインの有効性を検証するため、水槽内で実験を行った。水槽の縦横は約2[m]、水深は約1.5[m]である。また、目視により水面は安定していることを確認した。したがって、本実験は外乱がほとんどない環境下で行われたと考えられる。

実験データの記録時間は10秒とした。目標値を入力した後、機体姿勢が安定した状態において、カメラが認識したARマーカのRoll角、Pitch角、およびARマーカまでの直線距離を記録した。

5.2 実験結果と課題点

実験結果(Fig.5)より、Roll角およびPitch角については、カメラ自体に取付角度があるため、機体を水平に維持することを目的として目標値を 2° と 5° に設定した。また、ARマーカからカメラまでの直線距離の目標値を0.35[m]とした。その結果、RollおよびPitch方向の誤差は約 ± 0.05 [rad]、直線距離の誤差は約 ± 20 [mm]となった。

課題点として、第一にYaw方向の制御が困難であることが挙げられる。現在のスラスト配置ではYaw方向の出力がほとんどないため、回転方向の異なるスラスト間の出力差のみによってYaw方向の旋回を制御することは難しい。

第二に、本実験では直線距離、Pitch、Rollのみを制御対象としたため、機体を水平に維持することはできたが、一点に位置を定位することはできなかった。Fig.6に示すように、赤色の円周上の任意の点で条件を満たすことができるため、今後の実験ではX方向およびY方向の距離設定も必要である。

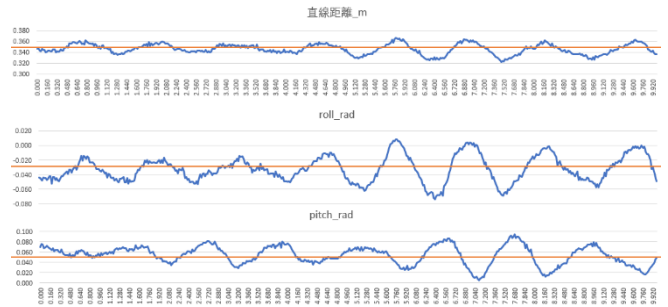
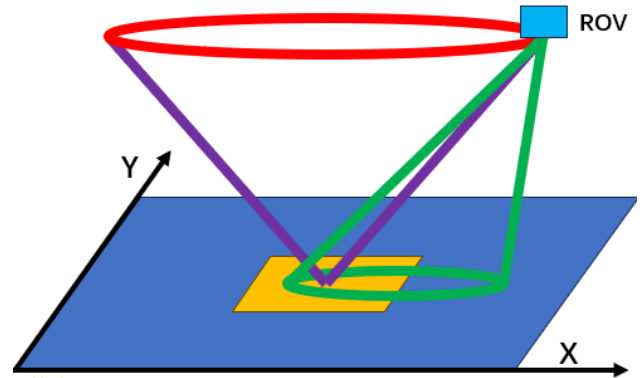


Fig.5 Experimental results for linear distance, roll, and pitch



黄色：ARマーカ
緑色：カメラの視野範囲
赤色：現在の条件を満たす位置で構成されるの円
紫色：設定したARマーカとカメラ間の直線距離

Fig. 6 Range satisfying the AR marker constraints

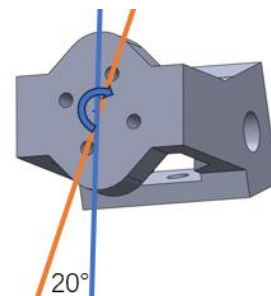


Fig. 7 Thruster Angle Modification

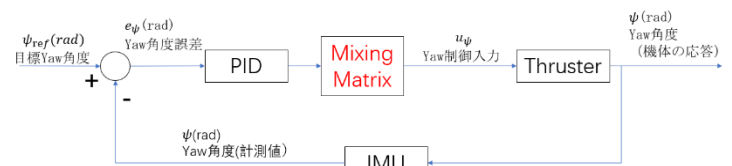


Fig. 8 Yaw Loop Control Block Diagram

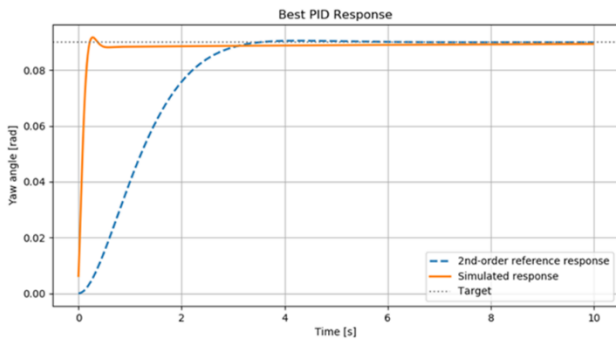


Fig.9 Simulation results of the yaw angle

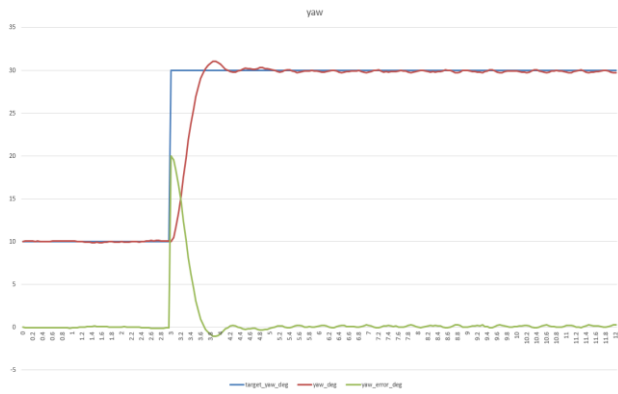


Fig. 10 Experimental results of the yaw angle using the actual ROV

5.3 予備実験：Yaw角出力増加による機体制御

Fig.7に示すように、スラストを取付面に沿って20°回転させることで、Yaw方向の出力を増加させ、Yaw方向の旋回をより効果的に制御することを目的とした。

スラスト角度を変更した後、機体のYaw方向旋回に関するデータを収集した。具体的には、対角配置のスラストを1組として、一方の組の出力を増加させ、もう一方の組の出力を減少させた際のIMUによるYaw旋回データを記録した。その後、得られたデータを用いて数学モデルを構築し、PSOによってPIDゲインを探索した。Fig.8にYawの予備実験のブロック線図を示す。

Fig.9の橙色線はシミュレーション結果、Fig.10は実機による水槽実験の結果である。本実験により、Yaw方向制御の実現可能性を確認した。

6. 結言

本研究では、製作した機体に対して、ARマーカから取得したデータを用い、PSOによりPIDゲインの最適化を行った。これにより、機体が目標ARマーカと一定の直線距離を保ちながら、水平姿勢を維持できることを確認した。また、予備実験により、スラスト角度を変

更した場合におけるYaw方向制御の実現可能性を確認した。

今後は、ARマーカから取得したデータに基づいて、機体のYaw角制御を行う予定である。また、カメラとARマーカ間のX軸およびY軸方向の位置関係を制限することで、機体を一点に定位させることを目指す。さらに、機体下部に搭載したアームは重力により自然に鉛直方向を保つ構造であるため、機体移動時に揺動が発生する。今後は、このアームの揺動が機体のホバリング精度に与える影響について評価する。

参考文献

- (1) Xu, J., Ding, S., Pan, G., et al. TJ-FlyingFish: Design and Implementation of an Aerial-Aquatic Quadrotor with Tiltable Propulsion Units. arXiv preprint [J]. 2023.
- (2) Durdevic, P., Li, S., Ortiz-Arroyo, D. Design, Modelling and Control of an Amphibious Quadrotor for Pipeline Inspection. arXiv preprint [J]. 2023.
- (3) Bouabdallah, S., Murrieri, P., & Siegwart, R. Design and Control of a Quadrotor with Application to Autonomous Flying. International Journal of Robotics Research [J]. 2007.
- (4) NEDO. 着床式洋上風力発電導入ガイドブック. 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2020. <https://www.nedo.go.jp/content/100889995.pdf>.
- (5) Huang D, Wang C, Dou M, et al. Underwater motions analysis and control of a coupling-tiltable unmanned aerial-aquatic quadrotor[J/OL]. arXiv preprint, 2023. [2025-05-30].
- (6) Abbas S M, Aslam S, Berns K, Muhammad A. Relative Localization and Dynamic Tracking of Underwater Robots Based on 3D-AprilTag[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 13(5): 833.