

# 水中・水上ロボットシステムの 連係動作に関する基礎検討

内田 博志\*

Basic Study on the Coordinated Operation of Underwater and Floating Robot System

Hiroshi UCHIDA\*

## ABSTRACT

The Seto Inland Sea is blessed with many resources and industries, and it is expected to realize underwater robots that support the effective utilization and development of them. Gps cannot be used because radio waves cannot be used in water, and accumulation of integral error becomes a problem in inertial navigation based on the time integration of acceleration. We examined a method of estimating the position and posture of underwater robots by attaching LEDs with different light emitting colors to underwater robots and imaging them with a camera installed at the bottom of the water robot. As a result, it was found that good estimation was possible by expressing the yaw angle by the phase angle on the unit circle and using the estimation by ensemble learning. Next, the control method for autonomous navigation of water robots based on the position information from GPS was examined. It is considered that the target value from the map and the feedback value from GPS are given in global coordinates. As a result of the simulation, in the position control by simple feedback control, the orbital error in the y-axis direction of the robot coordinates occurs due to the initial position error and disturbance, but in the control considering that the water robot with two thrusters is a non-holonomic system, the result of the orbital error converging vibrationally was obtained.

キーワード：水中ロボット，自己位置推定，アンサンブル推定，非ホロノミック制御

**Keywords:** Underwater robot, Self-position estimation, Ensemble estimation, Nonholonomic control

## 1. 背景

瀬戸内海は多くの資源や産業に恵まれており，その有効な活用・育成を支援する水中ロボットの実現が期待される．地域での比較的小規模な応用を想定する自律水中ロボットシステムには，大洋での広範囲の観測等を主目的とする従来型の水中ロボットとは異なる仕様や機能が要求される．本稿では，小型の AUV 型自律水中ロボットと水上ロボットが，衛星や観測気球などからの情報をもと

に連係動作しつつ，海洋生物の生態調査などを行うロボットシステム（図 1）に関する研究を行う．

そのようなロボットシステムを実現するうえでいくつかの技術課題があるが，本稿ではまず水中ロボットの位置・姿勢推定の問題を取り上げる．水中ロボットがマップ情報をもとに自律的に動作するためには，水中ロボットが絶対座標系における自らの座標（姿勢を含む．以下同じ）情報を得る必要があるが，水中では電波が通じないために GPS が使えず，また加速度の時間積分に基づく慣性航

---

\*機械システム工学科

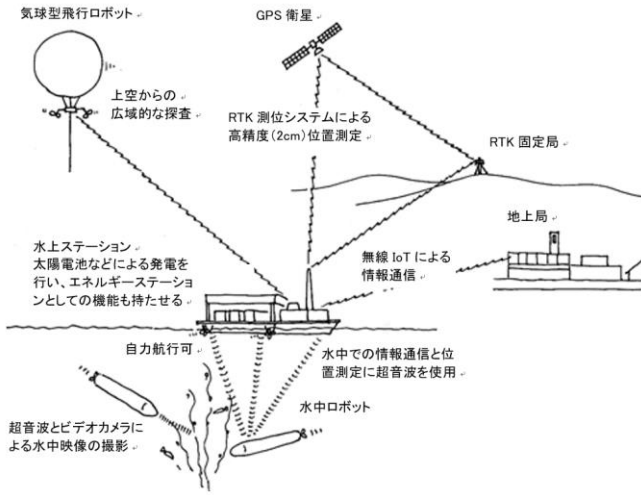


図1 海中探査ロボットシステム

Fig. 1 Underwater exploration robot system

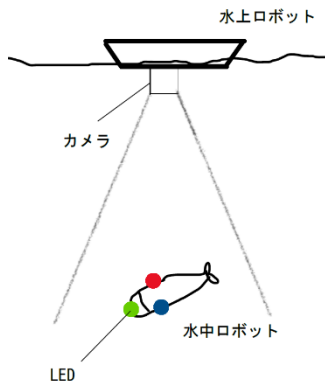


図2 水中ロボット位置・姿勢推定法

Fig. 2 Underwater robot position / attitude estimation method

法では積分誤差の補正が問題となる．そのため，本稿では GPS を備える水上ロボットとの相対座標を求め，水上ロボットの絶対座標を加え合わせる方法をとる．

水上ロボットと水中ロボットの相対位置を測定する方法としては，光を用いる方法と音を用いる方法とが考えられるが，本稿では安価で容易に実現できる可能性のある，デジタルカメラを用いる手法について検討する．

## 2. 水中ロボットの位置・姿勢推定

### 2.1 基本方策

上述したように，水上ロボットと水中ロボットの相対的位置・姿勢をカメラ画像をもとに推定することを考える．水中ロボットに発光色の異なる LED を取り付け，水上ロボットの船底に設けたカメラで撮像する（図2）．

画像処理により個々の LED を識別して座標を求めるため，異なる色の LED を用いる．水上ロボットに固定した座標系（水上ロボット座標系）から見た水中ロボットの位置と

姿勢を  $X, Y, Z, \Phi, \Theta, \Psi$  ( $\Phi, \Theta, \Psi$  は水中ロボットのロール，ピッチ，ヨー角)，水中ロボットに固定した座標系（水中ロボット座標系）における LED の位置を  $(x, y, z)$  で表すと，LED  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ ) の水中ロボット座標は次式で水上ロボット座標に変換される．

LED =  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) における水中ロボット座標を次のように表す．

$$p_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

LED =  $p_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) の水中ロボット姿勢角度を  $(\Phi, \Theta, \Psi)$  とおくと，それらによる座標変換行列は次式で与えられる．

$$T_\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_\Theta = \begin{bmatrix} \cos\Theta & 0 & -\sin\Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Theta & 0 & \cos\Theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_\Psi = \begin{bmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi & 0 \\ -\sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

これらを用いると，LED $i$  の水上ロボット座標は次式で表される．

$$q_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + T_\Phi * T_\Theta * T_\Psi * p_i \quad (5)$$

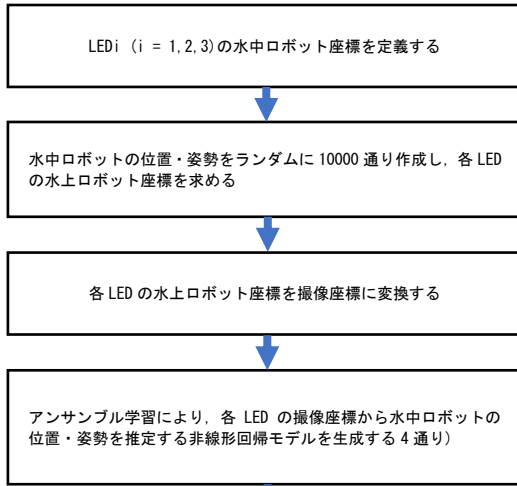
LED  $i$  がカメラで撮像されると，撮像素子上の座標（撮像座標） $H_i, V_i$  が得られる．水上ロボット座標  $X_i, Y_i, Z_i$  から撮像座標への変換は次式で与えられる．

$$H_i = L \frac{X_i}{Z_i} \quad (6)$$

$$V_i = L \frac{Y_i}{Z_i} \quad (7)$$

このように，水中ロボットがある位置・姿勢にあるときの，各 LED の撮像座標を求めることは容易である．その逆変換，すなわち各 LED の撮像座標から水中ロボットの 6 自由度の位置・姿勢を求めることを考えた場合，もとの変換の非線形性が強いことから，幾何学的な逆変換を求めることは困難である．そこで以下では，非線形回帰手法を用いた統計的推定により水中ロボットの位置・姿勢を求めることを考える．なお，水中ロボットの姿勢角のうち，ロールとピッチについては水中ロボットに内蔵した加速度センサーにより回転時の各軸方向に分解した重力加速度を測定することにより算定できる．従って以下では，

位置・姿勢推定モデルの作成



位置・姿勢推定シミュレーション

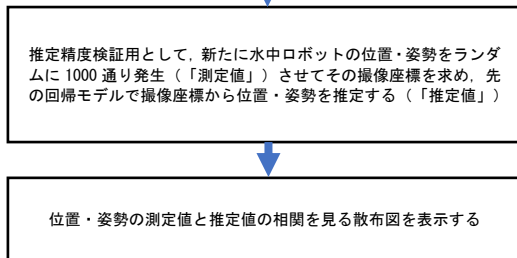


図3 水中ロボット位置・姿勢推定シミュレーションのフローチャート

Fig. 3 Flowchart of underwater robot position / attitude estimation simulation

姿勢角についてはヨー角のみを測定することを考える。

2.2 シミュレーション

上述した推定に応用可能な非線形回帰手法には数多くものが考えられ、ニューラルネットワークもその一つであるが、本稿ではより容易に適用可能な、アンサンブル学習による回帰を用いる。アンサンブル学習は、複数の推定器を複合的に用いる機械学習手法で、近年、回帰や分類の問題に幅広く適用されている。

本稿では、水中ロボット座標系の x-y 平面内で、原点を中心とする半径 r の円に内接する図形の各頂点に LED を 3~5 個配置することを前提として、水中ロボットの位置・姿勢推定のシミュレーションを行った。このシミュレーションのフローチャートを図3に示す。

2.3 シミュレーション結果

上記のシミュレーションを LED の個数を 3~5 個で変化させながら行った。LED の個数と配置の関係を図4に示す。その結果、LED の個数が多いほど、位置の推定精度が向上することがわかった。また特にヨー角 (Ψ) に関しては、ヨー角そのものを推定する方法では、精度の良い推定ができなかったが (図4)、ヨー角を偏角とする絶対値 1 の複素

数に置き換えて推定を行うと、推定精度が向上する結果が得られた (図5)。

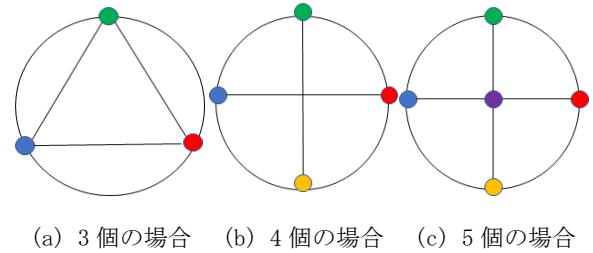


図4 LED の配置

Fig. 4 LED layout

3. 水上ロボットの自律制御

3.1 基本方策

本稿で考える水上ロボットでは、位置・方向の目標値はマップ情報に基づくグローバル座標系で与えられ、フィードバック値も GPS と地磁気に基づくグローバル座標系で与えられる。これに対して入力であるスラスト推力は、水上ロボットに固定されたローカル座標系で与えられる。水上ロボットのダイナミクスは、これらのことを反映した形で定式化する必要がある。図6に、水上ロボットのグローバル座標系とローカル座標系の関係を示す。

グローバル座標系における速度とローカル座標系における速度の関係式は、

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\Omega} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\dot{X}, \dot{Y}, \dot{\Omega}$  はそれぞれグローバル座標系における X 軸方向の速度、Y 軸方向の速度、Z 軸回りの角速度である。 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\omega}$  はそれぞれローカル座標系における x 軸方向の速度、y 軸方向の速度、z 軸回りの角速度である。

式(1)の両辺を時間微分すると、

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\Omega} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\Omega} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ローカル座標系における水上ロボットのダイナミクスを式で表すと、

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -b & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$$

∴

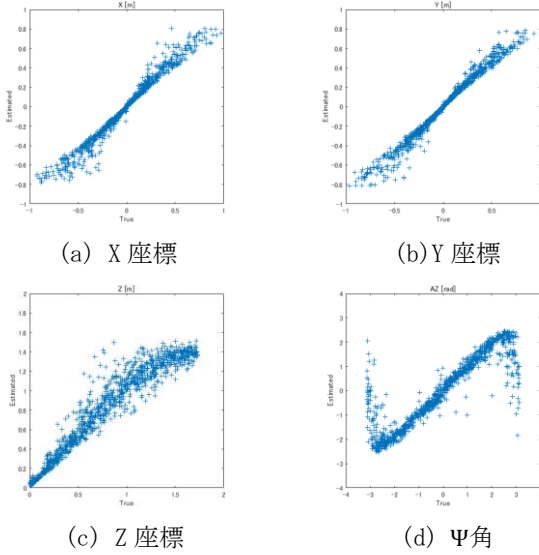


図4 シミュレーションによる水中ロボット位置・姿勢推定 (LED5個の場合)

Fig. 4 Underwater robot position / attitude estimation by simulation (in the case of 5 LEDs)

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/M & 1/M \\ -b/J & d/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\ddot{x}, \dot{\omega}$ はそれぞれローカル座標系における水上ロボットの加速度と各角速度,  $f_1$ は水上ロボット右側ポンプのスラスト推力,  $f_2$ は水上ロボット左側ポンプのスラスト推力,  $M$ は水上ロボットの質量,  $J$ は水上ロボットの慣性モーメント,

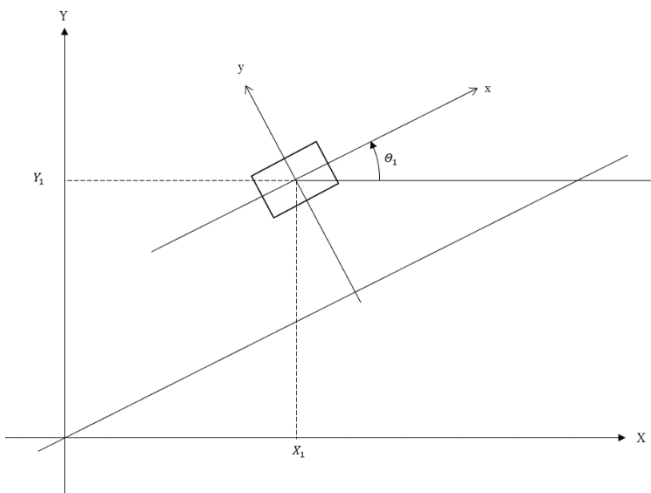


図6 水上ロボットのグローバル座標系とローカル座標系 (ロボット座標系)

Fig. 6 Global coordinate system and local coordinate system of water robot (robot coordinate system)

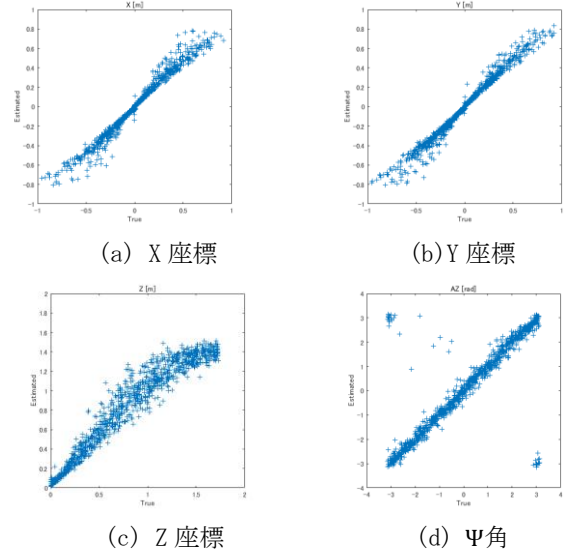


図5 シミュレーションによる水中ロボット位置・姿勢推定 (LED5個, 角度を複素数に置き換えて計算)

Fig. 5 Underwater robot position / attitude estimation by simulation (in the case of 5 LEDs, calculated by replacing 5 LEDs and angles with complex numbers)

メント,  $b$ は水上ロボットの中心から左側ポンプの出力口中心までの幅,  $c$ は水上ロボットの中心から右側ポンプの出力口中心までの長さである. 簡単のため, 付加質量や流体による粘性抵抗は無視している.

式(10)より, 水上ロボットのダイナミクスにおいて, 常に $\ddot{y}=0$ であるから, 式(9)の第2行は次式で表される2階非ホロノミック拘束を与えることになる.

$$\ddot{Y} \cos \theta - \dot{X} \sin \theta = \dot{Y} \Omega \sin \theta + \dot{X} \Omega \cos \theta \quad (11)$$

式(9)の両辺に左から

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

を乗じ,  $\ddot{y}=0$ とおくと,

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \dot{\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \Omega \\ \dot{Y} \Omega \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)に式(10)を代入すると

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \dot{\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/M & 1/M \\ -b/J & d/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \Omega \\ \dot{Y} \Omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

となり, 本稿で考える水上ロボットのダイナミクスが得られる.

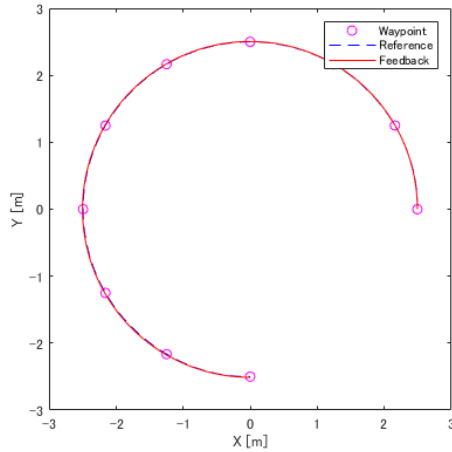


図8 初期誤差がない場合のフィードバック制御の結果  
(破線：目標軌道，実線：実際の軌跡)

Fig. 8 Result of feedback control with no initial error (dashed line: target trajectory, solid line: actual trajectory)

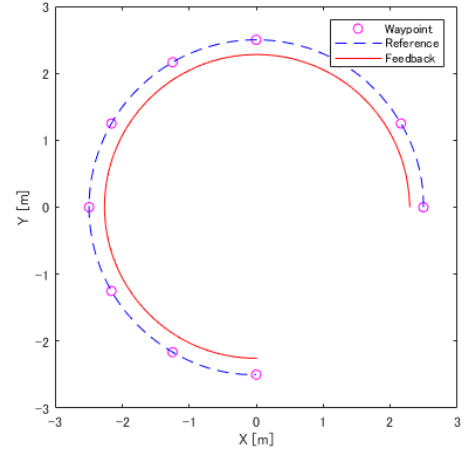


図10 初期誤差がある場合のフィードバック制御の結果  
(破線：目標軌道，実線：実際の軌跡)

Fig. 10 Result of feedback control when there is an initial error (dashed line: target trajectory, solid line: actual trajectory)

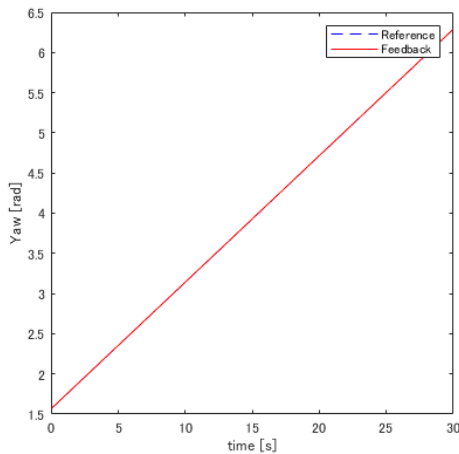


図9 初期誤差がない場合のフィードバック制御の結果  
(破線：目標ヨー角，実線：実際のヨー角)

Fig. 9 Result of feedback control when there is no initial error (dashed line: target yaw angle, solid line: actual yaw angle)

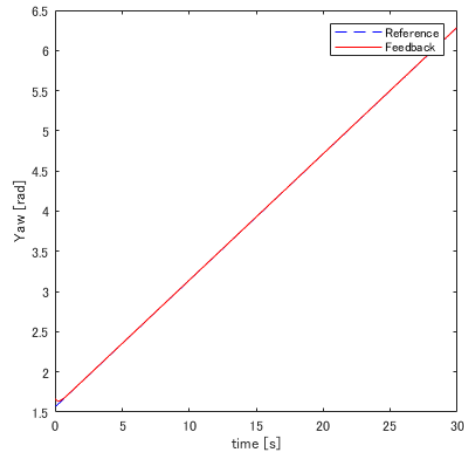


図11 初期誤差がある場合のフィードバック制御の結果  
(破線：目標ヨー角，実線：実際のヨー角)

Fig. 11 Result of feedback control when there is an initial error (dashed line: target yaw angle, solid line: actual yaw angle)

この水上ロボットが速度目標値 $[\tilde{x} \ \tilde{y} \ \tilde{\Omega}]^T$ からスラスト推力 $[f_1 \ f_2]^T$ をオープンループで決定する手順は以下の通りである。

- ① 速度目標値 $[\tilde{x} \ \tilde{y} \ \tilde{\Omega}]^T$ を時間微分することにより $[\dot{\tilde{x}} \ \dot{\tilde{y}} \ \dot{\tilde{\Omega}}]^T$ を求める。
- ② それらを式(2)に代入してローカル座標系における加速度目標値 $[\ddot{x} \ \ddot{\omega}]^T$ を求める。 $\ddot{y}$ は無視する。
- ③ 式(3)を変形した

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{b+d} \begin{bmatrix} \hat{d}\hat{M} & -\hat{J} \\ \hat{b}\hat{M} & \hat{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\omega} \end{bmatrix} \quad (14)$$

によりスラスト推力 $[f_1 \ f_2]^T$ を求める。ただし、 $\hat{b}, \hat{d}, \hat{M}, \hat{J}$ は、それぞれ $b, d, M, J$ の推定値である。

### 3. 2 シミュレーション

前述したオープンループ制御では、精度の良い軌道追従制御ができないため、図7に示すフィードバック制御を適用してシミュレーションを行った。このフィードバック制御では、 $X, Y, \Theta$ の各グローバル座標値とその時間微分である $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{\Omega}$ についてフィードバック補償を行っている。

このシミュレーションを、初期誤差のない場合について

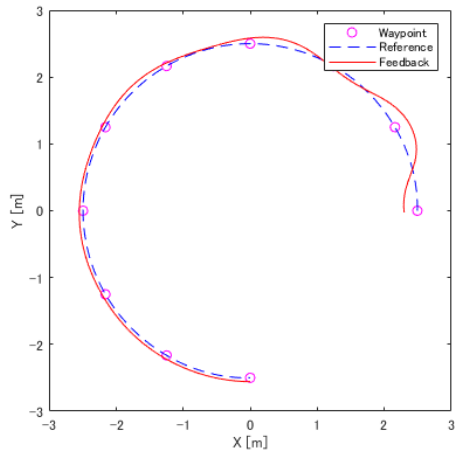


図 12 非ホロノミック制御の結果 ( $K_p=3$ , 破線: 目標軌道, 実線: 実際の軌跡)

Fig. 12 Results of nonholonomic control ( $K_p = 3$ , dashed line: target trajectory, solid line: actual trajectory)

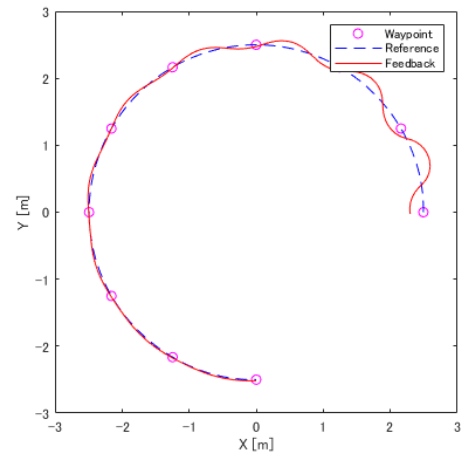


図 14 非ホロノミック制御の結果 ( $K_p=9$ , 破線: 目標軌道, 実線: 実際の軌跡)

Fig. 14 Results of nonholonomic control ( $K_p = 9$ , dashed line: target trajectory, solid line: actual trajectory)

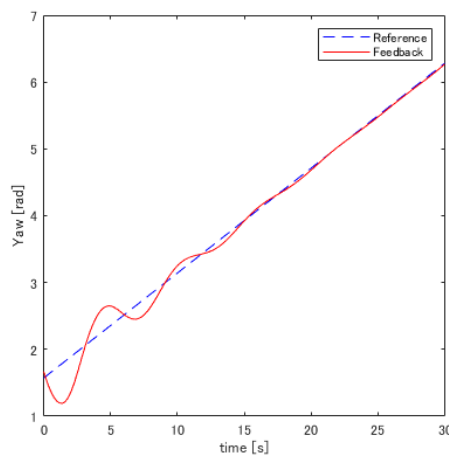


図 13 非ホロノミック制御の結果 ( $K_p=3$ , 破線: 目標ヨー角, 実線: 実際のヨー角)

Fig. 13 Results of nonholonomic control ( $K_p = 3$ , dashed line: target yaw angle, solid line: actual yaw angle)

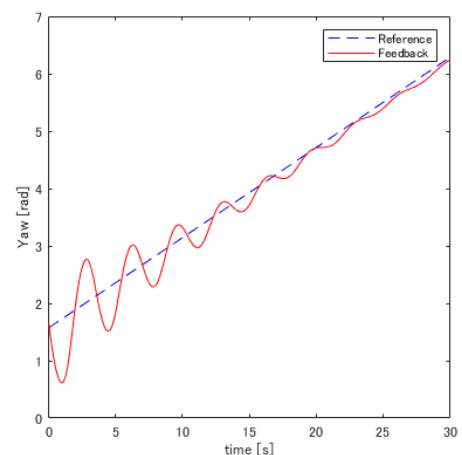


図 15 非ホロノミック制御の結果 ( $K_p=9$ , 破線: 目標ヨー角, 実線: 実際のヨー角)

Fig. 15 Results of nonholonomic control ( $K_p = 9$ , dashed line: target yaw angle, solid line: actual yaw angle)

行った結果を図 8 と図 9 に, また各座標値に  $+0.5\%$  の初期誤差が含まれる場合について行った結果を図 10 と図 11 に示す. これらのうち図 8 と図 10 は目標軌道と実際の軌跡を比較したものであり, また図 9 と図 11 は目標ヨー角と実際のヨー角を比較したものである. いずれも目標値は破線で, 制御結果は実線で示している. 水中ロボットは, いずれも図 10 に見えるような  $3/4$  円軌道に沿って反時計回りに動作するようプログラムした.

図に示されるように, 初期誤差がない場合には, 軌道, ヨー角ともに, 目標値によく一致した制御結果が得られた

が, 初期誤差がある場合では, 軌道において初期誤差が収束せず, 目標軌道に一定の距離を保ったまま運動する結果が得られた. これは, 本稿で想定しているような, 並行に推力を発生するように取り付けられた 2 つのスラスタを持つ水中ロボットは, 3 自由度を持つ平面座標系の中では非ホロノミック系となり, 横方向に移動する自由度を持たないためである.

### 3. 3 非ホロノミック制御の適用

以上のことから, 水上ロボットに非ホロノミック制御を適用した. これは競技用二輪台車 (マイクロ・マウ

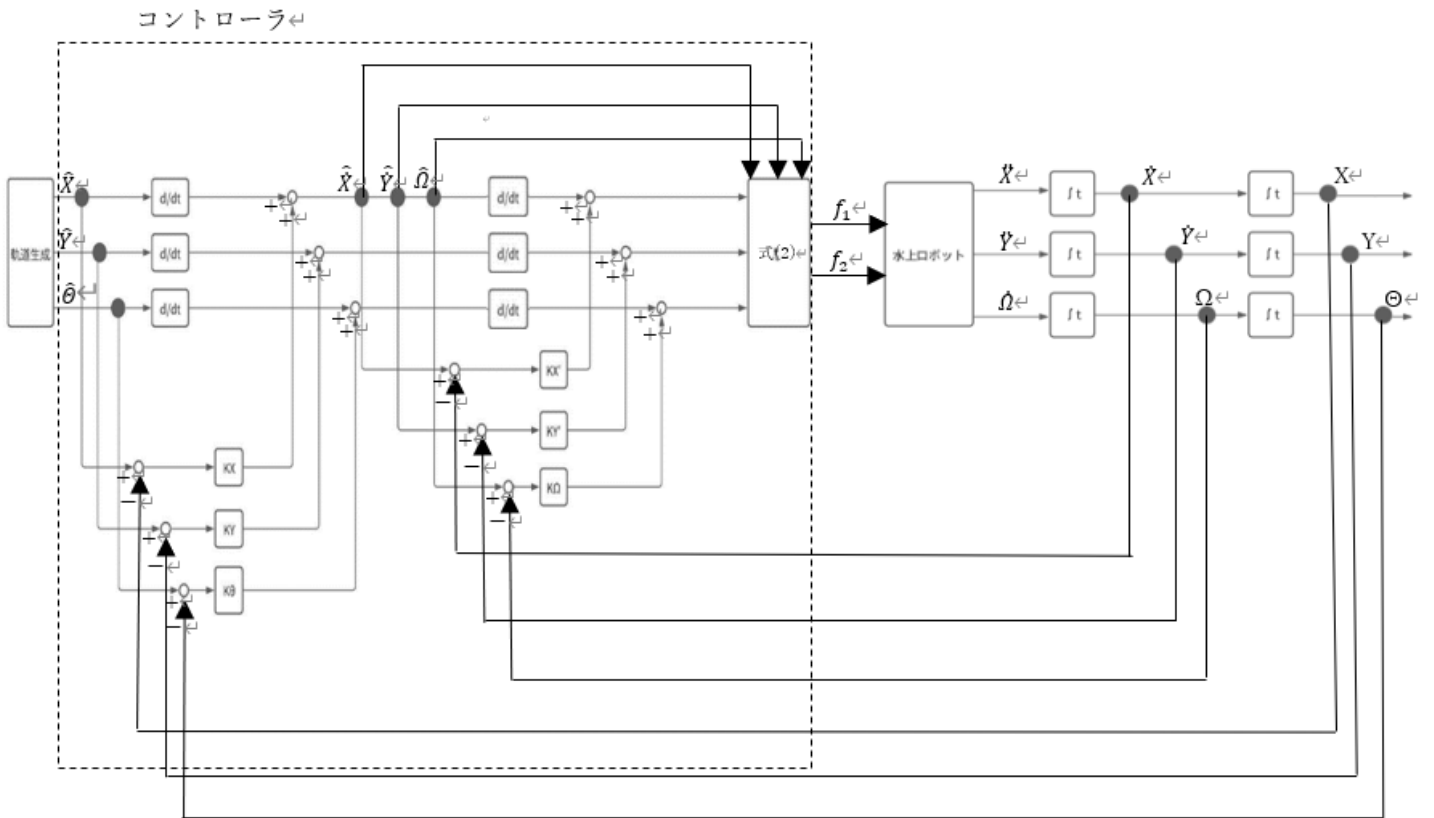


図7 フィードバック制御ブロック線図  
Fig. 7 Feedback control block diagram

ス)の制御用として実績あるアルゴリズムを応用したものである。このアルゴリズムでは、横方向に位置誤差が生じた場合、それを解消するために進行方向(ヨー角)を変更する。アルゴリズムは次式で与えられる。

$$\omega = K_p \Delta y + K_d v \sin \Delta \theta \quad (15)$$

式の中の  $K_p$ ,  $K_d$  は、それぞれ  $y$ ,  $\theta$  (ヨー角) 方向の誤差に関する制御ゲイン、 $\Delta y$ ,  $\Delta \theta$  は、それぞれ  $y$ ,  $\theta$  方向の位置誤差、 $v$  は前後方向の進行速度である。

図12, 図13は  $K_p=3$  としたときの結果であり、図14, 図15は  $K_p=9$  としたときの結果である。いずれの場合も、前述したフィードバック制御の場合と比較すると、横方向の誤差が次第に収束している。

またフィードバックゲインの一種である  $K_p=3$  としたときの結果は、 $K_p=9$  としたときの結果と比較して動きが穏やかであり、したがって誤差の変動幅が小さいメリットがあるが、シミュレーションの終盤においても横方向の軌道誤差が完全に収束しない欠点を生じている。これに対して  $K_p=9$  の場合は、シミュレーションの終盤においてほぼ完全に誤差が収束しており、精度の良い軌道追従が行われているが、その反面、シミュレーション開始直後

の誤差変動幅が大きく生じている。このことは、制御の段階によって望ましいゲインの値が変わるということを示唆しており、今後研究が必要な事項の一つである。

#### 4. 結論

水中ロボットに発光色の異なるLEDを取り付け、水上ロボットの船底に設けたカメラで撮像する方法により、水中ロボットの位置・姿勢を推定する方法をシミュレーションで検討した。その結果、ヨー角を単位円上の位相角で表し、アンサンブル学習による推定を用いることにより、良好な推定が可能であることが分かった。

またGPSからの位置情報をもとに水上ロボットの自律航行を行うための制御方法を検討した。マップからの目標値とGPSからのフィードバック値がグローバル座標で与えられることを考慮したシミュレーションの結果、単純なフィードバック制御による位置制御では、初期位置誤差や外乱によりロボット座標  $y$  軸方向の軌道誤差が生じるが、2つのスラスタを有する水上ロボットが非ホロノミック系であることを考慮したフィードバック制御では、軌道誤差が良好に収束する結果が得られた。

## 参考文献

- [1] 鶴井明：工業力学，培風館，(1986).
- [2] 元良誠三：船体運動力学（電子訂正版），  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj55Zbo8\\_f0AhVPE6YKHSZdCicQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.jasnaoe.or.jp%2Fpublish%2Fothers%2Fdl%2Fsentaundourikigaku.pdf&usg=AOvVaw1dkhRdbRZn0OhqP27\\_fUdX](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj55Zbo8_f0AhVPE6YKHSZdCicQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.jasnaoe.or.jp%2Fpublish%2Fothers%2Fdl%2Fsentaundourikigaku.pdf&usg=AOvVaw1dkhRdbRZn0OhqP27_fUdX), (2021 年 12 月閲覧).
- [3] アンサンブル学習のフレームワーク，  
<https://jp.mathworks.com/help/stats/framework-for-ensemble-learning.html>, (2021 年 12 月閲覧).
- [4] 二輪台車シミュレーションを MATLAB で実装するー制御モデルと解法ー，  
<https://qiita.com/motorcontrolman/items/60480e0766d00f3b3d8f>, (2021 年 12 月閲覧).
- [5] マイクロマウスと制御理論 (1) 壁トレース制御，  
<https://blog.tokor.org/2015/12/21/rogy-Advent-Calendar-2015-%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%83%9E%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%81%A8%E5%88%B6%E5%BE%A1%E7%90%86%E8%AB%96/>, (2021 年 12 月閲覧)).