

福山大学ブランド研究プロジェクト

里海の海中探査プロジェクト完了報告

研究期間：1997 年 4 月～2022 年 3 月

スマートシステム学科 仲嶋 一

機械システム工学科 内田 博志

スマートシステム学科 田中 聡

スマートシステム学科 関田 隆一

スマートシステム学科 沖 俊任

スマートシステム学科 伍賀 正典

目次

1. 序論
2. 藻場観測用小型自律水中ロボットシステム
3. 藻場観測機用海中音響ビーコン／通信システム
4. AI を用いた海中ロボットの自律航行支援システムの開発
5. 藻場環境観測システムの開発（海底カメラ）
6. 地球観測衛星データによる藻場分布解析
7. 藻場における生態観察用 ROV の開発

1. 序論

藻場や干潟の生態系は、二酸化炭素の固定と酸素の生成や水質の浄化、生物多様性の保全、海岸線の保全、環境学習、そして保養等、人の生活に有益な様々な機能(生態系サービス)を有している。これら沿岸生態系は単位面積当たりの生態系サービスが地球上で最も多く、熱帯雨林をはるかにしのぐとも言われており、人の福利に資する多くの未知の機能が眠っていると考えられる。しかしながら、近年の工業発展に伴う沿岸開発による沿岸域への負荷の増大や、地球規模での気候変動によって、藻場と干潟等沿岸生態系は深刻な影響を受けつつある。にも拘わらず、藻場・干潟生態系の理解は、調査技術の制約により、極めて限定的であり、その生態系サービスは十分に理解されているとは言えない。このため、里海の生態系および多様性を維持し、資源の利用をはじめとする生態系サービスの恩恵に与るためには、その環境や状況を正確に把握することが急務である。

一方、福山市は瀬戸内海のちょうど中央の満潮時に東西から流入する潮が合流する場所に位置し、潮汐における干満の差が大きいという特有の自然環境を持っている。また、島が多く典型的な多島海を有することから、他地域と比較して沿岸域が顕著に多いのも特徴である。このような地形的特質から必然的に藻場や干潟が発達し、これらの生態系は比類ない地域の特色となっている。このような環境に立地する本学として、瀬戸内の里海の生態系を究明し産業利

用を推進する全学的プロジェクト研究を展開している。そのような中で、工学部として、このような里海の藻場の把握するためのテクノロジーを開発するプロジェクト「里海の中探査プロジェクト」を5年間に亘り遂行した。

本プロジェクトは4つのサブテーマに分割され、各々で技術確立に取り組んだ。

1. 自律航行の海中ロボットにより藻場の状況や生育息を探索する「海中探査ロボット」
2. 海底に設置するステレオカメラ等の測定器により藻場の環境を定点観測する「藻場探査システム」
3. 衛星画像から広域の藻場分布を推定する「衛星画像藻場分布」
4. 藻場における生態系の詳細観測のための「生態観察用 ROV」

本報告では、各研究者の成果としてまとめており、1. 海中探査ロボットについては、2～4章が対応している。また、3章の音響通信に関しては、海中ロボット、藻場探査共通の技術として取り組んだ。

2. 藻場観測用小型自律水中ロボットシステム

内田 博志

1. 緒 言

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。地域における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的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、図 1.1 に示す、小型の自律水中ロボット (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) と水上ロボットが、衛星や気球などからの情報をもとに連係動作しつつ、藻場内の海洋生物の生態調査などを行うロボットシステムに関する研究を行った結果について述べる。

2. 水中・水上ロボットの基本構造

2.1 水中ロボット

図 2.1 に、製作した水中ロボットの外観を示す。水中ロボットは、藻場の中を移動することを想定して、自由度の高い小型紡錘形状とし、スラスタは、藻への絡みなどを防止するため、プロペラが大きく露出しない形とした。またラダーは設けず、ロボットの 5~6 自由度を 3 軸の推進器

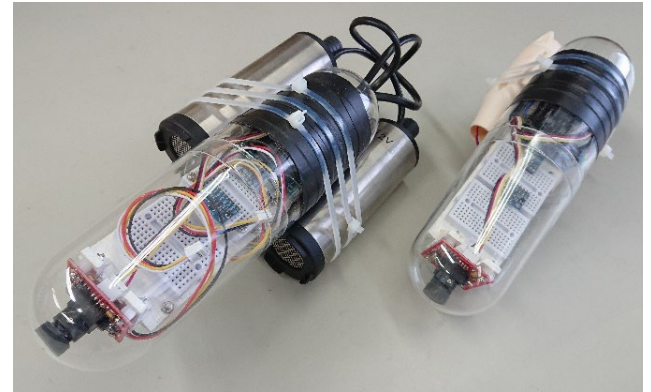


図 2.1 水中ロボット外観
Figure 2.1 Appearance of underwater robot

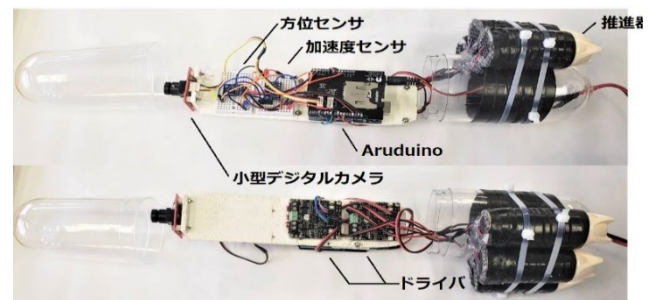


図 2.2 水中ロボット 1 号機の内部構造
Fig 2.2 Internal structure of underwater robot #1

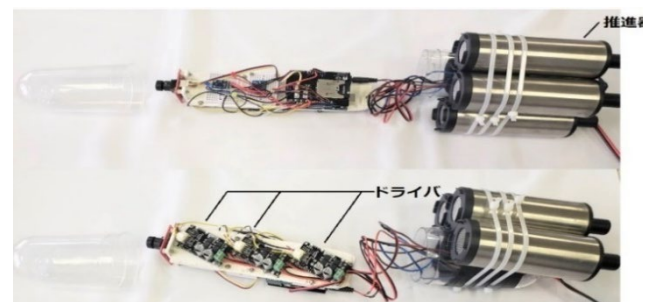


図 2.3 水中ロボット 2 号機の内部構造
Fig 2.3 Internal structure of underwater robot #2

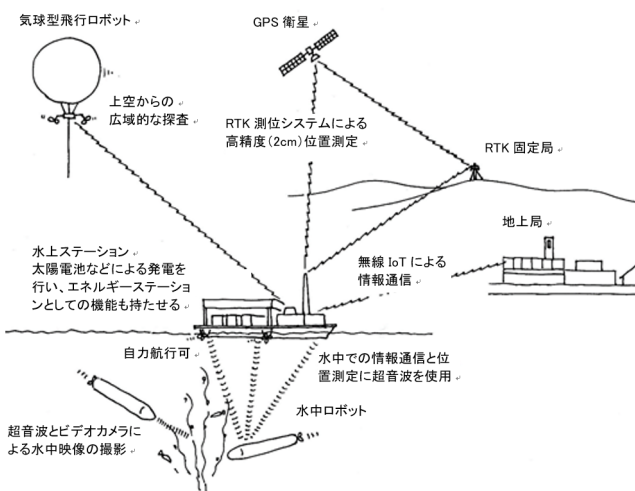


図 1.1 水中ロボットシステムのイメージ
Fig 1.1 Image of an underwater robot system

で制御する非ホロミック系として捉えることとした。スラスタとしては、家庭用や産業用の小型ポンプをスラスタとして利用した。このうち 1 号機 (図 2.2) は推進器 1 個あたりの出力 1.95W の省電力型、2 号機 (図 2.3) は出力 42W の高出力型としている。

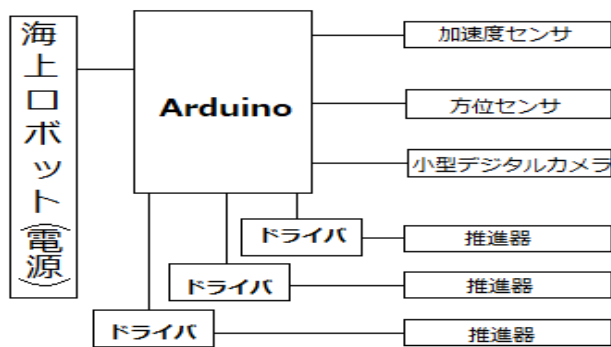


図 2.4 水中ロボットの制御系の構成

Fig 2.4 Configuration of the control system of the underwater robot

図 2.4 に水中ロボットの制御系の構成を示す。Arduino を制御用コンピュータとして 3 台の推進器を制御する構成としており、制御用センサとしての加速度センサ，方位センサを備える。前部には水中探査用の小型デジタルカメラを設けている。電力は有線で水上ロボットから供給する。水中ロボットの基礎実験は，実験室内に設置した大型水

槽で行った。図 2.5 に水槽内実験の様子を，図 2.6 に水槽内実験において水中ロボットが撮影した水中写真を示す。

2.2 水上ロボット

図 2.7，図 2.8 に水上ロボットの写真を示す。この水上ロボットは，長距離無線通信モジュールや IoT モジュール

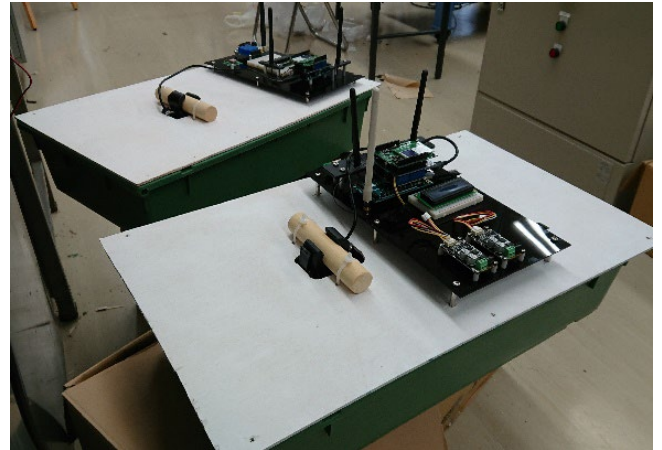


図 2.7 水上ロボット（甲板側）

Fig 2.7 Water robot (deck side)

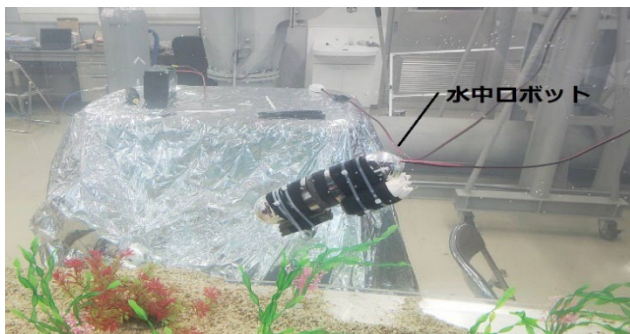


図 2.5 水中ロボットの水槽実験の様子

Fig 2.5: Underwater robot aquarium experiment



図 2.8 水上ロボット（船底側）

Fig 2.8 Water robot (bottom side)



図 2.6 水中ロボットが撮影した水中の写真

Fig 2.6 Underwater photograph taken by an underwater robot

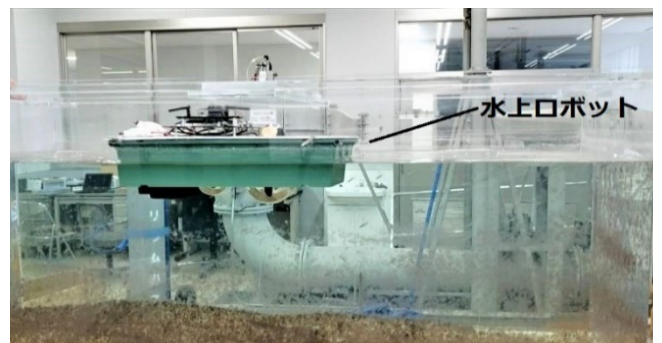


図 2.9 水上ロボットの水槽実験

Fig 2.9 Water tank experiment of water robot

を備え、地上局との直接通信やインターネットを介してのデータ伝送が可能な構成としている。また RTK 測位システムやみちびき対応 GPS を備え、水上ロボットの高精度な位置同定を可能としている。底部には大小 2 つの亚克力製ドームを備え、その内部に 360 度カメラと小型デジタルカメラを配置している。これらは、海面から水中の藻場を探

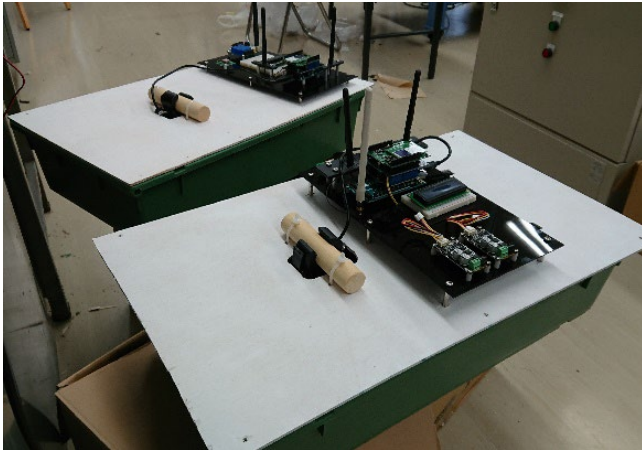


図 2.7 水上ロボット（甲板側）
Fig 2.7 Water robot (deck side)



図 2.8 水上ロボット（船底側）
Fig 2.8 Water robot (bottom side)

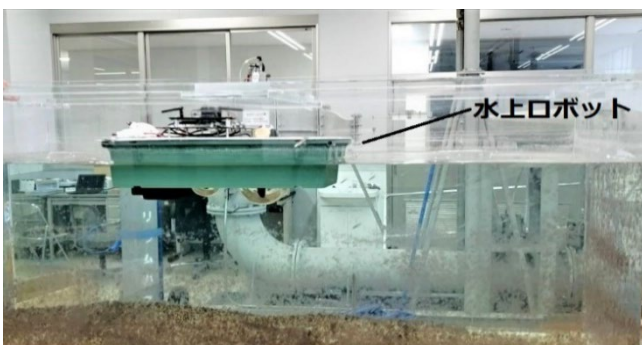


図 2.9 水上ロボットの水槽実験
Fig 2.9 Water tank experiment of water robot

索することや、水中ロボットの位置測定を行うことを目的とするものである。図 2.9 に水上ロボットの槽内実験の様子を示す。

3. 空撮による藻場情報取得

水中ロボットによる水中の自律探索では、ロボットにあ



図 3.1. 生の空撮写真
Figure 3.1. Raw aerial photography

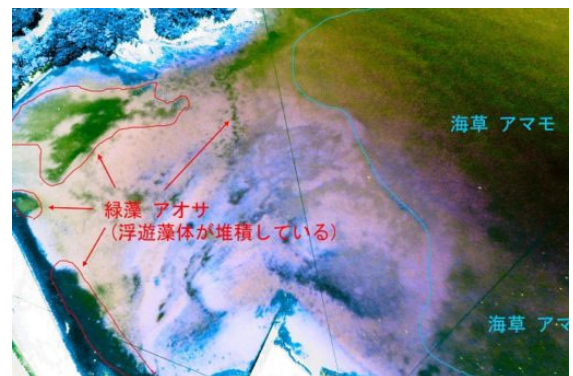


図 3.2. 画像処理による藻場領域の強調
Figure 3.2. Enhancement of seaweed bed area by image processing



図 3.3. 赤外線カメラによる空撮写真
Figure 3.3. Aerial photograph taken by infrared

らかじめ藻場の地図情報を与えておくことにより、より確実に効率的な藻場探査が期待できる。そこで気球を用いて、海面の空撮写真から藻場が判別できるかを確認するための実験を、福山大学内海生物資源研究所東側の海岸付近で行った。

図 3.1 は、気球を約 120m の高さまで上げたときの、通常のデジタルカメラによる空撮写真である。浅瀬の一部に藻場らしきものが見えるものの、海底の深さが一定以上の領域では全体に海面の青緑色が広がっており、藻場の位置が判然としない。そこで画像の微かな色の違いを強調するため、画像処理手法の一つであるカラーズワッピングを施したところ、藻場と海底の砂地の部分が異なる色となり、藻場の範囲が比較的明瞭に判別できる画像となった（図 3.2）。アオサ藻体は不定形で、アマモは線状の葉を持つが、そのような形状の違いも幾分確認できている。

次に、通常のカメラを改造して製作した赤外線カメラを用いた空撮を行った。図 3.3 は、図 3.1 と同じ海岸部を、この赤外線カメラで空撮したものである（画像処理によりモノクロ化したもの）。水中では青緑色領域以外の光は減衰が大きく、海面はほぼ黒一色となるが、植物は赤外線を強く反射する性質があるため、白色に近い色となって現れる。海面上に見られる白い筋状の部分は枯死して海底から抜けたアマモが海面を浮遊しているものである。

このように、通常の写真では判別しにくいアマモの浮遊物が、赤外線写真では明瞭に判別できる。海藻や海草が抜けて海面を浮遊する「流れ藻」は、種々の海洋動物の生息場所として海洋生物学における重要な研究対象の一つであり、赤外線空撮は、流れ藻研究に貢献する観測手段として有望である。

4. 水中ロボットの位置・姿勢推定

4.1 研究の背景

本章では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

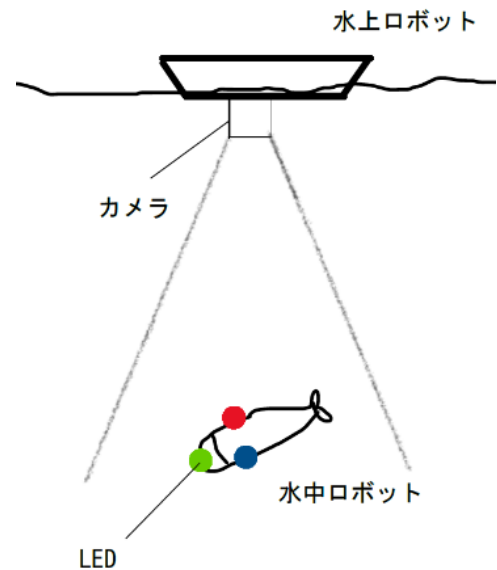


図 4.1 水中ロボット位置・姿勢推定法

Fig. 2 Underwater robot position / attitude estimation method

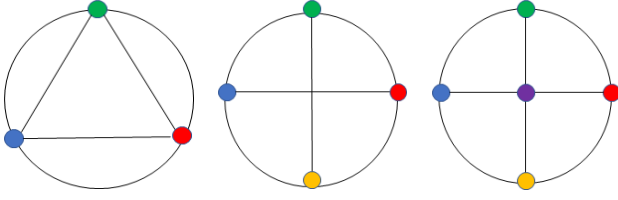
が、水中では電波が通じないために GPS が使えず、また加速度の時間積分に基づく慣性航法では積分誤差の補正が問題となる。そのため、本稿では GPS を備える水上ロボットとの相対座標を求め、水上ロボットの絶対座標を加え合わせる方法をとる。

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。

4.2 カメラ画像を用いる方法の基本案

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 4.1）。

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 $X, Y, Z, \Phi, \Theta, \Psi$ （ Φ, Θ, Ψ 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



(a) 3 個の場合 (b) 4 個の場合 (c) 5 個の場合
(a) 3 LEDs (b) 4 LEDs (c) 5 LEDs

図 4.2 LED の配置

Fig. 4.2 Layout of LEDs

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 (Φ, Θ, Ψ) 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.

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

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

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

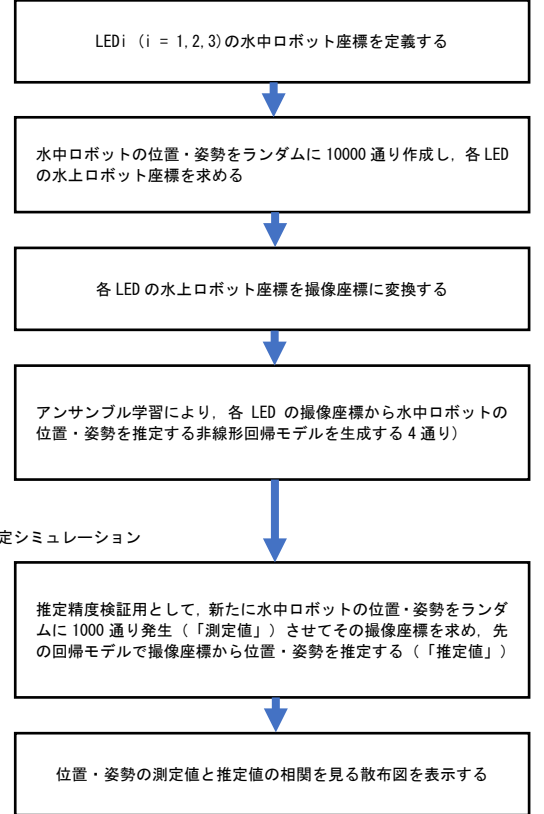
これらを用いると, LED i の水上ロボット座標は次式で表される.

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

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.

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

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 4.3 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. 4.3 Flowchart of underwater robot position / attitude estimation simulation

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

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, 姿勢角についてはヨー角のみを測定することを考える.

4.3 カメラ画像を用いる方法のシミュレーション

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。

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 4.4, 4.5 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 4.4), 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 4.5)。

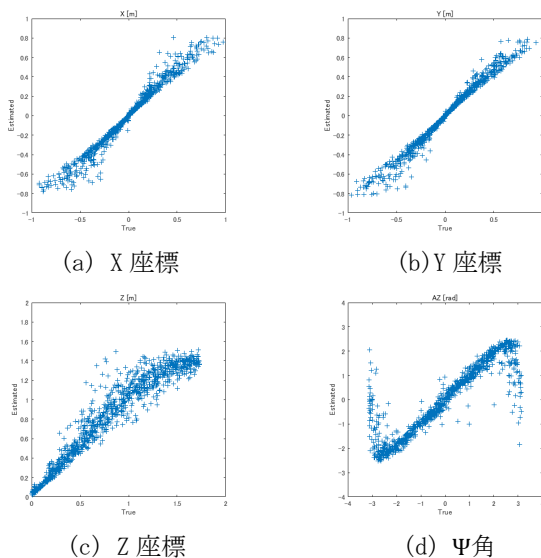


図 4.4 シミュレーションによる水中ロボット位置・姿勢推定 (LED5 個の場合)

Fig. 4.4 Underwater robot position / attitude estimation by simulation (in the case of 5 LEDs)

4.3 慣性航法を用いる方法の基本案

水上ロボットのような移動体が事故の位置を同定する方法として、慣性航法が知られている。本研究の水中ロボットでは、Arduino UNO と連動する Inven Sense 製の 6 軸加速度センサ (MPU-6050) を搭載しており、このセンサから得られたデータを Arduino 内のプログラムで数値積分 (台形積分) することで位置・姿勢を推定する慣性航法を試みた。

4.3 慣性航法を用いる方法の実験検証

平坦な場所で 6 軸加速度・ジャイロセンサ (MPU-6050) を搭載した実験装置を、長さ 1.0m の直線に移動させた時と Θ , Φ , Ψ をそれぞれ 30° 傾けた時の各時間における位置・姿勢を測定し、Arduino 内で慣性航法を用いて、位置・姿勢を推定する実験を行った。推定結果を図 4.6 に示す。

X 軸は誤差が大きく目標値から大きく外れる結果となった。また、姿勢角はロール、ヨー角に関しては理想的なグラフ結果だが、ピッチ角は誤差が大きい結果となった。これらのことから、位置・姿勢どちらも実験装置の移動速度が遅かった場合、積分時間が長くなり誤差が多く蓄積すると

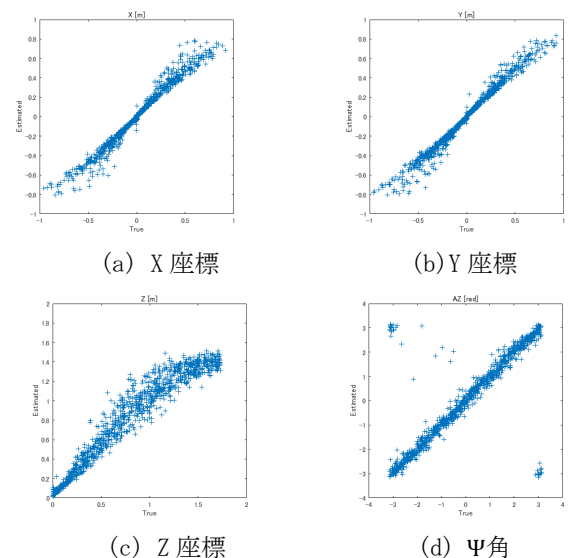
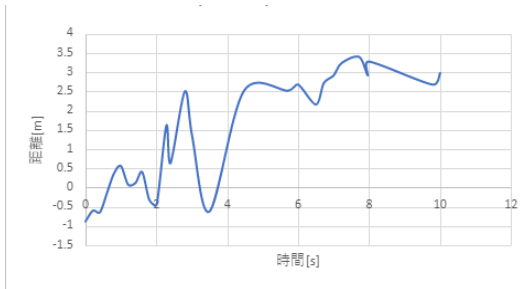
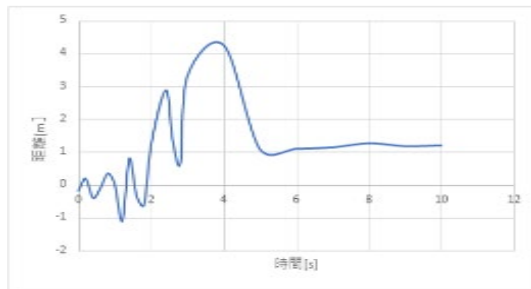


図 4.5 シミュレーションによる水中ロボット位置・姿勢推定 (LED5 個、角度を複素数に置き換えて計算)

Fig. 4.5 Underwater robot position / attitude estimation by simulation (in the case of 5 LEDs, calculated by replacing 5 LEDs and angles with complex numbers)

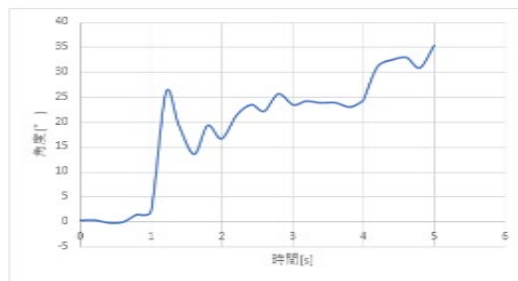


(a) X 方向 X direction

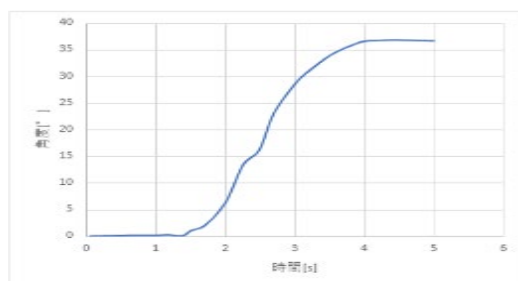


(b) Y 方向 Y direction

図 4.6 慣性航法による移動距離の推定
Fig 4.6 Estimating the distance traveled by inertial navigation



(a) ピッチ角 Pitch angle



(b) ヨー角 Yaw angle

図 4.7 慣性航法による偏角の推定
Fig 4.7 Estimating the declination by inertial navigation

考えられた.

また上述の推定システムを実機に搭載して、ドルフィン起動を目標とした制御プログラムを実行した. 本研究では, 手動で水中ロボットを1 傾けさせ, ロール角が 30° を超えると上下の推進器がそれぞれ交互に作動することを確認した.

5. 水上ロボットの自動航行機能

5.1 研究目的

本研究では, 遠隔制御を介して与えられた軌道に沿って自律航行する水上ロボットを考えた. 具体的には図 5.1 に示すような複数の通過点(赤○)を結ぶ軌道に沿って自動

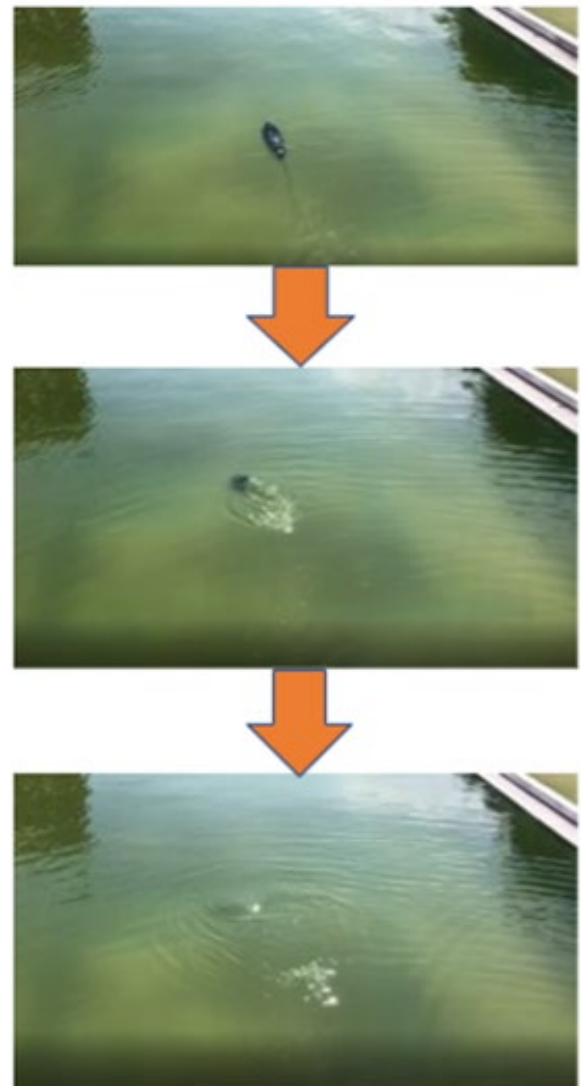


図 4.8 水中ロボットのプール内実験
Fig 4.8 Underwater robot in-pool experiment

的・自律的に巡回航行する水上ロボットについて検討した。

5.2 基本制御方策

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 5.2 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(8)の両辺を時間微分すると、

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

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、

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

$$\therefore$$

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

$\ddot{x}, \ddot{\omega}$ 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加速度、 f_1 は水上ロボット右側ポンプのスラスト推力、 f_2 は水上ロボット右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、 b は水上ロボットの中心から左側ポンプの出力

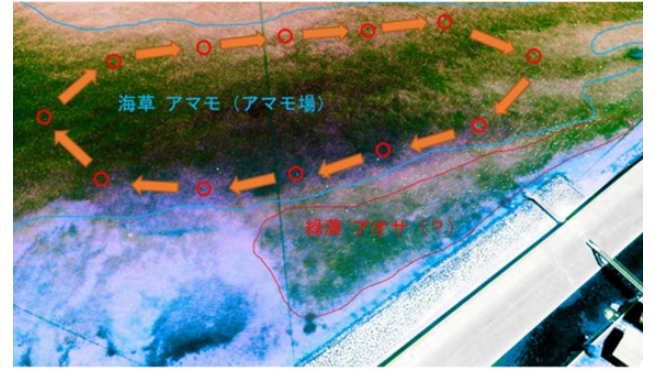


図 5.1 藻場領域内の水上ロボット目標軌道のイメージ
Figure 5.1 Image of the target trajectory of the water robot in the seaweed bed area

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。

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

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、

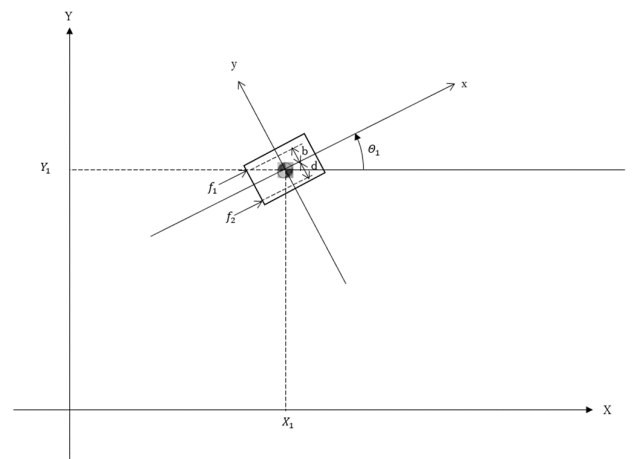


図 5.2 水上ロボットのグローバル座標系とローカル座標系 (ロボット座標系)

Fig. 5.2 Global coordinate system and local coordinate system of water robot (robot coordinate system)

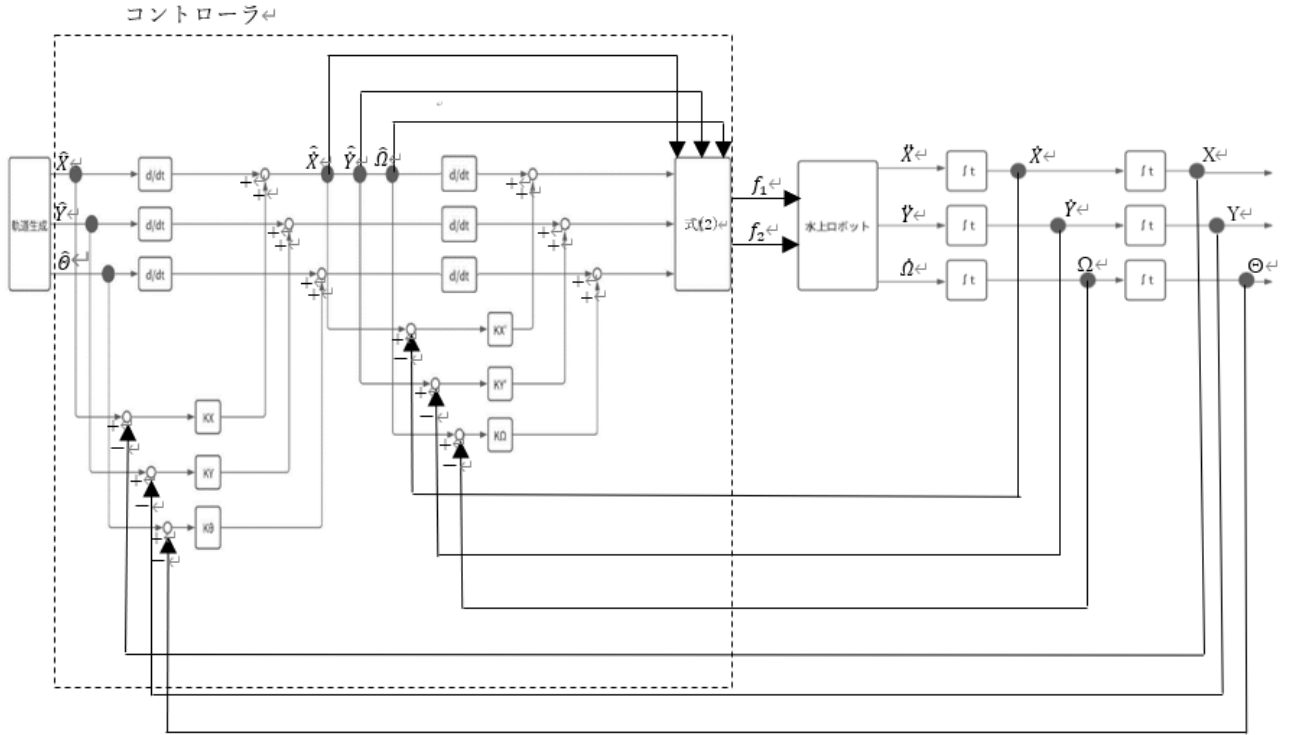


図 5.3 フィードバック制御ブロック線図

Fig. 5.3 Feedback control block diagram

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

式(12)に式(10)を代入すると

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

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。

この水上ロボットが速度目標値 $[\dot{x}_d \ \dot{y}_d \ \dot{\theta}_d]^T$ 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 $[\dot{x}_d \ \dot{y}_d \ \dot{\theta}_d]^T$ を時間微分することにより $[\ddot{x}_d \ \ddot{y}_d \ \ddot{\theta}_d]^T$ 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 $[\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{\theta}]^T$ を求める。 \ddot{y} は無視する。
- ③ 式(3)を変形した

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

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

5.3 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 5.3 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, Θ 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行った結果を図 5.4 と図 5.5 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 5.6 と図 5.7 に示す。これらのうち図 5.4 と図 5.6 は目標軌道と実際の軌跡を比較したものであり、また図 5.5 と 5.7 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

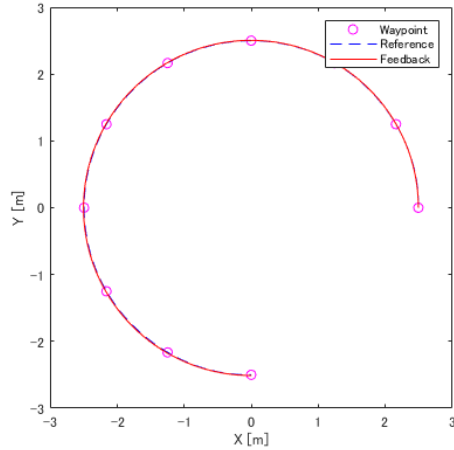


図 5.4 初期誤差がない場合のフィードバック制御の結果（破線：目標軌道，実線：実際の軌跡）

Fig. 5.4 Result of feedback control with no initial error (dashed line: target trajectory, solid line: actual trajectory)

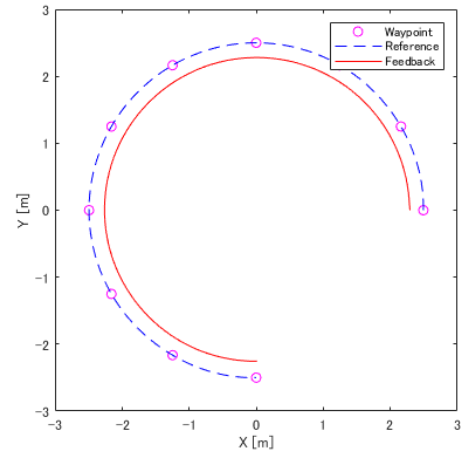


図 5.6 初期誤差がある場合のフィードバック制御の結果（破線：目標軌道，実線：実際の軌跡）

Fig. 5.6 Result of feedback control when there is an initial error (dashed line: target trajectory, solid line: actual trajectory)

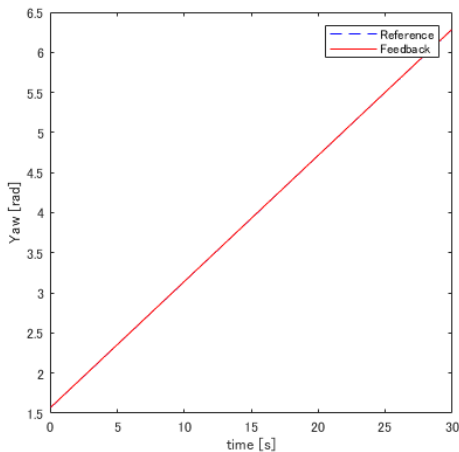


図 5.5 初期誤差がない場合のフィードバック制御の結果（破線：目標ヨー角，実線：実際のヨー角）

Fig. 5.5 Result of feedback control when there is no initial error (dashed line: target yaw angle, solid line: actual yaw angle)

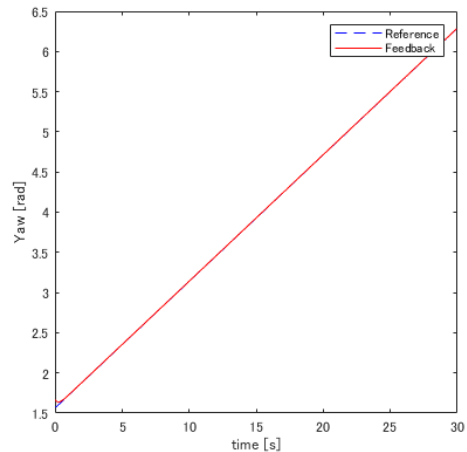


図 5.7 初期誤差がある場合のフィードバック制御の結果（破線：目標ヨー角，実線：実際のヨー角）

Fig. 5.7 Result of feedback control when there is an initial error (dashed line: target yaw angle, solid line: actual yaw angle)

ットは、いずれも図 5.4 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。

5.4 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

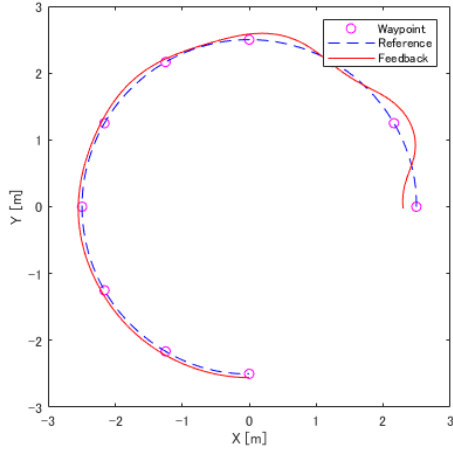


図 5.8 非ホロノミック制御の結果 ($K_p=3$, 破線：目標軌道, 実線：実際の軌跡)

Fig. 5.8 Results of nonholonomic control ($K_p = 3$, dashed line: target trajectory, solid line: actual trajectory)

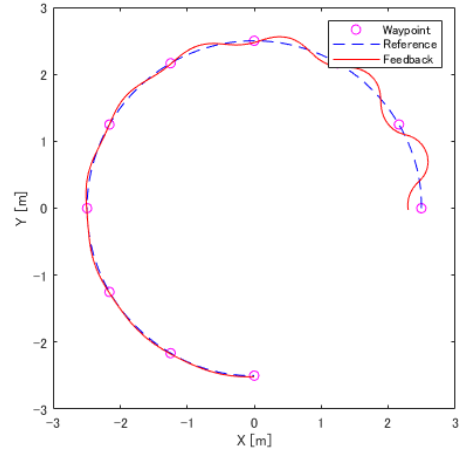


図 5.10 非ホロノミック制御の結果 ($K_p=9$, 破線：目標軌道, 実線：実際の軌跡)

Fig. 5.10 Results of nonholonomic control ($K_p = 9$, dashed line: target trajectory, solid line: actual trajectory)

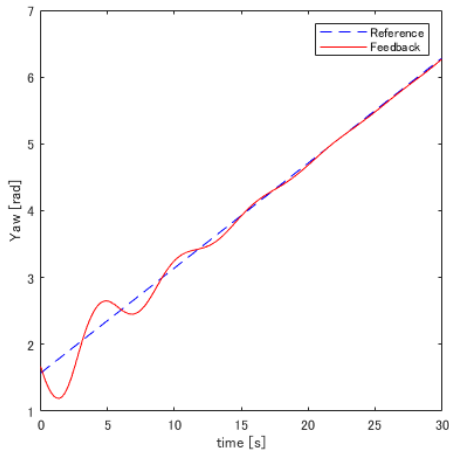


図 5.9 非ホロノミック制御の結果 ($K_p=3$, 破線：目標ヨー角, 実線：実際のヨー角)

Fig. 5.9 Results of nonholonomic control ($K_p = 3$, dashed line: target yaw angle, solid line: actual yaw angle)

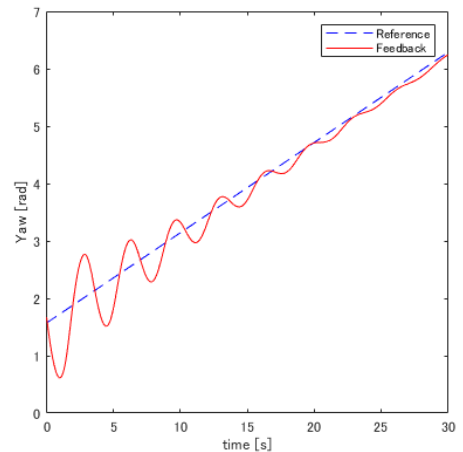


図 5.11 非ホロノミック制御の結果 ($K_p=9$, 破線：目標ヨー角, 実線：実際のヨー角)

Fig. 5.12 Results of nonholonomic control ($K_p = 9$, dashed line: target yaw angle, solid line: actual yaw angle)

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

図 5.8, 図 5.9 は $K_p=3$ としたときの結果であり, 図 5.10, 図 5.11 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

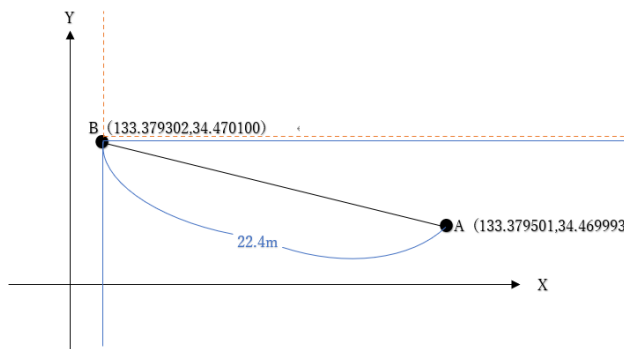


図 5.13 通過地点の座標指定例

Fig 5.13 Example of specifying coordinates of passing points

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．

5.5 GPS 動作実験

以上に述べた制御では，GPS の利用によって水上ロボットが自己の位置を同定できることを前提としている．GPS の位置同定精度等を確認するため，LED を用いて GPS の動作実験を行った．

図 5.13 に示す範囲において 22.4m 離れた 2 つの地点 A, B を基準設定した．さらに，GPS が実線で囲まれた範囲の内側にある場合は，現在地から B までの距離を計算し，距離 1m につき LED が 1 秒点灯するようにし，破線で囲まれた範囲の内側にある場合は LED が 1 秒ごとに点滅する制御プログラムを作成した．A, B の経度と緯度はそれぞれ (133.379501, 34.469993)，(133.379302, 34.470100) であった．

A 地点で LED は 21.02 秒点灯した．A B 間の距離が 21.02m であると判断されたことを意味しており，実際の距離 22.4m とほぼ誤差がない結果となった．B 地点に近づくとつれて LED の点灯時間は短縮されたが，B 地点に到着しても 3 秒ほど点灯するなどの誤差も見られた．

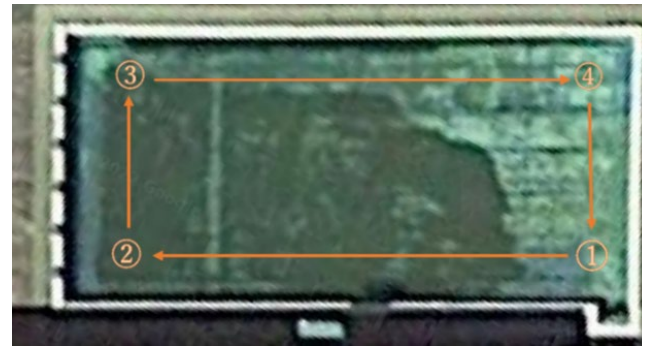


図 5.14 水中ロボットの自動航行ルート

Fig 5.14 Automatic navigation route for underwater robots

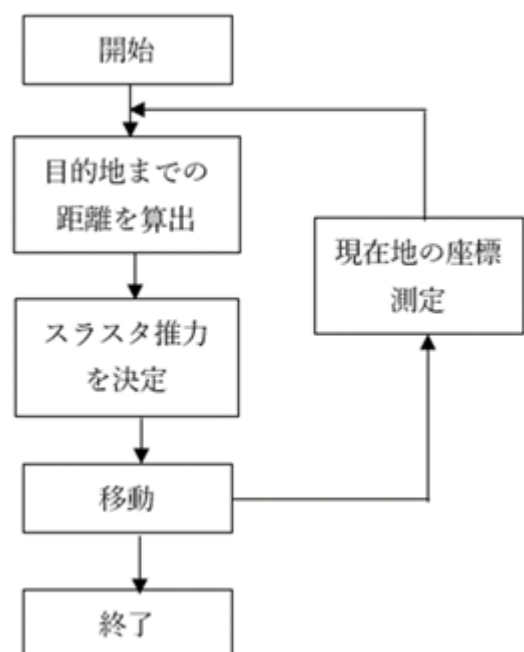


図 5.15 水上ロボットの制御フローチャート

Fig 5.15 Water robot control flowchart

破線で囲まれた範囲の中に LED を移動させると，LED は 1 秒ごとに点滅する動作を繰り返した．ただし，指定範囲に入ってすぐに点滅動作が実行されたわけではなく 2～3 秒ほどのタイムラグが見られた．

以上の結果は GPS を使うことによって，目的地までの距離に見合う出力の算出，異なる範囲に移動すると動作の切り替えができることを示している．しかし，距離に関して 3m ほどの誤差が生じる場合もあったので，水上ロボットのプログラム開発はその点を考慮して進める必要がある．

5.6 水上ロボット自律動作プログラム

5.5 節のプログラムを応用して、図 5.14 に示すプールの点①から④を時計回りに航行する水上ロボットの制御プログラムを作成した。使用したプロセッサおよび言語は Arduino である。図 5.15 にこの制御プログラムのフローチャートを示す。

6. 結 言

以上の研究を通じて、瀬戸内海の藻場探索を目的とする小型水中ロボットシステムを製作して大型水槽、プール、内海資源研究所近辺での海岸で動作実験を行い、同システムの設計・製作に関する知見を蓄積した。また気球での空撮と画像処理により、沿岸部の藻場の範囲を同定できることを示した。

基礎研究の面からは、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 つのスラスト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, (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)).

3. 藻場観測機用海中音響ビーコン／通信システム

仲嶋 一

1. まえがき

本プロジェクトは、沿岸域の藻場に移動・固定の観測機器を導入し、藻場の環境、生育状態、藻場内の生態系を観測するというものである。瀬戸内海は栄養分が多く豊穡の海である反面、微生物や流れ込む河川の影響で透明度が低く、水深 5m 程度の藻場といえども上記観測機器の位置を海上から光学的に特定することは極めて困難である。また、藻の生い茂る中を有線の ROV で移動することは、テザーが藻に絡まり航行不能になる可能性が高く、テザーレスによる航行システムも開発中であるが、このようなテザーレス自律航行システムでも、海中における自機の位置の把握が必須となる。また情報通信においても、透明度の低く導電性の高い海水中の伝搬では光や電磁波の使用が不可能であり音波が唯一の手段としてもっぱら用いられている。このため、本サブテーマでは、情報通信を兼ねた位置特定ビーコンシステムの構築を最終目標とした。

2. 海中音響ビーコン／通信システムのコンセプト

2. 1 音響ビーコンシステム

海中音響ビーコンは古くより海底油田掘削等で用いられている技術で、海底の構造物と海上の船舶等の相対位置を確保するために用いられている[1][2]。図 1 および図 2 に代表的なビーコンによる位置特定方式を示す。図 1 は海底（海中）に一つのビーコンを設置し、船舶等の海上設備に複数の受信機（Hydrophone）を特定のベースライン長を以て配置し、個々の受信機への到達時間差及び伝搬時間からビーコンの位置を特定するものである。複数の受信機を海上設備に配置するため、そのベースライン長は比較的短くなり、ショートベースライン方式と呼ばれ、3 次元的な方位を特定するため、一般に直交する方位に配置される。この方式は、海中のビーコンが一定周期で音響パルスを発するピンガー方式と、海上より音響パルスを発信し、それを受信したビーコンが音響パルスを送るトランスポンダー方式に二分される。ピンガー方式はシステム構成が簡単であるが、海上設備側では受信機間の到達時間差しか判らないので、ビーコンの到来方位 θ のみが特定できることになる。海底油田等の海底構造物であれば水深 Z が既知であるので、方位角 θ と推進 Z

からビーコンの 3 次元位置が特定できる。トランスポンダー方式では、海上設備で発信した時間からビーコンの返信の到達した時間差から絶対距離 ρ を算出することが可能であり精度が向上するとともに、ROV 等の水深が不定の対象における 3 次元位置特定が可能となる。

一方、図 2 に示す海底に複数のビーコンを設置する方式は、ロングベースライン方式と呼ばれており、トランスポンダー方式のみが可能である。海上設備より個々のビーコンを指定した音響パルス信号を発信し、対応する音響パルスを受信したビーコンだけが音響パルスを返すことで送受信間の時間遅れから個々のビーコンと海上設備との絶対距離 ρ を算出し、その各々の距離から海上設備の位置を特定するものである。この方式では、海中のビーコンの位置が既知でなければならず、海中の構造物も比較的大きくなければならないので、ROV のような小さく、かつ位置の特定できないものに使用することはできない。このため、本研究で採用する方式は、必然的にショートベースライン方式となる。

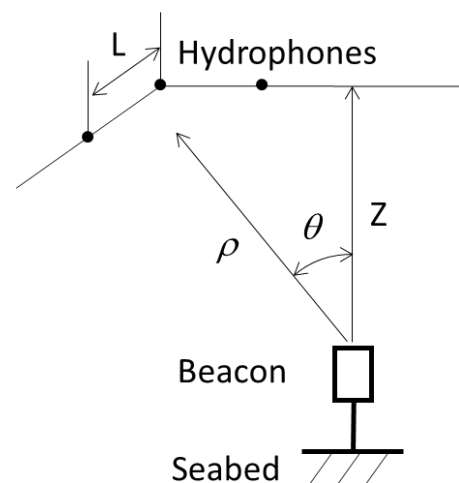


図 1 ショートベースライン方式
Fig.1 Short-baselin system

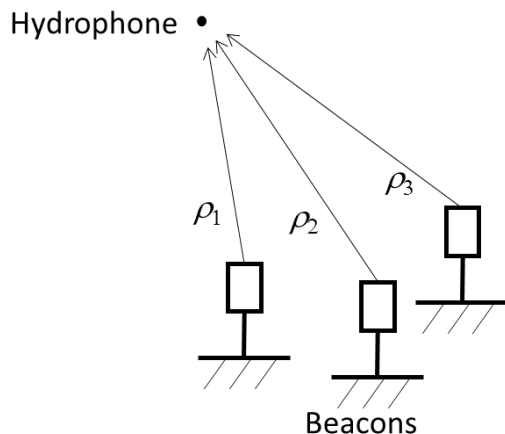


図2 ロングベースライン方式
Fig.2 Long-baseline system

2. 2 システムコンセプト

提案する海中音響ビーコン／通信システムの基本図を図3に示す。詳細は後述するが、海中機器、母船搭載機器は同等の送受信機能を持つことを想定しており、複数の圧電トランスデューサー等による送受信素子アレイと信号処理ユニットからなる。藻場観測において母船は ROV に追従して移動するものとし、ROV の動作水深を 5m 以下として通信距離を 10m と設置した。また、搭載を予定している ROV は定位置での観測を主目的としており、高速で移動する仕様とはなっておらず、速度としては 0.5 knot 程度になる見込みである。

ROV や固定観測器等海中機は藻場の中で用いられるため 0.5m 以下程度の小型に設計される。このような小型機に搭載されるため、送受信素子アレイのベ-

スライン長としては 0.2 m～0.3 m 程度に抑える必要がある。このような条件で各受信機より得られるビーコン波の位相から伝搬時間差を計測するため周波数はなるべく高いほうが有利であり、また本システムを情報通信にも併用することから、通信帯域を広げるためにも搬送周波数は高い程有利である。一方、音波では電磁波に比べて送受信機器の移動や海流によるドップラー広がりやマルチパスによる遅延広がりが多いことや[3]、高周波になるほど伝搬損失が大きくなることから搬送周波数を際限なく高くすることはできない。また圧電トランスデューサーの発信可能周波数にも限界がある。

上述のように藻場では海底や岩礁など近接して多くの反射体が存在し、先に述べたマルチパスによる遅延広がりにより信号劣化を引き起こす。また、海面も刻々と反射角度を変化させる除去の困難な動的障害となる。このため、ビーコンと母船送受信機広がり角の狭いビームで相互に音響信号を伝送し合うことが好ましい。一方、個々の送受信素子アレイにとって送受信相手の機器がどの方位に存在しているかは不特定であるため、全方位に亘って狭角のビームを形成する必要がある。このような要求から、送受信素子アレイとして水平円周上に複数の素子を配置した構成とし、移相器によって個々の素子へ入力する信号の遅れ時間を制御することで角度選択性の高い狭角の音響ビームを形成する[5]。図では 4 方位に素子を配置しているが、各素子の発信音響波が干渉しなければならないため、個々の素子の広がり角によって配列の個数を設定する必要がある。

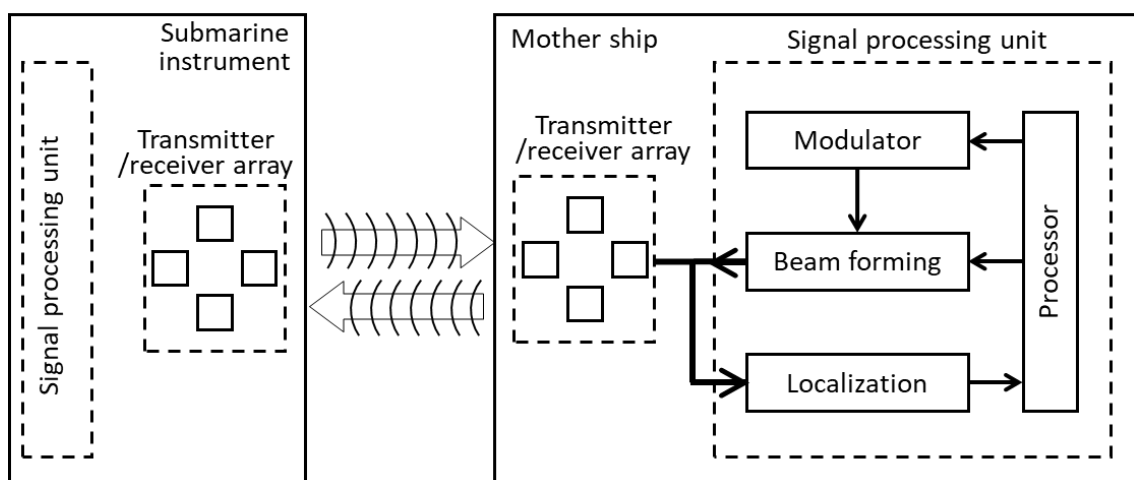


図3 ビーコン／通信システムの基本構成図
Fig.3 Basic structure of the beacon/communication system.

2. 3 信号処理の流れ

遅延広がり除去や信号パワーの面から音響ビームは前述の通り狭角の方が良いが、初期状態や何らかのトラブルで相手の方位を見失った場合には、全方位に亘って相手を探索する必要がある。この場合は一方がピンガーを發し、他方が受信して位置特定をするピンガーモードを採用することとした。ピンガーを發するのは、海中機と母船の何れでも良いが、図4では海中機をピンガーを發するビーコンに設定して表している。ビーコン側では狭角ビーコン波を順次全方位に亘ってスキャンする。母船の受信機は受信信号を全方位に対して定位モジュール (Localization module) にてビームフォーミングによる走査を行ってビーコン波の検出を行い、検出された場合にはその方位に向けて応答信号を發信する。海中機は母船からの応答信号を一定期間待ち、応答が無ければ次の走査方向に向けて移相器の設定を変更してピンガーを發信し、以降、前述を繰り返す。

一旦ビーコン波を捉え、母船は応答信号を返信しトランスポンダーモードに移行する。同様に海中機も母船の応答信号を受信するとトランスポンダーモードに移行する。トランスポンダーモードではパケットの送受信を繰り返し、常に定位モジュールに依って互いの位置が把握される。上記パケットには通信情報が挿入されるが、ない場合にもダミー信号が交換され、継続的追尾を行う。

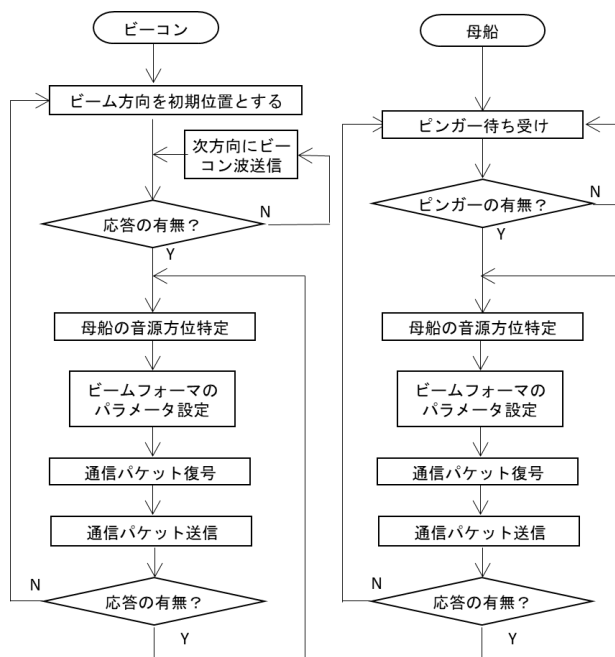


図4 処理の流れ

Fig.4 Basic structure of the beacon/communication system.

3. 市販レジャー用ソナー素子を用いた送受信系の基礎検討

3. 1 送受信用発振子の選定

送受信システムの構築のためには耐水性のある小型の素子が必要であるが、現状入手可能なもので適切な素子は見いだせなかったため、アレイ化には不利であるが入手の容易なレジャー用のソナー素子で基礎的な実験を行うこととした。入手性の良いレジャー用ソナーの周波数が 200kHz であったことと、水中における減衰が 200kHz で約 50dB/km[4]と想定使用範囲である 10m で 10dB に減衰が収まることから、搬送周波数を 200kHz とし、本検討をおこなった。上記の条件におけるドップラー広がりを検討すると、ドップラー広がり距離を L 、移動体の速度または海流の伝搬方向成分を v 、音速を c 、音響周波数を f とした場合、到達波の位相変動 ϕ は、

$$\phi = 2\pi L \frac{V}{c^2} \cdots (1)$$

で求めることができる。 $L=10\text{ m}$ 、 $c=1500\text{ m/s}$ 、許容位相変動を BPSK の限界である $\pi/2$ (1/4 周期) とすると、許容速度は 0.28 m/s (0.55 knot) となる。この値は ROV の航行能力に対してマージンのない値であるが、藻場の実際の海流環境や運用状況により将来的に再設定することとしている。

選定したソナーは本多電子製レジャー用振動子 TD4A である。発信周波数は 200 kHz であるが、その他の仕様は公開されていないため、まずその確認を行った。図5に選定したソナーの周波数特性を示す。この特性は、二つのソナーを水中で対抗させ、一方を送信、他方を受信として送信ソナーへの入力電圧振幅に対する受信ソナーの出力電圧の比をとったもので、実際の送受信系における伝搬特性となる。公称どおり 200 kHz で最大となり、半値全幅で約 40 kHz の特性となっている。図6にソナー素子の指向特性の測定結果を示すが、半値全角で 10° 程度となっており非常に狭角のビームとなっている。海中である程度の許容度を持って送信ソナーからのビーコン波を捉えるためには、半値全角で 30° 、5 m の距離にて 2.8 m 以上の広がりが必要と考えられたため、ソナー出射前面に凸面の反射体を設置して拡散させる構成とした。図7に試作した送受信部の写真を、図8にその指向特性の測定結果を示す。ソナーの出射ビーム径を出射面と同じ 40 mm とし、拡散用に $R=57.15\text{ mm}$ の市販ステンレス半球を切断してソナー前面に配置した。ソナーの軸線は拡散用半球

の赤道面から 0.7R だけオフセットしている．この構成による出射波は半値全角約 30° で広がっており，ほぼ設計通りの特性となっている．

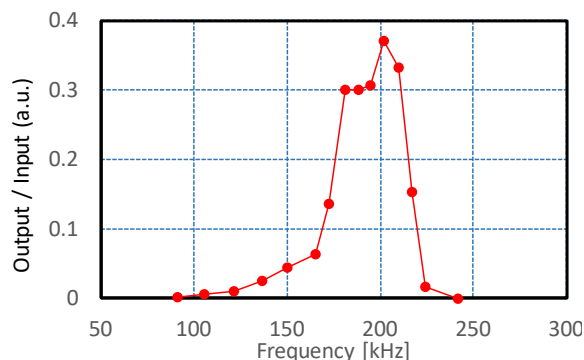


図 5 ソナー出力の周波数特性

Fig.5 Frequency characteristics of soner element.

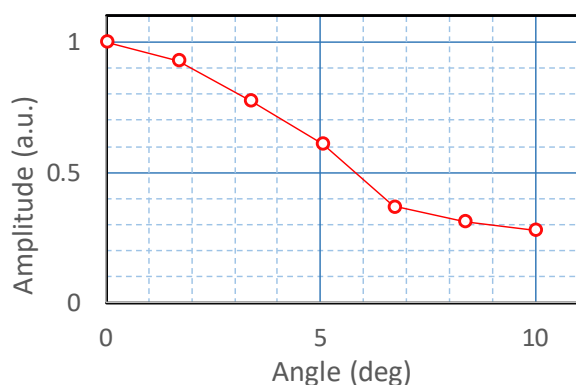


図 6 ソナーの指向特性

Fig.6 Directional characteristics of soner element.

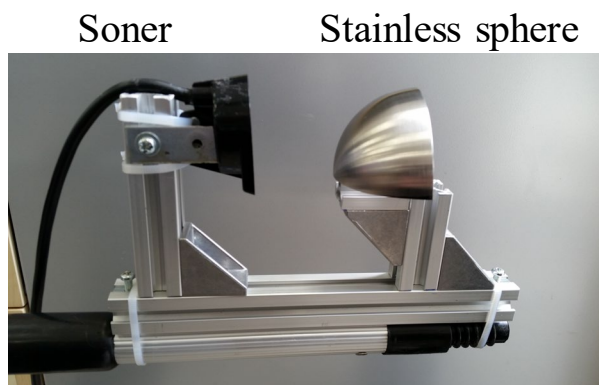


図 7 試作した送受信モジュール

Fig.7 Transmit and receive module.

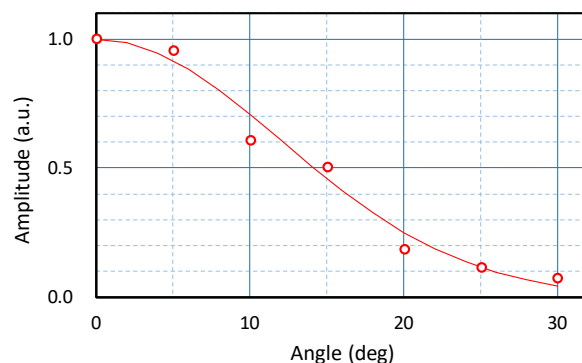


図 8 拡散送受信部の指向特性

Fig.8 Directional characteristics of soner element.

3. 2 素子による到来角度検出精度の評価

前節で述べた送受信モジュールを 3 個使い，2 個をベースライン長 0.2 m の受信モジュールアレイとした基本的ショートベースラインシステムを構成し，その特性を評価した．測定した水槽の寸法の制限から，送信モジュールと受信モジュールアレイの距離を 0.5m とし，受信モジュールアレイのベースラインに平行に送信モジュールを移動させて個々の位置でビーコン波の到来時間差を測定し，到来角度の推定精度を評価した．なお，送信モジュールの原点はベースラインの垂直 2 等分線とした．

図 9 に受信モジュールを原点に置いた場合の各受信モジュールの受信信号と送信モジュールの駆動信号を示す．送信には周波数 200 kHz の矩形波を用い，マルチパスによる干渉の影響を除去するため，4 周期駆動して 64 周期分休止するバースト信号とした．受信信号間には若干の時間差があるが，これは両モジュールの作成誤差による固定の誤差成分と考えられる．このため，以降の計算では，この時間差は固定のオフセットとして除去している．また，図では駆動に対して直後に受信信号が表れているように見えるが，実際は伝搬遅れによりバースト周期の 1 周期遅れの信号が検出されている．主の波束の前に小さな波束が観測されるが，これはソナーへの直接波で，拡散用半球からの反射波は半球とソナーとの距離 50mm での伝搬遅れ約 $33 \mu s$ を以って観測されている．

図 10 に各送信モジュール位置における到来時間差から算出した到来方位を示す．到来時間差は相互相関のピークを得る時間差としている．到来方位の計算は平面波を仮定しているが，測定では送受信間の距離が近いこと誤差の発生が見込まれるが，ほぼ計算に近い値が得られている．位置 200mm 以上で測定結果が大きく外れているが，到来波の入射方位がモジュールの指

向角度である半値角 15° を超え受信振幅が下がって
 関連ピークの検出が不正確になったためである。

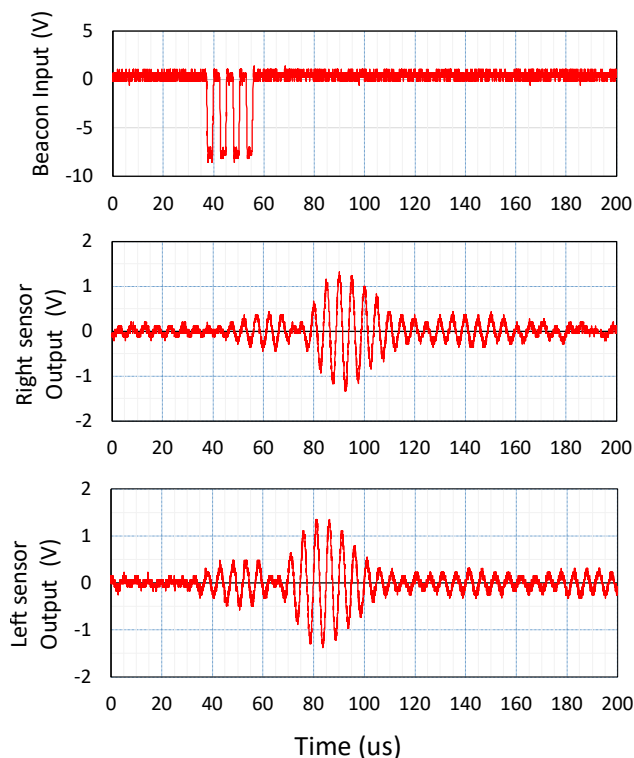


図 9 ショートベースラインモジュールの受信波形
 Fig.9 Received signal of short baseline module.

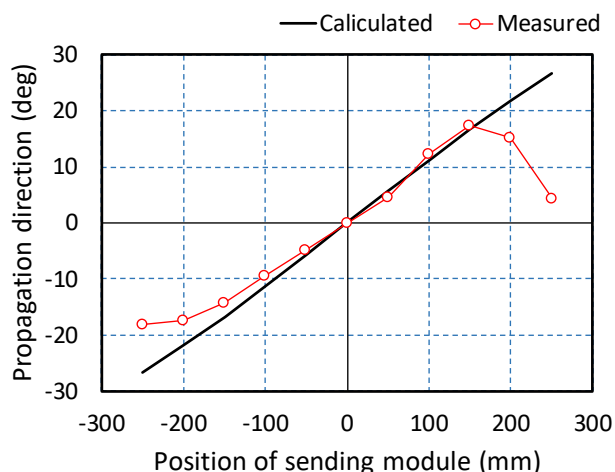


図 10 到来方位の推定結果
 Fig.8 Estimation result of propagation direction.

3. 3 ソナーを送受信機とし評価のまとめ

ソナーを送信素子および受信素子に用いて送受信
 信号および到来角推定性能を確認することができた

が、ソナー素子の指向特性が狭角であったことからビーム拡散用の凹面鏡を素子前面に設置する必要があり、ROV への搭載としては現実味のないものとなった。このため、積層セラミックアクチュエータによる小型化を試みることにした。

4. 積層圧電アクチュエータ (Multilayer Piezoelectric Actuator: MPA) を用いた送受信系の検討

4. 1 MPA 送受信素子の選定

前章で述べたように送受信器は小型の素子が必要であり、かつ小型の ROV で使用することから定電圧で駆動できることが好ましい。このような要求から、送信素子として積層圧電アクチュエータ (MPA, トーキン AE0505D16DF 駆動面寸法: 5×5 mm, 共振周波: 69 kHz) を選定した。この素子の最大発生力は 0.34 MPa であり、音響波の発生源としては十分である。一方、本素子を受信機として使用した場合には十分な受信感度が得られず、直径 20mm, 振動周波数 5 MHz の超音波振動子 (メーカー不明) を用いた。これは出力回路としてチャージアンプを用いていることが原因である可能性があり、今後共用化の可能性を検討していく。

4. 2 MPA による送受信システム評価用回路

評価送受信システムの概略構成を図 11 に示す。送信系としては、搬送波周波数 50 kHz の BPSK 変調とした。シンボルはアイパターン評価のため M 系列符号とし、特性多項式 (4,1) の 4bit または特性多項式 (5,2) の 5bit, シンボルレートは 6.25 k symbol/s または 3.125 k symbol/s で構成した。

ロジック回路は FPGA (Cyclone IV) 内で構成し、FPGA 出力をゲート駆動信号として MOS トランジスタの H ブリッジにより積層圧電アクチュエータを駆動している。

検出回路の初段アンプには容量 100 pF と抵抗 27 k Ω を並列に使用し、58 kHz を遮断周波数とする高域遮断フィルタを構成し、不要な低域で積分特性が現

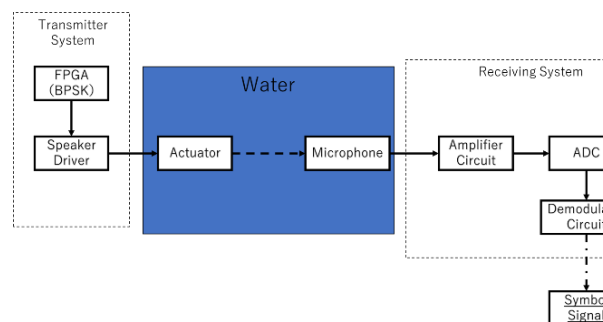


図 11 送受信システムの概略構成
 Fig.11 An outline of transmit and receive system.

れないようにしている．また，後段は遮断周波数 106 Hz, 141 kHz, 利得 7.5 倍の帯域通過フィルタ 2 段で構成されている．復調回路としては，図 1 2 に示すような PLL を用いた構成を考えているが，評価段階においては，変調におけるクロックを復調にも用いることが可能であり，PLL による同期検波は実施せず，Matlab におけるソフトウェア上で，検波及び復調を行っている．

4. 4 MPA素子による送受信実験

作製した送受信系を用い，因島にある福山大学マリンバイオセンターの大型水槽を借用して実験を実施した．水槽は 150 トンの容量があり樹脂製の岩礁が設置され，種々の近海魚が飼育されている．また，海水が循環されており，水面は常に波打っている．送受信系は，図 1 4 のようにバックヤードからアルミニウム

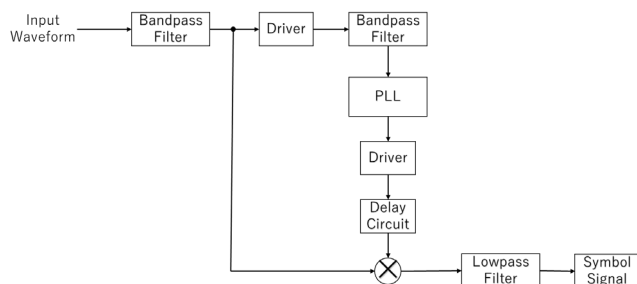
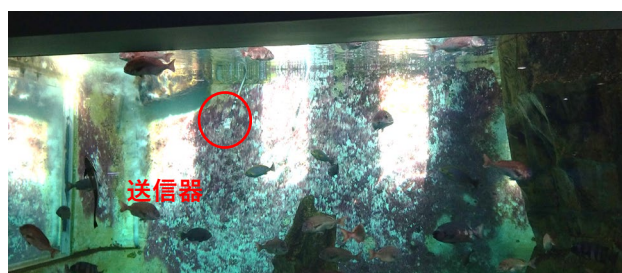


図 1 2 復調回路のブロック図
Fig.12 A block diagram of demodulator .



(a)

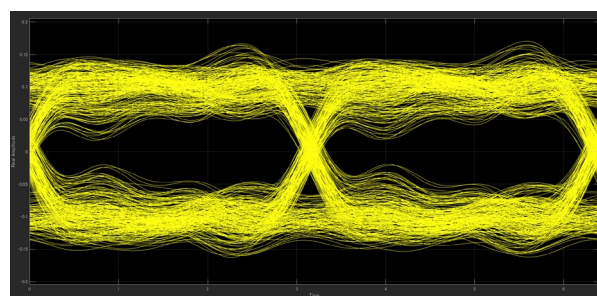


(B)

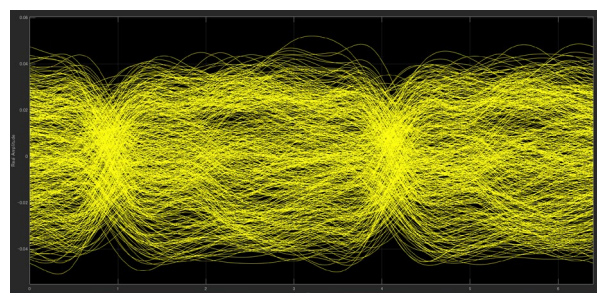
図 1 4 マリンバイオセンター150 トン大型水槽での送受信実験風景
Fig.14 Transmit and receive experiment in a big aquarium in Marin Bio Center.

製のポールに装着して，水槽内に配置した．送信器を図中丸印で囲んでいる．

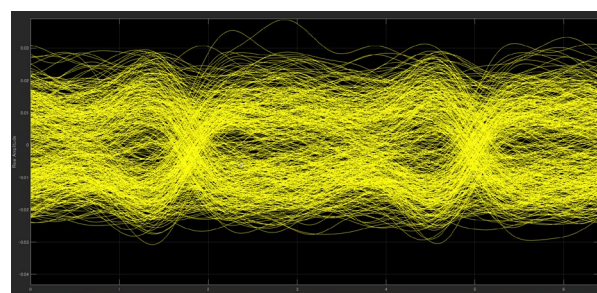
図 1 5 に受信信号のアイパターンの 1 例を示す．本信号は，送受信器を水面より約 0.5 m の深さに水面と平行に設置している．(a)の送受信間距離 0.5 m ではアイパターンは開いているが，(b)の 1 m ではアイが全く開いていない．一方，(c)の 2 m では，さらに距離が離れているにもかかわらず若干アイパターンが改善している．これは水面での反射によるマルチパスが関係していると推察され，一旦は直接波の減少に対する水面反射波の増加により信号品質が大幅に劣化したものの，距離が増加し，水面に対する反射角度が浅くなったことで，水面による散乱反射波の多くが受信機に到達せず，深さ方向に拡散していったためと考えられる．図 1 6 8 に送受信系の設置深度を約 2m とした場合のアイパターンを示している．図 1 5 で同様の送受信間距離 1 m に比較して良好なパターンが得られており，水面での反射が減少したためと考えられる．



(a) 0.5 m



(b) 1 m



(c) 2 m

図 1 5 受信信号のアイパターンによる評価
Fig.15 An estimation of received signals by eye-patterns.

4. 4 MPA送受信素子評価のまとめ

ソナーに対してMPAは素子サイズが小さく、また搬送波の周波数を50 kHzと低周波に設定したこともあって、搬送波の波長が素子サイズに比べて大きく、ほぼ全方位に発散しているものと考えられる。このため、信号品質は送受信器間隔が大きくなるにつれて急速に劣化した。また、マルチパスによる信号劣化も側方への伝搬波が多いことから必然のことといえ、当初の設計通り、アレイによる指向性の制御が必須である。今後、アレイ化を進めていかなければならないが、MPAは変位量を大きくとるため積層数が多く、微弱な電圧で駆動できる反面、海水への伝達効率を上げるために駆動面積を増やすと素子価格が急速に上昇する。このため、積層数が比較的少なく、かつ駆動面積の大きな、本用途に適合した素子の模索も並行して進めていかなければならない。

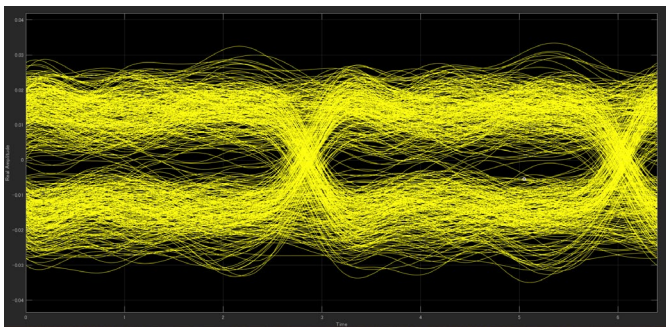


図16 送受信器の設置深度約2 m および距離1 m でのアイパターン

Fig.16 An eye-pattern at a device distance of about 1.0m and a depth of about 2 m.

5. まとめ

藻場観測機器の位置を特定するための音響位置特定システムの送受信系の開発について、ソナーを送受信素子としたものと、積層圧電アクチュエータ(MPA)を素子としたものについて評価し、その結果を報告した。ソナー素子では指向特性が狭角であることから、拡散のための構造が必要となり、小型のROVへの搭載に問題がある。また、マルチパスと考えられる信号劣化が激しく、現状で目的の10 mの通信距離を確保できる見通しは得られていない。距離に対する信号振幅の低下も大きいことから、アレイ化による送信波の狭角度化によって、信号低下とマルチパス波の発生両方を抑制することが有効と考えられ、今後の課題である。一方、ソナー素子も音波強度は高くとれること、広角のソナーも存在していることから、候補として検討を継続していく。

参考文献

- [1] 岸康太郎, 野々瀬茂, 富岡源一郎: 音響式大深度位置検知装置, 日本造船学会誌. **613**, 368-373, (1980).
- [2] 横山謙三, 山下重之: 海洋開発における計測と制御, 計測と制御. **9(5)**, 361-376, (1970).
- [3] 海老原格, 小笠原英子: 海洋開発を支える水中音響通信, 日本音響学会誌 **72(8)**, pp. 471-476, (2016).
- [4] 浅野太: 音のアレイ信号処理, コロナ社, 271pp., (2011).
- [5] 永田仁史, 安倍正人, 城戸健一: 多数センサによる音源位置の推定, 日本音響学会誌 **46**, (1990)

AIを用いた海中ロボットの 自律航行支援システムの開発

池岡 宏

1. まえがき

瀬戸内海に点在する藻場は、魚の餌場であり、隠れ家でもあることから、魚の生態観察の場として非常に重要視されている。実際、効率よく藻場を発見し、その状況を観察したいという要望がある。藻場探索や水中観察には、カメラを搭載した海中ロボットを人間が操縦することで実現可能であるが、岩などの障害物を回避しつつ藻場を探索するには一定レベルの操縦技術が求められるほか、広い海域を効率よく藻場探索を行うには、多数の海中ロボットを活用が望ましく、その場合、海中ロボット数分だけの人員も必要となる。

従って、広範囲にわたって海底の藻場を探索するには、海中ロボットの航行制御を自動化し、人的負荷の軽減を図ることができれば、その恩恵は非常に大きい。本研究では自動制御化の実現にあたり、海中ロボットに備えた各種センサからの情報をもとに海中の状況をリアルタイムに把握しつつ、事前情報も活用しながら効率良く藻場探索を可能とする海中ロボットの自動航行支援システムの提供を目指す。特に本システムで自動化の核を担う AI の開発が本研究の主目的である。

2. システム開発

2. 1 システム構成と AI の役割

海中ロボットに搭載されたカメラより画像情報を、超音波距離計により距離情報をそれぞれ取得する。本システムは、これらの情報を基に海中ロボット近傍の周囲の環境を把握する周囲環境認識用 AI を備える。この AI の出力する周囲環境の情報に加え、事前に持っている海底メッシュデータ等の地図情報や人工衛星等から得られた大まかな藻場分布情報を、次段の自動航行支援用 AI に入力し、海中ロボットの航行用モータを制御することで、効率的に藻場探索を行うことを目指した（図 1）。

従って、本システムの開発のメインテーマは、周囲環境認識とモータ制御を行う自動航行支援に関わる二つ AI の開発である。

2. 2 自動航行支援用 AI の開発

藻場探索のための海中航行を支援する AI の学習を、ただちに実環境で実施することは極めて困難であることから、まず基礎学習が可能なシミュレーション環境を用意することにした。その際、Unity の機械学習フレームワークである ML-Agents を使って構築した（図 2）。海中ロボットには、カメラを想定した藻場認識センサおよび超音波距離計を想定した正面前方の一点だけ距離推定可能なセンサの搭載を仮定した。なお、実際の超音波距離計の検出領域は上記仮定のように単純ではないが、ここでは無視した。基礎実験にあたってマップは、ランダムな凹凸を持つ地形に加え、やはりランダムに配置した藻場が存在する海中において、藻場探索実行するように AI の学習を行った。報酬設計において、藻場探索成功時にプラス、地形や岩への衝突および時間経過でマイナスとなるようにし、また海底の様子を近似するにあ

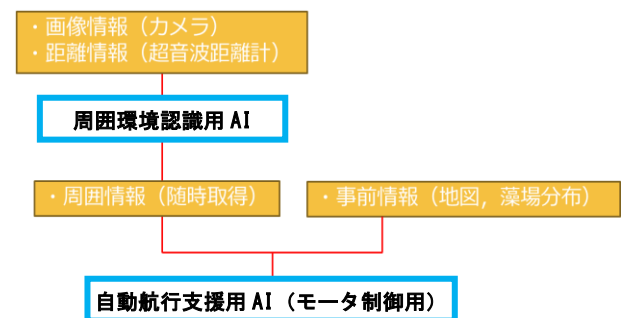


図 1 自律航行支援システムの概要

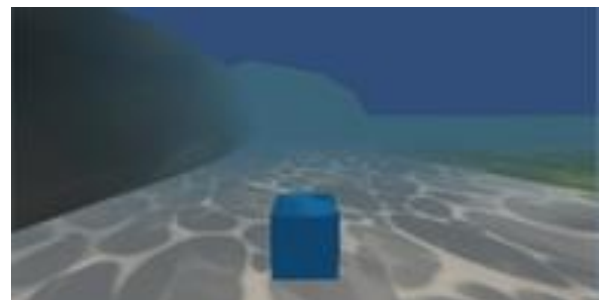


図 2 藻場探索シミュレータの様子

たり、海洋メッシュデータ（約 10m 間隔）を使い地形再現も試みた．まずは、一般的な強化学習（アルゴリズムには PPO[1]を採用）で AI の学習を試みた．その際の報酬設計では、藻場発見時に+1 とし、毎フレームで-0.001、岩に衝突時のマイナス報酬については-100~-300 で実験を行った．ただし、どの報酬設定時でも期待した十分な精度が得られなかった．

そこで、一般的な報酬設計に基づいた強化学習だけでなく、模倣学習による AI の開発も試みた．模倣学習とは、あらかじめ人間の手により模範となる行動を与え、それをもとに強化学習を行うことで AI が学習を行う方法であり、一般的に模範となるデータを与えない通常の強化学習よりも、学習に成功しやすく、学習時間も短いとされる（図 3）．模倣学習の導入により、強化学習と同じ1万ステップの学習後、シミュレータ上での藻場探索時間を3分間と固定し、岩への衝突回数を比較した．その結果、地面や岩への衝突回数が 7.6 回から 3.6 回に減少し改善傾向が見られたものの、藻場探索能力に関しては大きな改善は見られなかった（図 4）．また、岩への衝突時のマイナス報酬を-200 に設定した模倣学習の衝突回数が最少であった．一方、藻場の発見回数については、強化学習の場合は岩への衝突時のマイナス報酬の大小はあまり大きな影響与えないが、模倣学習でのマイナス報酬値は大きく変動することが分かった．

なお、岩等の障害物を回避する AI については、比較的容易に実現できる可能性があることがわかったものの、藻場探索 AI の開発という目的を達成するには AI への入力情報に関してもう少し工夫が必要であると思われる．また、局所的な画像や距離といった単純なデータだけでは、広範囲の藻場探索は難しく、予め藻場の生育位置や海流等の情報を加味した学習環境を用意するなどの対策が必要であろう．

なお、PC ではなく組み込み環境で AI 動作確認を行うにあたって小型コンピュータ Jetson Nano を利用した実験も実施した（図 5）．なお、この実験における藻場探索は 2 次元平面に限定し、AI の航路判断のもと試しに接続した水中モータを駆動する簡易的な実験を実施した．なお、水中モータは海中ロボットの左右に装着されていると仮定し、前後および旋回のみができるものとして、AI の指示に従い、水中モータを連動させた．実際には、潜水・浮上といった動作や水流を考慮したモータ駆動などが求められることから、最終的にさらに複雑な条件・環境下での AI の学習やその他処理の工夫が必要になるであろう．

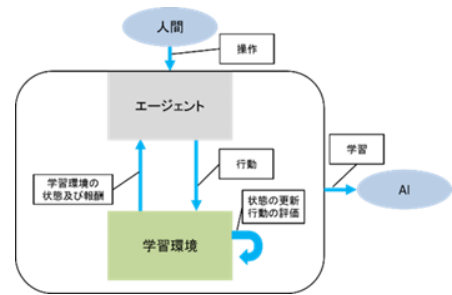
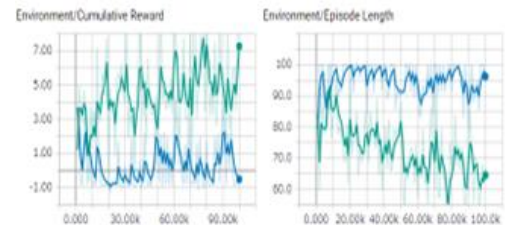


図 3 藻場探索で用いた模倣学習の概略図



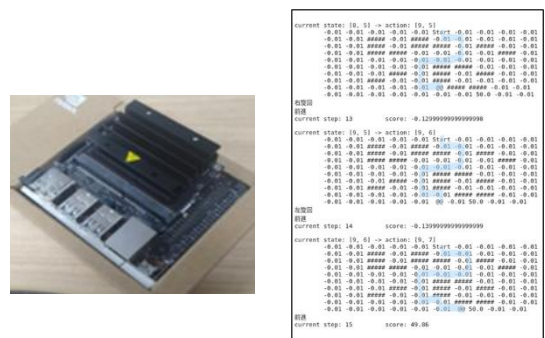
(a) 学習・検証データにおける損失変化



(b) 学習に伴う累積報酬、エピソード長

※緑・青色で学習 2 回分を表記

図 4 藻場探索シミュレータにおける学習過程



(a) AI を実装した Jetson Nano とその動作実験



(b) 確認用のモータドライバと水中モータ

図 5 組み込みシステム上での AI 動作確認

2. 3 周囲環境認識用 AI の開発

入力画像の全画素にクラス分類するセグメンテーション技術として、ピクセルごとにクラス分類するセマンティックセグメンテーションや、ピクセルごとにクラス分類しつつ個体も識別するインスタンスセグメンテーションなどがあるが、周囲環境認識用 AI の開発にあたって前者のアルゴリズムを利用することにした。

以下に具体的な AI 学習手順について述べる。まず、水中撮影の動画から、藻場の分布や地面の位置などの構図が大きく異なる画像 10 枚を適当に選択した。続いて、アノテーションツール「labelme」を用いて、全 10 枚の画像に対して藻場領域を手作業で丁寧に範囲選択した（図 6）。なお、アノテーションとは、対象となるデータに対して正解ラベル（タグ）や対象物の座標等に関する情報を付与することである。近くのアマモに対しては、できるだけ丁寧に輪郭線を手動でトレースし、遠方については鮮鋭度が落ちることから、おおよその位置を藻場領域としてアノテーションを付けるかまたは無視することにした。なお、海中ロボットの航行には障害物（地面や岩）の領域認識は必須である。動画データ中に存在する障害物（地面）領域についても藻場と同様の学習手順を踏むことで、藻場および地面の両方を同時に認識する AI の開発を進めた（図 7）。

なお、アノテーション作業は非常に手間のかかる作業であり、この負担を軽減するため周囲環境認識用 AI の開発にあたって転移学習を活用している。転移学習とは、既に何らかの学習済みのモデルに対して、追加学習を行い新たな AI を開発する方法のことである。事前の大量の学習を通して、物体の特徴抽出（例えばエッジ抽出など）を行う能力などを獲得済みであることから、わずかな追加学習データおよび学習時間で、新たな物体の認識が可能になる。セマンティックセグメンテーション用 AI を持ち、オープンソースとして提供される DeepLabv3+[2]は、様々な物体について学習済みであるものの、藻場画像の学習はもちろん、水中画像を使った学習はなされていない。そこで藻場の学習を別途追加実施することで、AI を一から開発するのではなく、少ないコストで AI を構築することにした。実際、藻場の学習データが比較的少ないにも関わらず高い識別精度が得られたことは、転移学習に成功したためと考えられる。

なお、今回の転移学習では画像データ 10 枚を使い 300 回の学習を実施した。その際、学習の所要時間は約 CPU の使用で約 29 分、GPU 使用で約 3 分と非常に短い時間で済ませることができたことを確認した。

2. 4 学習用教師データの自動生成

セマンティックセグメンテーションを行うにあたり教師データの用意が必要となるが、その際ツールを使った手作業によるアノテーション作業に非常に手間を要する。実際今回利用した画像データは、目標となる海中ロボットで利用するカメラとは異なる。したがって、カメラを変更した場合、あらためてアノテーションデータを作り直す必要があり、これは



(a) 藻場領域の手動選択の様子



(b) 地面領域の手動選択の様子

図 6 アノテーション作業の例



赤画素：AI が藻場と認識した領域

緑画素：AI が地面と認識した領域

図 7 AI による藻場及び地面の領域の認識

カメラや光学系の選定作業等に伴い毎回大変な労力が必要になることを意味する。そこで、セマンティックセグメンテーションのための教師データの自動生成の可能性について探った。具体的には、画像中の藻場の領域に色情報をもとにした画像処理による自動アノテーションを行うことで、教師データを自動生成するプログラムを構築した。

プログラムの大まかな流れは、アノテーション対象となる画像データの読み込み、色情報による藻場の識別、藻場の輪郭の描画、輪郭の座標のリスト化である(図8)。この座標リストをテキストファイルとして出力し、最終的には labelme で使用可能な json ファイルの形式として出力する一連の流れを自動化する。開発するにあたり、OpenCV という画像処理用オープンソース・ライブラリを利用した。

この試みの核となる画像処理について述べる。海中の濁りや照度環境に大きく影響をうける彩度および輝度の影響を除いた色相のみの設定で、対象領域を識別するため、まず画像を HSV 表色系に変換する。続いて、色範囲に応じたマスク画像生成を行う。マスク画像とは画像と同じ大きさの2値画像で、学習対象となる画素には1、対象外の画素には0を割り当てた画像のことである。本研究では、藻場の色が収まる色の範囲を HSV 表色系で最小値(25, 120, 10)から最大値(90, 255, 255)に収まる範囲とした。続いて、対象領域を囲む輪郭線の検出処理を行う。なお、入れ子構造となっている輪郭が存在する場合、最も外側の輪郭だけを検出するようにした。また、輪郭の冗長な点を削除し、必要最低限の点で検出対象領域を選択するようにした。

3. まとめと今後の課題

自動航行支援用 AI については、障害物回避に関しては成果があったものの、藻場の発見・探査行動については、さらなる学習データの追加が必要な事がわかった。地形データ以外にも、潮の流れや藻場の分布条件等の詳細情報を AI に提供することで、さらなる自動航行能力向上の余地があると考えられる。

一方、カメラを使った周囲環境認識用 AI については、今回利用した実験画像に関しては、当初の目標通りの十分な精度および認識速度を確保できた。ただし、本来想定される小型海中ロボットに搭載されるカメラは、解像度等の面でもう少し不利な条件になる予定であり、さらに今回の実験画像以上に海中の光量や透明度といった悪条件下で撮影が強いられることも予想されることから、今回の実験画像以上に不利な条件下においても、期待通りの性能が発揮できるか、さらなる検討が求められる。

参考文献

- [1] John Schulman, Filip Wolski, Prafulla Dhariwal, Alec Radford, Oleg Klimov: "Proximal Policy Optimization Algorithms," arXiv:1707.06347, 2017.
- [2] Liang-Chieh Chen, George Papandreou, Iasonas Kokkinos, Kevin Murphy, Alan L. Yuille: "DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs," arXiv:1606.00915, 2017



(a) アノテーション生成対象画像



(b) 画像処理による輪郭線抽出



(c) アノテーション結果 (マスク画像)

図8 アノテーションの自動生成

5. 藻場環境観測システムの開発（海底カメラ）

田中 聡 仲嶋 一 伍賀 正典

1.1 海底カメラ



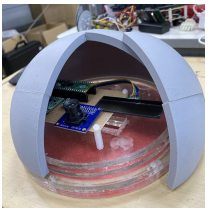

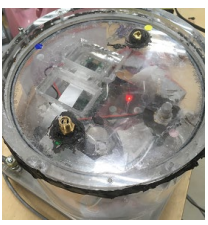
本報告書では2017年度から2021年度まで実施された「瀬戸内海 しまなみ沿岸生態系に眠る多面的機能の解明と産業支援・教育 テーマ①：生態系の解明」プロジェクト[1.1]のうち「藻場環境観測システムの開発」において行われた「海底カメラ (Sea Bedded Cam)」の開発について、システムの概要と実験成果について報告する。

1.1.1 研究目的

瀬戸内海周辺において里山と里海により連携的に維持されている生態系を解明することにより、海の生産性を高める知見を得ることを目的とし、観測するためのシステム技術の開発を主要なテーマとしている。筆者らは瀬戸内海の海中で春夏秋冬の年サイクルで消長する海藻の集まりである藻場の役割の解明がそこに暮らす生物の誕生から生育に大きな役割を果たしているとみて、藻場の中的环境を明らかにするためには観測機器の開発を行った。なかでも、各種センサを搭載した「海底カメラ」を中心に開発を行い、2018年度は1号機から2021年度の4号機の製作および機能テストを行った[1.2]。この海底カメラは藻場の中の様子をステレオ動画として長時間にわたって記録し、特に藻場の中における海流の三次元的な流れを測定し、海中の透明度の変化を測定する。また、生物を認識して生物相の変化を調べ、赤潮などの警報を行う機能の実現を目指している。こうした機能を実現するために、AI 技術を用いたオブジェクト認識技術の導入を目指しており、2019年度は海底の藻場における海藻の画像認識を行っている。さらに、2020年度は記録した動画から魚の認識を行う画像認識システ

表 1.1 開発した海底カメラ

Table.1.1 A list of the developed seabed camera.

1号機 2018 喪失	直径30cm 高さ30cm 10W ステレオカメラ, 水圧計, 温度計, 姿勢センサ, エロージョン 原価>30万円	
2号機 2019 開発完了	直径20cm 高さ30cm 2W ステレオカメラ, 水圧計, 温度計 姿勢センサ, 太陽光発電 原価10万円	
3号機 2020 開発中断	直径20cm 高さ15cm ?W AIセンサ 原価5万円	
4号機A 2021 開発完了	直径20cm 高さ15cm 6W ドライブレコーダ (ステレオ) GPS, Wi-Fi 姿勢センサ, 温度計 原価5万円	
4号機B 2021 開発完了	直径20cm 高さ15cm 3W モノラルカメラ 原価5万円	

ムを開発した。

3号機はコロナ禍の中で研究活動が制限され, 必要な部品の入手も困難となり開発を中断している。

1. 1. 2 海底カメラ画像ギャラリー

これらの海底カメラを用いて記録した瀬戸内海の海底の画像を紹介する。



図 1.1 船で海中を牽引される海底カメラ 1 号機. 重いので設置作業が大変だ(2018 年 11 月).

Fig.1.1 The Seabed camera unit 1 is towed underwater to the installation location, because it is heavy(Nov. 2018).



図 1.2 海底から見たアカモク. 明るい太陽と船上から見ている筆者の影(2019 年 2 月).

Fig.1.2 Sargassum horneri seen from the seabed. The Sun and the shadow of the authors seen are reflected(Feb. 2019).

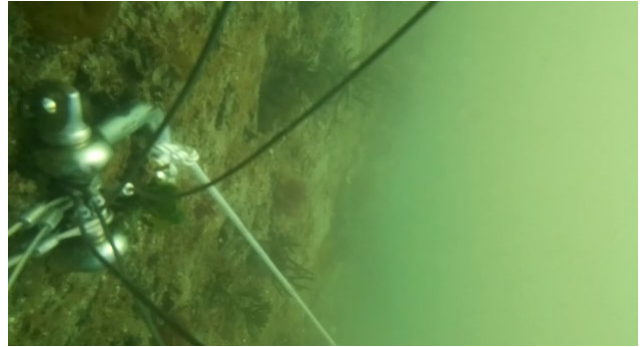


図 1.3 海底の様子. 冬の海底は透明度が高く奥まで見える. 海底にはところどころに藻がある(2019 年 2 月).
Fig.1.3 The seen of the seabed in winter. It is highly transparent and can be seen to the depth. There are algae in some places(Feb.2019).

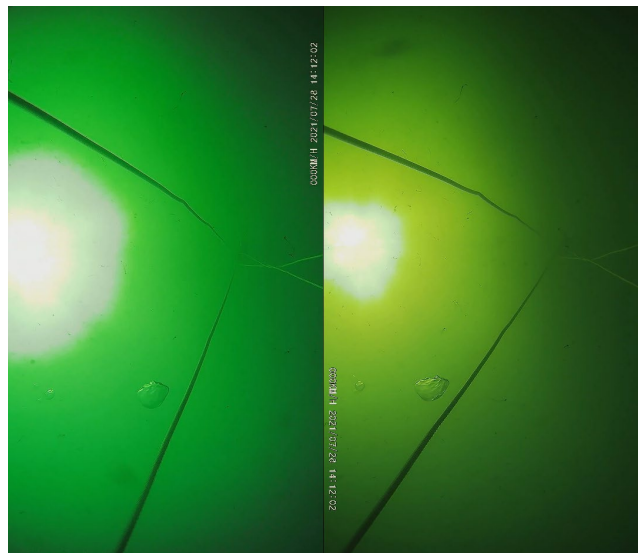


図 1.4 夏の海は透き通った緑色. ドライブレコーダで画像の鮮明度が向上する. ステレオ表示したが左右の色バランスが悪い(2021 年 7 月).

Fig.1.4 In summer season the sea is clear green. Improves the sharpness of the image can be taken by the dashboard camera (jul.2021).



図 1.5 秋の海は混濁物が増えて透明度が低い. 1 m 先を見ることも難しい(2021 年 9 月).

Fig.1.5 The autumn sea has a lot of turbidity and low transparency (Sep. 2021).



図 1.6 秋が深まると透明度が向上. 曇天時は海水の緑色が目立たない(2021 年 10 月).

Fig.1.6 Transparency improves as autumn deepens. The green color of the sea disappears while it is cloudy (Oct. 2021)



図 1.7 冬場は海面まで届くロープが遠くまで見える. 海中を流れていく小さい海藻が見える(2021 年 12 月).

Fig.1.7 In winter, the mooring rope that reaches the surface of the sea far away (Dec.2021).

1. 1. 3 主な研究成果サマリ

5 年間の海底カメラの研究・開発の成果をここにまとめて示す. 詳細については 2 節以下もしくは参考文献を参照されたい.

(1) 海底カメラの技術

1 水深 10 m 以下の海中で数日間動作する, ステレオカメラ及び各種データ記録装置を製作・運用する技術基盤を習得した. 水深, 海水温, 海流を観測した.

2 海底カメラのカメラ画面の 3 次元的な方向を知るための, 姿勢認識および姿勢表示アルゴリズムを構築した.

3 魚類や海藻の画像から魚類を識別するための画像認識技術を習得した. 海藻の種別判別能力は 70%, 魚影識別は 90% 以上の性能を得たが, 魚種の判別機能は実現できていない.

4 数日間海底に設置して運用するため, 係留方法や盗難への対応に種々の試みを行った.

5 海底カメラ 4 号機 A および B の 2 つを用いて同時多点観測の運用を試みて 10 時間の連続記録を得た. カメラの画像や方向, 水深は正しく測定できたが, 温度測定データは正確について疑問があり, 性能や運用方法の改善が必要である.

6 夏場の運用では海底の冷たい海水で容器内部に結露が発生し, 保護回路のないリチウムイオン電池は結露により暴走して電極が熔融しガスが発生し, 容器が破裂するという事故に至ることがわかった. 海中でのリチウムイオンバッテリーの運用技術が向上した.

(2) 生態系の解明

1 実験海域では海そうは 5 月から 10 月の夏, 秋には枯れて海底は岩場になっている. また, 夏場は植物プランクトンで海水は緑色ににごり, 透明度が悪い. 一方, 11 月以降になると海藻の植生が始まり, 種々の

海藻が繁茂し、海水の透明度が高まる。海中をただよ
う海藻の断片は観測されたが、期待された「流れ藻」
といえるほどの大きな海藻の群集は観測されなかつ
た。また、魚類の観測例は1例しかなかった。

2 当初目的である海中を漂う物体の移動の観測によ
る海水流の測定については、大きな動きは係留ロープ
の動きの観察で可能であった一方で、近接した海中漂
流物の動きは上層の海流方向とは無関係な方向に運動
しており、数m離れた地点で観測できる大型漂流物は
見つからなかった。

こうした点から生態系の観測のためには月単位、年
単位の長期間運用が必要であると考えている。

参考文献

[1.1] 2017 年度進捗報告テーマ①-③ 藻場環境観測
システムの開発。

2018 年度進捗報告テーマ①-③ 藻場環境観測システ
ムの開発。

https://www.fukuyama-u.com/project/project_branding/

[1.2] 田中 聡他,「藻場観測のための海底カメラの開
発」,福山大学工学部紀要 第41巻 2018年2月。

2 海底カメラの構成

2.1 機能と特徴[2.1]

海底カメラにて実現を予定していた機能とプロジェクト終了時点での実現状況を表 2.1 に示す。これらの多くを実現するためにステレオカメラによる動画データを長時間記録する方式を採用した。また、水温のプロファイルを計測するために、熱応答速度の早い熱電対温度計を容器外部に露出させ、赤外線から温度を測定する放射温度計を搭載して容器外部温度を測定している。

表 2.1 藻場観測に必要な情報

Table 2.1 The observation items in the seaweed bed.

	観測項目	観測結果の影響	実現状況 2022現在
1	海流（方向，流速）	藻場の移動に影響	1号機—
2	水温（面，鉛直データ）	生物相の変化に大きく関わっている	2号機—
3	水圧（水深）		1号機—
4	塩分濃度（面，垂直データ）		センサ開発中
5	透明度（面，鉛直データ）	海水の循環とプランクトンの消長	解析方法の研究中
6	栄養塩		未実装
7	クロロフィル測定	プロファイル測定は赤潮の予測に有効	センサ検討中
8	上空の風向・風速	海流に影響	未実装
9	植生の変化（海中，沿岸）		オブジェクト認識技術の応用

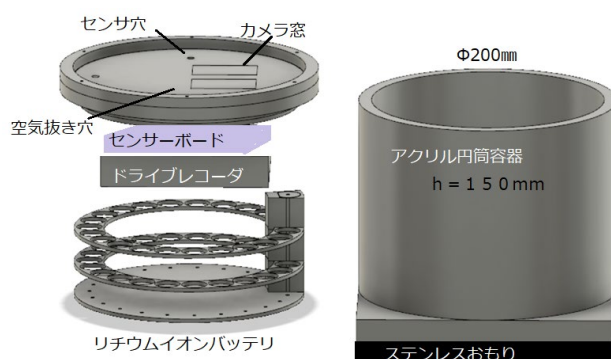


図 2.1 海底カメラ 4号機 A の構造模式図

Fig.2.1 The outline of the seabed cam unit 4A.

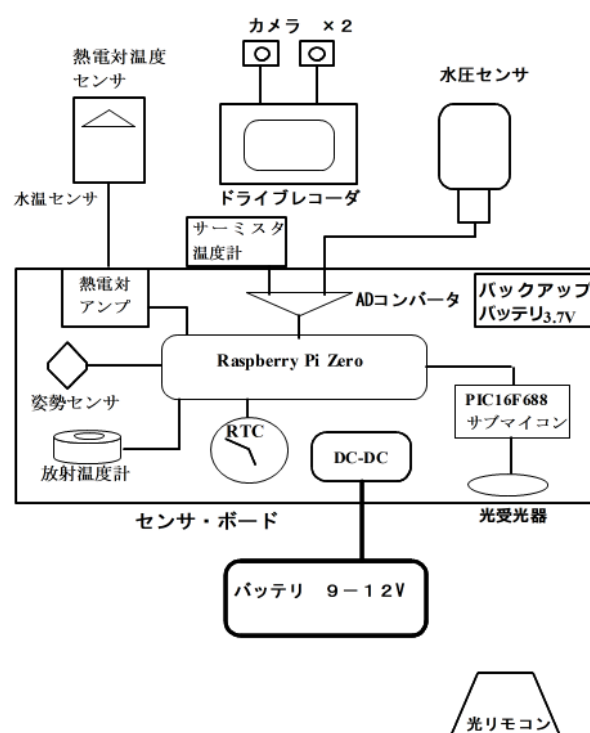


図 2.2 海底カメラ 4号機 A の機能ブロック

Fig.2.2 The block of the measurement functions of sea bed camera unit 4A.

図 2.1, 2, 2, 2, 3 に海底カメラ 4号機 A の構造図, 内部回路の機能ブロック図, 上からみたカメラおよびセンサ部分を写真で示す。画像を記録するドライブレコーダとは別にセンサの情報を記録するセンサボードを搭載するとともに、赤外線光リモコンにより電源の ON/OFF を制御するサブマイコンを搭載している。



図 2.2 海底カメラ 4 号機 A のセンサ部.

Fig.2.2 The top view of the sensors of unit 4A.

2.2 ステレオカメラ技術の進展[2.2]

海底カメラでは基本的に2つのカメラを利用してステレオカメラを実現している。ステレオカメラにより海中のオブジェクトを立体的にとらえ距離と移動速度を測定することを可能にした。表 2.2 に海底カメラに採用した録画機器を一覧で示す。

表 2.2 カメラ装置の変遷

Table 2.2 The history of the imagers.

バージョン	使用機器	特徴
1 号機	Raspberry Pi3 × 2 台	2 台の録画機器を並べたため消費電力が大きい.
2 号機	Raspberry Pi CM3	1 台の録画機器で記録するため消費電力が半減. タイムスタンプ機能など機能が充実.
3 号機	ルネサス RA+eAI	超低消費電力による長時間録画 (開発中断)
4 号機 A	ドライブレコーダ	2 カメラのドライブレコーダによる簡素化
4 号機 B	Raspberry Pi ZERO	オートフォーカス・単カメラの採用

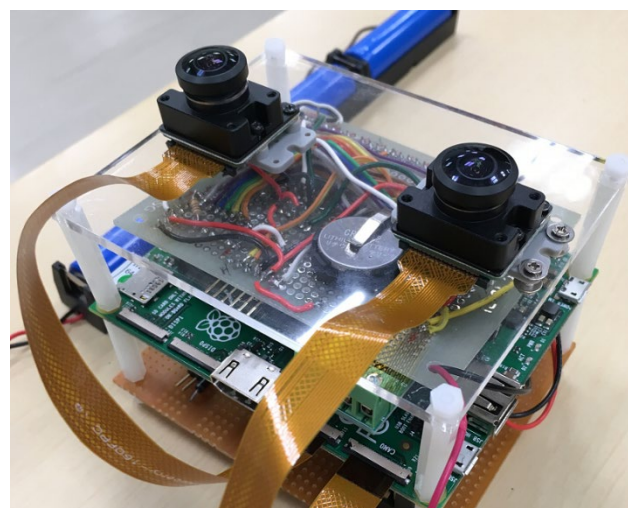


図 2.3 海底カメラ 2 号機のカメラモジュール.

Raspberry Pi CM3 に魚眼レンズを接続した状態.

Fig.2.3 Camera module for the unit 2 has fisheye lens connected to the Raspberry Pi CM3.

開発当初は Raspberry Pi を用いて録画ソフトウェアを C 言語で開発を行い, 省電力化や録画機能の向上を目指したが, 2019 年頃から 2 カメラ以上を接続可能なドライブレコーダが安価に市場に流通したことからこれをステレオカメラとして利用したところ画質および録画性能が良好であった[2.2]. また, 車載用のドライブレコーダは防滴性能が低く, 海中実験中に潮をかぶると故障しやすい. 一方, バイク用のドライブレコーダは IP 67 の防水性能があり海底カメラに適している.

ただし, ドライブレコーダは 128GB 以上の容量のある SD カードを使用できるものが見つかっておらず, 128GB では 2 画面 HD 画質で 8 時間程度の記録しかできていない. さらに, 自作のステレオ動画記録器であれ市販のドライブレコーダであれ, HD 動画記録するためにはシステムの消費電力が 5W 以上に上がり, 比較的高い放熱がある. 一方で, センサ部分のみの運用であれば数百 mW で充分である. こうした点からカメラ部分の省電力化のための AI 技術の導入と単カメラによる流速計測を検討している.

2.4 水圧に耐える容器設計

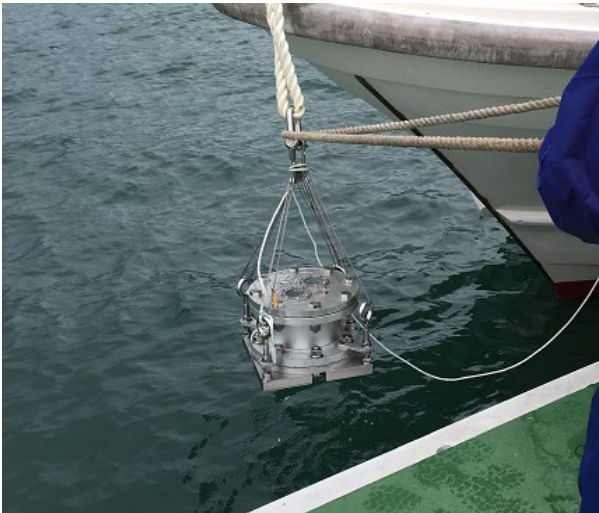


図 2.4 海底カメラ 1 号機はとても重い.

Fig. 2.4 The unit 1 is much sturdy but heavy.

瀬戸内海は海深が 30 m 程度あることから余裕を考えて 70 m に耐える直径 200 mm の耐圧容器をアルミで設計・製作した[2.3]. しかし海に沈めるために下部に 27 kg のステンレスバラストを必要とした. このため, 全重量が 40 kg を超え不安定な船上での取り扱いが難しく運用が困難だった (図 2.4). また, 海上から見て目立つ機器であったことから盗難の危険性もあった. 実際, 3 回目の長期運用実験時に 1 号機は行方不明になった.

この反省から 2 号機では小型軽量化を検討する. 観測を行う藻場はおおよそ 10 m 程度の水深の場所が多く, その倍の水深 20 m を目指すならば, 容器を 10 mm 厚の透明アクリル製とした. さらに体積も 4 分の 1 とした. 2 号機では機材の水密封入のために図 2.1 のようなふたを O リングではめ込む方式を採用した. このため, 設計上の最深耐水圧は 10 m 程度となっている. 2 号機以降はこの設計を継続しているが, 海上からみてもあまり目立たない (図 2.5).

この構造ではふたをはめ込む時に内部圧力を逃がす手立てが必要になる. このためにふたの部分に M6 のねじを使った空気抜き穴を設けた.

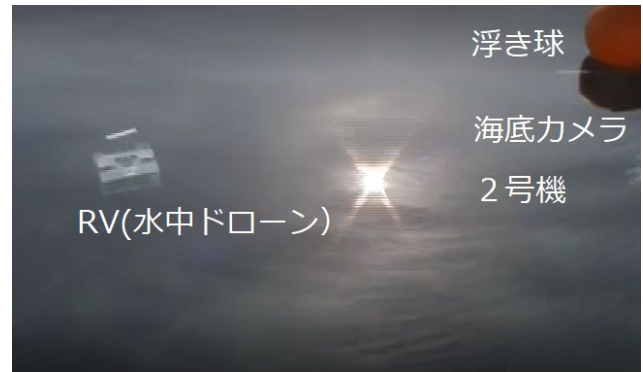


図 2.5 海底カメラ 2 号機と ROV. 浮き球の下に微かに見える. 水深約 2 m (2019 年 2 月).

Fig. 2.5 The unit 2 and ROV. The unit 2 can be seen under the floating ball (Feb. 2019).

空気抜き穴はふたの開閉時にねじをとりはずさなければならない. ねじ山はアクリル板に直接切り込んでいるためねじの抜き差しによりねじ山の摩耗が進み, バッテリトラブル時に内部圧力でねじが脱落して浸水するというトラブルが発生した. また, 海底への設置時にねじを忘れて浸水するという人為的な失敗も繰り返された.

この問題の対策として, 空気抜き穴に一方弁 (チェックバルブ) をとりつけ, 容器内から外部へは自然に排気されるが外部からは侵入しない仕組みとした. 図 2.6 のように, 一方弁は金属ねじのついたキャップがとりつけられており, 海水の流入防止にはこの金属キャップを用いる.



図 2.6 一方弁 (チェックバルブ) と金属キャップ
Fig. 2.6 The check valve and its metal cap.

Decompress when closing the lid.

2. 3 温度センサの課題

プロジェクトの初期において海水温のプロファイル測定（深さ方向の温度変化測定）のために Onset 社 HOB0 U20 を使用したが、熱応答速度が極めて悪く、1 点の測定に数十分を要した。そこで、海底カメラ 4 号機では次の 3 種類の温度センサを搭載して水温測定を行った。

（1）サーミスタ 主に容器内部の温度測定。電流を流すと発熱するので測定時だけ通電する。



図 2.7 ねじの内部に K 電対が埋め込まれている
Fig. 2.7 A thermocouple is embedded under the screw.

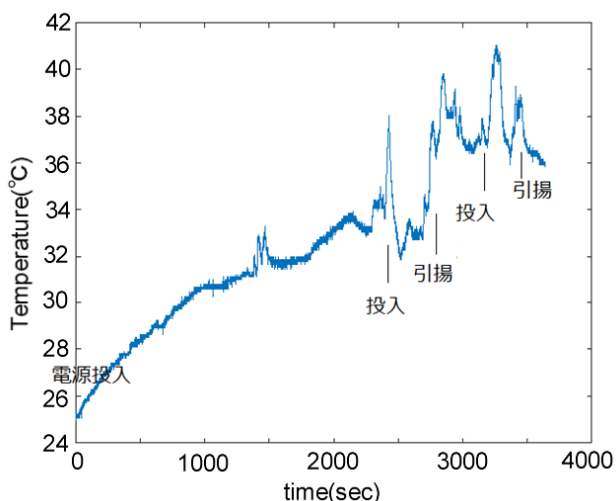


図 2.8 放射温度計による測定例(2021 年 9 月).
Fig. 2.8 A measurement example with a radiation thermometer (Nov.2021).

（2）熱電対温度計 海水温度を測定する。そのため容器外部に露出した金属ねじに埋め込まれている（図 2.7）。

（3）放射温度計 容器外部からの赤外線で温度を測定する。

図 2.8 には（3）放射温度計による計測結果を示す。この実験は電源投入から 2000 秒後に海底カメラを海中に投入したり引き揚げたりを繰り返している。電源投入直後から温度上昇が続き、投入・引揚により少しだけ温度計測値が変動するが、外部温度を測定しているとみなすことできない。他の 2 つの温度計も同様な挙動をしていることから 3 つの温度計はすべて内部温度に関連した値を示していると考えている。すなわち、ドライブレコーダやセンサボードの発熱が容器内を温めて熱伝導により熱電対温度計を含めて加熱していると考えている。これらの点から温度計の取り付け位置を再度見直す必要がある。

2. 3 電源システムの改善

電源はシステムで最も重要な要素の一つである。観測装置の運用には内臓バッテリーのみで動作させるか、外部からケーブルなどで給電するか、自家発電を行うかを判断しなければならない。外部給電は陸上か海上からケーブルを伸ばして行うが設置現場の海は海流が 2 ノットと早い上、海の荒れた日には海上にとどめることが困難であると判断して断念した。

2 号機では図 2.9 のようにアクリルの透明容器の内部に陸上で最大出力 2 W が得られる太陽光パネル 6 枚を備え海中での発電性能を評価した。実験結果を図 2.10 に示すが、海中に入ると一気に起電力が低下し、水深 2 m で半分、水深 4 m では 10 分の 1 に低下することが分かった。また、太陽光の受光面の方向が適切ではないため、海上においても発電電力は 0.1 W 程度であった。

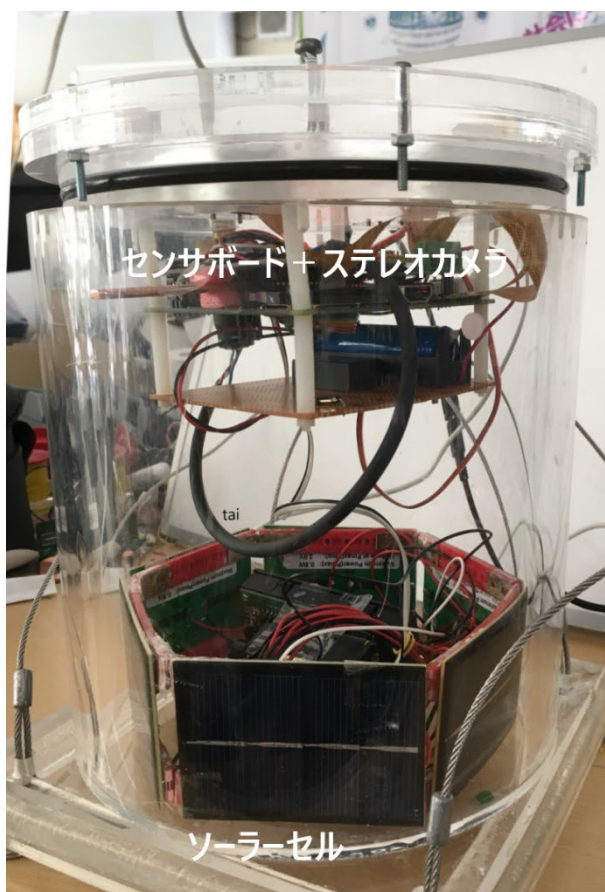


図 2.9 2号機の内部構造

Fig. 2.9 Six solar panels are installed in unit 2.

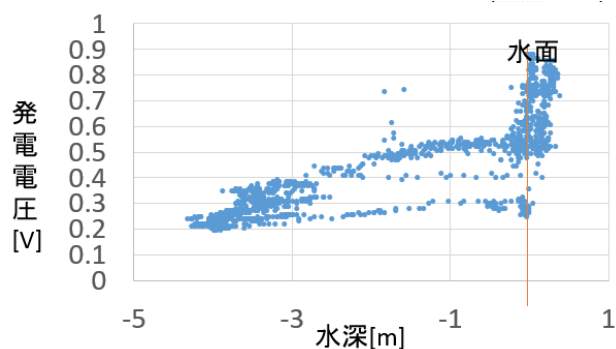


図 2.10 水深と発電能力

Fig. 2.10 The relationship between power generation and depth.

1号機では市販の角形モバイルバッテリー30,000mAhを内蔵して運用したが円筒形の容器に対して実装密度が上がらなかった。2号機からは18650型（金属缶タイプ）リチウムイオン電池を容器の隙

間にあわせて詰め込んでいる。1号機の4分の1の容積しかない4号機でも最大70,000mAhの容量を搭載できる見込みである。

バッテリー容量に上限があるためカメラや観測機器の省電力化を図る必要がある。2カメラでHD動画を記録するためには5Wの消費電力が必要であるが、他のセンサとロガー部分（4号機ではセンサボード）の消費電力は0.1Wと大きくない。そこでカメラ部分の省電力を検討した。

夜間の海底画像の撮影には照明が必要であり、撮影用のLEDライトは10W程度と見積もられ現在のシステムでは実用的ではない。そこで夜間撮影を停止する電源制御をサブマイコンに実装した。この過程で性能不足のサブマイコンをPIC16F18857に更新した。

電源システムの系統図を図2.11に示す。電源制御サブマイコンはリチウムポリマーバッテリーのバックアップにより常に動作しており、容器外部からの赤外線リモコンの操作を受け付け、またメインプロセッサおよびドライブレコーダのスリープやウェイクアップの動作を実行する。メインプロセッサにはRTC（リアルタイムクロック）が接続されているので現実時間に合わせてサブマイコンに停止・起動時刻を指示している。

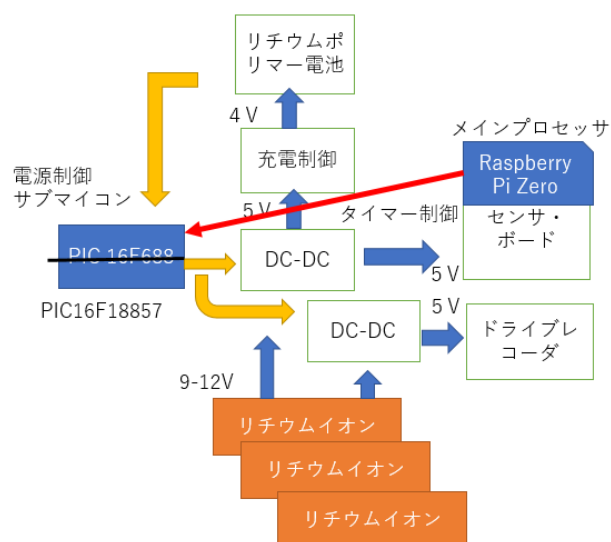


図 2.11 電源系統ブロック図

Fig. 2.11 Power system diagram.

このようにして動作時間を細かく制御することにより 60 時間以上の録画時間を目指している。

リチウムイオン電池の比重は海水より大きいので本体容器の容積を使い切れれば効率よく運用時間を増やすことができるが、放熱のための隙間が必要でかつ、構造上バッテリーを実装できない無駄な容積が増え、隙間の浮力に打ち勝ち海底に沈めるためのバランサ（おもり）を増設する必要がある、結果、全重量が大きくなるとともに運用性能が悪化する。1 号機では 27 kg、4 号機でも 4 kg のバラストを必要とした。

2.4 多点観測に向けたアプローチ [2.2]

藻場観測において運動が必要ないという利点がある海底カメラであるが、観測点が固定されてしまうという欠点を補うためには複数の海底カメラを設置して多点観測を行いネットワーク化を行うことが考えられる。

多点運用のためには次のような点を解決しなければならない。

- (1) 低コスト化（盗難・流出対策）
- (2) メンテナンス容易（修理・バッテリー交換）
- (3) 運用が容易（電源を入れるだけ）

1 号機から 3 号機まではそれぞれの目的のために回路や部材を 1 から製作したが、4 号機からは機能ごとに部品をモジュール化および標準化を進めることとした。表 2.3 にモジュール化の内容を具体的に示す。例えば 1, 2 号機ではカメラ部分とセンサを同じ CPU で実行するため、同じボード搭載してそれぞれに合ったプログラムを製作した。しかし、故障時にはボード上の部品の一つを取り外して交換といった手間がかかり、作業の上で人為的ミスが発生した。

4 号機ではセンサは容器のふたの部分に集中させ、耐水容器は同じものを使用する。センサの制御部分とカメラは分離して、カメラには市販のドライブレコーダを使用した。センサ部分についても今後追加されるセンサを簡単に接続できるように「センサボード」の

標準化を進め、バッテリー、外部センサへのコネクタを統一した。制御ソフトウェアも Python を基本として共通化を図った。

サブプロセッサは特殊な機能のため C 言語によるフルスクラッチの開発であったが、最近の電源コントロールに伴う機能追加に対応するため高機能のサブマイコンが必要となり、メインプロセッサとの統合が視野に入っている。

2020 年度後半からの半導体不足のためドライブレコーダの入手が困難になり、ドライブレコーダによって性能がまちまちであったため安定した開発が難しくなった。さらに 2021 年になると Raspberry Pi などの汎用マイコンや MEMS センサすら入手が不安定で、実験で損傷した部品を交換することもできなくなっている。

表 2.3 海底カメラ 4 号機におけるモジュール化

Table 2.3 Modularize the system functions in unit 4.

モジュール	機能	実現方法
カメラ	画像記録	ドライブレコーダ
センサ群	各種センサ	容器のふたに集中
	データログ	センサボード（カスタム）
電源回路	バッテリー 充電 電源制御	インテリジェント電源 非接触充電
耐水容器	耐水圧 耐汚染 低結露	4 号機のアクリル容器 乾燥空気の導入
ソフトウェア	メインプロセッサ	Python によるプログラムの標準化
	サブマイコン	C 言語によるカスタムソフトウェア

参考文献

[2.1] 宮地 寛明, 「海底カメラ 4 号機の開発と海洋実験について」, 令和 3 年度福山大学工学部スマートシステム学科卒業論文。

[2.2]宮地 寛明, 田中 聡 「海底カメラへのドライブレコーダの適用」, 第30回計測自動制御学会中国支部学術講演会 2C-5, 2020年11月28日.

[2.3] 仲嶋一, 「藻場環境観測システムの開発 (筐体設計試作)」, 福山大学ブランディング研究 2018年度進捗報告.

3. 姿勢センサ

3. 1 地磁気センサの評価[3. 3][3. 4]

海底カメラの海中での姿勢を測定する姿勢方位基準装置 (AHRS) には, 加速度, ジャイロ, コンパスにそれぞれ 3 軸をもつモノリシック 9 軸センサを用いる. 採用したセンサは表の 2 つである.

表 3.1 姿勢センサ

Table 3.1 9-axis Attitude sensors.

AHRS センサ	メーカー	特徴
BMX055	BOCHE	加速度, ジャイロ 12bit 地磁気 XY 13bit Z 15bit
LMS9DS1	ST マイクロエレクトロニクス	全軸 16bit

図 3.1 に実験装置の回転台を示す. Arduino NANO, 9 軸センサ BMX055 に無線データ送信用の Bluetooth ユニットの纏めた基板が回転テーブルの上に設置されている. 回転テーブルはステッピングモータに接続され, Arduino UNO マイコンから信号を送ることで速度と角度を調整することができる. この実験では, 10rpm, 60rpm, 120rpm で回転テーブルの回転速度を 3 種類に調整し, 上から見て時計方向に 2 回転させた後, 逆方向に 2 回転させる.

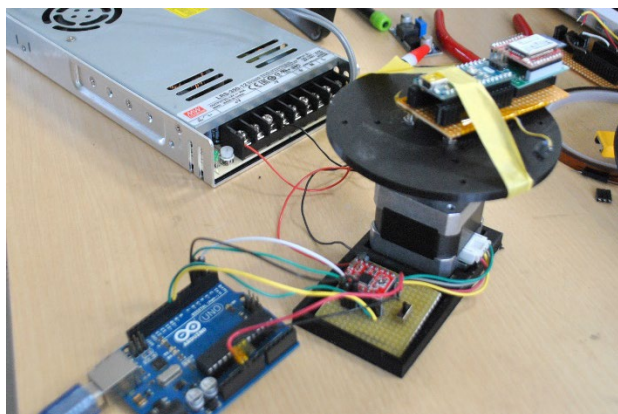


図 3.1 実験装置 回転台

Fig. 3.1 Horizontal Rotation Table with the sensors.

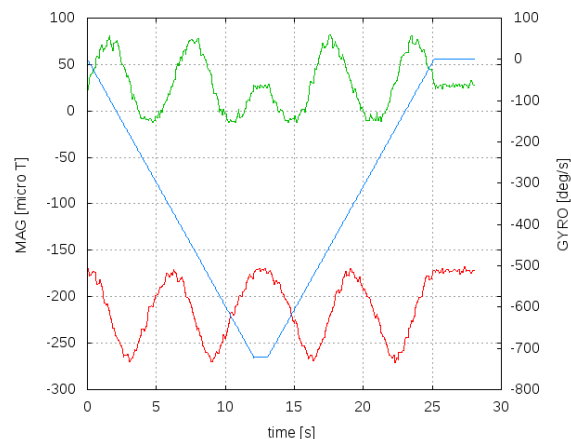


図 3.2 回転速度 10rpm

Fig.3.2 10 rpm.

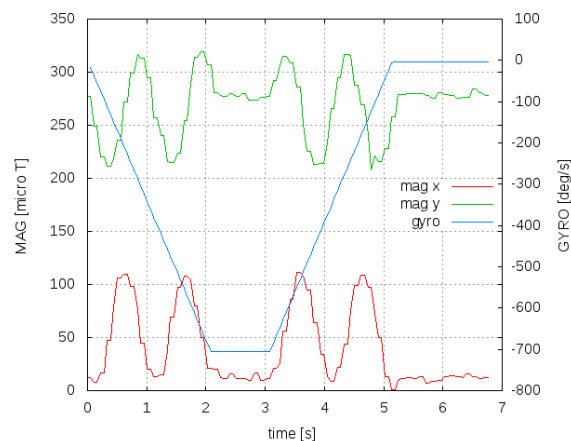


図 3.3 回転速度 60rpm

Fig.3.2 60 rpm.

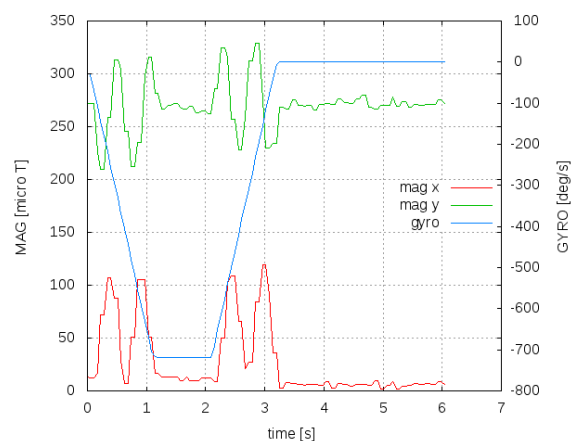


図 3.3 回転速度 120rpm

Fig.3.3 120 rpm.

このとき, BMX055 センサでの地磁気と角速度の計測を行った. 図 3.2~3.4 にそれぞれの回転速度で設定した場合の磁気および角速度の計測結果を示す. 図 3.2 は回転速度が 10rpm の場合で, 回転テーブルが 1 回転するのに 6 秒かかり 12 秒で 2 回転した後, 逆方向に 2 回転する. 地磁気の x 方向と y 方向の成分を見ると, 上記のような回転を行ったことが分かる. また, このグラフ中の直線は, z 方向の角速度に単位時間をかけて角度にしたものであり, 右の凡例より, 一定の速度で 2 回転 (720 度) した後, 逆に回転し 0 度に戻ることが分かる. 同様に, 図 3.3 は回転速度が 60rpm の場合の結果である. この実験設定では, 10rpm の 6 倍の回転速度であるが, 10rpm の場合と同じく, 地磁気の x 方向と y 方向の成分から回転の動作が分かり, また, 角速度を処理した直線は, 720 度回転した後に, 0 度まで戻っていることを示している. 図 3.4 は 120rpm で回転させた場合であるが, 地磁気の x 方向と y 方向の成分は周期的ではなく, 増減しながらも増加の傾向を示してい. これは, 図 3.1 に示した実験装置では, センサを回転テーブルに対し正確に垂直に設置していなかったため, 偏心が起こったことが考えられる. これらの結果から, 60rpm 程度の回転速度では地磁気, 角速度の計測結果を用いて回転量を推測することが可能であり, 海底カメラに搭載し姿勢を測定することは可能である. また, この実験結果から, 回転台への取り付けに注意し, 海底カメラ搭載のセンサ・ボードをそのまま用いて測定する.

次に表 3.1 に示した, 2 つのセンサの特性を測定する. 図 3.5 の回転台を用いて X, Y, Z 軸をそれぞれ中心に水平にして回転させた測定結果を 3 次元プロットする (図 3.6(a) (b)). それぞれの軸まわりの地磁気ベクトルの先端は円を描き, 仮想楕円体のまわりを回っている. LSM9DS1 は軸のオフセットが大きく, Z 軸回転の結果が他の結果に比べ仮想楕円体から離れている. 一方 BMX055 では Z 軸方向につぶれた仮想楕円体の上を回っているが原点からのオフセット量は小さい. 仮想楕円体を測定値にフィッティング [3. 1] を行い, 軸のオフセット量を計測した結果を図 3.7, 表 3.2 に示す.



図 3.5 測定用回転台

Fig. 3.5 Horizontal rotation table with the sensors.

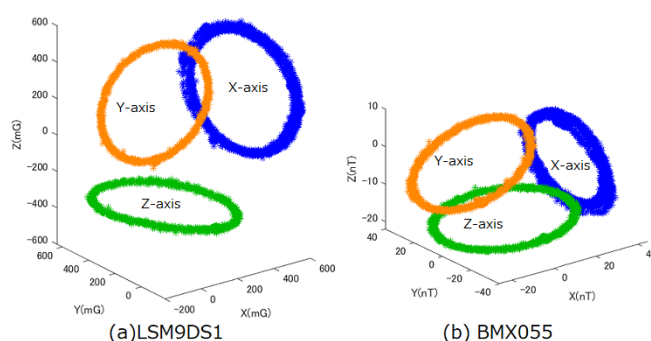


図 3.6 地磁気センサの軌跡

Fig. 3.6 Rotation trajectories of magnetometer.

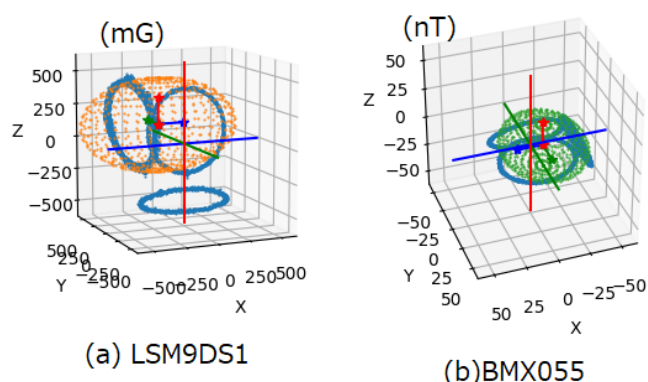


図 3.7 最適化された仮想楕円体

Fig. 3.7 Fitted virtual ellipsoid.

表 3.2 フィッティング結果

Table 3.2 The results of fitting to virtual ellipsoid.

整合項目	LSM9DS1 (mG)	BMX055 (nT)
中心座標 X	-283	-12.8
中心座標 Y	-178	-8.79
中心座標 Z	193	-8.48
X 方向半径	588	33.3
Y 方向半径	379	41.1
Z 方向半径	339	18.6

このように LSM9DS1 はオフセットも大きく仮想楕円近似の整合性が悪い。

3. 2 海底カメラにおける姿勢センサ

姿勢センサの設置場所や方向は海底カメラのバージョンや時期によって少しずつ異なるが、円筒形の容器の水平面に合わせて XY 軸をとり、重力方向に Z 軸としている。図 3.8 には海底カメラ 4 号機 A に BMX055 を搭載した場合の軸関係を示している。海底カメラ 4 号機 B には LSM9DS1 を搭載しているが、加速度センサの Y 軸方向だけが逆向きになるなど、細かい差異がある。とはいえカメラ画像の上下左右と X, Y 軸が一致するように方向を合わせている。

グローバル座標（地球座標系）に対して海底カメラの姿勢は図 3.9 に示すように

X 軸正方向 北

Y 軸正方向 東

Z 軸正方向 地心

方向を基準として XYZ の順序のオイラー角回転 ϕ (Roll), θ (pitch), ψ (Yaw) により表現する。

姿勢推定のためのセンサフュージョンのモデルとして拡張カルマンフィルタを用いた[3.2][3.5]。

ここでは海底カメラを船上からつるして海底に沈めるまでの数分間の姿勢を計測した結果を一例として示す。図 3.10 は右側の列は加速度, ジャイロ, 地磁気のそれぞれの時刻のセンサ値を示しており, 左側の列はセンサ値から得られる「計測値（青線）」とカルマ

ンフィルタにより求められる「推定値（橙線）」を表記しているがほとんど一致している。

海上から垂直に降下しているため X, Y 軸方向の揺動は少ないが円周方向の回転 (Yaw) が 30° 程度あったことがわかる。また Yaw=-3.5 となっていることからカメラの画面の上が北方向, 右が西方向となっていると知れる。

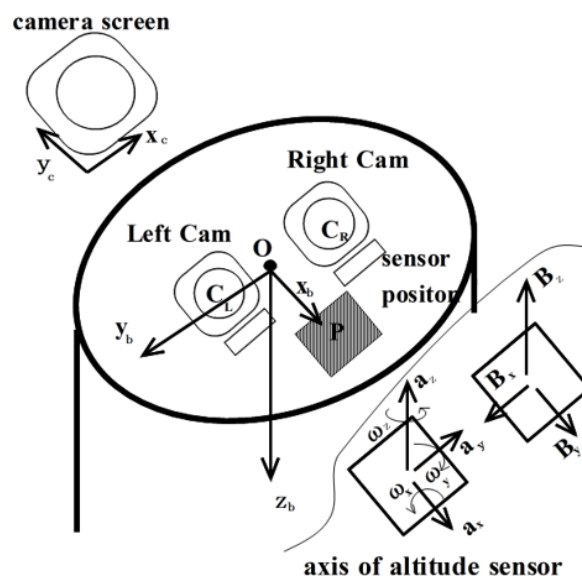


図 3.8 カメラ画面と姿勢センサの関係（4 号機 A）

Fig 3.8 Relationship between the camera screen and the attitude sensor (Unit 4 A).

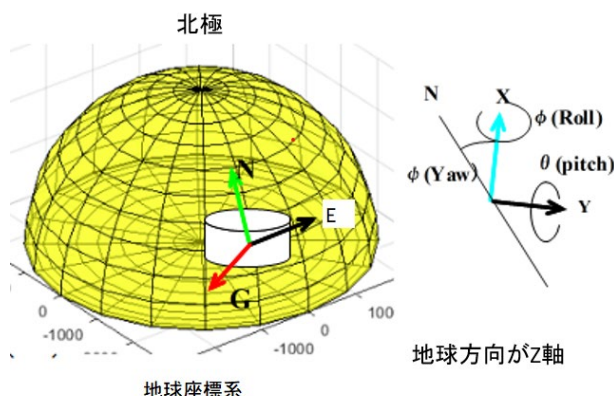


図 3.9 グローバル座標に対する海底カメラの姿勢

Fig. 3.9 Roll, pitch, yaw on global coordinates.

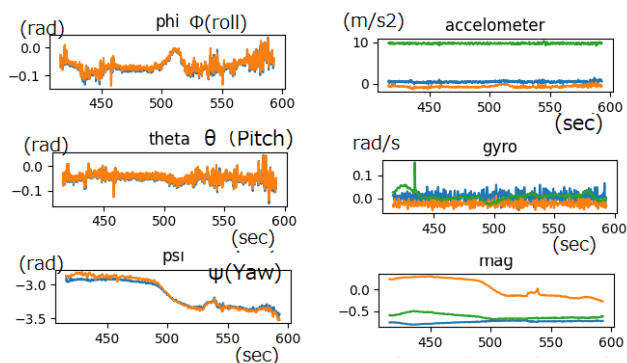


図 3.10 姿勢計測結果 2021 年 12 月 23 日

Fig3.10 A measurement result on 23 Dec.'21.

海底カメラのシステムでは測定した姿勢をカメラ画像に図 3.11 のように楕円と矢印のグラフィックで表示している。楕円は水平面を表しており、北を表す緑矢印と上（重力の反対）を表す赤矢印により直感的に画面方向を理解できる。



図 3.11 画面上の姿勢表示

Fig3.11 The graphically marker sets are displayed on the images.

参考文献

[3. 1] Alexandra Malyugina, etc: "Least-Squares Fitting of a Three-Dimensional Ellipsoid to Noisy Data", Applied Mathematical Sciences, vol. 8, 2014, no. 149, 7409 – 7421.

[3. 2] 田中聡, 「カルマンフィルタを用いた海底カメラの姿勢推定について」 電子情報通信学会 2022 年総合大会, D-12-34, 2022 年 3 月 18 日.

[3. 3] 田中聡, 伍賀正典: 「海底カメラにおける姿勢計測技術の研究」, 福山大学工学部紀要第 45 巻

[3. 4] 伍賀正典: 「実機ロボティクスワームに適用するためのセンサ統融合に関する研究」, 計測自動制御学会第 63 回システム工学部会研究会, 2021 年 3 月 7 日.

[3. 5] A.M Sabatani, "Kalman-filter-based orientation determination using inertial/magnetic sensors: observability analysis and performance evaluation", Sensors (Basel) . 2011;11(10):9182-206. doi: 10.3390/s111009182. Epub 2011 Sep 27.

4. 画像処理システム

本章では海底カメラに搭載されているステレオカメラを利用した画像処理技術の開発について述べる。

4. 1 ステレオ画像処理[4. 1]

ステレオ画像を用いて距離を推定するためにはカメラのレンズひずみや2つのカメラの間の関係を表すカメラパラメータ（行列）を計測して十分な補正を行っておく必要がある。これをステレオキャリブレーションとよび、一般には Z. Zhang の方法[4. 2]が用いられる。

これは図 4.1 のようなチェッカーパターンを左右のカメラで同時に撮影し白黒の交点の座標を比較して一致点を探す方法である。同図にはパラメータ推定の結果から得られたエピソード線（左右の正面と水平線の一致する線）が描かれている。

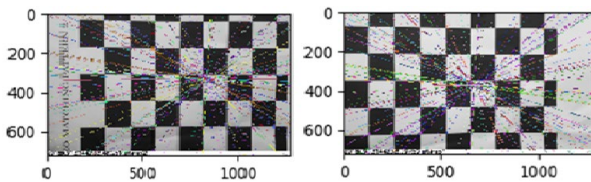
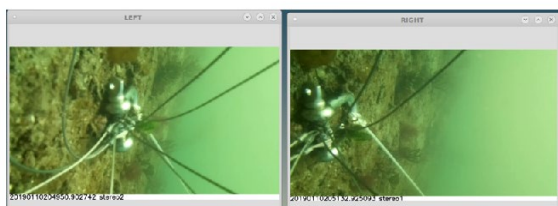


図 4.1 チェッカ撮影とエピソード線

Fig. 4.1 Stereo matching with the checker pattern.

得られたパラメータを用いて海底カメラで撮影したステレオ画像を補正した後で視差画像を作成し対象物までの距離を求める。結果の一例を図 4.2 に示す。



(a) 元の画像



(b) 再構成した画像

図 4.2 ステレオ再構成の例

Fig. 4.2 An example of stereo reconstruction.

最後の視差画像（disparity Image）を生成する機能を統合した画像処理プログラムを作成している（図 4.3）。このソフトウェアでは視差画像を OpenCV の StereoBM を用いて生成している。このため視差画像から実際の対象物までの距離を機械的に正しく得るためには少し手間がかかる。一方、両眼視差でわかるアナグリフ（図 4.4）を生成することにより、より直感的に距離を知ることができる。

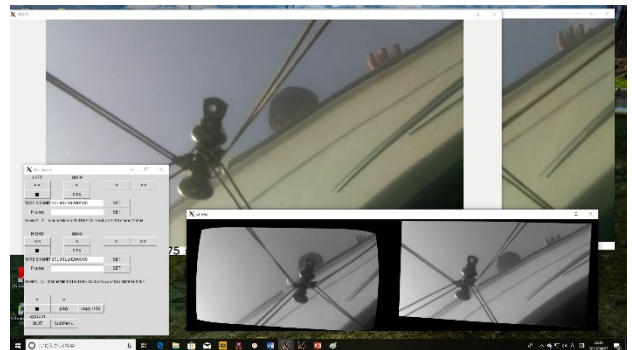


図 4.3 ステレオ画像処理システム

Fig. 4.3 Image processing software are developed.

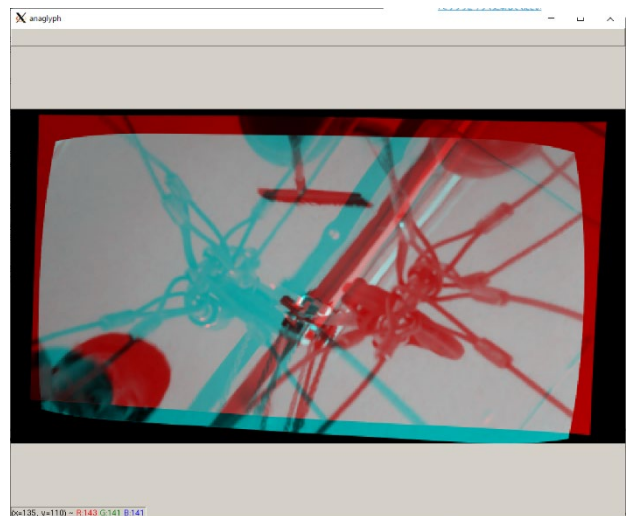


図 4.4 視差画像をアナグリフ表現

Fig. 4.4 An example of stereo image with the anaglyph.

4. 2 画像認識とオブジェクトトラッキング

海底カメラは長時間の海中動画を記録するため、録画した大量の動画データを人間の眼で再生して確認する

には限界がある．そこで画像解析により「何が(オブジェクト認識)」「画像中のどこに(領域判別)」あるのかを解析し、「移動方向を検出(トラッキング)」する手段が必要になる．トラッキングで広く使用されている手段はオプティカルフローの Lucas-Kanade 法であり、これを拡張した手法が画像処理ライブラリ OpenCV に実装されている．ここでは Median-Flow を用いたトラッキング実験を行った．その結果、ガラス面や水面に映る鏡像によりトラッキングが失敗する場合が多いとともに、オブジェクトが前面にある物体と重なる(オクルージョン)ことによる失敗が多いという課題があることが分かった．

このうちオクルージョンの問題を解決することを目的としてニューラルネットワークの Mask R-CNN[4.3]を用いて水槽の魚類の「オブジェクト認識」「領域判



図 4.3 水槽のオブジェクト(潜水艦模型)のトラッキング．青い枠がトラッキング部分．

Fig. 4.3 Tracking a aquarium object(submarine model). The rectangle frame is the tracking area.

表 4.1 動作環境

Table 4.1 System feature.

項目	機器など	備考
CPU	Core-i3(4 世代)	
主メモリ	16GB	8GB では不足
GPU	GeForce GTX 1050	6GB Cuda10.2
OS 他	Ubuntu 18.04	Jupyter notebook

別」「トラッキング」の研究を行った．

Mask R-CNN は ICCV 2017 Best Paper に選出された手法で、Faster R-CNN の手法を継承したものである．Faster R-CNN との最大の違いは対象のオブジェクトに対して背景との区別をつけるためのマスクを生成する機能を持っていることである．Mask R-CNN では、ROI (Region of Interest) の内部の該当オブジェクトが実存するオブジェクトの一部であっても最大のサイズのマスクを生成しようとする．そのため、ROI の内部であってもマスクに漏れる部分は背景として処理される．別の ROI においてマスクに漏れた部分を別のオブジェクトと認識できることから、オクルージョン問題を緩和できると期待される．

今回使用したシステムは matterport 社の tensorflow 1.x への実装[4.4]を tensorflow2.3 に移植し、学習方法を変更して本研究に適合するように変更した．動作環境を表 4.1 に示し、ネットワーク構造を図 4.4 に示す．このネットワークではバックボーンには FPN (Feature Pyramid Network head) を使い、分類器には ResNet-101 を使用している．学習したデータは次の 2 種類、クラスも 2 つである．

- ① fish(魚) 258 枚 (学習用 209 枚, 評価用 49 枚)
- ② jellyfish(くらげ) 117 枚 (学習用 91 枚, 評価用 26 枚)

学習に使う画像データは動画サイトから切り出し加工を行った．Mask R-CNN では画像中のバウンディングボックスのみならず輪郭情報も必要であり、VIA (VGG Image Annotator) [4.5] を用いて輪郭形状をデータ化した json ファイルを作成し、同時に学習した．

学習したニューラルネットワークを用いて福山大学内海生物資源研究所の大水槽の魚影をトラッキングした結果を図 4.5 に示す．画像の左側が元画像で、右側はシステムの認識結果を表す画像である．四角い線で囲まれた部分が認識された魚の ROI であり、その内部で魚の形状はマスクにより緑色に塗りつぶされて表示されている．

このシステムでは魚影は画像上の 90% を認識することができ、また、魚影の重なりあう場合や岩陰に隠れ

る場合でもある程度識別が可能になっている。一方、形を誤って認識する場合もある。

図 4.5 に示すように太陽光の照射角度によっては岩の

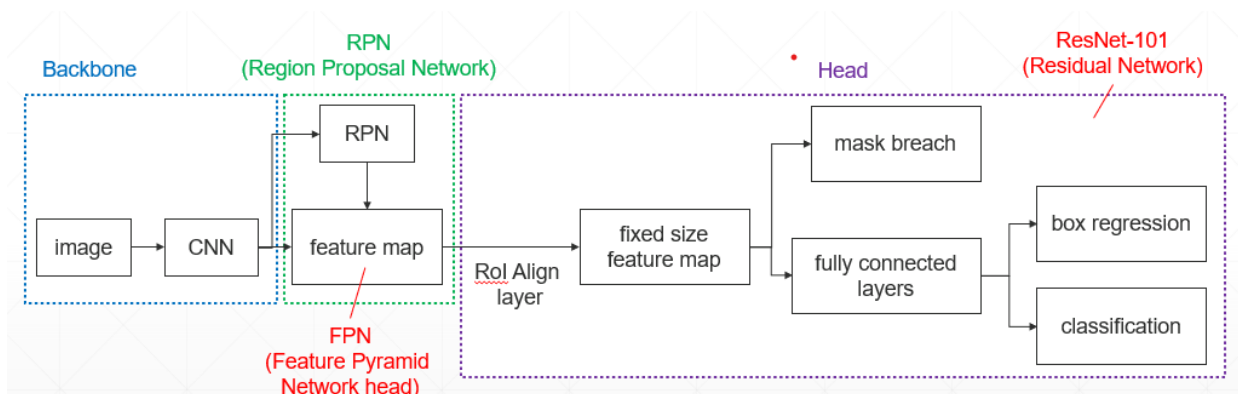


図 4.3 Mask R-CNN ネットワークブロック図

Fig. 4.3 Mask R-CNN object recognition network. The input image size is 512x512 px. The output class is 2 (fish , jellyfish).

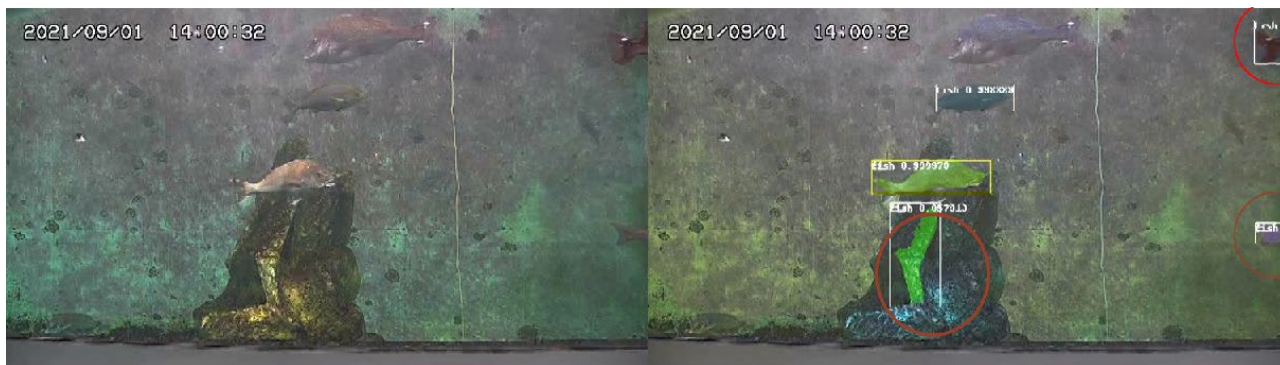


図 4.4 大水槽の魚影の認識。 赤丸の部分は岩の模様を誤認識している。

Fig. 4.4 A snapshot of the image recognition of the main aquarium on the Research Institute of Marine Bioresources Fukuyama University. The left image is original and the right image is recognized. The recognized areas are filled with green. The red circle is the misrecognized rock pattern.

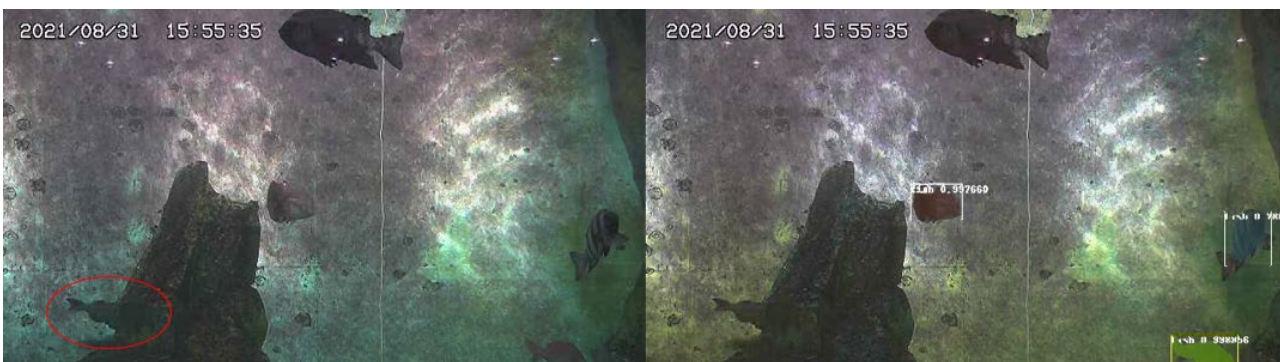


図 4.5 早朝の大水槽の魚影の認識。 赤丸の部分は岩陰にいる魚が認識されていない。

Fig. 4.5 Another snapshot of image recognition in early morning. Recognition from low contrast image is bit difficult.

4. 3 海藻の識別[4. 6]

魚のように簡単に個体を分割できるものに対して、群生する海藻は面状に広がり、境界があいまいであったり境界が画面外にある。このような物体の識別について CNN を用いて試みた。

使用した CNN のネットワーク構造を図 4.6 に示す。この研究では、領域判定を行わず、入力画像を CNN のサイズである 32×32 ピクセルにリサイズして認識させ 4 種類の海藻とその他（ロープ、泡、海底の岩）の 5 つのクラスに分類を行っている（図 4.7）。学習に使用する画像データは広島県尾道市の因島周辺の海域で海中カメラにより撮影したものを用いている。

このシステムによる推論の結果はオオブサでは 93%，ウスバアオノリ 100% の認識結果を得たが、アマモやフジスジモクでは 56% と低かった。平均値は 79.6% であった。なお、画像の回転処理をおこない学習データを増やすことにより認識率は向上した。

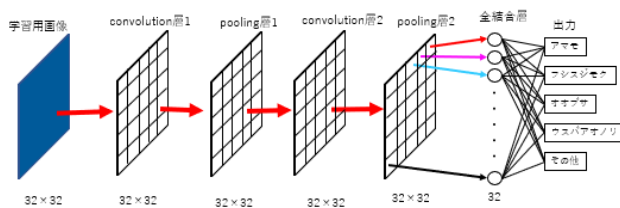


図 4.6 CNN の構成

Fig. 4.6 Structure of CNN network for seaweed classification.

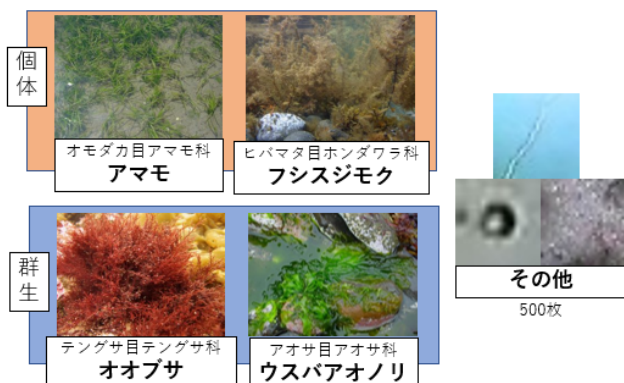


図 4.7 海藻の分類(クラス)

Fig. 4.7 The classes of seaweed and etc.

参考文献

- [4.1] 村上 祐紀：「藻場探査用海底カメラのための物体追跡技術の開発」, 2018 年度福山大学工学部スマートシステム学科卒業論文.
- [4.2] Z.Zang: "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330-1334, 2000.
- [4.3] He, Kaiming, Georgia Gkioxari, Piotr Dollár, and Ross Girshick. "Mask R-CNN." ArXiv:1703.06870 [Cs], January 24, 2018.
<https://arxiv.org/pdf/1703.06870>.
- [4.4] matterport:"Mask_RCNN",
https://github.com/matterport/Mask_RCNN
- [4.5] VGG, Visual Geometry Group, University of Oxford.
- [4.6] 田中聡, 河戸智也, "Mask R-CNN を用いてオクルージョン問題を軽減した魚画像の認識システム", 2021 年度 (第 72 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会. R21-22-03. 2021 年 10 月 23 日.
- [4.6] 桑田他, "CNN を用いた海藻画像の分類に関する研究", 第 28 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2c-2, pp. 43-44. 2019 年 11 月 23 日.

5. 海底カメラの運用

本章では海底カメラの海洋実験を通して運用における諸課題について述べ、最後にまとめを行う。

5. 1 海底カメラの動作実験[5. 1]

海底カメラの動作試験は

- (1) 陸上でのセンサ類の動作試験
- (2) 大型水槽での容器耐水試験 (図 5. 1)
- (3) センサ類封入後の小型水槽動作試験
- (4) 河川での運用実験 (図 5. 2)
- (5) 海中への投入実験 (図 5. 3)

を行っている。

海中への投入実験は福山大学内海生物資源研究所の所有する研究調査船のご協力により、調査船（第一）爽風丸が出港する大浜港から最も近い八重子島近くで行った (図 5. 4)。実験海域は尾道大橋に近く、海水路の狭窄部（瀬戸）であり、潮流が速く一日 4 回の潮流変化で流されやすい場所である。また、近辺を大型船が往来する海上交通路であるとともに内海漁業も盛んであるため、設置場所や設置方向にも工夫が必要である。

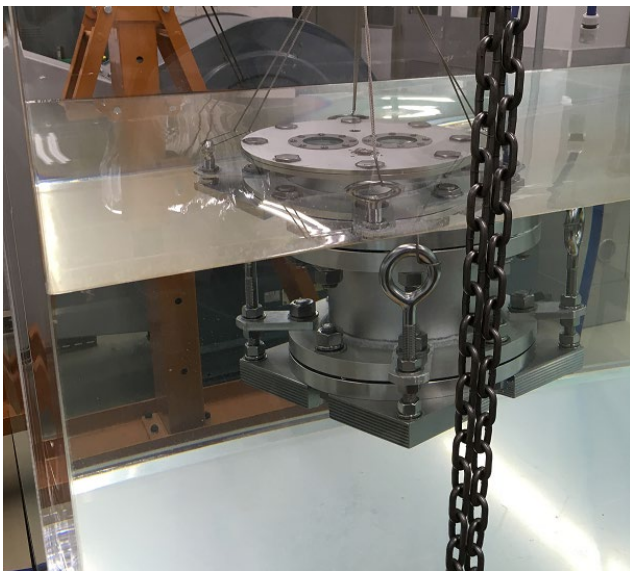


図 5. 1 1 号機の大型水槽実験

Fig. 5.1 Sea bed camera unit 1 under water leak test.



図 5. 2 河川での運用試験

Fig. 5.2 An operational test in irrigation canals.



図 5. 3 因島沖における観測実験

Fig. 5.3 Observation experiment performs off the coast of Innoshima island.



図 5. 4 海洋実験現場と周辺マップ

Fig. 5.4 Experiment area map of Innoshima island.

海底カメラでは電源確保の課題とともにデータの回収、定期的なメンテナンスの必要といった種々の理由から設置したまま長期運用することは技術的に困難であり、設置、回収作業を行うしかないと考えている。

海底カメラの設置は図 5.5 に示すように、本体のおもりのほかに単体のおもりを補助として設置する。また、設置位置を示すための浮き球や補助の浮きを接続している。さらに海流が速いので念のために船舶用のアンカも用意した。

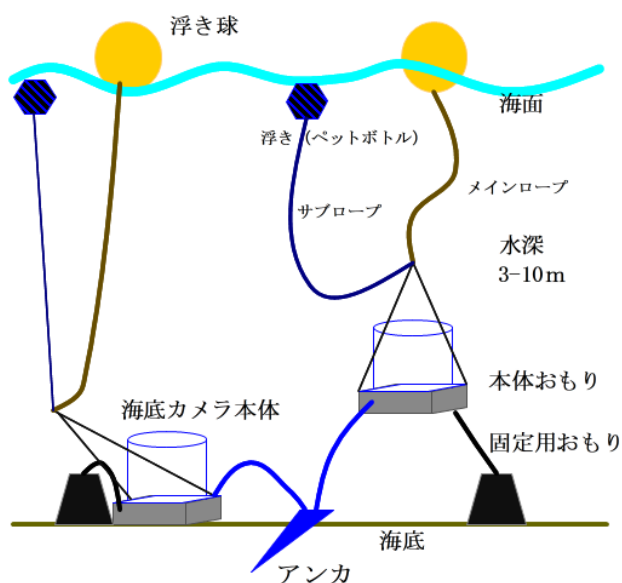


図 5.5 設置方法の模式図

Fig. 5.5 The seabed camera is submerged in the sea using a weight with multiple ropes. The rope is connected to the float on the surface of the sea.



図 5.6 海底カメラの設置の様子

Fig. 5.6 The seabed camera sinking into the sea.

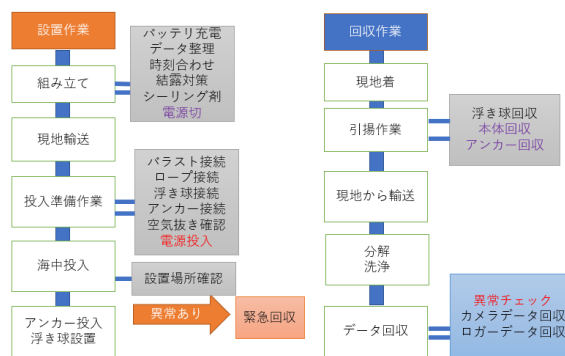


図 5.7 海底カメラ設置および回収ワーク・フロ

Fig. 5.7 Workflow diagram for seabed camera work.

初期の海底カメラでは本体懸架のためのワイヤやロープが、上に向けられたカメラに写りこむという課題があった。これを解決するためにワイヤを本体下部にワイヤをまとめ、2本のロープで誘導しながら沈める方法を採用したところ、浮力のバランスによりカメラの取り付けられた上部が上を向くとともにワイヤやロープがカメラ正面から離れたところに着地するようになった。

海底カメラを運用する手順を図 5.7 に示す。組み立て作業時の水密強化のためのシリング剤は硬化に数時間かかるため、SD カードの不要データ削除と時刻合わせが終わったら、組み立て前に海底カメラの電源を OFF にしておく必要がある。

5.2 観測結果

観測は主に 7、8 月の夏季、9、10 月の秋季、12、1 月の冬季Ⅰ、2、3 月の冬季Ⅱに区分される。一般に夏季から秋季は海中の緑色が濃く透明度が 1 m 程度と視界が悪い。一方、冬季の実験では緑色が落ち着いて透明度が格段に高くなる。海底は泥の部分と岩場の部分があるが、泥は深くなく海底カメラの底部が少し埋まる程度である。

2021 年度の冬季Ⅰの実験において 8～10 時間の連続観測結果を得た。図 3.4 には水深の時間変化を、図 3.5 には姿勢の時間変化を示す。この場所では 6 時間ごとの干満が繰り返されており、観測当日は 1 m の干満差があった。海流は早く投入後 3000 秒（8 時間）後

の満ち潮に向かうときに海底カメラは浮き球が潮の流れに引きずられて方向が変わっている。他のデータからみて本体は傾斜しただけで位置が変わるほどではなかった。

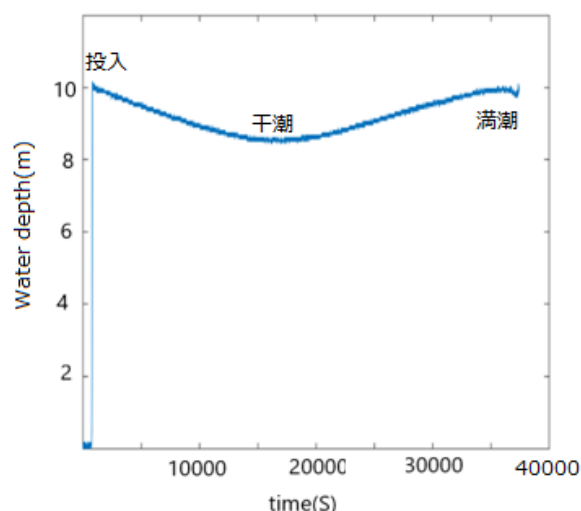


図 3.4 水深の変化

Fig.3.4 An observation of water depth with seabed camera unit 4A.

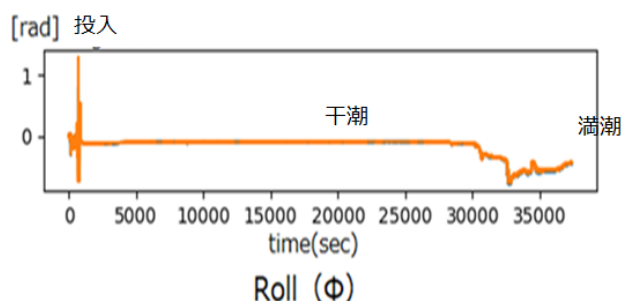


図 3.5 海底カメラの姿勢変化 (X 軸)

Fig. 3.5 The attitude variation in the Roll X.

5.3 観測システムへの要求と課題[5.2]

海中に長時間設置して藻場の環境を観測する海底カメラでは表 5.1 のような課題がある。ここでは 8 の結露の問題について述べる。

夏季における 4 号機の海洋での観測実験では海底からの引き上げの際に容器の空気穴のねじが脱落し、内部が浸水し機器を全損するというトラブルが発生した。

表 5.1 海底カメラの運用課題

Fig. 5.1 Operation issues of concern.

No	運用課題	対策
1	海中は電波が届かない 超音波は大きな送信電力が課題	スタンドアローンで運用し、定期的なメンテナンスを行うため、メンテナンスの容易化設計をする。
2	海底から海上へのケーブル接続は荒天時に破損	
3	海底に長期間(数日)置くと付着生物により機能が劣化、停止する。	
4	海水の腐食性が高く金属には対策が必要	海水耐食性、対候性の高い材料を用いる。
5	強い紫外線照射によるプラスチックの劣化	
6	盗難や故意の破損の危険	管理しやすい場所への設置. 監視の強化 単価の削減
7	強い海流に流される	潮流に対する抵抗の小さい形状
8	外部温度変化による結露	種々の結露対策

電源回路部分を中心に損傷があり、特にリチウムイオン電池は図 5.8 のように電極が溶融するほどの状態であった。発生メカニズムは次のように推定される。

夏季は大気中の水蒸気が多く、本体容器を閉じたときに封入される空気が海底の冷たい海水で冷やされて容器の上部に結露する。結露は容器上部の電子回路基板に落ちて短絡するなどで過電流が流れる。過電流でリチウムイオン電池が発熱暴走状態に陥り内部からガスが発生するとともに電極が溶融する。発生したガスは内部にたまるが、海底の水圧のために浸水しないが、引揚時に外部圧力が低下すると容器の弱い部分であった空気穴のねじを吹き飛ばしてしまう。空気穴は直接容器の亚克力にタッピングで切り込まれているが、実験のたびにねじ止めを行うために劣化しており、浸水事故後に確認したところ亀裂が発生した。



図 5.7 浸水した海底カメラ

Fig. 5.7 Burst and flooded into the container.

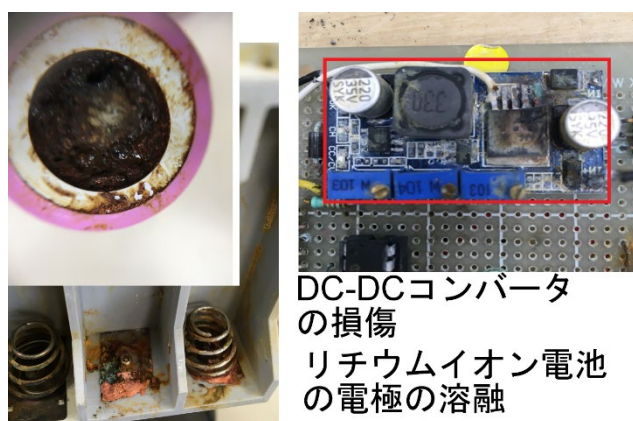


図 5.8 電源回路とリチウムイオンバッテリーに損傷

Fig. 5.8 The both electrode of Li-ion can battery melt out. DC-DC converter is burned out.

この浸水事故に対応するため、以下のような対策を講じた。

- (1) 電源を含む電子回路をプラスチック容器で覆う。
- (2) リチウムイオン電池は保護回路付きのものを使う。
- (3) 空気穴を直接アクリルに切り込まず、2.4 に示した一方向弁を取りつける。
- (4) 結露の水滴を迅速に吸収するために容器内に給水ポリマを敷く。
- (4) 夏季運用時は乾燥空気を容器内に入れる。

なお、2021年の秋季の実験では結露対策効果を確認した。

5.4 海底カメラの今後の目標

第2節の表 2.1 に示す本研究の当初に予定されていたセンサのうち未搭載もしくは開発中のセンサのうち、搭載可能な塩分濃度, PH センサは次のバージョンで搭載する予定である。

画像解析で実現できると考えている透明度および植生変化をとらえるセンサは画像認識技術の研究の一環として推進する。

すでに搭載済みの温度センサを改良して海水温の正確な測定ができるようにすることも喫緊の課題である。

センサのネットワーク化については海中と通信技術の開発が不可欠であるが、低電力で通信することは極めて難しい。

現在、海底カメラ全体の消費電力を下げるための実験を行っている。全体の消費電力を 0.1W 程度まで下げることができれば、太陽光によるエネルギーハーベスティングも視野に入り、メンテナンス性が向上する。その場合に最も電力を必要とする動画撮影の位置づけを再考する必要があると考えている。

参考文献

- [5.1] 宮地 寛明, 「海底カメラ 4 号機の開発と海洋実験について」, 令和 3 年度福山大学工学部スマートシステム学科卒業論文。
- [5.2] 宮地 寛明, 田中 聡 「海底カメラへのドライブレコーダの適用」, 第 30 回計測自動制御学会中国支部学術講演会 2C-5, 2020 年 11 月 28 日

謝辞

本研究はスマートシステム学科の次の在学生・卒業生に支えられました。

村上祐紀, 桑田 航平, 藤本貴大, 河戸智也, 宮地寛明, 村上力丸（敬称略）。

因島の実験においてご協力いただいた, 福山大学内海生物資源研究所の有瀧所長以下教職員の先生方にご協力お世話になりました。特に水族館の大水槽の実験では水上先生にご無理を申し上げました。観測船爽風丸を運用いただいた柿内船長, 得能技術助手にはいつも現場作業を応援いただきありがとうございました。

海洋実験では八重子島周辺での実験にご快諾いただいた因島漁協のみなさまのご協力に感謝いたします。

最後になりますが, 5年間にわたる貴重な研究の機会を与えていただいた福山大学のすべての関係者の皆様に感謝申し上げます。

6. 地球観測衛星データによる藻場分布解析

関田 隆一

1. はじめに

里海の豊かさを持続可能性を伴って維持するには、海の状態やその植生を表すパラメータについて季節や経年化変化を計測することが不可欠となる。本研究は地球観測衛星によるリモートセンシングデータから瀬戸内海の藻場の分布状況を精度付きで観測し、里海の豊さを定量的に把握するものである。

2. 研究目的

里海の豊かさを藻場の状態（色や面積）で地球観測衛星によるリモートセンシングデータを使って定量化し、持続的な状態モニターにより藻場の経年変化を把握する技術を確認することが本研究の目的である。特に本研究では、藻場が海岸周辺の人の活動により受ける影響及び里山から河川を伝って排出する砂等で受ける影響をモデル化する技術の確認まで踏み込むものであり、これは従来研究に全く困難度が高く同時に意義が大きいと言える。

3. 研究計画

研究目的を達成するために立てた 2017 年度から 5 年間の研究計画は以下の流れである。

- ① リモートセンシングと沿岸観測の現状を知る（2017、2018 上期）
- ② 地球観測衛星データから藻場を識別する解析技法の研究（2018～）
- ③ リモートセンシングの位置付けと対象衛星の研究（2018、2019）
- ④ 地球観測衛星データ収集、解析及び現地観測による検証（2018～）
- ⑤ 藻場増減要因の研究とモデル化に向けた考察（2019～）
- ⑥ 藻場の持続的発展に向けた陸域の活動と藻場増減モデル化（2020～）

4. 研究成果

4.1 研究計画①及び③の成果

海洋リモートセンシング研究は、グローバルな気象変動を解明する大気と水の循環が主であり、一地域に絞って沿岸域のデータ解析を行う研究は少ない。海洋観測に比べて沿岸域観測に困難が加わる点は以下の 2 点である。

- ✓ 複雑な地形の沿岸域を解析するため「高解像度の画像」が必要
- ✓ 川からの土砂による影響を知るため「高い波長の分解能画像」が必要

現在、沿岸域観測に適した地球観測衛星が軌道上にないため、陸域用地球観測衛星のデータを使わざるを得ない。その中で月 1 回程度は晴天の因島周辺データを得られること、2019 年度までで解析上の課題を克服してあること及びデータを無料で得られることから欧州の Sentinel-2 (10m 画素) を選定した。アメリカの Landsat-8 データ (30m 画素) は画像補正済でデータとして使いやすいが、2019 年 2 月以降、消散係数比を算出できなくなりその状態が改善していない。またアメリカのデジタルグローブ社の商用地球観測衛星 World View シリーズは高解像度 (1.38m 画素) の画像を誇るもので、本研究で 2 日分の画像データを購入した。World View 衛星では、因島全体に雲がかからず撮像できているデータが限定的で Sentinel-2 よりも選択できる日数が少ない。また World View 衛星の撮像データを藻場識別に使う場合、消散係数比の算出に独特の工夫が必要でその結果、高解像度が活かしきれず識別精度は Sentinel-2 と同等であった。以上から本研究の藻場識別では Sentinel-2 衛星データを使えば十分であると判断した。

4.2 研究計画②の成果

本研究では広島大学の研究成果を基に、Bottom Index (BI) による藻場分布解析技法について MATLAB 上で解析アルゴリズムを構築した。BI は Lyzenga が提案した技法で、異なる 2 バンドの画像（例えば、青と緑バン

ド)を比演算することで、青と緑バンド画像の間で反射率が異なる藻類を抽出するものである。この技法には、青と緑バンド画像を比演算することにより水深の影響を除去する水深補正が含まれている。

(1) BI アルゴリズムによる藻場分布解析

BI アルゴリズムは、Lyzenga の「比演算アルゴリズム」(ルイほか、2008[1])を基にした。図1に光学衛星センサーが検出する放射輝度の原理を示す。Lyzenga は、地球観測衛星に搭載されたセンサーが浅海域において波長 λ で検出する放射輝度 (L_λ) を次式で表した。

$$L_\lambda = L_{s\lambda} + E_\lambda r_{B\lambda} \exp(-k_\lambda f z) \quad (1)$$

ここで、

- $L_{s\lambda}$: 空気中での放射輝度
- E_λ : 定数(地上に到達する太陽の放射照度、大気と水面の透過率を含む)
- $r_{B\lambda}$: 底質による分光反射率
- k_λ : 水の消散係数
- f : 光路補正係数
- z : 水深

である。

水の消散係数とは、水中を光が伝播する際の光の散乱・吸収に起因する光の減衰の係数のことであり、水の混濁度により大幅に変化する(多田村ほか、1995[8])。上記の各パラメータで空気中の情報は $L_{s\lambda}$ だけであり、それ以外のパラメータは水中の情報である。

地球観測衛星画像から底質を判別するために最も有効な方法は①式から $r_{B\lambda}$ を求めることである。しかし、水深や消散係数に反映される水質が不明な底質環境に対して、①式

の $r_{B\lambda}$ を解くことは非常に難しい。そこで、「底質が同じならば、異なる2バンドの底質反射率比は一定になる」という Lyzenga の理論を応用して、画像を比演算することにより水深の影響を除去する水深補正アルゴリズムが導かれる。以下にこの過程を式で表す。

異なる2バンド i, j により地球観測衛星が観測する放射輝度は、①式からそれぞれ以下の式で表される。

$$L_i = L_{si} + E_i r_{Bi} \exp(-k_i f z) \quad (2)$$

$$L_j = L_{sj} + E_j r_{Bj} \exp(-k_j f z) \quad (3)$$

以降、簡単な数式展開なので詳細を省略するが、2つの異なるバンドの消散係数 k_i と k_j の比(以降、消散係数比)である k_{ij} として次の④式を得る。

$$\frac{\log(L_i - L_{si}) - \log(E_i r_{Bi})}{\log(L_j - L_{sj}) - \log(E_j r_{Bj})} = \frac{k_i}{k_j} = k_{ij} \quad (4)$$

この④式により水深や光路長などの不明なパラメータを除去していることがわかる。

④式の両辺を k_{ij} で割ると⑤式を得る。

$$\frac{\log(L_i - L_{si}) - \log(E_i r_{Bi})}{k_{ij} \log(L_j - L_{sj}) - k_{ij} \log(E_j r_{Bj})} = \frac{\log(L_i - L_{si}) - \log(E_i r_{Bi})}{\log(L_j - L_{sj})^{k_{ij}} - \log(E_j r_{Bj})^{k_{ij}}} = 1 \quad (5)$$

これを更に展開することで以下の式を得る。

$$\log \left[\frac{E_i r_{Bi}}{(E_j r_{Bj})^{k_{ij}}} \right] = \log \left[\frac{L_i - L_{si}}{(L_j - L_{sj})^{k_{ij}}} \right] \quad (6)$$

この式で、左辺の変動の多くは「2バンド間における海底反射率の比」支配され、底質の情報を持つといえる。そこで、これを底質指標 BI_{ij} とする。

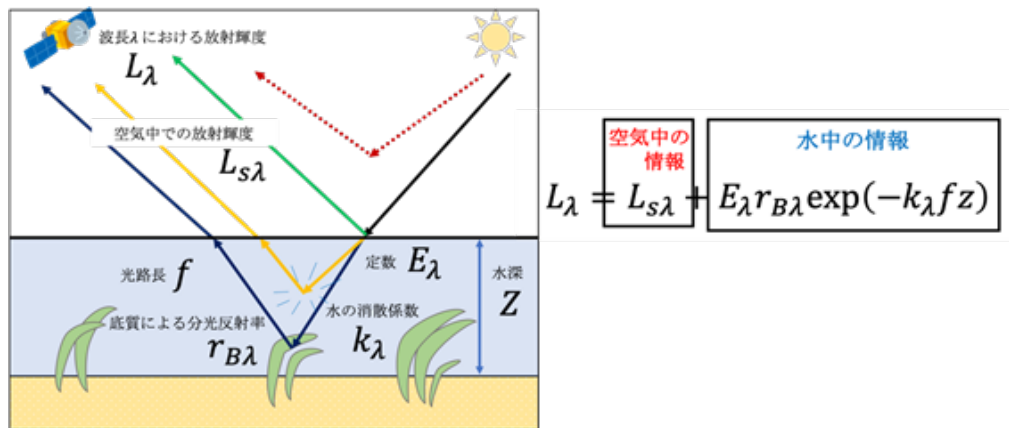


図1 地球観測衛星センサーが検出する放射輝度の原理

$$BI_{ij} = \log \left[\frac{L_i - L_{si}}{(L_j - L_{sj})^{k_{ij}}} \right] \quad (7)$$

更に、⑦式は、地球観測衛星のセンサが観測したデジタル値（DN：Digital Number）に置き換えることで以下の式で表される。

$$BI_{ij} = \log \left[\frac{(DN_i - DN_{si})}{(DN_j - DN_{sj})^{k_{ij}}} \right] = \log (DN_i - DN_{si}) - k_{ij} \log (DN_j - DN_{sj}) \quad (8)$$

⑧式より、異なる2バンドの地球観測衛星データの関係から消散係数比がバンド比（異なるバンドの輝度値の対数をプロットした時の傾き）として求まり、理論的には画像のみから水深の影響を除去した藻場の判別が可能となる。

(2) 消散係数比の算出

消散係数比は以下の方法で算出する。DN値は3×3画素の平均値とする。

- ① 底質の状態がほぼ同じと仮定できる水域50カ所のDNを抽出する
- ② 水深が十分深いと考えられる水域1カ所のDNを抽出する
- ③ ①で抽出した50カ所から②の1カ所を引く
- ④ 両バンドの大気補正後のDN値の自然対数をプロットし、その回帰直線の傾きから消散係数比を求める

本研究の消散係数算出として抽出した海域箇所を図2に示す。

今回は、底質が砂地の生名島周辺または因島最南端の日立造船付近の水域およそ50カ所を抽出した。また、水深が十分深いと考えられる水域1カ所は、観測対象の海図を基に平内島の西側の水域を抽出した。



図2 消散係数比の算出課程で抽出した水域箇所

(3) 大気補正

大気中での光の散乱、吸収により発生する解析誤差を補正するために本研究では以下の2つの技法を採用した。

① 暗画素法

簡易な大気補正法で、対象とする画像の中で最も暗く写っている画素（暗画素）を、すべての画素から差し引いて行う方法であるが、更に解析精度向上が必要と判明したものである。

② 相対大気補正法

時間的に反射特性が変化せず、かつ高い反射率から低い反射率をもつ数点の地上被覆物を基準物体として、データ間（地球観測衛星の基準データと観測日データ間）の相対的な関係を求める方法である。本研究では、高い反射率の基準物体を白色に近い因島運動公園のグラウンド、低い反射率の基準物体を黒色の太陽光発電設備の太陽電池パネルとしている。

また基準データは、太陽高度の高い2018年5月22日撮像のLandsat-8データを使用している。他に太陽高度の条件が良い撮像データがないことからLandsat-8データを採用しているが、観測日の撮像はSentinel-2で異なっても同じ基準物体の抽出であれば問題がない。

(4) 水深下限補正

水深が10mより深くなると太陽光が届かず、藻類は存在しないことが知られている。

BIアルゴリズムによる藻場分布推定法で解析を行うと、海中の光の散乱・反射により水深10mより深い領域で藻場を誤判別する場合がある。この対策として水深10mより深い領域にフィルタをかける水深下限補正を以下のとおり実施してある。

- ① 水深が記載された因島周辺の海図により、関心領域の水深10mより深い領域と陸域を黒くする。海図に記載の水深は干潮時の値が表記しており、1日で潮位が変化しても水深10mの表記エリアは潮位が10mを下ることがないため藻類が存在しないと判断する。

- ② 色の区別をした海図をスキャンして保存する。このとき、解析画像ファイルの種類を揃えるためTIFFで保存する。

- ③ 関心領域にトリミングする。
- ④ MATLAB 上で構築した藻場識別解析プログラムで藻場の場所を特定した後に、色の区別をした海図でマスクする。これにより、水深 10m より深い領域に藻場があると推定しても、色の区別をした海図では黒色なので結果には反映されない。

(5) 海中補正と Lyzenga の式適正化

先行研究サーベイ成果から「塩分が低い、かつ、透明度が低い (=濁度が高い)、かつ、夏の海水温が高い海域では、藻の生育度が低くなるので、地球観測衛星データからの識別が困難」という仮説を立てた。

地球観測衛星データのある 2 つの周波数の反射率比から塩分、透明度及び海水温を推定でき、因島の現地観測データ及び広島県水産海洋技術センターのデータを使って検証した上で一般化推定式を考案した。

塩分、透明度及び夏の海水温の藻の生育を低くするしきい値は以下である。

- ① 塩分:藻の生育を低くする低塩分濃度は先行研究で報告がないため、因島周囲 30 ポイントを抽出し、その平均から標準偏差 (1σ) 引いた値とした。
- ② 透明度: 環境省は、透明度が 1m より低いと藻の生育に影響があると報告しているが、因島沿岸域では、透明度が 1.5m より

り低いと藻の生育に影響があると考察できたため、1.5m と設定した。

- ③ 夏の海水温: 本学海洋生物科学科の研究成果によると因島沿岸域に生育するアカモクの生育上限温度が 27℃であるため、27℃と設定した。

2020 年 2 月の地球観測データからの上記 3 項目推定結果が共通する海域、つまり藻の生育度が低いと推定した沿岸域 (図中の緑) を図 3 に示す。

Lyzenga の式の適正化

上記により抽出した藻の生育度が低い沿岸域で BI の閾値を下げるアルゴリズムを実現させて Lyzenga の式による藻場識別を適正化させた。2019 年 3 月から 2020 年 2 月までの 6 日分のデータで藻場識別解析を行い、現地観測結果を使って海中補正適用の有無による解析精度をそれぞれ求めた。海中補正適用による藻場識別の解析精度は 4.3 項で説明するとおり 73.0%を得て、環境省の藻場識別解析精度 71%を越える目標を達成した。

4.3 研究計画④の成果

(1) 解析対象の地球観測衛星

アメリカの Landsat-8、ヨーロッパの Sentinel-2 及びアメリカ商用衛星の World View シリーズの 3 種類を対象とする。各衛星のセンサ概要を表 1 にまとめる。

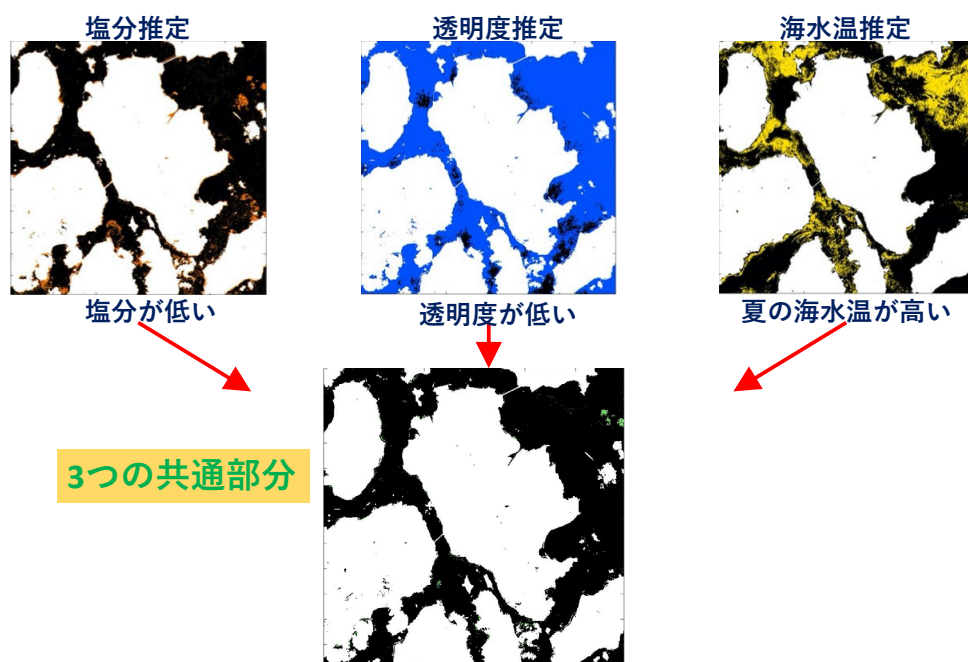


図 3 藻の生育が低い沿岸域の推定結果(2020 年 2 月)

表 1 衛星及びセンサの概要[2][3][4][5]

衛星 (センサ)	Landsat-8 (OLI)	Sentinel-2 (MSI)	WorldViewシリーズ (WorldView-4)
回帰日数	16 日	10 日 (2機で5 日)	約2 日
観測幅	185km	290km	17.7km (直下視)
マルチスペクトルバンド数	8	13	8 (入手可能は4)
マルチスペクトルの分解能	30m	10m, 20m, 60m	1.84m (直下視)
1画素あたりの情報量	12bit	12bit	11bit

① Landsat-8

Landsat-8 撮像データは、United States Geological Survey (アメリカ地質研究所、USGS) のホームページ (<https://landlook.usgs.gov/landlook/>) にて無料で入手可能である。Landsat-8 衛星の回帰日数は 16 日で、解析に必要なマルチスペクトルの分解能は 30m である。2019 年から BI アルゴリズムでは藻場識別解析が不可能となりっている。衛星データの輝度情報に何らかの変更が加わったと推定しているが、現在も詳細不明で対処方法がない。

② Sentinel-2

Sentinel-2 撮像データは、European Space Agency (欧州宇宙機関、ESA) がホームページ (<https://www.sentinel-hub.com/>) より無料で配布している。Sentinel-2 衛星の回帰日数は 10 日であるが、2A と 2B の 2 機運用であるため 5 日に 1 度データを入手できる。また、解析に必要なマルチスペクトルの分解能は 10m である。Landsat-8 衛星と比較すると回帰日数、マルチスペクトルの分解能は優れているが、Landsat-8 データでかかっている一次データ補正をユーザが行う必要があるという欠点がある。しかし本研究では暗画素法によりこの一次データ補正を行うことができるため、毎月の撮像データから藻場識別解析結果を蓄積して、持続的に藻場増減を考察するには Sentinel-2 データが最適である。また、2020 年 6 月以前の撮像データは一次大気補正処理が行われていないデータ (Level 1 Correction、以降 L1C) で、2020 年 6 月以降の撮像データは一次大気補正処理が行われたデータ (Level 2 Correction、以降 L2C) になっており、精度比較により L2C の方が有

効なデータと判断している。

③ World View シリーズ

World View シリーズはアメリカのデジタルグローブ社の商用地球観測衛星である。WorldView-2 の概要を記述すると、マルチスペクトルバンド数は 8 個、マルチスペクトルカメラの解像度は 1.38m と高精度である。日本の代理店から必要なデータの詳細仕様を指定して購入する必要がある、その購入費用は因島一周のデータ一式で約 30 万円代と高価である。本研究では 2 度購入したが因島全体に雲がかからず撮像できているデータは限定的で Sentinel-2 より選択日数が極端に少ないのが実態である。

④ Sentinel-2 と World View の精度比較

2019 年 10 月 9 日撮像の WorldView-2 データおよび 2019 年 9 月 6 日の Sentinel-2 データを比較する。図 4 に WorldView-2 と Sentinel-2 の解析結果比較を示す。

藻場識別解析で重要なパラメータである消散係数比算出について、当初は World View-2 データから算出ができないという課題があったが以下の手法で解決した。

Sentinel-2 データは 3×3 画素の平均を 1 画素 (30m) として 20 画素抽出するが、WorldView-2 データは、画素の大きさを Sentinel-2 データと対応させるために、16×16 画素の平均を 1 画素 (29.44m) として 20 画素抽出することとした。この手法により高解像度衛星画像を用いた BI による藻場識別解析が可能になった。

図 4 を見ると、高解像度の WorldView-2 の識別結果は、藻場が細かな点状ではなくまとまって識別されているのに対して Sentinel-2 の識別結果は WorldView-2 に比べて藻場が細かく識別できているとわかる。

WorldView-2 と Sentinel-2 の撮像データ解析結果の精度を比較した結果では両者に大差なく、観測点別の識別正誤の傾向が

類似している。
以上から Sentinel-2 撮
像データを使用
して藻場識別
解析を行う
ことが最適で
あると判断し
た。

(2) 解析精度 を検証するた めの現地調査

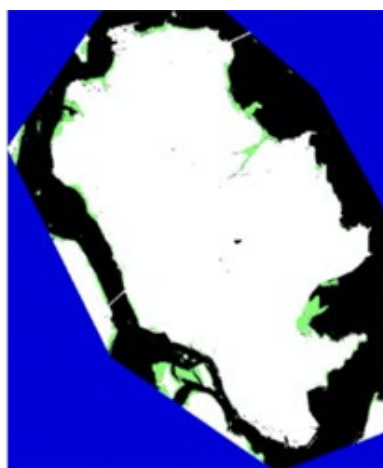
図 5 (a) に藻
場の現地調査
ポイントを示
す。主対象は
広島県尾道市
因島

島の沿岸域であるが、2019 年 10 月以降は尾
道市向島沿岸域、2020 年 4 月以降は尾道市
生口島沿岸域も追加してある。現地調査ポ
イントは、本学生命工学部海洋生物科学科の阪
本准教授、山岸准教授の研究による知見から
藻場がある海域及び藻場がない海域をご指
導いただいて計 20 点を選定してある。

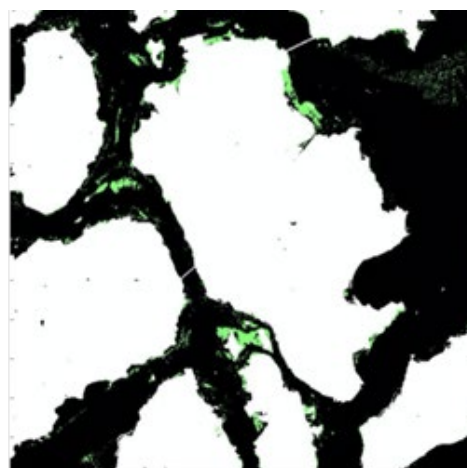
また、図 5 (b) に海洋データの測定ポイント
を示す。この調査対象は因島と生口島の沿岸
域である。

藻場調査では、LIGHT 社釣り用水中カメラ
「Big Catch LQ5050DR」を使用した。この
水中カメラは温度センサと圧力センサを搭
載しており、撮影と同時に水温と水深を測
定できる。精度検証には調査ポイントの位
置情報が必須と
なる。そこで TSKY
社の GPS ロガー
「GT-730FL-S」と
ソニー社の GPS ユ
ニット「GPS-
CS1K」を使用して
軌跡を記録して
ある。

海洋データ測定
には、本学生命工
学部海洋生物科
科学科の金子教
授にご協力いた
だいた水質センサ
(水深、水温、塩



WorldView-2データ (2019年10月9日)



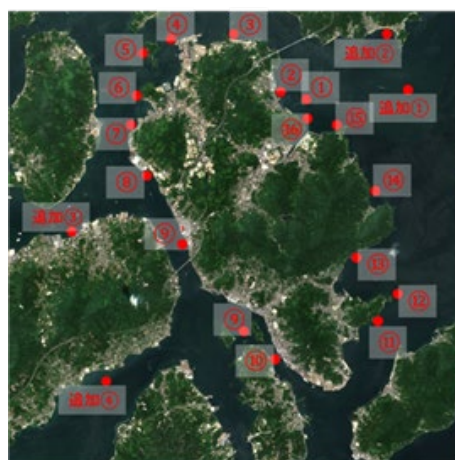
Sentinel-2データ (2019年9月6日)

図 4 WorldView-2 と Sentinel-2 の藻場識別解析結果比較

分、光量子測定) と新規購入した東亜デ
ィーケー(株)の多項目水質計「WQC-24 型」を用
いた。この多項目水質計は pH、溶存酸素、
電気伝導度、濁度、水温、塩分濃度を測定
できる。本研究では、濁度、水分及び塩分
濃度を使用している。

藻場の現地調査方法は、各観測点の海岸
に接近し、藻場の有無を水中カメラで確認
する。藻場が存在した場合は徐々に海岸か
ら離れ、藻場の存在限界を確認してある。
図 6 に現地藻場調査で観測した藻場の撮
像データを例示する。

2019 年 3 月から 2020 年 2 月までの 6 日分
のデータを用いて藻場識別解析を行い、最
終的な海中補正適用の有無により求めた解



(a)



(b)

図 5 藻場現地調査ポイントと海洋データ測定ポイント

析精度を表 2 に示す。海中補正適用により藻場識別の解析精度が 6.8% 向上して 73% を達成している。しかし時期によって解析精度は平均から±15% 前後ばらついているため、このばらつきを小さくすることが課題である。

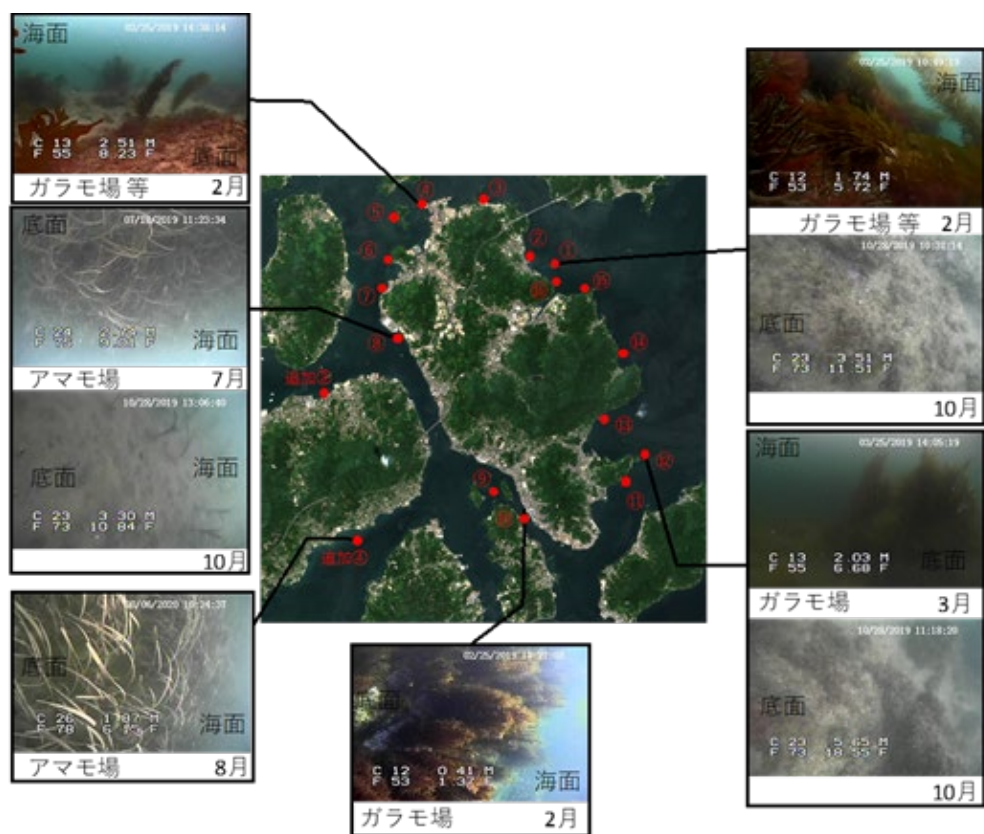


図 6 現地調査で観測した藻場の撮像データ例

表 2 藻場識別解析精度比較

4.4 研究計画⑤の成果

(1) 藻場の季節変化

因島沿岸域全体の藻場識別解析結果から藻場増減要因を考察することは困難であるため図 7 に示す 3 つの海域 (A, B, C) に分けて考察してある。解析に使用したデータは、2019 年 3 月から 1 年間である。

ここでは、アマモ場と

ガラム場が混生している海域 A の季節変化を考察する。各月の藻場識別解析結果、推定藻場面積の季節変化グラフを図 8 に示す。図 8 には、推定藻場面積の図に示した理論的变化の数値が示す藻場の状態の説明表も記載してある。図 8 では、藻場の季節変化を大まかにはとらえているが、8、9 月期と 12 月に藻場面積の急増を示しており、藻場の実態と合致していない。8、9 月期は、解析データを精査すると前述した海中補正により識別している部分が多く、この分過剰に識別していると考えている。この時期

年	月	解析精度		合わないポイント
		相対大気補正あり (海中補正なし)	海中補正あり	
2019	3	63%	81%	4,9,10
	5	75%	75%	1,3,4,10
	8	65%	82%	6,9,15
	10	61%	61%	3,8,9,12,13,14,15
	12	67%	56%	3,6,7,9,13,14,15,追加2
2020	2		83%	3,8,10
平均		66.2%	73.0%	

赤：藻場が存在しているが解析結果では藻場無しと判別

青：藻場が存在していないが解析結果では藻場有りと判別

は藻場の一部が流れ藻になり消滅する時期であり、この流れ藻になる海水条件を藻場識別解析は反映することが有効と考えるが、詳細検討が必要である。12 月については撮像日の 2019 年 12 月 25 日の 2、3 日前に大量の雨が降ったことから、濁度に変化し、その影響で藻場を過剰に識別していると考ええる。正確な藻場識別解析には、地球観測衛星撮像日の直前の天候条件による海水状況も考慮する必要があることの示唆である。

(2) 藻場の経年変化

考察対象は、季節変化と同じ海域 A, B, C である。解析に使用したデータは、2018 年から 2020 年までの 4 月頃の撮像データである。図 9 に 3 つの海域の藻場識別結果と推定藻場面積の経年変化を示すと、藻場面積増減の経年変化をとらえている。個別には海域 A は藻場が減少傾向にあり、特に 2020 年に大きく減少しているがその実態は不明である。海域 B はアマモ場で、藻場面積の変化が大きい。2019 年に大きく減少しているが、実際にこれほど減少しているとは考えられず、これを除けば増加傾向と推定できる。海域 C はガラモ場で、藻場面積の変化は小さく若干の増加傾向である。



図 7 増減要因を考察した 3 つの海域

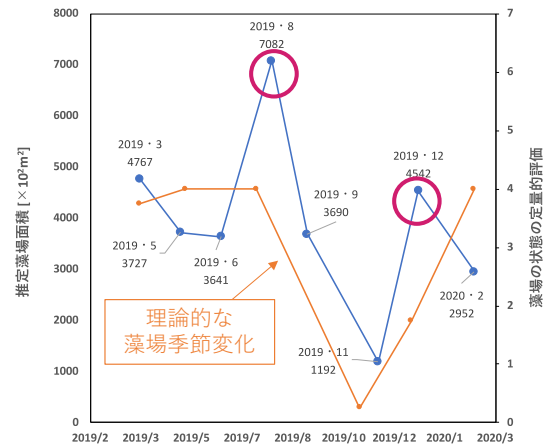
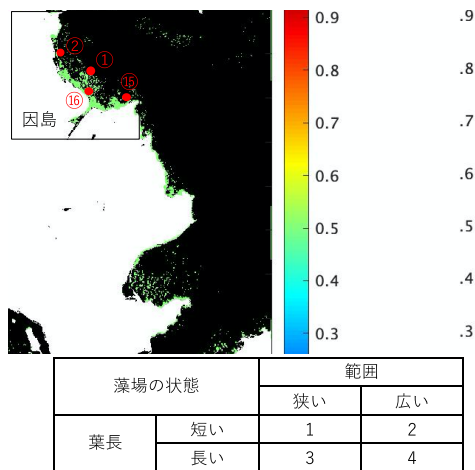


図 8 海域 A における推定藻場面積の季節変化

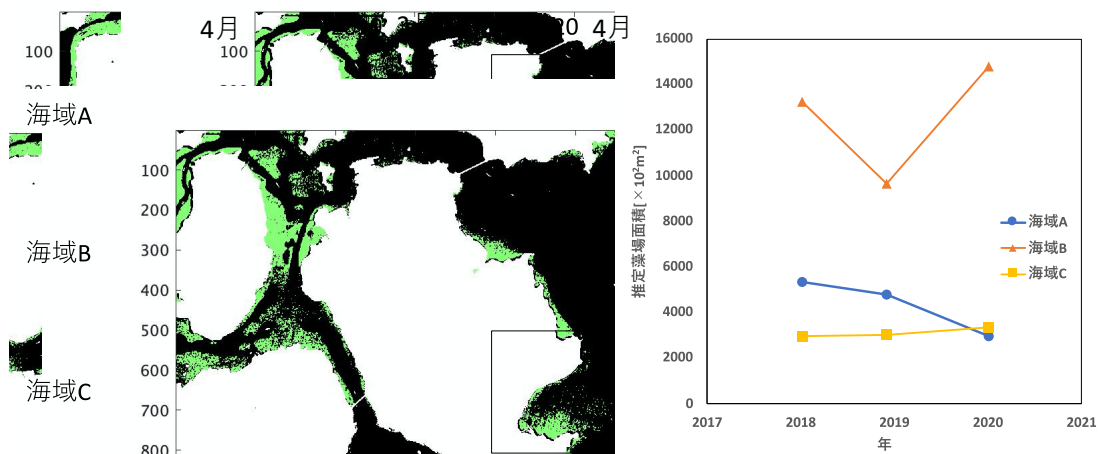


図 9 海域 A, B, C における推定藻場面積の経年変化

(3) 自然環境変化による藻場の変化

2019年9月22日に台風17号が広島県を直撃した。この台風が直撃する前（2019年9月6日）と直撃した後（2019年9月26日）の藻場識別解析結果を比較する。

図10に台風直撃前後の藻場識別解析を示す。台風直撃前にある大きな塊の藻場が台風直撃後に細かな点となって消滅していることがわかる。また解析精度を見ると67%から56%へ大きく低下している。これは台風の影響により土砂の流入や因島海域全体の砂地の攪拌によって濁度が高くなり反射率に大きな変動があった影響と考えている。

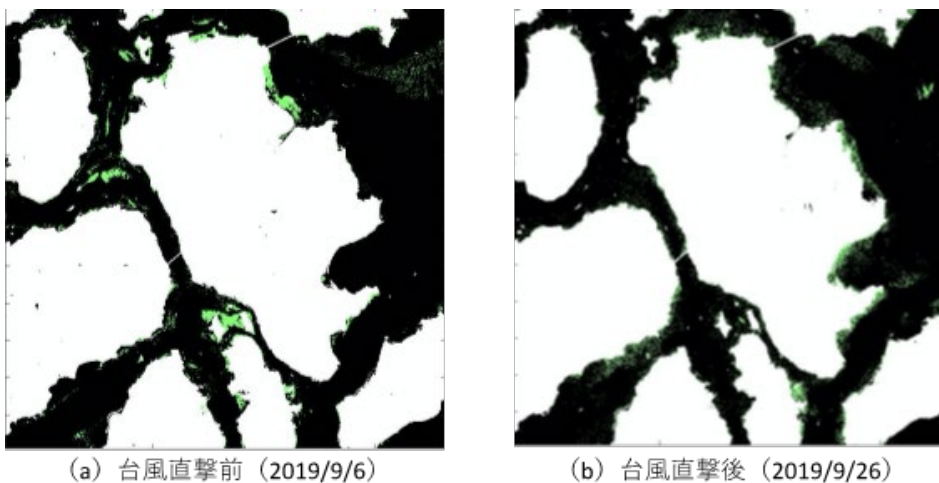


図10 台風による藻場識別解析結果の変化

4.5 研究計画⑥の成果

本研究では陸域の人の活動として、因島の一大産業である造船所の作業を対象とした。尾道市役所に紹介いただき因島重井に所在の株式会社三和ドックより2018年7月1日から2020年6月30日までのメンテナンス作業でドックに接岸した（海に浸かっている）船舶の総トン数（単位：グロストン G/T）推移データを提供いただいた。

提供いただいたデータから月毎の海に浸かっている船舶の総トン数と藻場識別解析によって得られ

た推定藻場面積との相関を分析した。

ここで推定藻場面積のエリアは、三和ドック付近で藻場増減の影響が出るのは比較的浅い西側の海域を抽出した。アマモは11月に発芽し12月が成長期であるため、11月から3月の船舶の合計に着目し、その相関結果を図11に示す。藻場成長期の船舶の合計トン数と推定藻場面積のピーク値（2019年5月と2020年4月）の関係を比較すると、2018年11月から2019年3月（以降、2018年度）は2019年11月から2020年3月（以降、2019年度）に比べて合計トン数が少なく推定藻場面積は大きいとわかる。推定藻場面積は図12に示す。図12より2018年度から2019年度にかけて藻場

が減少傾向にあると判別でき、造船活動によって藻場が減少する影響を受けている可能性が示唆された。しかし造船作業に限って海へ及ぼす影響を評価するにグロストン数のみでは適切ではなく、作業の内容や作業員人数などの詳細なデータが必要となる。これについて三和造船と討議したが、どのようなデータを解析するか結論を得られなかった。

また尾道市役所と島全体の陸域活動を代表するデータについて討議したが、大規模な基盤調査が必要で本研究では実行が不可能との結論である。

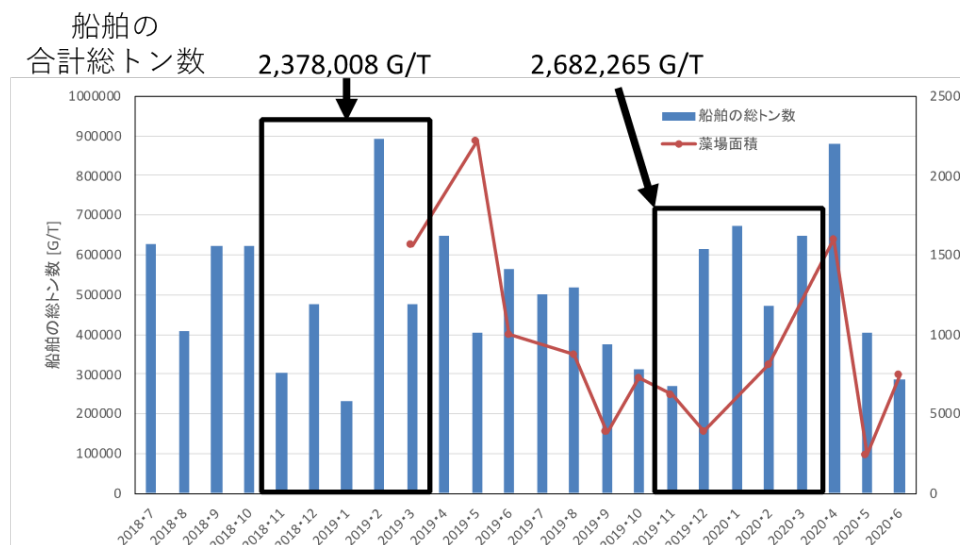


図11 月別の船舶総トン数と推定藻場面積の関係

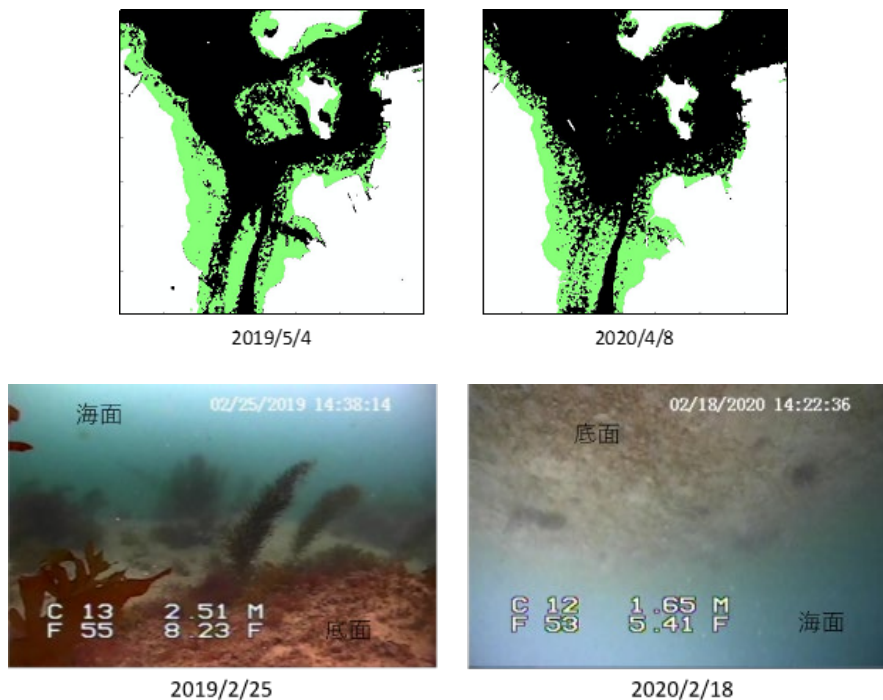


図 12 三和ドック周辺海域の藻場識別解析結果と現地調査結果

5. おわりに

瀬戸内の里海の豊かさを表すパラメータの一つとして藻場の状態を選定し、その藻場を地球観測衛星からのリモートセンシングデータの解析で求める研究を実行した。5年間の研究により以下の成果を得て、研究目的とした「藻場の持続的モニターによる季節変化や経年変化を把握する技術の確立」を達成した。

今後は、藻場増減の定量的モデル構築を実行するよりも、藻場識別解析精度向上と海の状態を知る研究として様々な海域の海水温、塩分濃度、濁度及び詳細スペクトルデータを収集してデータベース構築し、リモートセンシングデータによる推測と考察へ向かうことに大きな意義がある。

本研究で達成した項目

- 1) リモートセンシングによる海洋観測はグローバルな気象変化把握として行われている一方で沿岸観測の重要性と困難さを明確にした。
- 2) 地球観測衛星データから藻場を識別する瀬戸内に適した BI アルゴリズム分析技法を構築した。
- 3) 持続的に藻場の状態を把握するために最適な地球観測衛星として Sentinel-2 を選定した。
- 4) Sentinel-2 からの因島周辺データを収集して藻場識別解析結果のデータベースを蓄積した。
- 5) 藻場増減要因を考察し、それを反映して従来に

ない海中補正技法を考案し、解析精度 73%を達成し、環境省の解析精度 71%を上回った。

- 6) 藻場の季節変化、経年変化、陸域の活動による変化を解析結果から考察し、藻場増減モデル化の基盤を構築した。

参考文献

- [1] ルイ ソチエー（広島大学 大学院工学研究科）、作野 裕司（広島大学助教 大学院工学研究科）「衛星Terra/ASTERデータを使った吉名干潟における藻場モニタリング」『水工学論文集 第52巻（2008）
- [2] 宇宙技術開発株式会社 衛星画像データサービス、“Landsat衛星・センサの概要・諸元,” : https://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_landsat.html.
- [3] 宇宙技術開発株式会社 衛星画像データサービス、“Sentinel-2A/2Bの概要・諸元,” : https://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_sentinel2.html.
- [4] 宇宙技術開発株式会社 衛星画像データサービス、“WorldView-2衛星・センサの概要,” : https://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_worldview2.html.
- [5] 一般財団法人 リモートセンシング技術センター、“WorldView-2,” : <https://www.restec.or.jp/satellite/worldview-2>.

7. 藻場における生態観察用 ROV の開発

沖 俊任*

1. はじめに

1.1 研究背景と問題点

浅海域における藻場は小動物、稚魚、幼生が多く生息している。この生態システムを理解することで、生態系の保全、涵養、活用を発展できると期待される。例えば、稚魚が何をどのくらいどのように食べているか分かれば、養殖などに応用できる可能性がある。この生態システムの理解は様々な方面からアプローチする必要があるが、その一つとして藻場での生活の様子を観察する方法が考えられる。このような藻場として、アマモ場とガラモ場などがある。前者は潮流の穏やかな浅瀬の砂地であり、後者は比較的潮流の速い深めの岩場である。このような藻場の観察方法として、撮影機材を持ったダイバーが直接藻場に入り観察する方法が考えられるが、潜水する時間や時間帯などに制約がかかる。このような困難の作業を代替するシステムとして、海中を移動できるロボットの利用が考えられる。このロボットには、移動能力と、撮影能力が重要となる。

海中で活躍するロボットのうち、移動機構を有するものは ROV (Remotely Operated Vehicle: 遠隔操作型無人潜水機) と AUV (Autonomous Underwater Vehicle: 自律型無人潜水機) に大別できる。多くの場合、ROV は作業用や狭域探査用、AUV は広域探索用に用いられる。ROV はオンラインでロボットと操縦者間で情報交換を行っており、一方 AUV では航行中はリアルタイムで多くの情報通信を行わないためである。さらに、ROV は有線とするとそのケーブルを介して動力(電力)を供給できるため小型化と長時間運用が容易であるが、AUV ではそのエネルギーをバッテリーとして保持するため大型でないと長時間の運用が困難となる。さらに、ROV の利点とて、開発時間が短かく出来る、安価、万が一海中で不具合が生じてもケーブルを引っ張れば回収出来る可能性が高い。これらの特徴からこれまでに多種の ROV が市販されている。それらの多くは概ね中性浮力を有し、水中モータで移動する。しかし本体の浮力は静的であ

り、水深を保持するためには水中モータで制御を続ける必要がある。このような ROV は比較的ゴミなどの少ないきれいな水域で使うことが想定されていると思われ、モータにゴミや砂が噛むと動力を失い移動できなくなる。

生物を観察するためには撮影装置(カメラ)を搭載する必要がある。さらに、藻場の生物は小さいため、近くに寄るか、望遠で撮影する必要がある。望遠機能を有する撮影装置は、その視野が狭いため、パン・チルト・ズーム機能(PTZ 機能)を有し必要に応じてカメラの向きを操作できるものが望ましい。後者の方が遠方から撮影でき有利と考えられるが、浅海域では海水の濁度が大きく、ズームがどこまで有効か検証する必要がある。このようなカメラを高度に制御するには、装置がリモートで操作でき、かつ、その方法が公開されていなければならない。このようなインターフェースとして ONVIF (Open Network Video Interface Forum) が公開させており、これに対応したカメラであれば必要に応じて入れ替えができるなど利便性の向上が期待できる。

2 開発するシステム

本プロジェクトでは藻場の生態系を観察できる ROV の開発を目指している。まずは対象とする藻場をアマモ場とした。これは、アマモ場がより浅瀬であり、より小型の生物の数と種類が多くロボットの有効性が得やすいと考えたためである。このとき、システムは次が求められる。

【求められる機能】

1. 移動機構
 - (ア) 海底が砂地でも、水中モータに砂が噛むことなく移動できる。
 - (イ) 観察中は水中モータを停止しても位置と姿勢が維持できる。
 - (ウ) 姿勢と浮力の自動制御ができる。
2. 海底が砂地でも動作できる。
3. アマモ場は水深数メートルのため、設計仕様は

水深 20 メートルまで使用可能。

4. カメラ

- (ア) PTZ 機能を有する
- (イ) 高い倍率のズーム機能を有する
- (ウ) ONVIF など制御方法が公開されている
- (エ) 高機能なカメラで生態が観察できる。

【求められる非機能】

1. 安価で入手が容易な部品で構築できること
2. 開発期間短くするため、制御システムは ROS (Robot Operation System) をベースに構築する。これにより、複数のマイコンによる制御や GUI の構築が容易となる。
3. バッテリーは強力だが比較的安全。

実際の開発は市販の ROV の改造も考えられるが、適切な商品は未知からなかった。そのため、新規に開発することとした。本プロジェクトでは、次の 3 つのサブテーマを設けた。

【サブテーマ 1】 浮袋による能動的な中性浮力を獲得する ROV の開発 (ROV1)

アマモ場は砂地であることが多く、水中モータによる浮力の調整法では、ROV が海底付近にある時に巻き上げた砂が水中モータに噛む恐れがある。この問題を解決するため、ROV に浮袋を設けて浮力の調整を行うことで砂が噛む問題を回避する。これにより垂直方向への移動で砂を巻き上げることではないが、ゴミなどが噛む可能性は残る。潮流など水平方向に働く力に抗する推力は水中モータで発生させることとする。カメラはサイズを小さいものをデータ転送の方法を検証するために搭載するにとどめた。ただし、ROV 本体を水平に保ったまま下方が観察できるよう、チルト機能を設ける。

このテーマでは、ROV の開発を通して次の検証を行う。

- 水密性を有し、水圧に耐え、安価な筐体の製作
- 浮袋状の浮力調整機構の有効性
- ROS による制御システムの有効性
 - センサとアクチュエータをマイコンで制御。
 - 複数のマイコンと PC を連動させる分散システムの構築
 - 汎用性を考慮したブラウザベースの GUI
 - ROV 本体と母船との通信の質
 - 筐体内への浸水を検出するセンサ

【サブテーマ 2】 サブテーマ 1 の ROV の機能を確認するための圧力容器の検討

ROV は水中で動作させるため、海上から直接観察

するのは困難である。また、簡易な水槽では水圧が掛からず浸水や変形が確認できない。

この問題を解決するための圧力容器について検討を行う。この装置は ROV を入れて動作させることができ、水深 20m 相当の水圧を掛けたときの状態を観察できる窓を有するものとする。

実際の製作は行わず 3D-CAD で構造を検討し、CAE で強度の検証を行う。

【サブテーマ 3】 高機能カメラを搭載した水中クローラによる ROV の開発 (ROV2)

サブテーマ 1 における ROV は、水中で浮いているため、潮流に逆らうためには常に水中モータを駆動する必要がある。この点を改善するため、これまでに提案されている、水中に複数のウインチを設置してそのワイヤーの長さを調接することで交換位置を制御する方法を適用することを検討した。しかし、この方法では広い範囲を探索することが困難となるため、水中クローラを適用することとする。水中クローラはいくつもの商品がすでにあるが、小型で安価なものは見つからない。そこで、このシステムも新規に開発することとする。

水中クローラでは、低速高トルクの回転軸でクローラのスプロケットを駆動する必要がある。しかし、一般的な水中モータはスクリュウの駆動を想定しており、そのまま使用することができない。この問題に対して、筐体の隔壁越しに動力を伝えることができるマグネットカップリングの使用を検討した。この方法では筐体に軸を通す穴を開ける必要が無く高い気密性が容易にえられる。しかし、ここで必要な高トルクを伝達できる安価なマグネットカップリングが無いこと、さらに、海底付近で使用する時マグネットの磁力で砂鉄等が吸着する恐れがあることを考慮し使用しないこととした。筐体に軸を通して気密性を確保する方法として、パッキンやメカニカルシールなどを用いる方法があるが、本システムでは筐体内に漏水があるとそれを排出できないため高い気密性が求められることから、メカニカルシールの適用が望ましい。

ROV を長時間使用するには、ケーブルから電力を供給できる必要がある。そのため、ケーブルは PoE (Power over Ethernet) 用のものを用いることで電力の供給とイーサネット通信の両方を実現する。しかし、クローラ用のモータは PoE で供給できる電力より大きなパワーを必要とするため、ROV にはバッテリーも搭載する。ROV が移動していないときは PoE からの電力をバッテリー充電に用いる。この充電器の開発が必要である。

この ROV では PTZ カメラを搭載する。このカメラ

を ROS 上で操作できるノードが必要である。このようなノードはインターネット上にあると思われるが、使用するカメラの性能を十分引き出すためには改良が必要である。

このテーマでは、ROV の開発を通して次の検証を行う。

- 水密性を有し、水圧に耐え、安価な筐体の製作
- 筐体から動力を外部に伝達する部分の検討
 - メカニカルシール使用の検討
 - サブテーマ1のROVでは筐体から動力を外部に伝達する部分はなく、そのため比較的水未知が容易である。一方本システムではモータを
- PoE からのバッテリーの充電
- ROS から ONVIF 仕様の PTZ カメラの制御

3. 浮袋を有する ROV の開発 (ROV1)

3. 1 外観とパーツ

本紀要に投稿できる図 1 に ROV 本体の外観と主な部品を示す。(a) 図は前面、(b) 図は後面である。(a) 図 (b) 図では撮影時期が異なり帯ベルトなど実装が異なっている。

全体の大きさ(前後×幅×高さ)は概ね 57×55×47[cm]であり、重量は概ね 48[kg]である。

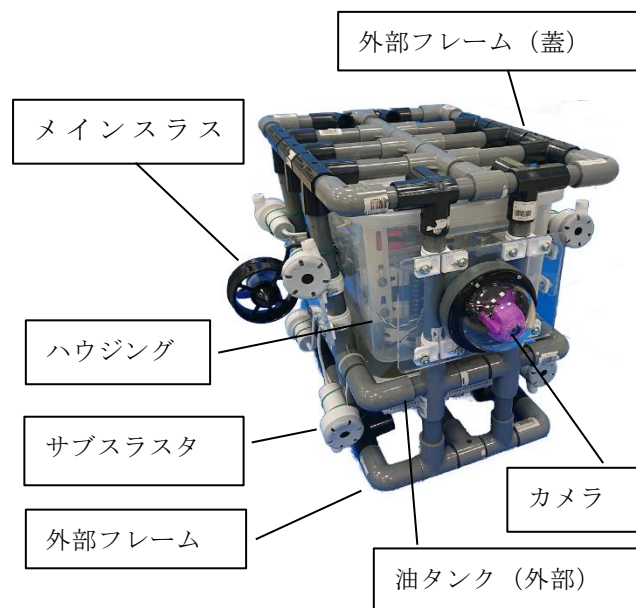
以下に、パーツを示す。

3.1.1 ハウジング

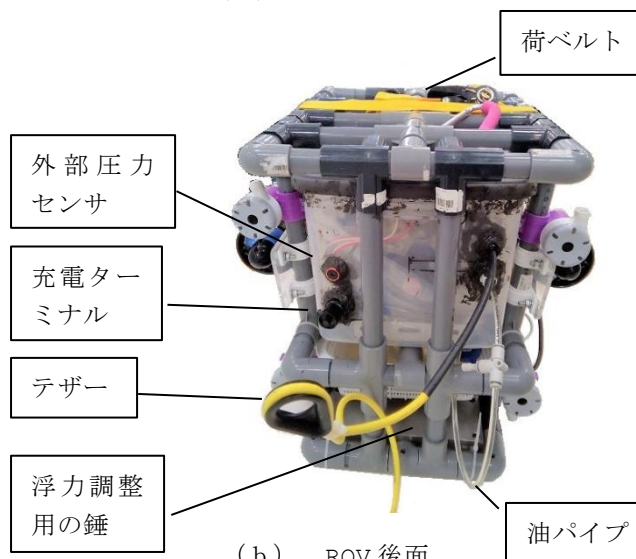
電子回路やバッテリーを格納しているハウジングの周りを水道管用の塩化ビニル製パイプで作成した外部フレームで覆っている。さらに、このフレームに2個のメインスラスト、8個のサブスラスト、カメラ、および、油タンク(外部)を格納している。

ハウジングにはホームセンターで入手したアスベル社製キッチンボックス(NF-55, 容積 22.5[L])を用いている。この容器は蓋と本体はそれぞれ一体成型されており、軽度の気密性を保つよう蓋と本体の間にゴムのシールが付いている。そのため、この蓋と本体の間をシリコンでシーリングすることで高い気密性を保つことが期待できる。さらに、水中において水圧でハウジング変形し気密性がなくなるのを抑制するため、外部フレームと内部フレームで変形を抑制している。

このハウジングの周りを水道管用の塩化ビニル製パイプで作成した外部フレームで覆っている。これはハウジングを保護するとともに、スラスト



(a) ROV 前面



(b) ROV 後面

図 1 ROV 本体の外観

などの取付け場所としている。

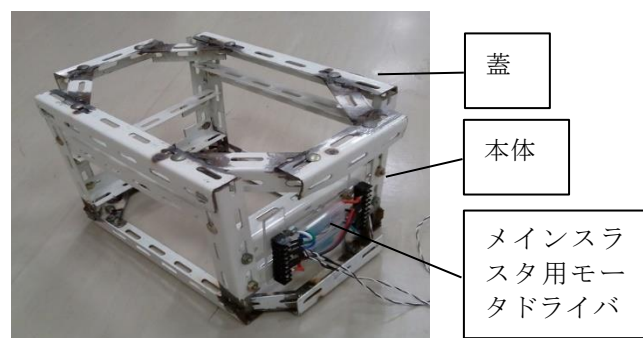
3.1.2 スラスト

メインスラストは ROV の前後進および旋回(ヨウ軸運動)を行うために用い、左右それぞれに1つ取り付けている。これには、BlueRobotics 社製 T200 Thruster (20[V]: 最大推力 (20[V]) 前進/後進 6.7 / 5.05 [kgf], 645 [W]) を用いている。

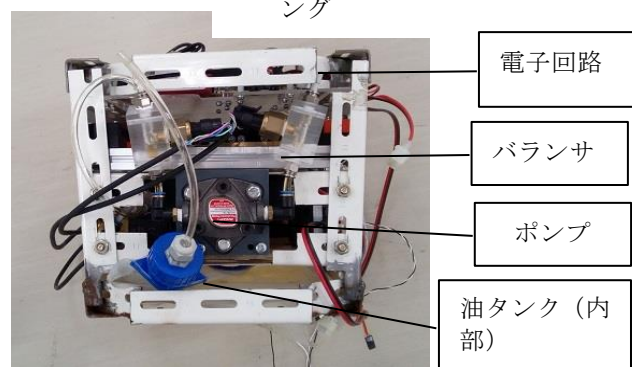
サブスラストは、家庭用のバスポンプ(工進社製 家庭用バスポンプ KP-104, 11[V], 1.3[A], 最大揚程 2.5[m], 最大吐出量(高さ 0m 時) 14[L/分])で、1方向のみの噴流となる。

3.1.3 内部ハンジング

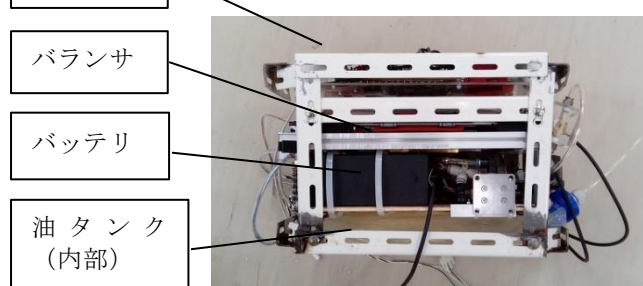
図 3(a)に内部ハウジングと図 4(b)と(c)にハウジングにパーツを収めた様子を示す。



(a) ハウジング



(b) 組み上げたハウジング (正面)



(c) 組み上げたハウジング (右側面)

図 3 内部ハウジング

図 4(a)に示すように、内部ハウジングは鉄を溶接で加工して作成している。ただし、蓋と本体は分離できるようになっている。これにより、本体内部に様々な部品を固定できるとともに、ハウジングが水圧で内側に大きく変形し気密性が損なわれるのを防ぐことができる。この内部に、図 3 に示す各パーツを配置した。

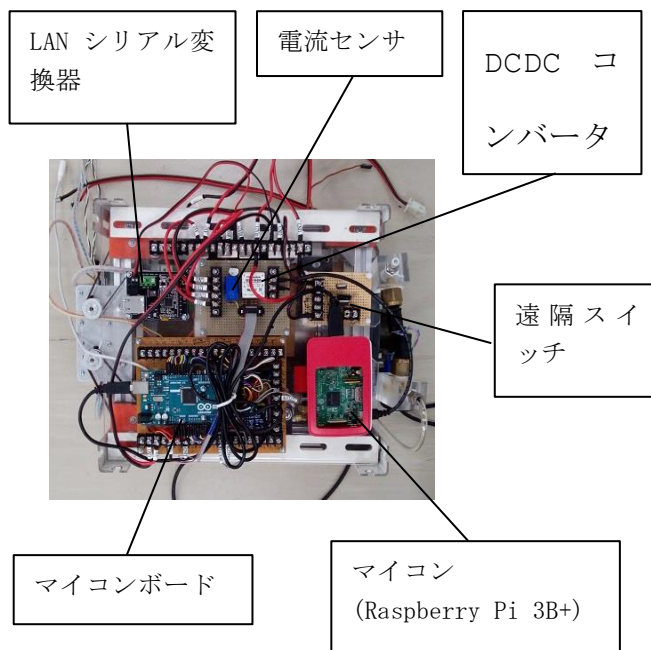


図 4 電子回路部

3.1.4 電子回路部

図 5 に図 4(b)で内部ハウジングの蓋を除き上から見た電子回路部の写真を示す。

マイコン (Raspberry Pi) は LAN と LAN シリアル変換器 (BlueRobotics 社製 FATHOM-X-SINGLE-R1-RP) を介してコントローラ内のマイコンと通信を行う。ROV 内のアクチュエータとセンサはマイコンボードを介し、マイコンボードと USB で接続されたマイコンから制御される。さらに、母船のコントローラ内のリモートスイッチの操作状態はテザーを介して遠隔スイッチ (FET) を操作し、ROV 内のバッテリーから供給される電力の開閉を行う。

3.1.5 バランサ

バランサの構造を図 5 に示す。

図 5(a)はこの 3D-CAD モデルであり、一部のパーツの透明度を変更してベルトの配置が識別できるように表示している。ベルトの一部は錘 (真鍮, 2[kg]) に固定されており、2 つのステッピングモータ (MERCURY MOTOR 社製 ST-42BYG020) とタイミングベルトで繋がり差動動作で錘の位置を変更することができる。この構造の場合、装置の厚みを薄くできる利点がある。

錘の平面位置は 2 つのポテンショメータで検出しマイコンボードで計測される。この情報は錘のリミットスイッチ代わりに利用するとともに、母船で知ることでもある。

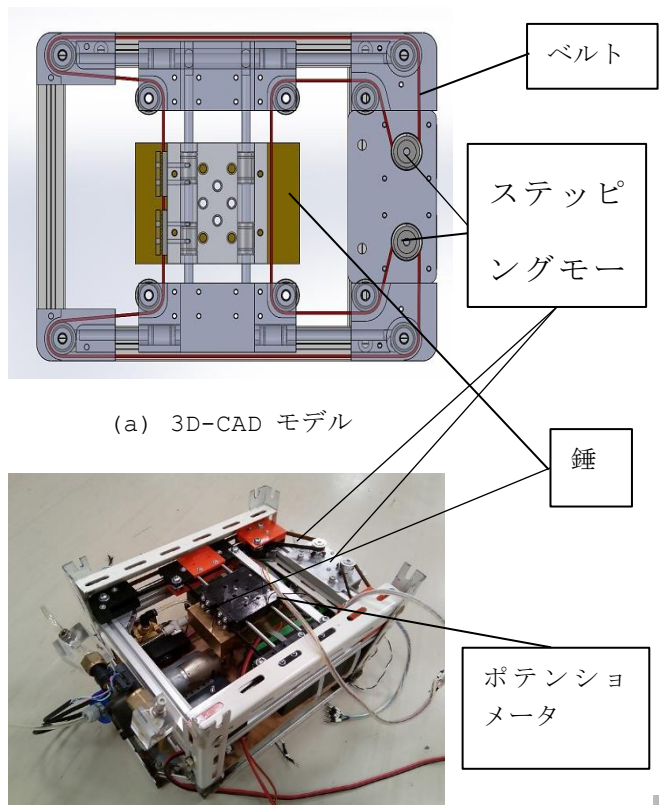


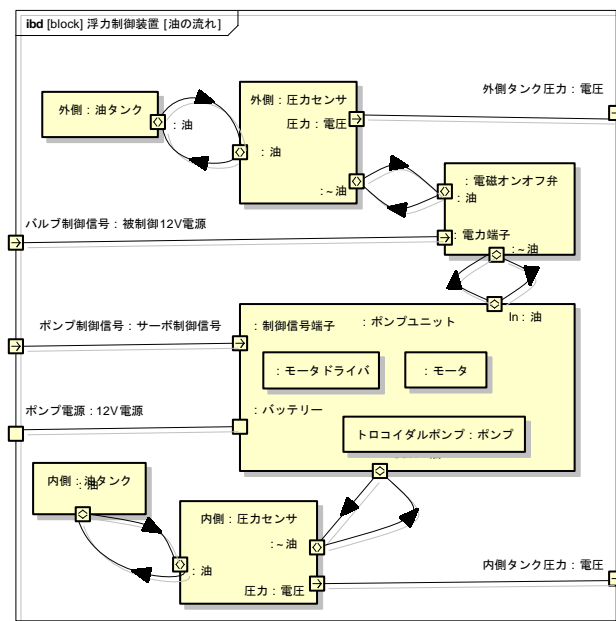
図 5 バランサ

3.1.6 浮力制御装置とバッテリー

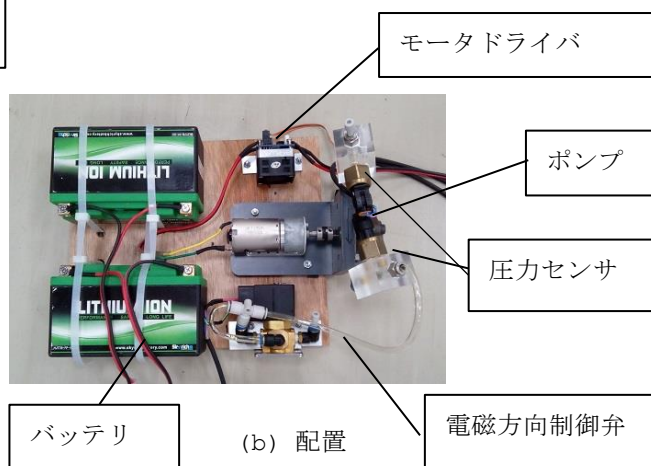
図 6 に浮力制御装置とバッテリーの構造と配置を示す。

マイコンボードからポンプユニットのモータドライバ (Parallax 社製 HB-25) に PWM 信号が送られ、それに応じてモータ (タミヤ社製ギヤードモーター 540K75) が回転しポンプ (日本オイルポンプ社製トロコイドポンプ TOP-10A) でロボット内とロボット外の油タンク (プラテック社製水タンク PW-6) 内の油 (食用油) を移動させることで浮力を調整する。さらに、ポンプ停止時に油の流れを止めるために電磁オンオフ弁 (SMC 社製 3 ポート方向制御弁 VX3114A をオンオフ弁として利用) を設けている。

ポンプは日本オイルポンプ社製トロコイドポンプ TOP-10A (理論押し除け容量 $0.8[\text{cm}^3/\text{rev}]$, 最大吐出圧力 $0.5[\text{MPa}]$), モータはタミヤ社製ギヤードモーター 540K75 を用い, オルダムカップリングで結合し駆動する。このモータは $7.2[\text{V}]$ で無負荷回転数 $221[\text{rpm}]$, 最大効率時のトルク $12[\text{kg} \cdot \text{cm}]$ ($6.32\text{A}/185\text{rpm}$), 最大トルク約 $82[\text{kg} \cdot \text{cm}]$ ($38\text{A}/0\text{rpm}$) である[5]。また、モータドライバには Parallax 社製



(a) 構成



(b) 配置



(c) 油タンク (内部)

図 6 浮力制御装置とバッテリー

HB-25 (25[A]駆動, 電源 6-16 [VDC], RC サーボ制御信号で制御) を用いた。電磁オン・オフ弁には 2 位置 3 ポート制御弁 SMC 社製 VX3114A-01-6T1-B (12[V], 油用, COM.タイプ, 最高システム圧力 $2[\text{MPa}]$) を用いている。

さらに、過度に油を移動させようとしないよう、各油タンクに圧力センサを設けタンク内の圧力が

過度に上昇しないよう制御を行う。

バッテリーは 12V のリチウムバッテリー (SKYRICH 社製 HJT7B-FP) を 2 つ使い、12[V]と 24[V]電源として用いている。これらの電圧はテザーを介して母船から監視していると共に、マイコンボード上のマイコンでも計測している。

これらのバッテリーの充電も、テザーを介して行うことで、ROV 本体を一度密閉するとそのままに運用できることが期待できる。しかし、テザーは 1 本あたり約 13[Ω]の電気抵抗があり、市販のバッテリー充電器でテザーを介して充電を行おうとするとバッテリーに異常があるとみなされ充電ができなかった。この問題を解決する必要がある。

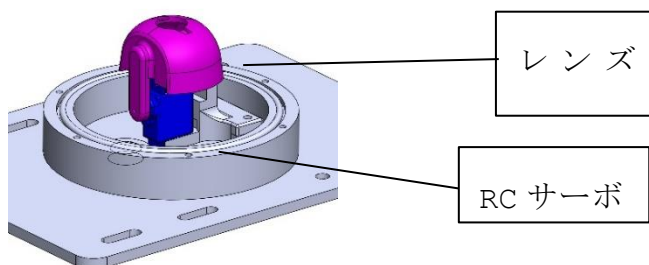
3.1.7 テザー

テザーには BlueRobotics 社製のものを 100[m]用いる。これは、4 極対のツイストペアケーブル (26AWG, 8 本) とケブラーファイバーの芯線から構成されている。これらの配線を図 7 に示す。

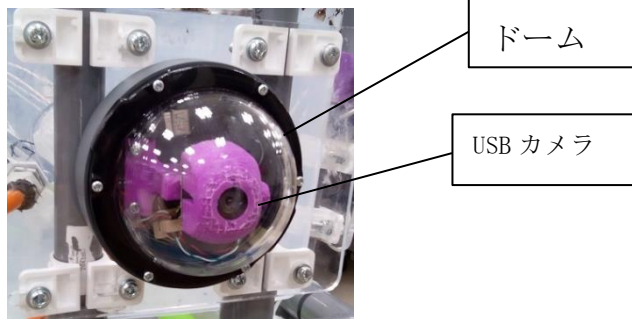
ROV 本体とコントローラ間の通信は LAN シリアル変換器を介して行うため、それぞれのマイコンからは LAN による通信と変わらない。

3.1.8 カメラ

ROV 前方のカメラを図 7 に示す。



(a) 3D-CAD モデル



(b) ドーム内のカメラ

図 7 カメラ

図 8(a)のように、USB カメラ (BlueRobotics 社製 CAM-USB-WIDE-R1-RP) はレンズカバー内に取り

付けられ、RC サーボにより上下 90 度は範囲でチルト動作させることができる。このドームは半球でその内径は概ね 90[mm]である。

3.1.9 マイコンボード

図 8 に ROV 本体に搭載されるマイコンボードを示す。

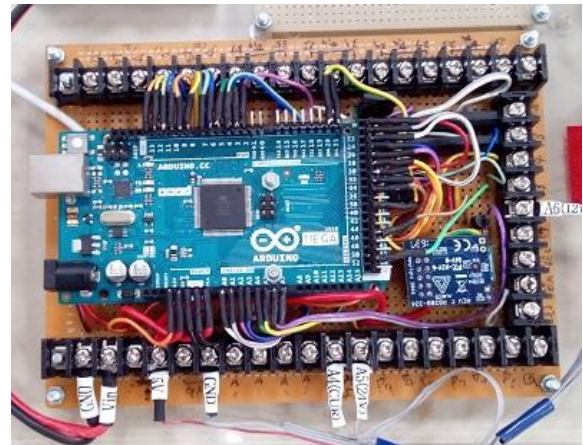


図 8 マイコンボード

このボードは Arduino Mega 2560 を中心に構成され、マイコン (Raspberry Pi) の代わりにセンサからの情報の入力やアクチュエータの駆動など外部とのインターフェースとなる。この Arduino も Raspberry Pi に接続され、ROS の管理下に置かれている。

3.2 設計上の性能

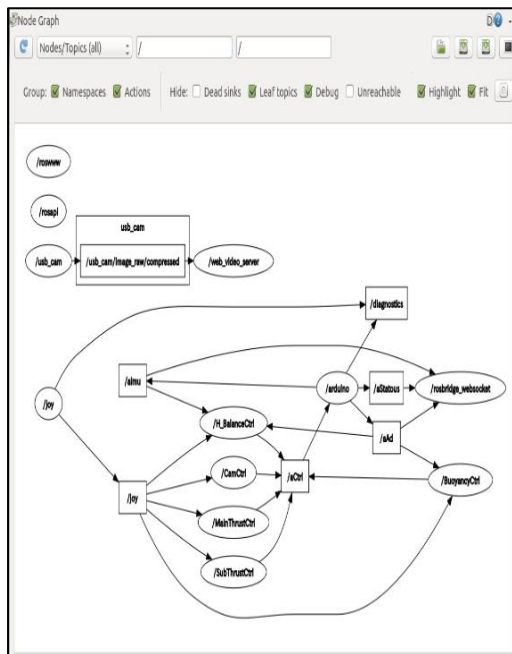
主な設計上の性能は次である。

- メインスラスタによる前進能力: ROV からメインスラスタとサブスラスタを除いた正面の面積とメインスラスタ 2 機の能力から、2.07[m/s]が期待できる。
- サブスラスタによる上昇能力: サブスラスタ停止時に中性浮力が得られているとすると、下側 4 器による最大上昇速度 0.287[m/s]が期待できる。
- 浮力制御装置による上昇能力浮力: 0.323[m/s]が期待できる。
- カメラの撮影能力: 最低照度は 0.01[lux], 1[°] 単位で 0~90[°] の範囲でチルト動作。

3.3 ROS によるシステム構成

ROS を用いたシステム構成を図 9 に示す。この図は ROS が動作中に rqt-graph で出力したものである。

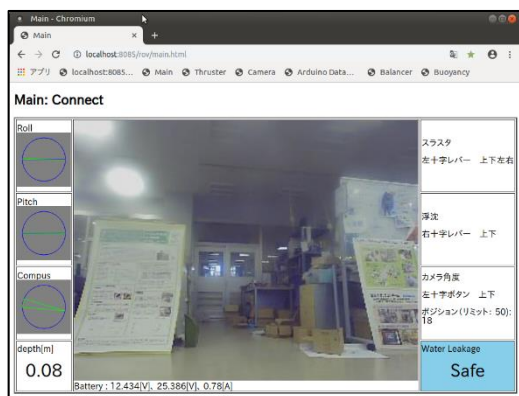
各ハードウェアを担当するノードが接続され、GUI を担う Web 連携のためのノードがある。



図



(a) 実験風景



(b) カメラ画像

図 10 実験水槽における実験

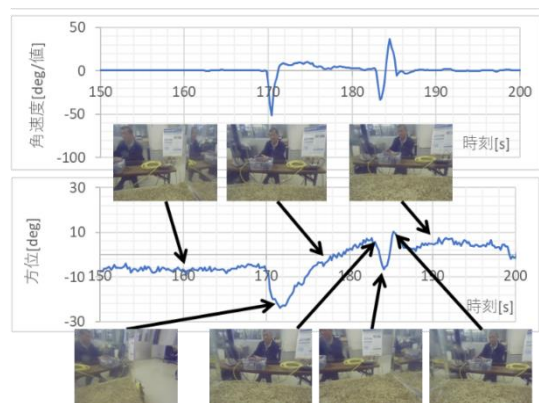


図 11 メインスラスタによる手動方向制御結果

3.4 実験水槽における動作

図 10 に、実験水槽でテストしたときの様子を示す。(a)が実験水槽に ROV を投入した様子であり、水槽内左奥に ROV がある。(b)にこのときの GUI の様子を示す。中央に ROV のカメラで撮影した風景が表示されている。左側に ROV の姿勢と方位、右に操作方法と右下に漏水センサーによる漏水の有無を示している。

3.5 実験水槽における動作

図 11 に手動で ROV の方向を制御したときの結果を示す。カメラで撮影した画像と内蔵した角速度センサと方位センサの情報が良好に対応していることが確認できる。

3.6 海中投入試験

因島の栈橋で行った海中への投入実験の様子を図 12 に示す。(a)はトラックから海中に投入する様子で、そのための小型クレーンを準備した。これにより、栈橋に接触することなく ROV を海中に投入できた。このときの ROV の海中での様子を別の ROV から撮影したものを(b)に示す。このときの ROV から撮影した水中の様子を(c)と(d)に示す。(c)では(b)を撮影した ROV が撮影できている。(d)は栈橋表面を撮影した画像であり、至近距離のためピントが合っていないが海藻の成育の様子が撮影できている。

この後、ROV の潜水を試みたが、潜水を始めると電源がオフになる問題が生じた。この問題は、実験水槽では生じなかった。この対策として、図 3 の内部ハウジング上部に梁を設け、実験水槽で問題が生じないことを確認した。その後、海中投入試験は行ってなく、実施する必要がある。

3.7 ROV1 のまとめ

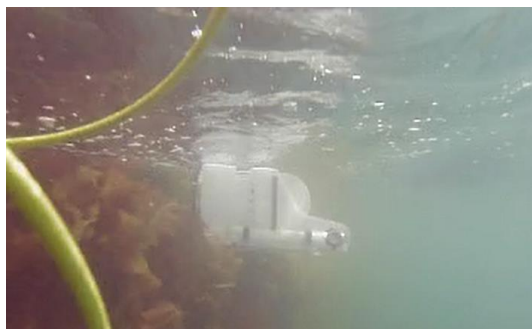
ROV1 の試作と実験を行った。各要素の基本的な動作は出来たが、性能評価や制御性能の検証ができてい



(a) 実験風景



(b) 別の ROV から撮影した海中での様子



(c) ROV で撮影した海中の様子 (1)



(d) ROV で撮影した海中の様子 (2)

図 12 実験水槽における実験

ない。継続して開発する必要がある。

4. 性能評価用タンクの設計

4.1 設計仕様

当初政策が容易となるよう直方体を検討したが良い結果が得られなかった。そこで、JIS B 8267「圧力容器の設計」に準じて円筒形の圧力容器として設計を行った。このときの主な仕様は次としてた。

- 内径 700[mm]以上
- 鏡板を除く胴の高さ 1000[mm]程度
- 内圧 0.2[MPa]まで
- 水が充てんできる。
- 大きな観測窓がある（可能であれば3つ）
- ケーブルグランドを取り付けることができる部分がある。取り外しができる。
- 内部に、試験体（50[kg]まで）を入れることができる（底置き、蓋吊り）
- 蓋の取り外しができる。
- 人が縁につかまって中をのぞき込むような作業を行っても壊れない。
- 材料はさびないものが望ましいが、安い素材で防錆処理（塗装）も可。
- 常温程度で使用

4.2 CAD を用いた設計

JIS に基づいた設計結果に基づいて、3D-CAD で作成したモデルを図 12 に示す。(b)は(a)に対して安全率についてシミュレーションを行った結果であり、安全率が3以下の部分を表示している。ここでの安全率は、破壊応力に対するものである。

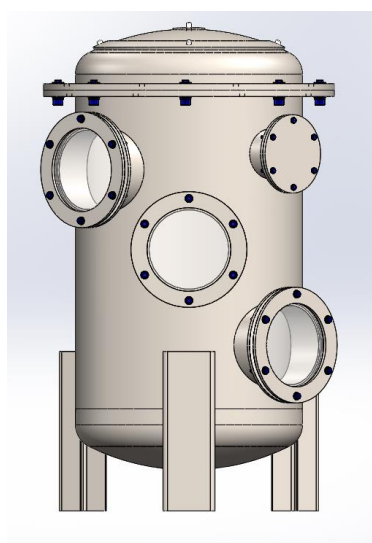
(b)より、観察までの周囲で安全率が低く、最小値は0.008でありこのままでは破壊されると考えられる。安全率が特に低い部分は接合部であり、接合の方法を再検討する必要があることが分かった。

5. 高性能カメラを搭載水中クローラの開発

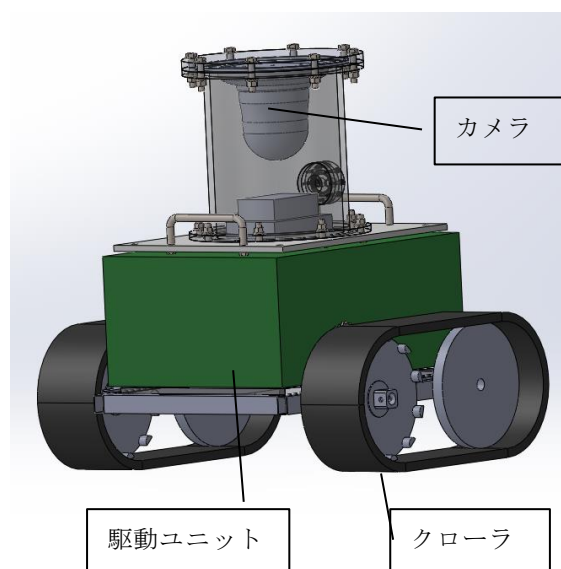
5.1 設計仕様

ROV をクローラで構成するとき、地面との摩擦により旋回に力が必要なこと、障害物を乗り越える力が必要となること、ケーブルをけん引するのに力が必要となること、潮流があるときケーブルが張力を受けてクローラが引っ張られることなど、非有線のクローラに比べて多くの力が必要となる。しかし、これらに必要な力を事前に知ることは困難なため、ここでは片側で 280 N の駆動力をクローラが発生できるように検討する。これは、ROV の重量が 40 kg として片輪で 45° の傾斜を上る力に相当する。

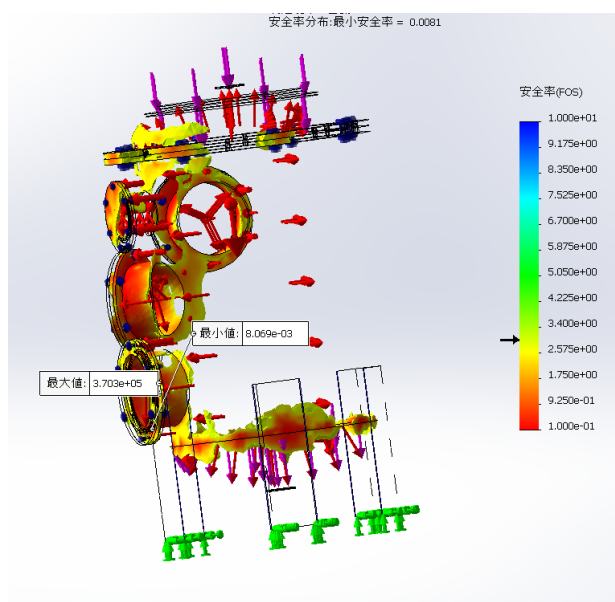
クローラ部は小型で海水に耐性があるものとして、小型除雪機のゴムクローラを利用することとする。



(a) モデル

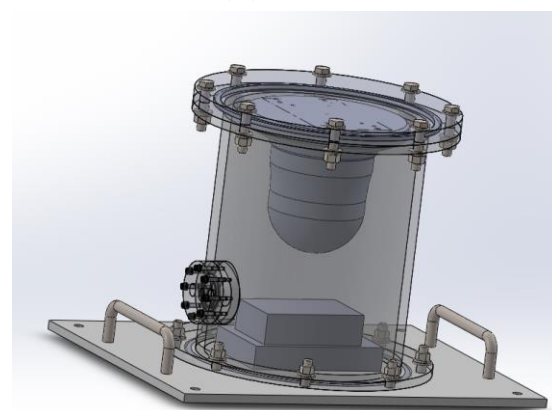


(a) モデル

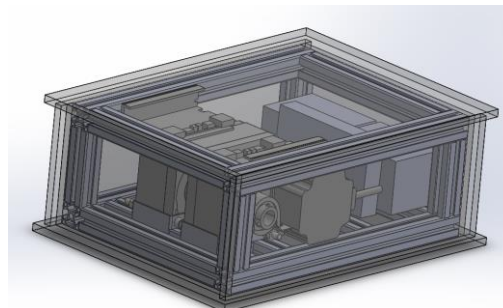


(b) 安全率が 3 以下の部分

図 12 実験水槽における実験



(b) カメラ格納部



(c) 駆動ユニット

図 13 実験水槽における実験

5.2 主要部品

5.2.1 クローラ

部品の入手性から、ヤマハ発動機の YT660 の物を用いることとした。保守パーツはインターネット上に公開されているが、詳細な寸法は不明である。購入後の実測から、スプロケット直径は 210 mm (クローラ外周で 240 mm)、軸間距離 280、幅 120 mm と見積もった。スプロケットの軸穴直径は 20 mm であった。

5.2.2 駆動系

モータは、オリエンタルモータ製 BLHM5100KC-50FR とした。主な仕様は、出力 100 W、

減速比 50、中空軸ブラシレスギヤドモータ、電源電圧 DC 24 V、定格電流 6 A、出力軸回転速度 60 rps、許容トルク 17 Nm (50 rps) である。

この出力を、出力軸・スプロケット間でチェーン駆動で減速比 2 を確保する。これにより伝達損失が無ければ、片輪で 283 N の推進力を得る。



図 14 マリンバイオセンターでの浸水試験

モータを 50 rps で回転させるとき、前進速度は 0.75 ms (2.7 km/h) である。

5.2.3 フレームの材質

ROV1 では海水と接触する部分のほとんどはプラスチックであることから、防錆はほとんど問題とならない。しかし ROV2 の場合、駆動系に大きな力がかかることから金属部品を多用する必要がある。海水での浸食を考慮すると、SUS316L が耐食性、加工性から適切と考えている。

5.2.4 カメラ

カメラは、Panasonic 製 BB-SC384BC、ONVIF 対応 PTZ カメラである。主な仕様は、130 万画素、倍率：光学 18 倍でデジタル 288 倍、パン：±175° (300° /s)、チルト：-30°~90° (100° /s)、H.264 または mjpeg、PoE 対応で。現有しているものの、現在は生産終了で補修部品保有期間も経過している。

5.3 ハウジングの浸水試験・通信試験

カメラを収めるアクリル製ハウジングは底部には SUS304 の板を用いた。この浸水試験をマリンバイオセンターの大水槽で行った。この様子を図 14 に示す。約 1 週間漬けたが、真数は見られなかった。しかし底部の SUS304 は腐食した。検討の結果、SUS316L がより耐食性が高く加工性も良いことが分かり、これ以降は SUS316L を基本とすることとした。

この実験と同時にマリンバイオセンターにカメラを置き、本学 2・3・4 号館から制御実験を行い、動作することを確認した。

5.4 ROV2 のまとめ

現在本体の開発を継続して行っている。

6. おわりに

藻場の生態系を観察するための ROV の開発プロジェクトについて報告した。期間中に十分完成できなかったものの、構成要素は昨日できることが確認できた。今後継続して開発する予定である。

謝辞： 本 PJ を実施するにあたり、親 PJ のメンバー、スマートマシン研究室の学生、実習工場の教員には多くの協力を得た。ここに謝意を示す。

発表一覧：

学会発表：

- 沖、皿田：「藻場における生態系観察のための ROV の開発」、第 20 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 (SI2019) 講演論文集, pp.2692-2697, (2019)

紀要：

- 沖：「水中ロボット用性能評価用水深 20[m]級性能評価用タンクの設計」、福山大学工学部紀要, 43 巻, pp.43-48 (2019)
- 沖：「藻場における生態観察用 ROV の開発～構造～」, 福山大学工学部紀要, 43 巻, pp.27-32 (2020)
- 沖：「藻場における生態観察用 ROV の開発～ROS による制御系と動作検証～」, 福山大学工学部紀要, 43 巻, pp.33-38 (2020)

卒業研究：

- 皿田：「藻場の生態系観察に適した ROV の開発」、平成 30 年度卒業研究

学長室ブログ：

- 2019.03.05 「【スマートシステム学科】里山・里海プロジェクト 水中ドローン発進」
- 2019.05.14 「【社会連携センター】府中☆産業博 2019 に 3 学科が出展！」
- 2020.02.07 「【スマートシステム学科】里海里山プロジェクト・藻場生態観察用水中ドローン発進！」

研究成果発表会：

- 2019 年度：低潮流浅海域における生態系観察を目的とした ROV の開発
- 2020 年度：里海の中探査プロジェクト・低潮流浅海域用 ROV の開発とその運用試験
- 2021 年度：浅海域における生態系観察を目的とした海底移動型 ROV の開発

展示会：

- 府中☆産業博 2019
- じばさんフェア 2019

福山大学ブランド研究プロジェクト

里海の海中探査プロジェクト成果リスト

研究期間：1997 年 4 月～2022 年 3 月

研究発表

1. 論文

- (1) 藻場観測のための海底カメラの開発
田中聡, 村上祐紀, 伍賀正典, 仲嶋一
福山大学工学部紀要, Vol. 43, pp. 25-32, (2019)
- (2) 水中ロボット用性能評価用水深 20[m] 級性能評価用タンクの設計
沖 俊任
福山大学工学部紀要, Vol. 43, pp. 43-48 (2019)
- (3) 藻場観測器用海中音響ビーコン／通信システムの検討
仲嶋 一, 松若 泰大
福山大学工学部紀要, Vol. 43, pp. 1-6, (2020)
- (4) 瀬戸内海の藻場探査を行う海底カメラの運用に関する研究
田中 聡, 仲嶋 一, 伍賀 正典
福山大学工学部紀要, Vol. 43, pp. 15-18 (2020)
- (5) 藻場における生態観察用 ROV の開発～構造～
沖 俊任
福山大学工学部紀要, Vol. 43, pp. 27-32 (2020)
- (6) 藻場における生態観察用 ROV の開発～ROS による制御系と動作検証～
沖 俊任
福山大学工学部紀要, Vol. 43, pp. 33-38 (2020)
- (7) 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
福山大学工学部紀要, Vol. 45, pp. 105-112 (2022)
- (8) 海底カメラにおける姿勢計測技術の研究
田中 聡, 伍賀 正典, Vol. 45, pp. 13-18, (2022)
- (9) 地球観測衛星画像データを用いた因島沿岸の藻場状況定量解析
関田 隆一, 勝部 雄介
福山大学内海生物資源研究所, 福山大学内海研報(31), pp. 1-15, (2021)
- (10) 藻場観測用音響位置特定システムの開発～送受信系～
仲嶋 一, 出柄 響
福山大学工学部紀要, Vol. 45, pp. 7-12, (2022)

2. 報 文

- (1) Seagrass Beds Distribution Analysis using Satellite Remote Sensing Data for The Sustainable Growth of the Seto Inland Sea Coastal Area Ecological System
Ryuihchi Sekita, Yuusuke Katsube
American Institute of Aeronautics and Astronautics, Science and Technology Forum and Exposition Forum (The 2021 AIAA SciTech), Virtual U.S.A, 査読付き国際学会
January 14, 2021 報告
- (2) 瀬戸内海の藻場を識別するリモートセンシングデータ解析
関田 隆一
電気学会 2019 年度計測研究会、電気学会研究資料 (Vol. 2019, No. 24, pp 13-18)
2019 年 7 月 5 日報告

3. 口頭発表

- (1) 数字列のタイムスタンプを用いて同期する海底ステレオビデオカメラの動画記録システム
田中 聡
平成 30 年度(第 69 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, R18-22-04, 2018 年 10 月
- (2) 海底カメラのための画像処理システムの開発
村上 祐紀、田中 聡、
第 27 回計測自動制御学会中国支部 学術講演会, pp. 49 - 50, 2018 年 12 月
- (3) 藻場探査用海底カメラの運用
田中 聡・村上 祐紀、伍賀 正典、仲嶋 一
D-12-52 2019 年電子情報通信学会総合大会, 2019 年 3 月
- (4) 海底カメラのための同期性能を向上させたステレオカメラシステム
田中 聡
令和元年(第 70 回)電気 情報関連学会中国支部連合大会, R19-22-03-02, 2019 年 10 月
- (5) CNN を用いた海藻画像の分類に関する研究
桑田 航平, 田中 聡
第 28 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp. 43-44, 2019 年 11 月
- (6) 藻場における生態系観察のための ROV の開発
沖 俊任, 皿田 広地
第 20 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 (SI2019) 講演論文集, pp. 2692-2697, (2019)
- (7) 瀬戸内海沿岸域の藻場分布状況を知る地球観測衛星画像データの定量解析

勝部 雄介

第 27 回（令和元年度）瀬戸内海研究フォーラム in 広島、2019 年 9 月

- (8) Satellite Remote Sensing Data Analysis for Sustainable Growth Model of the Seagrass Beds in Seto Inland Sea
Yuusuke Katsube, Ryuichi Sekita
32nd International Symposium on Space Technology and Science 査読付き国際学会、2019 年 6 月

- (9) 海底カメラにおけるオブジェクト分類に関する研究

桑田 航平, 田中 聡

2020 年度電子情報通信学会総合大会, D-12-13, , 2020 年 3 月

- (10) Mask R-CNN を用いてオクルージョン問題を軽減した魚画像の認識システム

田中 聡, 河戸 智也

2021 年度（第 72 回）電気・情報関連学会中国支部連合大会, R21-22-03, 2021 年 10 月

- (11) 瀬戸内海の藻場観測技術の開発

仲嶋 一

第 66 回海洋教育フォーラム 2020 年 12 月

- (12) 海底カメラへのドライブレコーダの適用宮地 寛明

田中 聡

第 30 回計測自動制御学会中国支部学術講演会 2C-5, 2020 年 11 月

- (13) 沿岸調査機器用水中音響ビーコン／通信に関する研究

出柄 響, 仲嶋 一

IEEE 学生研究発表会 IEEE_IM-S21-05, (2021)

- (14) カルマンフィルタを用いた海底カメラの姿勢推定について

田中 聡

電子情報通信学会 2022 年総合大会, D-12-34, 2022 年 3 月

卒業論文・修士論文

2018 年度

- (1) 卒業論文「藻場の生態系観察に適した ROV の開発」

皿田 広地

- (2) 卒業論文「藻場探査用海底カメラのための物体追跡技術の開発」

村上 祐紀

- (3) 卒業論文「瀬戸内の藻場の状況定量解析に向けた基盤研究」

勝部 雄介

2019 年度

- (1) 卒業論文「藻場探査機用小型超音波ビーコン技術の開発」
松若 泰大
- (2) 卒業論文「海底カメラ 2 号機の開発と CNN による海藻識別」
桑田 航平

2020 年度

- (1) 卒業論文「瀬戸内海の藻場探査を目的とする海中・海上ロボットシステム」
伊田 尚平
- (2) 卒業論文「魚認識によるオクルージョン問題解決のための研究ー海底カメラにおける魚認識システムの開発ー」
河戸 智也
- (3) 修士論文「地球観測衛星画像データを用いた瀬戸内藻場の状況定量解析」
勝部 雄介

2021 年度

- (1) 卒業論文「藻場探査機用音響通信技術の開発～伝送特性の評価～」
出柄 響
- (2) 卒業論文「水中・水上ロボットの連係動作機能に関する研究」
山内 陽登
- (3) 卒業論文「水上ロボットの自動航行機能に関する研究」
若木 公志
- (4) 卒業論文「海底カメラ 4 号機の開発と海洋実験について」
宮地 寛明

その他公表

1. 研究成果発表会

2018 年度

- (1) 「瀬戸内の里山・里海学」藻場探査プロジェクト＜瀬戸内海の藻場の生物多様性涵養機能を探る海中・海上探査ロボットシステムの開発＞
内田 博志
- (2) 「瀬戸内の里山・里海学」藻場探査プロジェクト＜藻場環境計測のための海底カメラの開発（中間報告）＞
田中 聡、伍賀 正典、仲嶋 一

2019 年度

- (1) 里海の藻場探査プロジェクト 生物多様性涵養機能を探る海中・海上探査ロボット

システムの開発

内田 博志

- (2) 里海の藻場探査プロジェクト 海底カメラによる海中観測実験
田中 聡、伍賀 正典、仲嶋 一
- (3) 低潮流浅海域における生態系観察を目的とした ROV の開発
沖 俊任
- (4) 里海の藻場探査プロジェクト 衛星ミッション変更
関田 隆一

2020 年度

- (1) 里海の海中探査プロジェクト・低潮流浅海域用 ROV の開発とその運用試験
沖 俊任
- (2) 里海の海中探査プロジェクト： 海中探査ロボットシステムの開発
内田 博志

2021 年度

- (1) 福山大学ブランド研究瀬戸内の海中探査プロジェクト
仲嶋 一
- (2) 海底カメラシステムの姿勢検出システムについて
田中 聡
- (3) 浅海域における生態系観察を目的とした海底移動型 ROV の開発
沖 俊任
- (4) 海中探査のための水中ロボットシステムの研究
内田 博志

2. 展示会他

- (1) じばさんフェア 2017
内田 博志
- (2) じばさんフェア 2018
内田 博志
- (3) 府中☆産業博 2019
沖 俊任
- (4) じばさんフェア 2019
沖 俊任
- (5) 広島湾さとうみフェスタ 2021
内田 博志
- (6) SALLY プロジェクト 里山 SDGs with 環境計測デバイス

伍賀 正典 第1回広島テックプラングランプリ (2021.02)