

# 粒子群最適化法を用いたクアッドコプタ型ROVの 深度・姿勢制御ゲインの最適化と実機検証 Optimization of Depth and Attitude Control Gains for a Quadcopter-Type ROV Using Particle Swarm Optimization and Its Experimental Verification

○小高 健幹\*, 小山 猛\*, 三好 扶\*

○Takeki ODAKA\*, 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)

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 小高 健幹, Tel: 019-621-6357, E-mail: g0326049@iwate-u.ac.jp

## 1. 緒言

日本は周囲を海洋に囲まれた島国であるため、移動や輸送の拠点となる港湾・海上空港、水産業の拠点となる漁港・漁場など、海上には数多くの施設が存在している。また、近年では、海洋エネルギーや資源を活用するための施設も増加している。

これらの施設の建築及び整備は潜水士によって行われているが、高齢化による離職者の増加に対し、若手後継者が不足しているため、潜水士の総数は減少傾向にある<sup>1)</sup>。将来的に海洋エネルギーや資源の需要の拡大が見込まれるなか、需要を賄うために必要な人材の不足が懸念される。

そして、水中での作業自体も酸素の制限や水圧の影響など、人間が活動するには過酷な環境であり、地上から作業状況を把握しづらい。実際、発生した事故への対応の遅れにより潜水士が死亡した事例が複数報告されている<sup>2)</sup>。

一方、陸上では危険な作業現場において、ロボットの遠隔操作によって建築作業を行った事例が報告されている<sup>3)</sup>。そのため水中でも同様の運用をすることで、人材不足や安全性の問題解決につながると考えられる。

水中で作業を行うには、浮遊状態のUUV (Unmanned Underwater Vehicle) の高精度な位置・姿勢の制御が必要である。Fengら<sup>4)</sup>はクアッドコプタ型AUV (Autonomous Underwater Vehicle) に搭載されたIMU (Inertial Measurement Unit) と深度センサ、AUVを上側から撮影した映像を用いたホバリング制御の手法を提案した。また、Jaehyunら<sup>5)</sup>はクアッドコプタ型ドローンにIMUを搭載し、学習データを基に遺伝的アルゴリズム

ムを用いて姿勢制御ゲインを決定する手法を提案した。

しかし、外部カメラを用いた制御は実海域への適用が難しい。また、Jaehyunらはロール角の1軸についてのみゲインの決定と検証を行ったが、クアッドコプタ型ROVには深度と姿勢の4軸を制御することが求められる。

本研究では、クアッドコプタ型ROV (Remotely Operated Vehicle) を使用し、水中での資材搬送を行うことを最終目標とする。本稿では基礎的段階として、機体搭載センサで学習用データを収集し、粒子群最適化法を用いて深度・姿勢制御ゲインの最適化を行う。そして、実海域環境における制御性能の検証結果について報告する。

## 2. 機体概要

作製した機体をFigure 1に、システム構成をFigure 2に示す。20[mm]×20[mm]のアルミフレームで外枠を作成し、対角線上に4基のスラスタ (T200, Blue Robotics) を設置した。また、上部と下部には電装ボックスを配置している。上部の電装ボックスにはRaspberry Pi 4 Model B, 5V バッテリ (Anker PowerCore Fusion 10000, Anker), ESC (Electronic Speed Controller, Basic ESC, Blue Robotics), IMU (BNO055), 深度センサ (Bar02, Blue Robotics) と周辺確認用の4つのUSBカメラ (C922n, logicool) を内蔵、下部の電装ボックスには14.8V バッテリ (Lithium-ion Battery (14.8V, 18Ah), Blue Robotics) を内蔵している。水中では無線通信を行うことはできないため、陸上のPCとROVはLANケーブルでの通信を行う。

### 3. 制御系

ブロック線図をFigure3に示す. 深度, ロール角, ピッチ角, ヨー角の4軸について個別に仮想制御入力を算出し, 推力配分行列を用いて各スラストのPWM (Pulse Width Modulation) 出力値を決定している.

スラストのPWM出力ベクトルを $\mathbf{T}=[T_1, T_2, T_3, T_4]^T$ , 仮想制御入力ベクトルを $\mathbf{u}=[u_z, u_\phi, u_\theta, u_\psi]^T$ と定義する.  $u_z$ は深度制御入力,  $u_\phi$ はロール制御入力,  $u_\theta$ はピッチ制御入力,  $u_\psi$ はヨー制御入力を表す. 機体が概ね深度と水平姿勢を保つことができるPWM出力ベクトルを $\mathbf{T}_{\text{base}}$ と置くと, 推力配分則は(1)式で表される.

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{base}} + \mathbf{M}\mathbf{u} \quad (1)$$

ここで,  $\mathbf{M}$ は推力配分行列である. 本システムにおける推力配分行列は(2)式で定義される.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

本システムでは, 深度制御には深度センサの位置情報に基づく単一の制御ループを採用し, 姿勢制御にはIMUの角度と角速度をフィードバックするカスケード制御を採用した. 姿勢制御は, 角度偏差から目標角速度を算出するアウターループと, 角速度偏差から仮想制御入力を算出するインナーループにより構成されている<sup>6)</sup>.

### 4. 粒子群最適化法によるゲイン決定

ROVの速度・角速度の動特性を1次遅れ+むだ時間モデルと仮定し, ラプラス演算子 $s$ を用いて(3)式で定義する.

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (3)$$

ここで,  $K$ はシステムゲイン,  $T$ は時定数,  $L$ はむだ時間である. 実機にて収集したデータから, システムゲインと時定数, むだ時間を同定した. これらの定数を用いたシミュレーションにて制御ゲインの探索を行う. 探索には粒子群最適化法を用い, 深度制御は単一PIDによる3次元探索, 姿勢制御は各軸について, 二重ループPIDによる6次元の探索を行う.

最適化の評価指標となるコスト関数 $J$ は, ステップ状の目標値に対して指数関数的に収束する評価基準応答 $\eta(t)$ とシミュレーション結果の二乗誤差を基本とし, 制御の安定性を担保するた

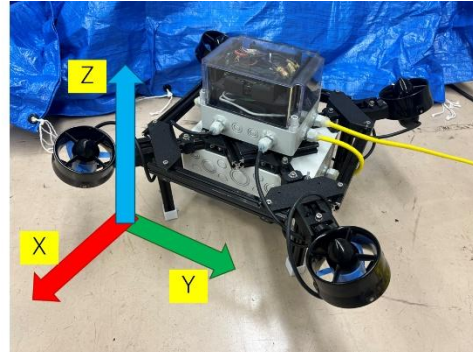


Figure 1 Overall View of ROV

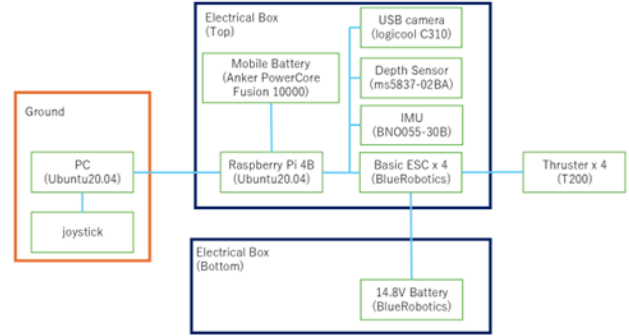


Figure 2 System Configuration

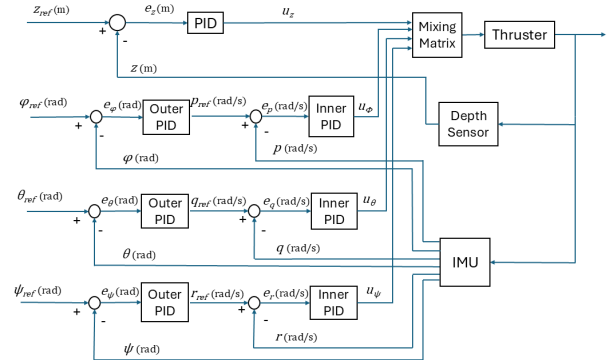


Figure 3 Block Diagram

め実機の制約に応じた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.

$$\eta(t) = \text{Target} \times (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4)$$

$$J = \sum_{t=0}^T \{y(t) - \eta(t)\}^2 \cdot w_{os} + w_u \sum_{t=0}^T |\Delta u(t)| \quad (5)$$

ここで,  $\tau$ は時定数,  $T$ はシミュレーション時間,  $y(t)$ は各時刻におけるシミュレーション値,  $\Delta u(t)$ は仮想制御入力の変化量,  $w_{os}$ ,  $w_u$ は重み係数である.

## 5. 実機による制御ゲインの検証

### 5. 1. 実験環境と評価方法

決定した制御ゲインの検証のため、駿河湾内の実海域にて実験を行った。水深は約20[m]、水温は約17[°C]であった。また、観測時の湾内は、風波・うねりによる海面変動が小さく、透明度も8~10[m]程度と良好であった。したがって、本実験は外乱の比較的小さい静穏海況下で実施されたと判断できる。

実験の試行時間は30秒とし、開始10秒の時点で目標値をステップ状に変化させ、20秒後までのデータを取得して評価を行う。制御性能の定常特性を評価するため、目標値変化後10秒から20秒の区間を評価区間とする。

本稿では目標値に対する追従性能の評価には(6)式で定義される二乗平均平方根誤差RMSE (Root Mean Squared Error) を用い、外乱による機体の振動の評価には(7)式で定義される標準偏差SD (Standard Deviation) を用いる。これにより追従性能と堅牢性を分離して定量評価を行う。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=k_{start}}^{k_{end}} (r_k - y_k)^2} \quad (6)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=k_{start}}^{k_{end}} (e_k - \bar{e})^2} \quad (7)$$

ここで、 $k_{start}$ は評価開始時刻に対応するデータ番号、 $k_{end}$ は評価終了時刻に対応するデータ番号、 $M$ は評価区間のデータ点数、 $r_k$ は目標値、 $y_k$ は実測値、 $e_k$ は偏差、 $\bar{e}$ は評価区間における偏差の平均値である。

### 5. 2. 深度・姿勢の制御実験と結果

この実験では、ロール角とピッチ角の目標値を0[°]、ヨー角の目標値を160[°]とし、深度の目標値を4.0[m]から5.0[m]へと変化した。Figure 4, Figure 5, Figure 6, Table 1に実験の結果を示す。

姿勢の3軸についてはRMSEの値が非常に小さく、深度のRMSEの値はステップ入力 of 2%程度である。またSDは4軸全てにおいて小さい。これは機体が目標値に対して小さな振動で追従していることを示している。

## 6. 結言

本稿では、作製した機体の制御ゲインを粒子群最適化法で最適化し、実海域での検証を行った。結果として、決定されたゲインによって、実

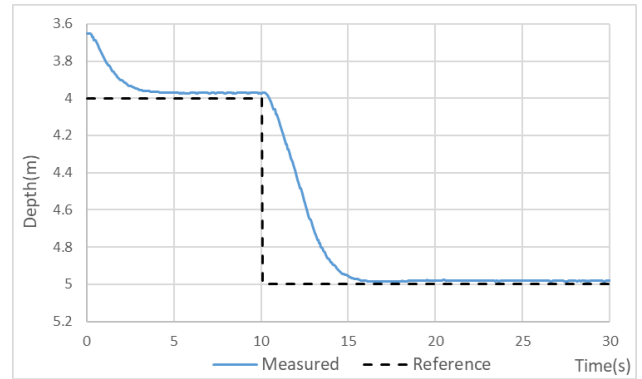


Figure 4 Depth data in Experiment

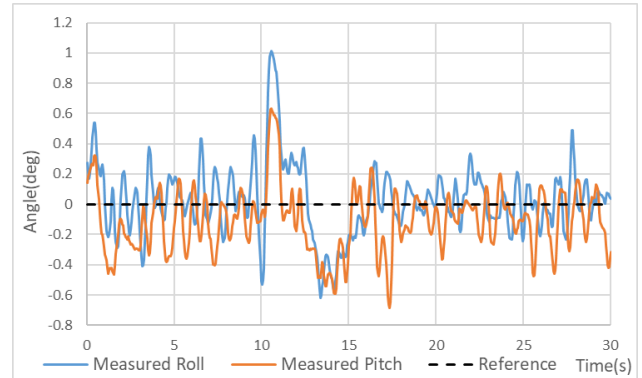


Figure 4 Roll and Pitch data in Experiment

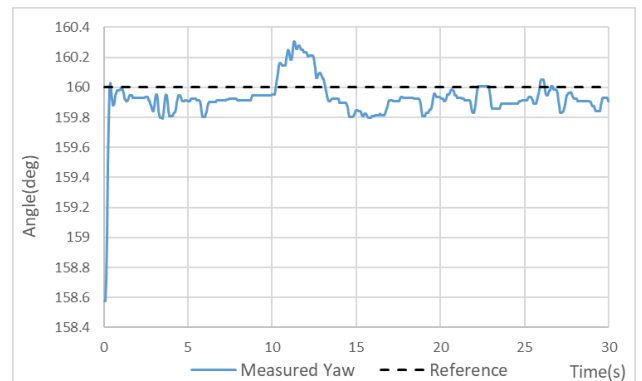


Figure 5 Yaw data in Experiment

Table 1 Evaluation results of Experiment

	RMSE	SD
Depth[mm]	18.673	1.216
Roll[deg]	0.138	0.135
Pitch[deg]	0.177	0.153
Yaw[deg]	0.092	0.050

海域での高精度な機体制御を実現した。このことから、粒子群最適化による制御ゲイン決定の有効性が示された。

今後は、荷物を懸架した状況を想定し、締結部に自由度を持った重りを機体下部に設置する。そして、重りの揺れによる外乱下での制御の実現と高精度化を目指す。

### 参考文献

- 1) 日本潜水協会: 水士後継者育成・技術伝承  
<https://www.sensui.or.jp/20170913174544>  
(参照日: 2026/5/21)
- 2) 厚生労働省: 労働災害事例, 職場の安全サイト  
[https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen\\_pg/sai\\_det.aspx?joho\\_no=100299](https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen_pg/sai_det.aspx?joho_no=100299)  
(参照日: 2026/5/21)
- 3) 国土交通省: 建設ロボット技術の開発・活用に向けて  
<https://www.mlit.go.jp/common/000995047.pdf>  
(参照日: 2026/5/21)
- 4) Rendong Feng, Shouzhuang Xing, Zhanglin Wang, Shijie Xu, Hangzhou Wang, Ying Che, Haocai Huang,: Underactuated hovering control of the minitype autonomous underwater helicopter, Ocean Engineering, Volume 284, 2023, 115201
- 5) Jaehyun Yoon, Jaehyeok Doh: Optimal PID control for hovering stabilization of quadcopter using long short term memory, Advanced Engineering Informatics, Volume 53, 2022, 101679
- 6) 牧緑, 武居秀雄, 石川和敏: 無人航空機の簡易型手動飛行操縦装置の開発, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.8, No.11, pp.90/98(2009)