

湖沼調査用小型水中ロボットの開発 ～ グライダー型の小型模型機の試作と基本特性の確認 ～

Development of a small underwater robot for surveying lakes and ponds

～ Prototype of a small glider type robot and validation of basic characteristics ～

西出 航陽* , 情野 瑛* , 高橋 隆行*

Koyo Nishide* , Akira Seino* , Takayuki Takahashi*

*福島大学

*Fukushima University

キーワード： 水中ロボット (underwater robot) , グライダー型 (glider type) , 運動計測 (motion measurement)

連絡先： 〒 960-1296 福島県福島市金谷川 1 福島大学 共生システム理工学類 高橋研究室
西出航陽, Tel.: (024)548-5259 , Fax.: (024)548-5259 , E-mail: nishide@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、湖沼の放射線量を調査するため、湖底泥の採取が行われている。本研究室では、湖底泥採取用の水中ロボットの開発を行ってきた。現在、水中ロボット G-TURTLE (Glider-type underwater robot for lake environmental survey) の開発を行っている。G-TURTLE の構想図を Fig. 1 に示す。

G-TURTLE の移動方式として、水中グライダー方式¹⁾²⁾を採用する。水中グライダー方式とは、浮力調整器によりロボットの浮力を調整することで潜水・浮上し、翼を用いて水平方向の推進力を得る移動方式である。大きなエネルギー消費が発生するのは、浮力調整時のみである

ため、推力を得るためにプロペラを連続的に回転させなければならないスラスト移動方式と比べて、同じバッテリー容量で、より遠距離の移動が可能になることが期待される。

本研究室では水中ロボットの動的挙動を検証するため、翼シミュレータの開発を行ってきた。

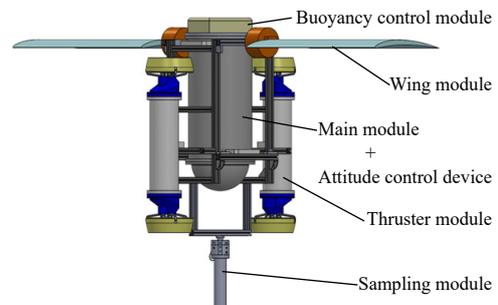


Fig. 1: G-TURTLE (image)³⁾

先行研究³⁾において、実際の模型機の運動とシミュレーション結果の正確な比較が必要であることが、課題としてあげられた。そこで、本研究では、翼シミュレータのシミュレーション結果の精度を確認するために、グライディング時の運動を計測できる小型模型機を製作し、様々な模型機のパラメータでグライディング実験における姿勢と位置を計測し、運動の基本特性を確認する。

2. 姿勢・位置測定方法

翼シミュレータのシミュレーション結果と実際の模型機の運動を比較するために、グライディング時の姿勢と位置の測定が必要である。本章では各データの測定方法について述べる。

2.1 姿勢測定方法

姿勢測定方法として、センサに加わる角速度を利用したジャイロセンサや、センサに加わる重力加速度を利用した傾斜センサを用いる方法があげられる。前者は、センサのゼロ点がドリフトするため長時間の測定が困難である。後者は、重力加速度を鉛直の基準としているため、加速度の大きな運動中は、センサに加わる加速度の方向が鉛直方向ではなくなり、傾きの測定が困難である。本研究では、実験に用いる模型機に生じる加速度が、十分小さいと考えられるため、傾斜センサ(村田製作所製 SCL3300-D01)を用いて姿勢の測定を行う。

翼や胴体に発生する揚力や抗力などは、迎角によって大きく変化するため、高い精度で姿勢を測定する必要がある。本研究で使用する傾斜センサの精度を確認する実験として、傾斜センサと角度計(シンワ測定製 デジタルアングルメータII 精度: ± 0.15 [deg])の出力角度を比較した。その結果、静止状態において、水平から ± 70 [deg] の範囲で約 ± 0.7 [deg] 以下の精度で測定できることが確認できた。

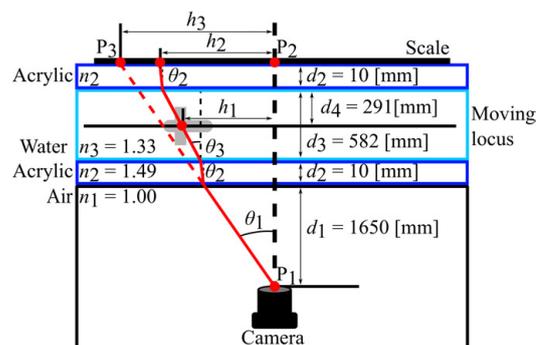


Fig. 2: Camera tracking to measure the position of the model underwater glider

2.2 位置測定方法

位置測定方法として、加速度センサを用いる方法や、カメラで撮影した動画から求める方法⁴⁾があげられる。前者は、加速度から位置を求めるために2回、積分をしなければならない。そのため、加速度の小さな運動における位置の算出は困難である。後者は、奥行方向の距離の測定は困難なものの、平面内の位置は比較的測定が容易である。よって、本研究では模型機がスタート位置から奥行方向への移動をしないようにグライディングさせることで、撮影した動画を用いて位置測定を行う。

Fig. 2に測定装置の概略図を示す。模型機の側面方向にカメラを設置し、模型機がグライディングする様子を撮影する。この際、水槽の外側から水中の模型機を撮影するため、本測定では光の屈折が生じる。屈折が生じない場合、カメラから見える模型機の位置はFig. 2に示す h_3 となるが、屈折を考慮するとカメラから見える模型機の位置は h_2 になる。また、カメラから測定できる値は h_2 のみであるため、実際の模型機の位置 h_1 は、 h_2 と h_1 の比 h_1/h_2 を h_2 に乗じることで求められる。 h_1/h_2 は

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{d_1 \tan \theta_1 + d_2 \frac{N_{12}}{\sqrt{1-N_{12}^2}} + (d_3 - d_4) \frac{N_{13}}{\sqrt{1-N_{13}^2}}}{d_1 \tan \theta_1 + 2d_2 \frac{N_{12}}{\sqrt{1-N_{12}^2}} + d_3 \frac{N_{13}}{\sqrt{1-N_{13}^2}}} \quad (1)$$

と表される。ここで、 d_1, d_2, d_3, d_4 はそれぞれ、カメラからアクリル板までの距離、アクリル板

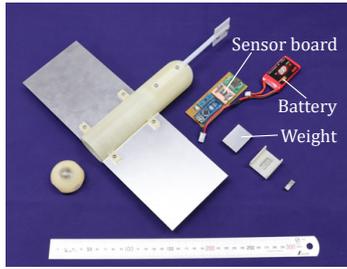


Fig. 3: Prototype of the model underwater glider

Table 1: Specifications of the model underwater glider

Item	Unit	Value
Length	[mm]	287
Wingspan	[mm]	300
Wing thickness	[mm]	1
Fuselage width	[mm]	44
Mass	[g]	254
Buoyancy	[N]	3.06

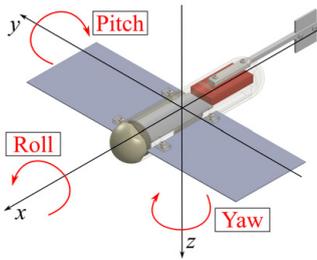


Fig. 4: Coordinate system of the model underwater glider

の厚さ，水槽の幅，スケール側のアクリル板から模型機までの距離， n_1, n_2, n_3 はそれぞれ空気，アクリル，水の屈折率， θ_1 は P_1 と P_2 を結ぶ直線と， P_1 と P_3 を結ぶ直線のなす角度である．また，式 (1) において， $N_{12} = (n_1/n_2) \sin \theta_1$ ， $N_{13} = (n_1/n_3) \sin \theta_1$ である．

3. 小型模型機の製作

製作した小型模型機を Fig. 3 に，小型模型機の諸元を Table 1 に，小型模型機の座標系を Fig. 4 に示す．模型機の翼は，最も単純な翼形状である矩形平板翼を使用する．そして，模型機は，おもりを搭載しない場合に水に浮き，おもりを搭載することで沈むように設計した．おもりの質

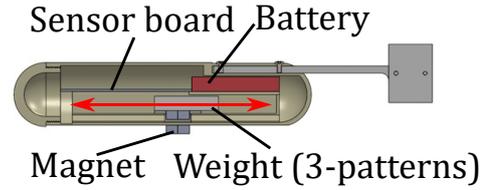


Fig. 5: A cross section of the model underwater glider

量は，おもりを模型機に搭載することで水中での模型機の重量が約 0.1[N]，約 0.2[N]，約 0.3[N] となるよう，それぞれ 69.3[g]，79.3[g]，89.1[g] とした．また，模型機のロールならびにピッチ方向の安定性を向上させるために，浮心位置に対して下方に重心位置を設定する．そこで，胴体内部下方におもりを搭載できるように設計した．模型機の断面図を Fig. 5 に示す．胴体内部のおもりは，模型機外部の磁石により固定されている．そのため，磁石を前後に動かすことにより，おもりが移動し，重心位置を前後に移動することができる．

模型機の重心位置は，空気中で幅 1[mm] の平板で支持しながら実測することで，前後方向に ± 0.5 [mm] の精度に収まるように調整した．また，模型機の浮心位置は，磁石を前後に移動した場合，模型機の翼前面から後方へ 79.40[mm] から 79.47[mm] の間で，かつ左右中心位置にあることを 3D-CAD で作成したモデルから確認した．

4. グライディング実験

模型機の水中での重量を約 0.1[N]，約 0.2[N]，約 0.3[N]，重心位置を 73.0[mm] から 82.0[mm] の間を 1.0[mm] 間隔（一部 0.5[mm] 間隔）で変化させ，各条件（前方への移動量が極端に小さい条件を除く）につき 3 回ずつグライディング実験を行った．実験には幅 582[mm]，長さ 6000[mm]，水深 600[mm] の水槽を使用する．実験の再現性をとるため，スタート台を製作し，模型機が水平な状態でグライディング開始できるようにした．

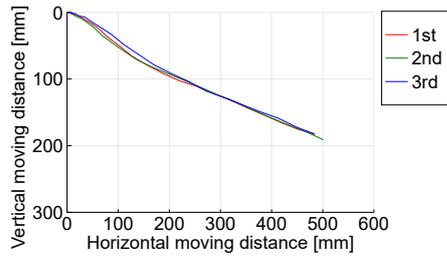


Fig. 6: Measured moving locus of the model underwater glider (the gravity center position is between 78.0[mm] and 79.0[mm])

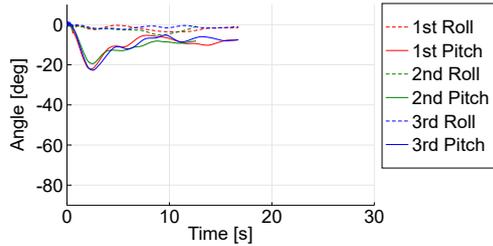


Fig. 7: Measured orientation of the model underwater glider (the gravity center position is between 78.0[mm] and 79.0[mm])

模型機の姿勢は，模型機に搭載した傾斜センサを用いて，Fig. 4 中のロール方向の傾きとピッチ方向の傾きを 25[ms] 間隔で測定した．また，模型機の側面方向に設置したデジタル一眼レフカメラを用いて撮影した動画 (30[fps]) から，模型機の移動軌跡と移動速度を算出した．

グライディング時の動画から，水中での重量が約 0.1[N] の場合，重心位置が翼前面から後方へ 78.0[mm] から 79.0[mm] の間のときに安定してグライディングした．約 0.2[N] の場合では，76.0[mm] から 77.0[mm] の間のとき，約 0.3[N] の場合では，74.5[mm] から 75.5[mm] の間のときに安定してグライディングした．このことから，模型機の水中の重量が重くなると，安定してグライディングできる重心位置が前方に移動する傾向が確認された．

計測した姿勢と位置を用いて，模型機が安定グライディング状態（一定の姿勢と速度で移動する状態）になっているか確認を行う．水中での重量が約 0.1[N]，重心位置が 78.0[mm] から 79.0[mm] の間の模型機の移動軌跡を Fig. 6，姿勢を Fig. 7，速度を Fig. 8 に示す．Fig. 6 より，

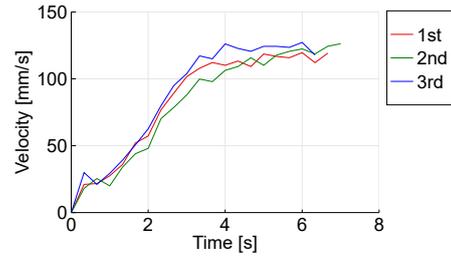


Fig. 8: Measured velocity of the model underwater glider (the gravity center position is between 78.0[mm] and 79.0[mm])

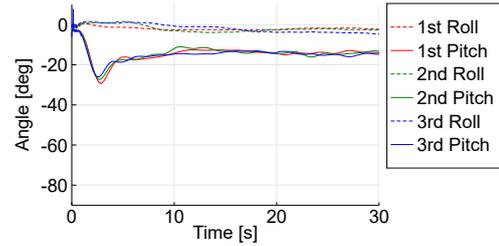


Fig. 9: Measured orientation of the model underwater glider in retest (the gravity center position is between 78.0[mm] and 79.0[mm])

移動軌跡が緩やかに安定し直線に近づくこと，Fig. 7 より，測定開始から約 10[s] 後，ピッチ角が安定し約 $-10[\text{deg}]$ に収束していると推測できること，Fig. 8 より，測定開始から約 5[s] 後，移動速度が約 135[mm/s] に収束しているようにみえることが確認できた．また，水中での重量が約 0.2[N] と約 0.3[N] の場合では，実験装置の大きさの関係で姿勢と速度が収束するまで確認できなかった．しかし，移動速度がそれぞれ，約 250[mm/s]，約 325[mm/s] であり，水中での重量が大きくなると移動速度が速くなることが確認できた．

そこで，直径 4.5[m]，水深 5[m] の水槽を用いて，再実験を行った．しかし，水槽の観察窓が球面であることや背景にスケールを平坦に設置できないため，姿勢測定のみ行った．また，グライディングの安定性については，測定した姿勢ならびにグライディングの様子を撮影した動画により判断した．

水中での重量が約 0.1[N]，重心位置が 78.0[mm] から 79.0[mm] の間の模型機の姿勢を Fig. 9 に

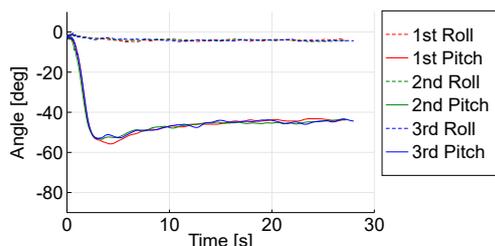


Fig. 10: Measured orientation of the model underwater glider (the gravity center position is between 77.0[mm] and 78.0[mm])

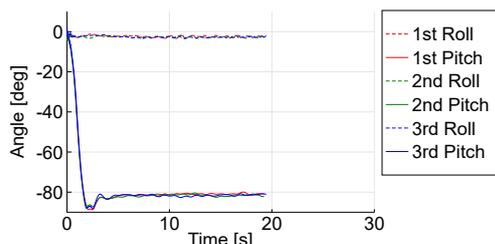


Fig. 11: Measured orientation of the model underwater glider (the gravity center position is between 73.0[mm] and 74.0[mm])

示す．Fig. 9 より，測定開始から約 10[s] 後，ピッチ角が約 -15 [deg] に収束していることが確認された．同じ実験条件である Fig. 7 と Fig. 9 のピッチの収束する角度が約 5 [deg] 異なっている．その理由として，重心があると推定できる範囲が 1.0 [mm] と幅があるため，重心位置がわずかに異なることが原因と考えられる．次に，水中での重量が約 0.1 [N]，模型機の重心位置が 77.0 [mm] から 78.0 [mm] の間の模型機の姿勢を Fig. 10 に， 73.0 [mm] から 74.0 [mm] の間の模型機の姿勢を Fig. 11 に示す．Fig. 10 より，測定開始から約 10[s] 後，ピッチ角が約 -45 [deg] に収束していることが確認できた．Fig. 11 より，測定開始から約 5[s] 後，ピッチ角が約 -80 [deg] に収束していることが確認できた．

本研究の実験結果から，模型機の重心位置が前方に移動してもピッチ角が収束し，安定してグライディングができることが確認できた．また，重心位置が前方に移動するとピッチ角の収束する角度が負の方向に大きくなることが確認できた．さらに，水中での重量が約 0.2 [N] と約 0.3 [N] の場合でも，同様にピッチ角が収束する

ことを目視と撮影した動画から確認した．

5. 結言

本研究では，グライディング時の運動を計測できる小型模型機を製作し，模型機のパラメータを変更した実験により姿勢と位置の計測を行った．模型機の水中での重量が重くなると，安定してグライディングできる重心位置が前方に移動する傾向と移動速度が速くなることが確認された．また，本研究の実験結果から，模型機の重心位置が前方に移動してもピッチ角が収束すること，そして，収束するまでの時間は約 10[s] と，大きく変わらないことが確認された．

今後は，小型模型機のモデル化，揚力や抗力等のパラメータを計測しシミュレータへ導入する．また，本研究の計測結果とシミュレーション結果を比較し，シミュレーション精度の確認を行う．

謝辞

本研究の一部は，令和元年度福島県産学連携ロボット研究開発支援事業補助金の支援を受けて行われた．関係各位に感謝いたします．

参考文献

- 1) 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，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 2K 号，pp.57-60 (2006)
- 2) 中村昌彦ほか: パーチャルモアリング用シャトルグライダー「ツクヨミ」の開発，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 14 号，pp.143-156 (2013)
- 3) 菅野 怜ほか: 湖沼調査用グライダー型小型水中ロボットののための翼シミュレーション，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019，2A2-I01 (2019)
- 4) DAM QUANG MANH ほか: 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットのの開発，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016，1A1-16b6 (2016)