

湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発 -グライダー方式の基礎的検討-

Development of a small and modular UROV for environmental surveying -Basic study of underwater glider-

Dam Quang Manh , Luis Canete , 高橋隆行

Dam Quang Manh , Luis Canete , Takayuki Takahashi

福島大学

Fukushima University

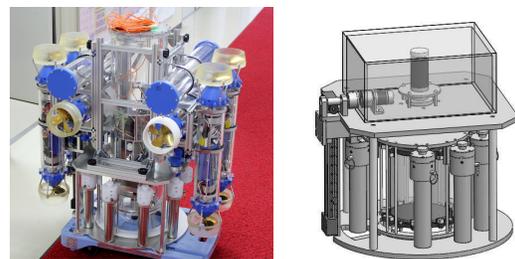
キーワード： 水中ロボット (Underwater Robot) , モジュール構造 (Modular Structure) ,
水中グライダー (Underwater Glider) , 屈折 (Refraction)

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

1. はじめに

多くの湖沼が存在している福島県では水質調査や生態系調査といった環境調査が継続的に行われている。また、2011年3月に福島第一原子力発電所の事故が発生して以降、放射線量の調査も行われるようになった。放射線量の調査では一般に底質中の放射性物質は土粒子表面へ付着していると言われていることから¹⁾、湖底泥の採取による調査が重要である。

現状の採泥法としては、船から採泥器などの観測機器を投下及び回収する方法や潜水士が湖底泥を採取する方法がある。しかし、観測機器を用いた方法は母船や観測機器が、風や湖水の流れに流されてしまうと観測機器の正確な位置を測定することが困難となる。潜水士による調査では潜水士の人体への負担が大きく、調査可



(a) Underwater robot (b) Sampling module

Fig. 1 Prototype of proposed underwater robot

能な深度も限られてしまう。

これらの問題に対し、筆者らはモジュール構造型小型水中ロボットの開発を行っている²⁾³⁾。開発した水中ロボットを Fig. 1(a) に示す。本水中ロボットは各機能ごとにモジュール化されているため、調査目的によってモジュールを交換することにより、様々な調査内容に対応する

ことが可能である．採泥に関しては，Fig. 1(b)に示す採泥モジュールを用いる．このモジュールをロボットに搭載することにより，1回の潜航で複数の採泥ポイントを巡ることができる．

しかし，本水中ロボットに搭載されるスラストモジュールのバッテリー容量により，ロボットの水平方向の最大移動距離が $800[m]^3$ ，連続稼働時間が2時間と限定されてしまうため，広範囲を調査を行うことが困難である．

そこで，筆者らは水中グライダー方式を水中ロボットに導入することで，より効率の良い調査を行うことができると考えている．水中グライダーの特徴は水平方向へ移動する際に推進器を持たず，機体内に設けられた浮力調整器と機体中央部の左右に取り付けている翼の揚力により，潜水と浮上を繰り返しながら航走することである．

本論文では，水中ロボットのグライダー方式用制御システムを開発するため，水中で動いている物体の測定方法を確立し，翼特性を確認した．確認を容易にするため，水中グライダーの定常巡航状態を想定し，中央部に取り付けている翼に作用する力を2次元とみなした．

2. 2次元モデル

外乱がない状態で動いている翼にかかる力を2次元モデルで考える場合，Fig. 2のように表すことができる．重心に重力 G と浮力 B が働く．翼と流体の相対速度を考えると，翼の圧力中心CPに流体の流れ方向に垂直な成分の揚力 L ，水平な成分の抗力 D が作用する．流体の流れに対する翼弦線の傾きを迎角 α とする．この α が変わることによってFig. 3に示す圧力分布が変動して，CPが移動する．

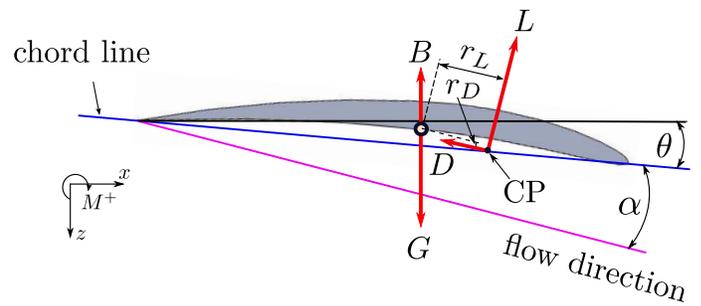


Fig. 2 Forces acting on wing

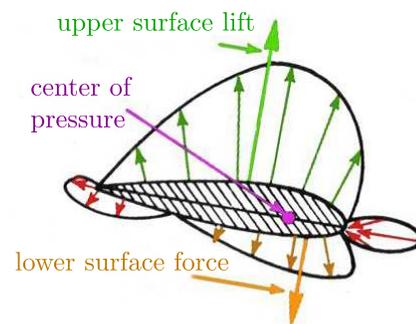


Fig. 3 Center of pressure and pressure distribution

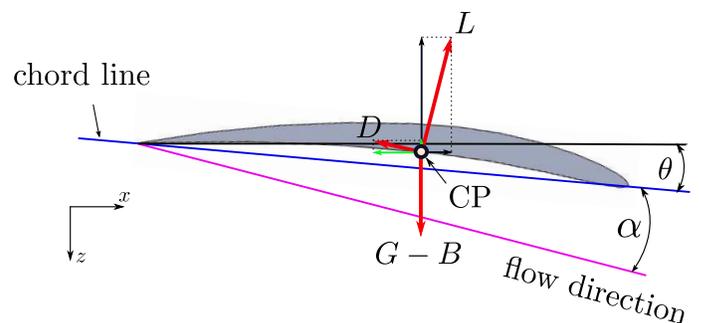


Fig. 4 Balance of forces acting on wing

2.1 運動方程式

水平に対する翼弦線の傾きを θ として，外乱がない場合は以下の式(1)のような運動方程式が成り立つ．

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} &= L \sin(\theta + \alpha) - D \cos(\theta + \alpha) \\
 M\ddot{z} &= G - B - L \cos(\theta + \alpha) - D \sin(\theta + \alpha) \\
 I\ddot{\theta} &= -Lr_L - Dr_D
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 M は物体の重量、 I は慣性モーメント、 r_L と r_D はそれぞれ重心から揚力と抗力の方向に垂直に下ろした距離を示す。

Fig. 2 の全ての力のバランスが取れ、CP が重心と一致しているとき、翼に働く力は Fig. 4 のように示すことができる。その際、翼は等速直線運動となり、式 (1) が式 (2) のように表現できる。

$$\begin{aligned}
 L \sin(\theta + \alpha) - D \cos(\theta + \alpha) &= 0 \\
 G - B - L \cos(\theta + \alpha) - D \sin(\theta + \alpha) &= 0
 \end{aligned} \quad (2)$$

揚力と抗力は翼の面積と速度の二乗に比例するため、次のように表すことができる。

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 S \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 S \quad (4)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 C_L と C_D は揚力係数と抗力係数を示す。 C_L と C_D は α に大きく影響される。

3. 翼特性の検証実験

江端ら⁴⁾は低レイノルズ数領域で用いる水中グライダーの翼断面形状に関する研究をし、アメリカ航空宇宙局が規定している NACA6406 の翼が最も高い揚抗比であることを明らかにした。

本節では、NACA6406 の翼断面形状を参考し、Fig. 5 のような実験機を作製し実験を行った。

3.1 実験方法

Fig. 5(b) に示すように実験機の重心の鉛直線から 5[mm] 離れた所に 1.5[g] の重りを取り付ける。

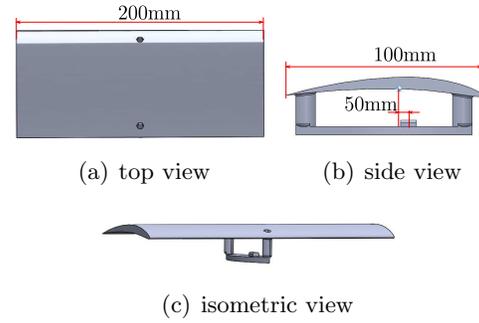


Fig. 5 Testing machine

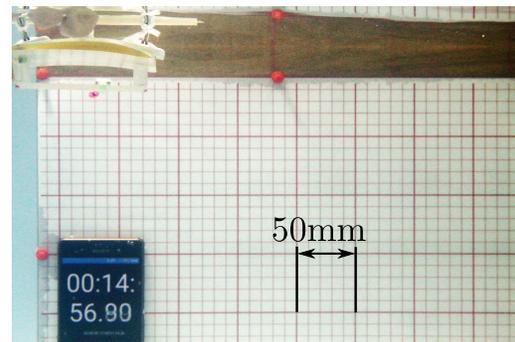
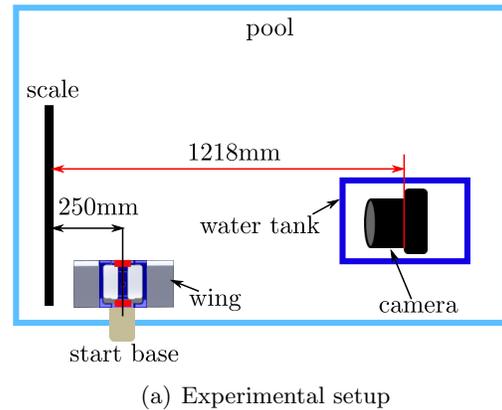


Fig. 6 Experimental image

Fig. 6(b) のようなスケールから 250[mm] 離れた地点にスタート台を設置し、実験機は初期位置において図のような姿勢を保つように設置した。スケールからデジタル一眼レフカメラの焦点 ((株)CANON 製 EOS 7D) までの距離が 1218[mm] になるように設置した。カメラを防水するため、ガラス製水槽を用いた。Fig. 6(a) に実験装置の配置図を示す。実験機が動き始めてからカメラで約 0.15[s] ごとに写真を撮影した。実験を 5 回繰り返し行った。

3.2 測定について

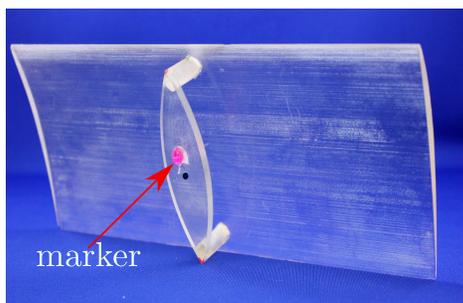


Fig. 7 Testing machine with marker

Fig. 7に示すように実験機の重心の鉛直線にマーカーを取り付け、実験機の動きを観測した。カメラで撮影した画像のマーカーはスケールから250[mm]離れている地点に存在しているため、幾何学変換をする必要がある。また、空気中に置かれるカメラで水中にある実験機の動きを確認するため、屈折現象についても考慮する必要がある。

まず、屈折を考慮しない、単純な幾何学変換を考えよう。

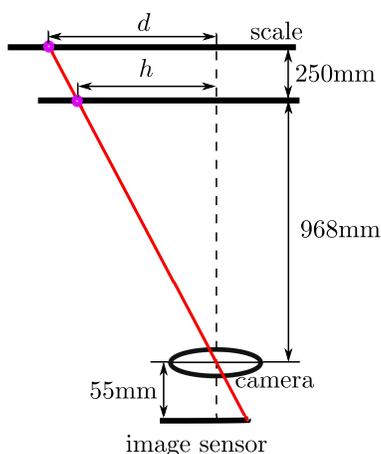


Fig. 8 Geometry conversion

Fig. 8に示す d は画像で見たときの中央からマーカーまでの距離、 h は中央からマーカーまでの実際の距離とする。このように、撮影画像で読み取れるスケール上の位置 d と実際の位置 h には差があることがわかる。

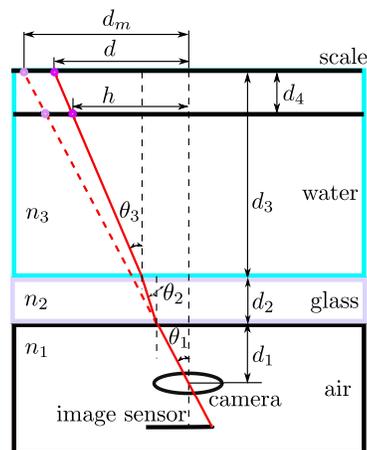


Fig. 9 Refraction

さて、ガラスと水の光速は空気中の光速とは異なるため、本実験で屈折現象が生じると考えられる。Fig. 9に示すようにカメラと物体が同じ媒質であれば、中央からの距離は d_m である。それに対して、間にガラスと水がある場合は距離 d_m が距離 d になることが分かる。

スネルの法則より

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3 \quad (5)$$

と表される。ここで、 n_1, n_2, n_3 は空気中、ガラス、水の屈折率であり、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ はそれぞれの屈折角である。

以上より、Fig. 9に示す中央から実験機の位置までの距離 h は式(6)から求められる。

$$h = d_1 \frac{\sin \theta_1}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}} + d_2 \frac{\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right)^2}} + (d_3 - d_4) \frac{\frac{n_1}{n_3} \sin \theta_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_3} \sin \theta_1\right)^2}} \quad (6)$$

d_1 はカメラの焦点とガラスの距離、 d_2 はガラスの厚み、 d_3 はガラスとスケールの距離、 d_4 はスケールと実験機の距離を示す。

3.2.1 速度 v とグライディング角度 $(\theta + \alpha)$ の求め方

実験機 の速度 v とグライディング角度 $(\theta + \alpha)$ は式 (7) のように表す .

$$v = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (7)$$

$$\theta + \alpha = \frac{dz}{dx}$$

これらを求めるため , 実験機が等速直線運動と考えられる区間に着目した . この区間内において , 時刻に対してマーカーの進行方向と潜水方向及びマーカーの軌道を撮影した画像から読み取り , それを用いて最小二乗法で近似直線を算出した . その結果をそれぞれ Fig . 10 , Fig . 11 , Fig . 12 に示す .

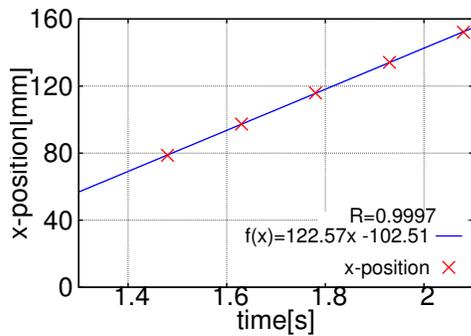


Fig. 10 Travelling direction motion of marker

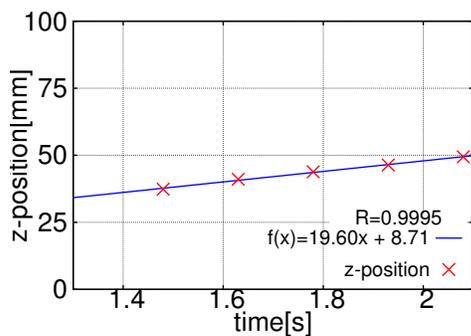


Fig. 11 Diving direction motion of marker

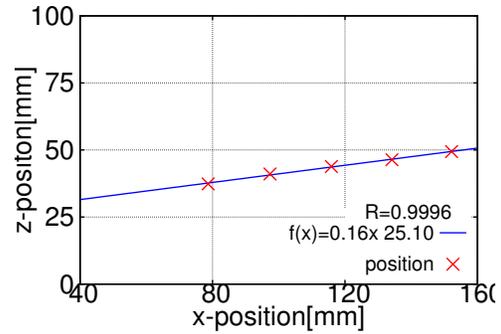


Fig. 12 Motion of marker

3.3 結果及び考察

測定したデータを式 (2) , 式 (3) , 式 (4) に代入し , 算出した C_L と C_D を Table 1 に示す .

Table 1 Experimental result

	$\theta + \alpha$	α	C_D	C_L
1 回目	9.089	5.402	0.102	0.639
2 回目	12.814	6.461	0.121	0.533
3 回目	9.664	4.340	0.092	0.538
4 回目	12.173	4.499	0.105	0.485
5 回目	12.698	4.517	0.098	0.436
平均		5.044	0.104	0.526
江端ら ⁴⁾		5.000	0.120	0.480

江端ら⁴⁾の結果と比較したところ , 同様の α でほぼ等しい C_L と C_D を得ることができた . 今後 , α と C_L , C_D の関係式を用いてシミュレーションを行う .

4. おわりに

本論文では , 水中で動いている物体の測定方法を確立し , 翼特性を確認することを目的とした翼の 2 次元モデルと本実験の測定方法について述べた . 今後は , シミュレーションにて 2 次元モデルを確認したのち , 制御システムを開発する予定である .

謝辞

本研究を進むあたりに、多方面でご協力いただいた日本オートマチックマシンの五十嵐伸一様、但野洋一様、協栄精機の但野政光様、ゆめサポートの中城孝司様にこの場をお借りして心より厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) いであ株式会社：水環境中の放射性物質調査方法など検討業務報告書，平成 24 年度．
- 2) 神尾柊太，高橋隆行：湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，2A2-D08．
- 3) 安西香保里，高橋隆行：湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，2A1-E05．
- 4) Shigeha Ebata，Takahiro Yasuda，Hisato Minagawa，Yuji Miyamoto，Nobuyuki Satofuka：A study of cross-sectional shape of wing for underwater glider at low reynolds number region，2013 The Japan Society of Mechanical Engineers，2013-JBR-0002．