

水中ロボットのモデル開発のための自己位置推定法

ArUco マーカを用いた手法の提案と実験用プロトタイプロボットの設計

Self-localization method to develop the model of underwater robots

Proposal of the method using ArUco markers and design of a prototype robot for experiment

佐久間歩夢^{*}, Jun Niel PAQUIBOT^{**}, Luis CANETE^{**}, 高橋隆行^{*}

Ayumu SAKUMA^{*}, Jun Niel PAQUIBOT^{**}, Luis CANETE^{**}, Takayuki
TAKAHASHI^{*}

^{*}福島大学, ^{**}San Carlos University

^{*}Fukushima University, ^{**}San Carlos University

キーワード: 水中ロボット (underwater robot), 自己位置推定 (self-localizing), 浮力調整器 (buoyancy controller), モデル化 (modeling)

連絡先: 〒960-1248 福島県金谷川 1 福島大学 理工学群 共生システム理工学類 高橋研究室
佐久間歩夢, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: ayumu@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

福島県には、桧原湖や猪苗代湖など多くの湖沼が存在しており、水質調査や生態系調査が行われている。また、2011 年の東京電力福島第一原子力発電所の事故以来、放射線量の調査も行われている¹⁾。水中の放射性セシウムは、一般に底質の土粒子表面に付着しているといわれていることから、湖底泥の採取による調査が必要である。

従来の採泥方法として、水上の船から採泥器を投下する方法や潜水土が採泥地点まで潜水し、直接採泥する方法等が存在する²⁾。前者の方法では採泥器が水流によって流されてしまうなど、正確な位置情報の把握が困難である。また、後者では、潜水土への負担が大きいため、深い水深で

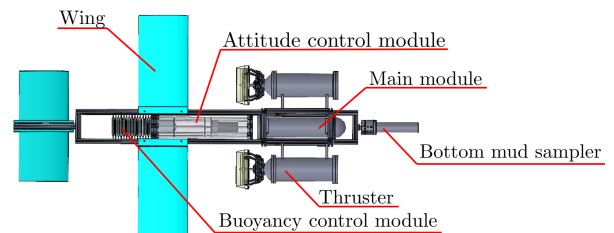


Fig. 1: The concept of G-TURTLE³⁾

の採泥が困難であり、コストの面からも長期にわたる定期的なサンプリングが困難である。そこで、筆者らは、これらの問題を解決するため、猪苗代湖を調査対象に水中ロボット G-TURTLE (Glider-Type Underwater RoboT for Lake Environmental survey) の開発を行ってきた³⁾。G-TURTLE の構想図を Fig.1 に示す。

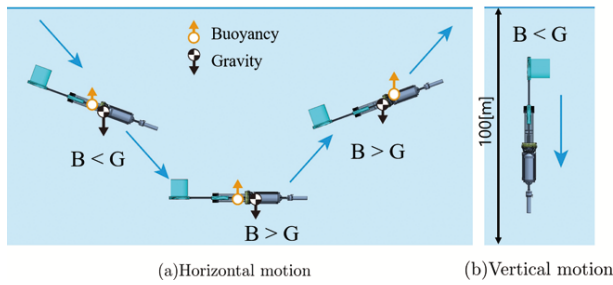


Fig. 2: The motion of G-TURTLE⁵⁾

本ロボットは水平方向の移動に、グライダー方式⁴⁾を採用する予定である。グライダー方式はFig.2のように、浮力調整器によって浮力を調整しながら潜水・浮上を繰り返し、翼まわりに揚力を発生させることで、水中を滑空するように移動する方法である。この方式では潜水・浮上のための浮力調整時のみにエネルギーを消費するため、スクリュウ方式と比べて同じバッテリー容量でより長距離の移動が可能になると考えられる。一方、採泥管の貫入・抜去には大きな推進力が必要であるため、その作業では、スクリュウ方式のスラスタを用いる。

本ロボットの運用方法は、人力で湖岸から湖沼へと投下し、ロボットが調査地点まで自立・自律的に移動して採泥を行い、その後回収地点の湖岸へと戻ってくことを目標としている。そして、猪苗代湖の最大水深は100[m]であり、Fig.3に示すように、湖を半径5[km]の円で覆うことができることから、本ロボットは以下のような要求仕様がある。

- ・ 水深 100[m] での運用
- ・ 長距離水平移動 (目標 10[km])
- ・ 小型・軽量 (目標 30[kg])
- ・ 水中における正確な位置情報の取得
- ・ 自立・自律した移動・採泥

先行研究では、G-TURTLE 開発にあたり、必要な多くの要素技術が開発された(後述)。現在は、それらを統合した水中ロボットのシステム実装と、制御系の構築が進められている。そ

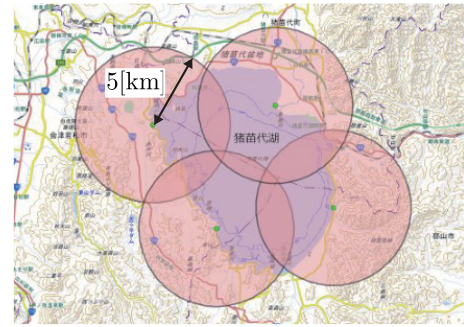


Fig. 3: Lake Inawashiro can be covered by 5 [km] radius circles⁶⁾

のうち、制御系の構築では、CANETE らによって、これまでのロボットの運動を定性的にはよく再現する数学モデルを構築しているが、実機による検証はまだ行われていない(発表準備中)。そこで本研究では、PAQUIBOT らが提案する ArUco マーカを用いた自己位置推定法(発表準備中)を用いて、CANETE らが提案している数学モデルを検証するための実機による運動データを得ることを目的としている。空気中での自己位置推定の精度を確認した後、実験用水中ロボット模型機的设计ならびに試作を行い、水中での自己位置推定が可能かを実験的に確認する。

2. 先行研究と本研究の目的

先行研究で、湖沼の底泥を乱さずに層状にサンプリングする不攪乱採泥管⁷⁾(Fig.4(a))、大きな推進力を得るためのスラスタモジュール⁵⁾(Fig.4(b))、グライダー方式の移動に重要な浮力調整器⁶⁾とその浮力調整器を機体の前後に搭載した水中グライダー模型機⁶⁾(Fig.4(c))などが開発されてきた。現在は、これらの要素技術を統合した水中ロボットのシステム実装と、その制御系の構築が進められている。

制御系の構築にはいくつかの課題がある。まず、制御対象の運動を数学的に記述した運動方程式を求める必要がある。CANETE らは、これまでの研究で得られたロボットの水中での運動を定性的にはよく再現する数学モデルを構築

している（発表準備中）．しかし，実機による検証は行われていない．本研究では，CANETEらが提案している数学モデルを検証するための，実機による運動データを得ることを目的としている．

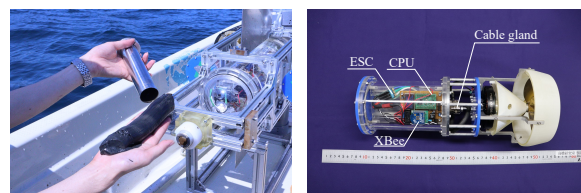
一般に，水中でのロボットの運動を計測することは容易ではない．これまで，音の時間差を利用した音響測位⁸⁾や，マーカを複数のカメラで撮影する光学式モーションキャプチャ⁹⁾等が提案されてきた．しかし，これらの方法は一般的に装置が高額なこと，音の反射やカメラの画角の問題から設置に大きな空間が必要といった問題がある．そのため，PAQUIBOTらはArUcoマーカを用いた自己位置推定法を提案した（発表準備中）．ArUco マーカとは，二次元の固有IDを持つ正方形マーカ¹⁰⁾であり，これを用いた提案手法は比較的安価に実装が可能で，設置に大きな空間を必要としない．そこで，本論文ではこの方法により，ロボットの運動を計測することとする（詳細は後述）．

この ArUco マーカを利用した計測法は，ロボットに搭載した小型カメラで外部に設置した複数の ArUco マーカを撮像し，その画像データからロボットの自己位置を推定する．本論文では，そのための水中ロボット模型機を試作し，実際に水中での自己位置推定が行えるか実験的に確認する．

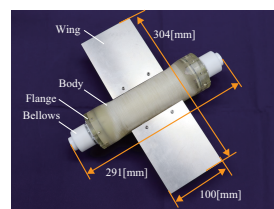
3. ArUco マーカを用いた自己位置推定

第2章で述べた通り，PAQUIBOTらによって ArUco マーカを用いた自己位置推定法が提案された（発表準備中）．

ArUco マーカとは，Fig.5 左に示すような二次元の固有IDを有する正方形マーカである¹⁰⁾．幅広の黒色の外枠と固有IDを決定する 6×6 の内部バイナリマトリクスの 8×8 マスで構成されている．



(a) Sampling module⁵⁾ (b) Thruster module⁵⁾



(c) Model underwater glider robot⁶⁾

Fig. 4: Previous research

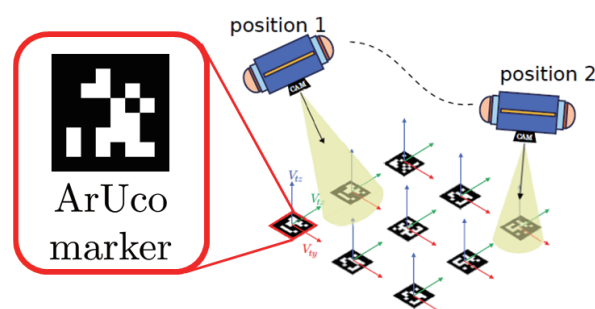


Fig. 5: Self-localization method using ArUco marker¹⁰⁾¹¹⁾

Fig.5 右に示すように，ロボット外部の既知の位置に，複数の ArUco マーカを予め配置（以降，ArUco グリッド）し，これをロボット下部に搭載した小型カメラで撮像する．その画像データからカメラに対する位置ベクトルと姿勢ベクトルを得ることができる．マーカの幅広の黒色の外枠が画像内での ArUco マーカの検出を容易にしている．

なお，このマーカシステムは現在，OpenCV ライブラリ¹⁰⁾の一部として一般的に使用されている．PAQUIBOTらは，このライブラリを用いて自己位置推定の精度を向上させるために，カメラパラメータの最適化や関心領域の検討等を行っているが，本論文では省略する．本論文では，このライブラリを用いて画像処理を行う．

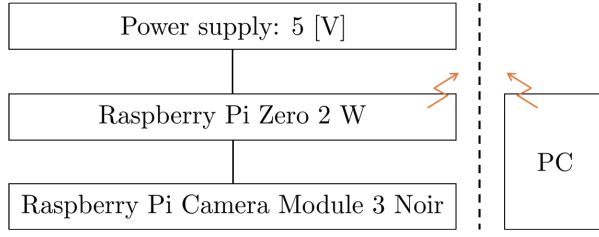


Fig. 6: Block diagram of image capturing setup

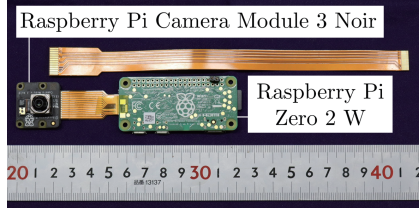


Fig. 7: Image capturing setup excluding power supply

4. 自己位置推定の精度確認実験

本章では，第3章で述べた ArUco マーカを用いた自己位置推定の精度を空気中での実験により確認する．

4.1 自己位置推定の実験に用いる装置と撮像パラメータの設定

実験に用いる計測装置のブロック線図を Fig.6，電源を除いた計測装置を Fig.7 に示す．画像処理のために小型・軽量の Raspberry Pi Zero 2 W，小型カメラとして Raspberry Pi 純正のカメラである Raspberry Pi Camera Module 3 Noir を用いる．なお，Raspberry Pi とカメラの接続には，長い方の FFC を用いた．ここで，カメラの座標系を Fig.8 に示す．

撮像のパラメータは Table 1 のように設定している．これまでの実験結果から，ロボットのピッチ方向の固有振動周期がおおよそ $1.0 \sim 2.0$ [s] と予想されており，この振動の 1 周期中に 10 枚以上の画像の取得を行うためフレームレートを 20 [fps] に設定している．なお，このフレームレートは Raspberry Pi Zero 2 W を用いて安定

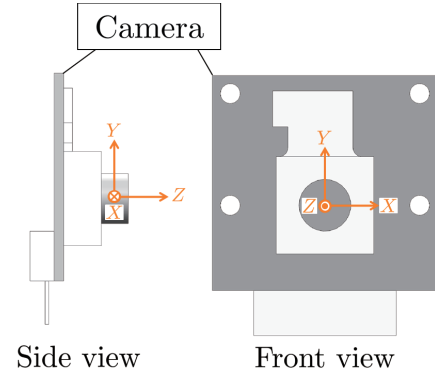


Fig. 8: Camera coordinate system

Table 1: Parameters of image capturing setup

Number of pixel	1536×864 [px]
Framerate	20 [fps]
Diopter	2.00 [D]
Exposure time	5 [ms]
Analog gain	2

した撮像ができるほぼ限界のフレームレートでもある．

4.2 精度確認実験

本装置による自己位置の計測精度を，Fig.8 に示すカメラ座標系の X および Y 方向と Z 方向に分けて確認する．

4.2.1 X および Y 方向

X および Y 方向の精度確認実験の方法について説明する．実験装置とそのブロック線図を Fig.9～11 に示す．カメラを先端に取り付けた振り子を製作した (Fig.9)．振り子の回転中心にはエンコーダ (NEMICON, OEZ-15-2M-05-050-00) を設け，振り子の角度を計測できるようになっている．エンコーダからの信号をマイクロコンピュータボード (秋月電子, RX621) で処理し，シリアル通信で PC に角度データを送信している．このエンコーダは 1500 [P/R] であり，4 逓倍で使用している．また，自己位置推定から得る姿勢ベクトルを用いて，カメラの

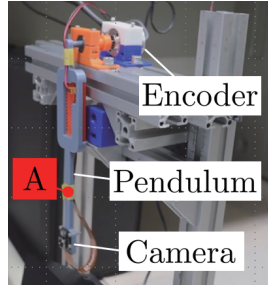


Fig. 9: Camera-equipped pendulum for X and Y accuracy verification experiment

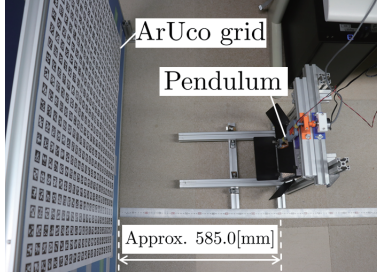


Fig. 10: Appearance of setup for X and Y accuracy verification experiment

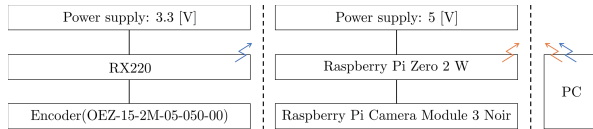
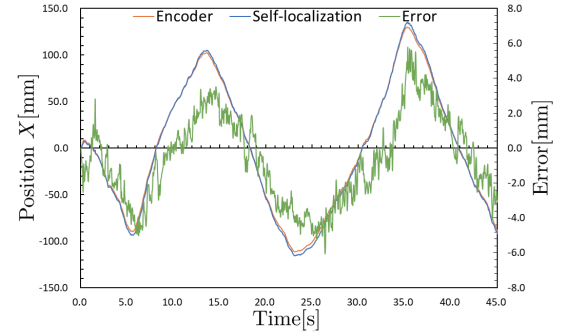


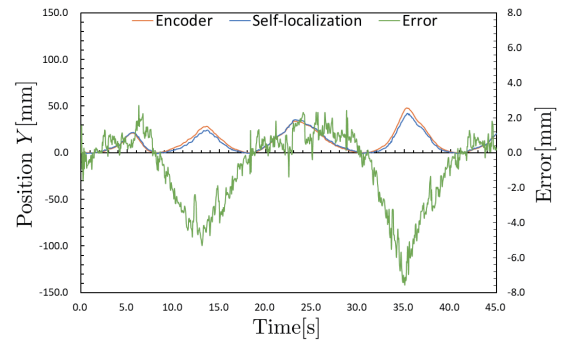
Fig. 11: Block diagram of X and Y accuracy verification experimental equipment

XY 平面と ArUco グリッドができるだけ平行になるように配置する．具体的には，Fig.8 に示すカメラ座標系の X 軸まわりの回転角度と Y 軸まわりの回転角度ができるだけ 0 に近づくように設置した (Fig.10)．Fig.9 に示した振り子の点 A に針金を取り付け，撮像しながら針金を手で操作することで振り子を任意の角度に動かす．エンコーダの角度から算出するカメラ座標の原点の位置 ($X_{\text{Enc}}, Y_{\text{Enc}}$) とカメラ映像から自己位置推定によって得られる位置 ($X_{\text{SL}}, Y_{\text{SL}}$) の比較を行い，精度を確認する．

実験結果を Fig.12(a), (b) に示す．誤差は， $X_{\text{SL}} - X_{\text{Enc}}, Y_{\text{SL}} - Y_{\text{Enc}}$ である． X_{Enc} と X_{SL} ， Y_{Enc} と Y_{SL} がよく一致した．カメラの原点と ArUco グリッド間距離はおよそ 585.0[mm] であり，この距離に対して， X および Y 方向の誤差



(a) X



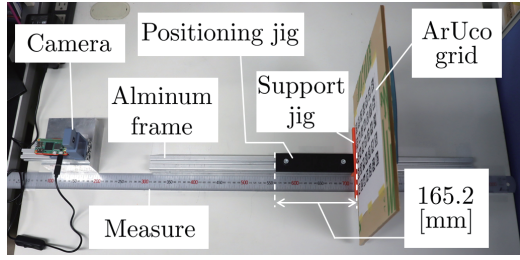
(b) Y

Fig. 12: Results of X and Y accuracy verification experiment

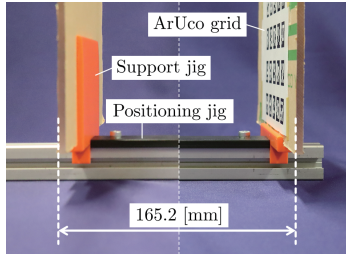
は最大でおよそ $-7.6[\text{mm}]$ であった．

4.2.2 Z 方向

Z 方向の精度確認実験の方法について説明する．実験装置を Fig.13(a), (b) に示す．実験装置のブロック線図は Fig.6 と同じである．Fig.13(a) に示すように，Fig.8 に示すカメラ座標系の Z 方向とアルミフレーム (ミスミ， $30 \times 30[\text{mm}]$ 1 列溝 4 面溝) の長さ方向が一致するように設置する．そして，ArUco グリッドを貼った平板をカメラの XY 平面と平行に取り付けできるサポート治具を製作した．ArUco グリッドは，カメラの XY 平面と平行な状態で Z 方向に移動させることができるように，このサポート治具はアルミフレームの溝に合う凸形状を設け，ArUco グリッドがカメラの XY 平面に対して傾かないようになっている．なお，アルミフレームやサポート治具は，Fig.8 に示すカメラ座標系の



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 13: Appearance of setup for Z accuracy verification experiment

すべての軸まわりの角度ができるだけ0に近くように設置した。そして、Fig.14に示すように、位置決め治具の前（Case 1）、後（Case 2）にArUcoグリッドを設置し、カメラ映像から自己位置推定によってカメラの原点とArUcoグリッド間距離 L_1 , L_2 を得る。ここから算出するArUcoグリッドとArUcoグリッド間の距離 $L_2 - L_1$ とサポート治具と位置決め治具の実寸法 $L_{\text{Real}} = 165.2[\text{mm}]$ の比較を行う。位置決め治具はA, B, Cの3通りの位置に設置する。

実験結果をTable 2(a), (b)に示す。誤差は、 $L_2 - L_1$ から L_{Real} を減じた値である。サポート治具と位置決め治具の実寸法 $L_{\text{Real}} = 165.2[\text{mm}]$ に対して、 Z 方向の誤差は最大でおよそ $\pm 0.6[\text{mm}]$ であった。

5. 実験用水中ロボット模型機

第4章で用いた計測装置のRaspberry Piとカメラ（Fig.7、以降、カメラ部と呼称）を搭載した、水中で自己位置推定が可能な実験用水中ロボット模型機（以降、新模型機と呼称）の設計を行う。

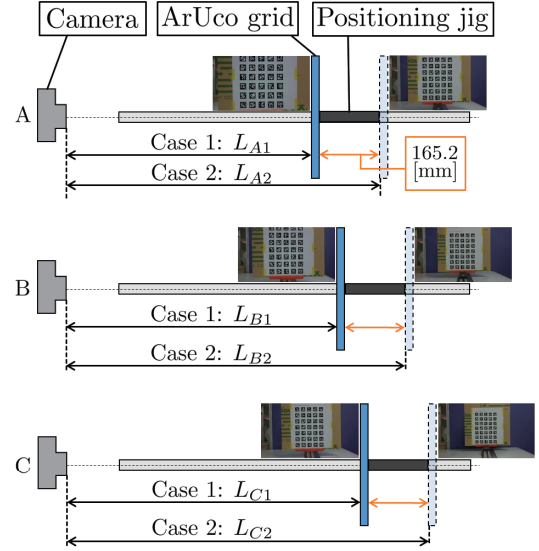


Fig. 14: Schematic of Z accuracy verification experiment

Table 2: Results of Z accuracy verification experiment

(a) Distance between camera and ArUco grid

Symbol	Distance[mm]
L_{A1}	352.0
L_{A2}	516.6
L_{B1}	451.2
L_{B2}	616.0
L_{C1}	550.8
L_{C2}	715.7

(b) Distance difference and error

Symbol	Distance[mm]	Error[mm]
$L_{A2} - L_{A1}$	164.6	-0.6
$L_{B2} - L_{B1}$	165.8	0.6
$L_{C2} - L_{C1}$	164.9	-0.3

5.1 新模型機の構成と形状

新模型機の構成と形状について説明する。新模型機のブロック線図をFig.15に示す。Fig.15の青塗り部分は、Fig.4(c)に示す先行研究で製作された水中グライダー模型機（以降、旧模型機）の構成⁶⁾である。新模型機は、これにFig.15の赤塗り部分の降圧回路とカメラ部を加えた構成になっている。また、カメラ正面には、アクリ

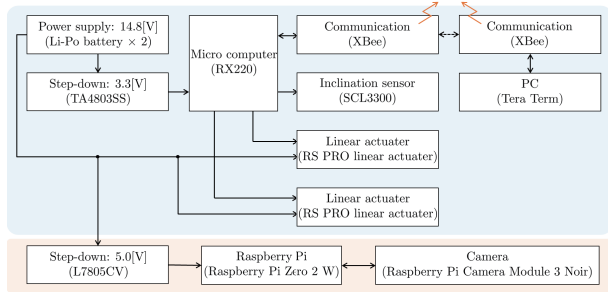


Fig. 15: Block diagram of the new model of the underwater robot

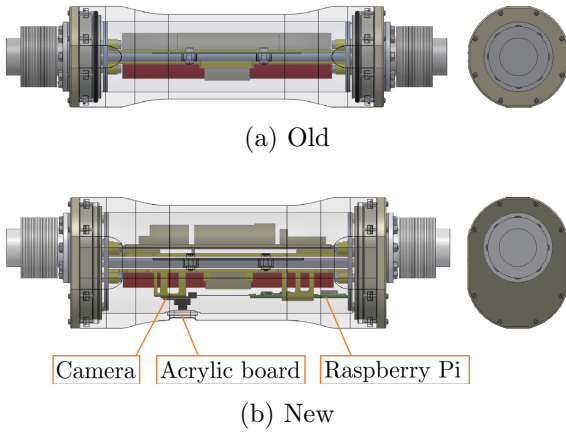


Fig. 16: Shape of the model of the underwater robot

ル板が挿入してあり，ロボット外部を撮像できるようにになっている．

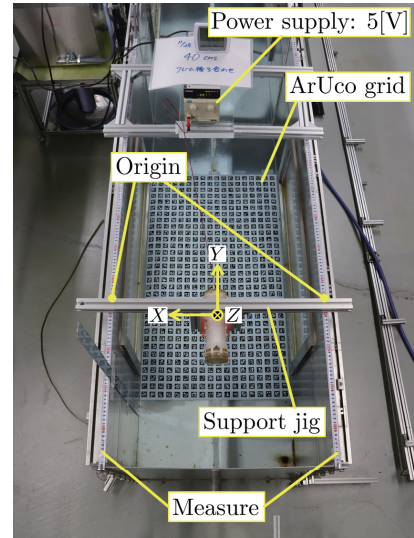
旧模型機の形状⁶⁾を Fig.16(a)，新模型機の形状を Fig.16(b) に示す．新模型機の形状は旧模型機の形状に比べて，カメラ部を搭載するために，筐体下部が膨らんでいる．

5.2 水中での自己位置推定

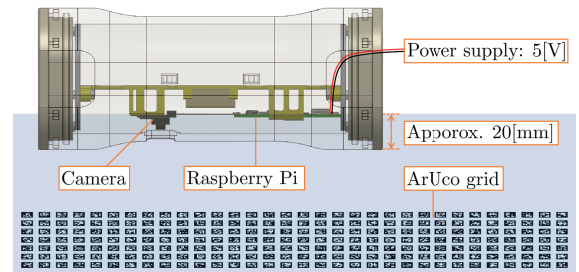
第5章1節で説明した新模型機の筐体と計測装置を用いて，水中での自己位置推定の精度を確認する．

5.2.1 実験方法

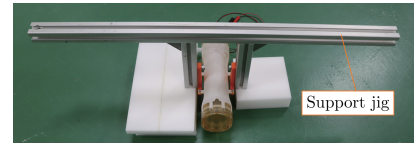
実験方法を説明する．実験装置を Fig.17(a) ~ (c) に示す．計測装置を搭載した新模型機筐体下部を II 型の治具 (Fig.17(c)) を用いて水中におよそ 20[mm] 沈める．そして，Fig.17(a) に示す



(a) Top view



(b) Side view



(c) Support jig

Fig. 17: Appearance of setup for the underwater accuracy verification experiment

ように，水槽の両側に設置してあるメジャーを用いて， Y 方向に 100.0[mm] ずつ 800.0[mm] までサポート治具を移動させ撮像を行う．サポート治具の実際の移動距離 Y_{Real} と，自己位置推定から得られる位置 Y_{SL} の比較を行う．また，実験時の水深 $Z_{\text{Real}} = 520.0[\text{mm}]$ と，自己位置推定から得られる位置 Z_{SL} の比較を行う．なお，本実験では，新模型機内部の Raspberry Pi への電源は外部から供給している．

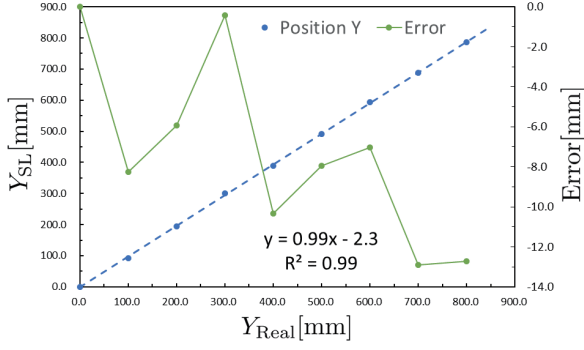


Fig. 18: Results of Y accuracy verification experiment in underwater

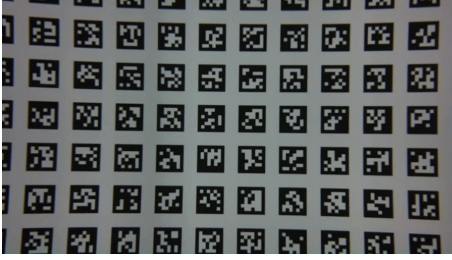


Fig. 19: Distortion of the image captured in underwater

5.2.2 実験結果と考察

Y 方向の実験結果を Fig.18 に示す．誤差は Y_{SL} から Y_{Real} を減じた値である． Y_{Real} と Y_{SL} がよく一致した．誤差の平均は $-7.3[\text{mm}]$ であり， Y 方向については一定程度水中でも自己位置推定が可能であるといえる．しかし，誤差の絶対値が Y_{Real} が長くなるにしたがって大きくなる原因についてはまだ判明していないため，今後追及する予定である．

Z 方向の実験結果を Table 3 に示す． Z_{Real} に対して， Z_{SL} がおよそ $130[\text{mm}]$ 短いことがわかる．さらに，Fig.19 にカメラで撮影された水中の映像を示す．糸巻き型の歪みが発生していることがわかる．これらの原因の一つとして，光の屈折による影響が考えられる．今後は，これらの影響を適切に補正することにより， Z 方向の精度向上を目指す．具体的には，水中でカメラのキャリブレーションを行うことで補正ができること等が考えられる．

Table 3: Results of Z accuracy verification experiment in underwater

$Y_{Real}[\text{mm}]$	$Z_{Real}[\text{mm}]$	$Z_{SL}[\text{mm}]$
0.0		372.0
100		372.0
200		370.8
300		370.2
400	520.0	370.4
500		370.0
600		370.4
700		371.3
800		372.2

6. 結言

本論文では，CANETE らが提案している数学モデル（発表準備中）を検証するための，実機による運動データを得ることを目的に，PAQUI-BOT らが提案した ArUco マーカを用いた自己位置推定（発表準備中）の空気中での精度の確認を行った後，実験用水中ロボット模型機の設計と水中での自己位置推定が可能かを実験的に確認した．

空気中での自己位置推定の精度確認実験は，Fig.8 に示すカメラ座標系の X および Y 方向と Z 方向にわけて確認を行った．結果として， X および Y 方向では，カメラの原点と ArUco グリッド間の距離がおよそ $585.0[\text{mm}]$ に対して，誤差は最大でおよそ $-7.6[\text{mm}]$ であった． Z 方向では，サポート治具と位置決め治具の実寸法 $165.2[\text{mm}]$ に対して，誤差は最大でおよそ $\pm 0.6[\text{mm}]$ であった．

さらに，実験用水中ロボット模型機を設計し，その筐体と計測装置を用いて水中での自己位置推定が可能かを実験的に確認した．結果として， Y 方向では，実際の移動距離 $100[\text{mm}]$ に対して，誤差の平均は $-7.3[\text{mm}]$ であった．一方で， Z 方向では，実際の水深 $520[\text{mm}]$ に対して，およそ $130[\text{mm}]$ 距離が短く推定された．さらに，カメラで撮影された水中の映像から糸巻き型の歪

みが確認された。これらの原因の一つは、光の屈折による影響だと考えられ、今後適切に補正を行うことにより、Z 方向の精度向上を目指す。

今後は、水中での自己位置推定の補正法の検討と、実験用水中ロボット模型機の製作を行う。

参考文献

- 1) 斎藤蔵希ら：猪苗代湖における底質の放射線量調査，土木学会東北支部技術研究発表会（平成 25 年度），VII-3，2014
- 2) いであ株式会社，平成 24 年水環境中の放射性物質調査方法等検討業務報告書
- 3) 中田航輔ほか：湖沼調査用水中ロボットのためのペローズを用いた浮力調整器の開発—高水圧下で運用可能な PTFE ペローズ伸縮機能の製作—，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会，2P1-I02(2025)
- 4) 有馬正和ほか：主翼独立制御型水中グライダー実験機の設計と開発，第 2K 号，57/60，2006K-0S3-4(2006)
- 5) 西出航陽ほか：グライダー型底泥サンプリング用水中ロボットのための推進機構の開発，令和 3 年度修士論本，2022
- 6) 稲見ひかりほか：湖沼調査用水中ロボットのためのペローズを用いた浮力調整器の開発，令和 5 年度修士論文，2024
- 7) 安西香保里ほか：湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発—不攪乱柱状採泥モジュールの改良—，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A1-E05(2015)
- 8) 日本海洋株式会社，“音響測位装置/Acoustic underwater positioning & navigating systems”，日本海洋株式会社，<https://www.nipponkaiyo.co.jp/product/hipap-series/>，(参照 2025.12.02)
- 9) アーカイブティップス株式会社，“Arqus UnderWater 水中用モーションキャプチャーカメラ”，ACT アーカイブティップス株式会社，<https://archivetips.com/qualisys/motion-camera/arqus-underwater/>，(参照 2025.12.02)
- 10) OpenCV，“Detection of ArUco Markers”，Open Source Computer Vision，https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html，(参照 2025.12.01)
- 11) 高橋隆行：環境放射能動態調査のための水中ロボットの開発とそれに関する研究，国際研究教育拠点 令和 6 年度 成果報告書，2025.03.31