

自律制御 AUV の開発と河川流速計測の自動化に関する研究

Development of Autonomous Underwater Vehicle and Study on Automation of Velocity Measurement of Natural River

金子泰洸ポール⁽¹⁾・山上路生⁽¹⁾

Taikopaul KANEKO⁽¹⁾ and Michio SANJOU⁽¹⁾

(1) 京都大学 大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

In order to manage adequately natural river environment and flood prevention project, discharge observation in natural rivers and construction of related database are very important. A rod float method is most prevailing for discharge measurement in natural rivers. However accuracy of this method is not good because the float could not always follow the mainstream and subjectivity of observer can't completely be removed. Here we report development of AUV (Autonomous-Underwater-Vehicle) designed to measure mean velocity in an open-channel flow. A PID control method could remain the position of the floating-robot stationary in main stream, and then mean velocity could be evaluated reasonably by a rotational speed of screw propeller.

キーワード: 新しい流速計測機器, 自律型無人潜水器, PID制御, 平均流速, 音響測量

Keywords: new current meter, AUV, PID Controller, mean velocity, acoustic surveying

1. はじめに

適切な河川整備計画や治水事業を進めるにあたって、河川の流量観測とそのデータベースの構築は欠かすことができない。また河川洪水時の迅速かつ正確なダム操作を実施させるためには、流況のリアルタイム観測は極めて重要である。一般に河川流量は水位や断面形状、流速分布を取得してそれらのデータから推定される。出水時の流速計測手法で最も一般的なのが浮子法である(二瓶ら, 2010)。これは浮子を河川に投下し、対象区間を流れる時間を計測することで表面流速を算出し、その結果から流量を推定するものである。浮子法は簡便性では有利だが、風などの影響により浮子が必ずしも流れに追従しないことや、観測員の目視に頼るために主観性が排除できず、信頼できるデータの取得には熟練が必要な

どの問題点もある。そのため浮子法に代わる新たな流速計測手法が、鋭意研究されてきた。その一つが ADCP によるものである(二瓶ら, 2010; 萬矢ら, 2010)。ADCP は超音波のドップラー効果を利用した流速計測機器であり、水中に鉛直方向に音波を照射することにより、水深方向の流速プロファイルを得ることができる。ADCP の運用方法として特に注目されているのが、曳航式浮体に ADCP を取り付け、橋の上からロープで操作する方法である。ADCP を横断方向に移動させれば、水深方向と横断方向の 2 次元断面の主流速プロファイルが得られるため、流量の正確な算定が期待できる。

またビデオカメラや赤外線カメラの画像情報により、流速の瞬時情報を非接触で取得できる方法も注目されている。藤田らが開発した LSPIV (Fujita et al, 1998) や STIV (藤田ら, 2009) は、PIV を河川流へ

適用した高精度画像計測手法である。また藤田らは遠赤外線カメラで撮影を行い、同様の手法で流速の算出をしている（藤田ら，2013）。これは悪天候や夜間でも運用が可能なため、極めて有用な方法である。画像計測手法の利点は、平面の 2 次元流速データが取得できることである。これにより流量観測だけでなく、ボイル渦のような河川の乱流渦の解明に大きく貢献することが期待され、学術面でも有用である。また最近注目を集めている手法として、電波流速計がある（山口ら，1994；萬矢ら，2010）。これは水面に電波を照射して散乱された電波から水面の波の状態を読み取り、表面流速を算出するというものである。天候や時間帯に左右されずに高速流にも対応でき、今後のさらなる普及が期待される。

しかしこれらの手法はそれぞれ欠点も有しており、その短所を補完できる新たな手法や技術の開発が求められる。ADCP はその測定原理から、横断方向の流速の変化が大きい側岸付近や、ADCP から離れた河床付近の計測誤差が大きくなる。また曳航式浮体の係留のために、観測ポイントが橋梁周辺に限定される。画像手法では、計測精度が画質に大きく依存し、データの信頼性の確認には時間を要する。また電波流速計は、表面に波がないと計測できないという欠点を有する。

ところで、水中で自律移動するロボットは AUV（Autonomous Underwater Vehicle）と呼ばれ、海底の鉱石分布の探査やダム湖の管理に活躍している。例えば東京大学生産研究所の Tri-TON は、海底に置かれたステーションとの相互位置の測定により自己の位置を把握して、自律行動をすることが出来る。この位置把握能力は海底のモザイク写真の作成に十分な精度であり、Tri-TON は 2012 年に鹿児島島の熱噴出孔の海底を調査し、200 平方メートルの地形情報を取得することに成功している（Tashiro et al, 2013）。

このような背景のもとに、筆者らは実河川での流量観測を目的とした自律制御水中ロボットの開発に着手した。開発は数年のスパンで行い最終的には簡便かつ低コストに使えるロボットの完成を目指す。山上ら（2015）は開発の第一段階として、船型の流速計測ロボットの試作機（Type-RX01）を作成した。これにより、本計画が提案している計測手法の有効性を示した。本研究では開発環境をより拡充させるため PIC による電子回路から自作し、より正確で高速駆動が可能な改良型を作製し、実用化に向けてさらに前進させた。

2. 流速計測 AUV の概要

2. 1 流速測定 の原理

Fig.1 にプロジェクトの最終目標である流速計測ロボットの概要図を示す。機体は水中潜航できるもので、形状は流水からの抵抗が少ない魚雷型か涙滴型にする。ロボットは尾部にスクリューを有しており、これを回転させることによって前進することができる。さらに姿勢の制御と方向の操作が可能なものとする。また外部からの操作は必要とせず、自律して航行できる AUV とする。以下当該のロボットを「流速観測 AUV」と呼ぶ。

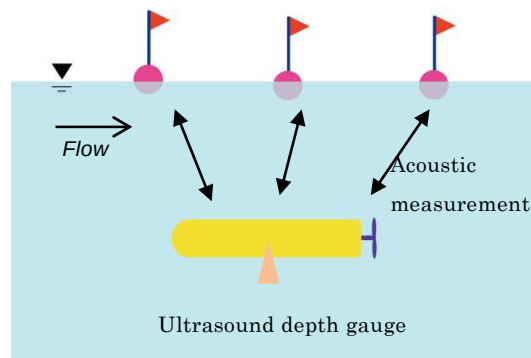


Fig. 1 The schematic of current measurement AUV

流速観測 AUV を水中へ投入し、流速を計測したいポイントまで自律移動させる。その地点で、地上座標に対して相対静止できるようにスクリューの回転数を自動制御する。うまく静止できたとき、ロボットは流水から以下の式で表される抗力 D を受ける。

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

ここで D : 抗力, ρ : 流体の密度, U : 対向流速, S : AUV の流線と垂直な面への投影面積, C_D : AUV の抗力係数である。ロボットが地上座標に対して静止しているとき、抗力 D とスクリューの推進力 F が釣りあっている。ここでスクリューによる推進力が、その回転数に依存するのであれば、以下の式で表すことができる。

$$F = F(n) \quad (2)$$

ここで n : スクリューの回転数である。(1)式と(2)式より、ロボットが相対静止しているのであればスクリューの回転数 n と流速 U が比例して、回転数 n から流速 U が逆算できることが分かる。

$$U = \left[\frac{2F(n_0)}{\rho S C_D} \right]^{1/2} = U(n_0) \quad (3)$$

すなわち、本システムの流速計測の原理は「流速

を計測したいポイントで AUV を相対静止させて、そのときのスクリュウ回転数から流速の値を推定する」となる。

(3)式の中には AUV の抗力係数 C_D が含まれているが、実際には抗力係数を測定する必要はない。流速 U が既知な実験水路で流速計測 AUV を運転させ、相対静止するときのスクリュウの回転数を記録する。この実験を流速を変えて複数回行えば、流速 U とスクリュウ回転数 n の関係 $U=U(n)$ が得られる。これが校正曲線であり、以降はこの曲線を利用してスクリュウ回転数と流速の変換を行えばよい。また(1)式にあるように、抗力 D は機体の投影面積 S にも依存する。したがって AUV が相対静止しているとき（流速を計測しているとき）は、機体の向きを変化させてはならない。水からの抵抗は少ないほうが、ロボットを駆動するバッテリーの消費が少なく済むため、一番抵抗が少なくなる流線と平行な向きに機体の姿勢を制御して保つことが望ましい。

なお同様の流速測定の原理を用いるなら、潜水するものではなくボート型のものも考えられる。しかしボートのような浮体形式だと、実河川で使用する際に風から力を受けてしまい、流速の測定ができない。したがって、潜水形式のものがよい。

山上ら（2015）はこの流速測定の原理の有効性を確かめるために、ボート型の試作機を作成した。実験室内で試運転を行い、スクリュウを回すモーターのパワー値（8 ビット階調）とレーザー流速計で高精度に計測した時間平均主流速との関係を調べた。その結果、両者を結びつける校正式の取得に成功した。

2. 2 音響測量による位置情報の取得

流速観測 AUV が自律航行して計測ポイントで精度よく相対静止するためには、ロボットが水中で自身の 3 次元位置を正確に取得できることが重要である。空気中での位置情報の取得には GPS が使用できるが、水中では電波は減衰して遠くまで届かないので、GPS は使用することができない。水中での 3 次元位置の取得は、超音波を用いた音響測量によって行うことができる。ここでは、音響測量の原理を説明する。

音波は空気中では約 340m/s の速さで伝わるが、水中ではそれよりもはるかに速く、約 1500m/s で伝わる。いま流速計測 AUV が超音波の送受信装置を設けているとする。また Fig.1 の水面にあるようなブイを複数設置し、このブイにも超音波の送受信装置を設ける。AUV からブイに向けて超音波を発射すると、ブイは超音波を感知して送られてきた方向に超音波を送り返す。この時 AUV とブイとの間の距離は、以

下の式で表される。

$$l = \frac{c(t_{of} - T_c)}{2} \quad (4)$$

ここで、 l : AUV とブイの間の距離、 c : 水中での音速、 t_{of} : AUV が超音波を送信してから受信するまでの時間、 T_c : ブイが超音波を受信してから送信するまでにかかる時間である。これより AUV がブイに超音波を送信して返ってくるまでの時間を計測すれば、ブイとの距離が分かる。ブイの座標 (X, Y, Z) が既知ならば、AUV は

$$l^2 = (x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2 \quad (5)$$

なる球面上のどこかにいることが分かる。 (x, y, z) は AUV の座標である。いま(5)式に含まれている未知数は AUV の座標 (x, y, z) の 3 つである。したがって同様の計測を、座標が既知の 3 つの異なるブイで行えば、式が 3 つとなり AUV の座標が推定できる。これが音響測量の原理である。

実際にはブイとの距離の測定には誤差が生じるので、4 つ以上のブイと相互距離の測定を行って、AUV が自身の位置を決定するのが良い。また AUV から水中に超音波を発したとき、跳ね返ってくるのはブイからの返信だけではなく、河床や側岸、魚等から反射したものも含まれる。ブイからの返信とこれらの反射波を区別するためには、返信する超音波の波長を受信波とは異なるものにするのが良い。このように受信した信号を異なる波長の電波または音波で送り返す中継器を、「トランスポンダ」という。

超音波を用いた空気中での 3 次元位置推定の技術は、ロボットアームの操作を目的として研究がおこなわれてきた。Hans ら（1997）は空気中での超音波を用いた位置推定法についてまとめており、その誤差は 10mm 程度としている。また精度は音波の媒体の乱流構造や温度分布にもよるとしている。超音波による水中での 3 次元位置推定システムは、Tri-TON のような海洋探査ロボットですでに利用されている。しかし、河川で運用するロボットへの適用は例をみない。河川と海洋では流れ構造が大きく違うため、位置推定を行う際の影響は未知数である。特に河川の乱流構造が与える影響が気になるところであるが、流速計測 AUV を開発するにあたって実験を重ね、精度のよい位置推定システムの開発をしていきたい。

2. 3 動作フロー

流速取得までの一連の流れは次の通りである。

- ①流速を計測したいポイントの座標を入力。

- ②あらかじめ設置してある基準位置からの測位により，ロボットが位置情報を取得．
- ③計測ポイントに向かって自律移動．
- ④計測ポイントに到着したら，一定時間静止するよう自動制御．
- ⑤静止時のスクリー回転数から平均流速算出．

流速を計測したいポイントの座標をあらかじめ AUV に複数インプットしておけば，運用者は初めに AUV を河川へリリースするだけで後はすべて自動で計測を行うことができる．また AUV をバッテリー式として河川に充電ステーションを設けておけば，AUV が自己で充電を繰り返して半永久的に流速を観測することができる．Fig.1 のように底部に超音波水深計を設置すれば，流速の計測と同時に水深情報も取得できる．したがって河川の横断方向に網羅的に流速を計測すれば，断面積と流速から流量を算出することが出来る．

以上のように，実現すれば極めて簡便でまた低コストな流量観測手法となる．

3. 船型流速計測ロボットの製作

潜水可能な機体を作成することは，技術的な面から非常に難易度が高い．したがって当面はボート型の流速計測ロボットを製作し，知見が集まりしだい潜水型の機体を作成していく．

山上ら（2015）はレゴ社のマインドストームを用いて，ボート型の試作機（Type-RX01）をすでに作成している．しかし Type-RX01 は最高 16cm/s ほどの流速までしか対応できないという問題がある．これはマインドストームでは使用できるモーターの種類が限られており，低速のモーターしか利用できないためである．PIC は Microchip 社が販売しているマイクロコントローラーであり，これを使うとブラシレスモーターも含めた高出力なモーターを利用することができる．したがって今回は PIC を制御部として用いて，高速流へ対応した試作機の開発を目指した．

3. 1 船型試作機（Type-RX03）の概要

Fig.2 に今回作成した試作機（Type-RX03）の全体図を示す．幅は 16cm，長さは 30cm でありややコンパクトに仕上がった．中央に制御部である PIC を配置している．Fig.3 に Type-RX03 の動作概念図を示す．動作原理は山上ら（2015）の Type-RX01 と同じである．Fig.3 の左端にあるように，水路に主流方向

と垂直になるように反射板を設置する．ロボットの前部には距離センサーを設置しており，ロボットはこの反射板からの距離を測定する．PIC のプログラムにはあらかじめ目標とする反射板からの距離がインプットされており，ロボットはこの距離で静止できるようにモーターへかける電圧を自動的に調節する．室内の実験水路で試験運転を行い，流速とモーターへかけている電圧の関係を調べる．

また，スクリーの傍にラダーを設置している．ロボットは地磁気を感知できるコンパスセンサーを有しており，船体の向きが主流方向と平行になるようにラダーを制御する．

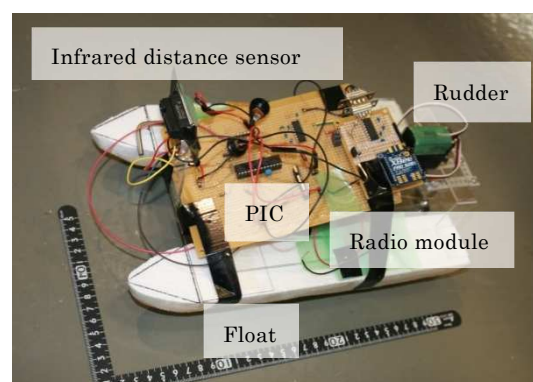


Fig.2 The schematic of boatlike velocity measurement robot (Type-RX03)

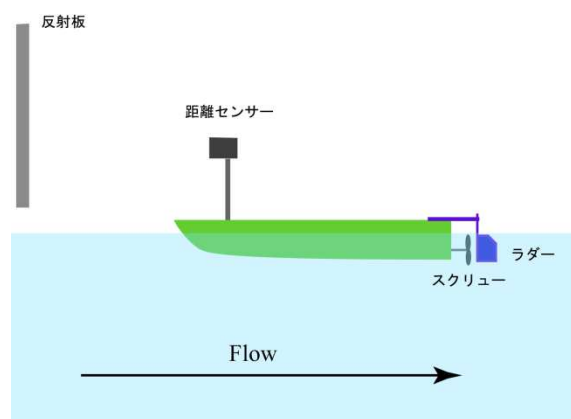


Fig.3 Movement principle of Type-RX03

3. 2 PWM によるモーターの制御

今回モーターの制御は，PWM という手法で行った．モーターの回転数を変化させるもっとも簡単な手法は，印加する電圧の大きさを変えることである．しかしこれは PIC のようなデジタル素子は苦手とすることである．そのためモーターに印加する電圧は常に一定として，電流を素早くオンオフさせる．オン

にしている時間とオフにしている時間の比を変えれば、モーターにかかる電力の量を調節することができる。この方法を“パルス幅変調法”（PWM）という（吉岡，2004）。今回制御部として使用した PIC16F873A には PWM の機能が搭載されており、適切な設定を行うことで PWM 信号を発生させることができる。詳しい説明は割愛するが、今回は PWM 周期を 1.22KHz としデューティ比（オンにしている時間/PWM 周期）を 0 から 1023 の 1024 段階で調節できるように設定した。またモーターはマブチモーターの RC-260 を用いた。さらにタミヤの遊星ギヤボックスも用いて、回転を 1/4 に減速させてスクリューのシャフトにつないだ。使用したスクリューは山上ら（2015）の Type-RX01 と同じ、外形 25mm のプラスチック製のものを用了。

3. 3 XBeesによる測定データの無線送信

山上ら（2015）の Type-RX01 では、データは本体の内部メモリに保存される。そのため測定データを読み出すには、一度ロボットの動作を止めてパソコンにつなげる必要があった。しかし実河川での試運転を考えると、ロボットの動作と同時に逐次測定したデータを確認できた方が、開発や運用上簡便である。そこで今回の Type-RX03 では、「XBee Pro」という無線モジュールを用いることで、ロボットの動作中に外部のパソコンへ測定データを送信できるようにした。

Fig.2 の右上にあるのが、無線モジュールの XBee Pro である。XBee Pro は非常に小型で軽量であり、3.3V で動作をすることができる。通信可能な距離は、室内では 60m、屋外では見通し 750m となっており小型ながら遠距離の通信で出来る。また日本の河川の幅が数 10～100m のオーダーであることを考えると、将来実河川で試運転を行う際でも XBee Pro による操作やデータの通信は有用であることが分かる。今回は XBee を用いて、距離センサーで測定した反射板からの距離、PWM のデューティ比の値をパソコンへ送信した。これらの数値データは PIC によりキャラクターデータに変換され、シリアル通信により XBee Pro へ送信される。XBee Pro はデータを電波として送信し、それをパソコンにつないだ別の XBee Pro によって受信する。

3. 4 PID 制御によるモーター操作量の決定

ロボットが反射板から一定の位置で静止できるようにするには、距離センサーの計測データを元にしてモーターにかかる電圧を適切に調節しなければならない。これには山上ら（2015）の Type-RX01 と同

じく、PID 制御（Proportional/Integral/Derivative Controller）を採用した。

$$\begin{aligned} MV_n &= MV_{n-1} + \Delta MV_n \\ \Delta MV_n &= K_p(e_n - e_{n-1}) + K_i e_n \\ &\quad + K_d\{(e_n - e_{n-1}) \\ &\quad - (e_{n-1} - e_{n-2})\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 MV_n , MV_{n-1} ：今回、前回操作量、 ΔMV_n ：今回操作量の差分、 e_n , e_{n-1} , e_{n-2} ：今回、前回、前々回の偏差である。操作量 MV_n は PWM のデューティ比である。偏差 e_n は目標とする反射板からの距離と、距離センサーで測った現在の距離の差である。第 2 式の右辺にある K_p , K_i , K_d はそれぞれ比例ゲイン、微分ゲイン、積分ゲインであり、これらの値によってロボットの動作が異なる。今回はゲインの値を変えて実験水路での試運転を繰り返し、一番良い動作をするゲインの値を実験的に決定した。

4. 実験水路での試運転（幅 40cm）

4. 1 実験方法と水理条件

全長 10m、幅 40cm の可変勾配水路にて、製作した船型流速計測ロボットの運動性能評価を行なった。Fig.4 に実験の様子を示す。まず写真左にあるように、水路に反射板を設置した。また天井から電源コードが垂下げてあり、これをロボットに接続して電力供給を行った。

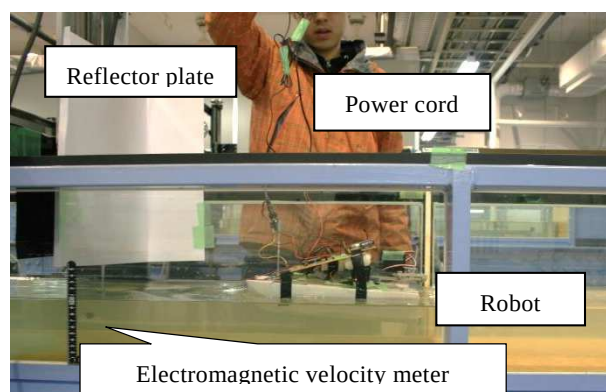


Fig.4 The test run at an experimental channel

コンセントからの電源供給を行うことにより、安定した動作を可能とした。電源コードによってロボットが引っ張られ動作に影響が出ないように、実験の際には電源コードが常にたるんだ状態になり、かつロボットの真上に来るように手で動かした。屋外で用いる際はバッテリーに切り替える。また図の左下にあるように、水路内には電磁流速計（ケネック VP3000）が設置してある。電磁流速計は水中のロボットのスクリューと同じ高さになるように固定して

あり、これによってスクリーンの位置の流速とモーターの出力量の相関を計測する。

実験は2種類行った。まず流速を 15.7cm/s に固定し水深を 10cm とした。また目標の位置を反射板から 30cm の距離とした。(6) 式にある3つのゲインの値 K_p , K_i , K_d を変化させて、最適な動作をするゲインの値を調べた。これらの値の変化による挙動の違いは山上ら (2015) がすでに述べているので、ここでは詳細は割愛する。実験の結果, $K_p=8.0$, $K_i=0.1$, $K_d=1.0$ を最適なパラメータ値として決定した。次に水深を 10cm に固定し、流速を 20cm/s から 35.7cm/s の間で 11 ケース変化させた。この時、PID のパラメータは上記の最適な値で固定した。目標は反射板から 30cm の距離に設定し、ロボットが目標点に到達して 1 分間程度自動制御で静止することを確認した。その際の距離センサーの測定値とモーターの出力値 (PWM のデューティ比) をパソコンに保存した。

4. 2 運動性能の評価

Fig.5 に流速 $U=22.8\text{cm/s}$ での距離センサーの測定値と、PWM のデューティ比のグラフを示す。デューティ比が大きいほど、モーターには大きな電力が送られている。これより目標の 30cm で、ロボットが良好に静止できていることが分かる。

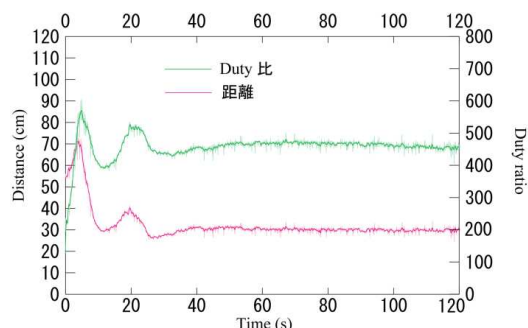


Fig.5 Position v.s. time and duty ratio v.s. time ($U = 22.8\text{cm/s}$)

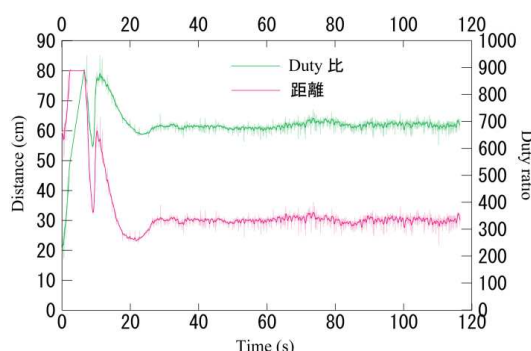


Fig.6 Position v.s. time and duty ratio v.s. time ($U = 35.7\text{cm/s}$)

次に Fig.6 に $U=35.7\text{cm/s}$ でのデータを示す。このように比較的高速流でも、流れに負けずに良好に PID 制御が働いていることが分かる。山上ら (2015) の Type-RX01 が 16cm/s ほどまでしか駆動できなかったことを考えると、PIC を導入することによってかなりの高速化に対応できたことが分かる。

4. 3 流速とモーターへの出力量の関係

Fig.7 にロボットが目標位置で静止しているときの、電磁流速計ではかった主流方向流速とデューティ比の関係を示す。なおデューティ比は、静止しているときの平均値を用いた。これより、両者はある程度の比例関係にあることが分かる。一方で山上ら¹⁰⁾の結果と比べるとデータのばらつきも否めない。このようにばらつきが大きくなった原因としては、次の理由が挙げられる。まず今回の実験においては、ロボットの横断方向の位置が時間によってぶれた。これによりロボットにかかる抗力も変化したと思われる。したがって今後は横断方向にも距離センサーを設置し、横断方向の位置も制御する必要がある。ふたつ目として、モーターの絶対的な回転数を返り値として用いていないことが挙げられる。一般的にモーターへかける電力が大きくなれば、回転数は大きくなる。しかし両者の関係は線形ではなく、かつ負荷の状況によっては比例関係が成り立つとは限らない。したがってモーターに回転数を計測するロータリーエンコーダを取り付け、絶対的な回転数を返り値として得る必要がある。今後はこれらの改良をして再度実験を実施し、回転数と流速との関係を調べる必要がある。

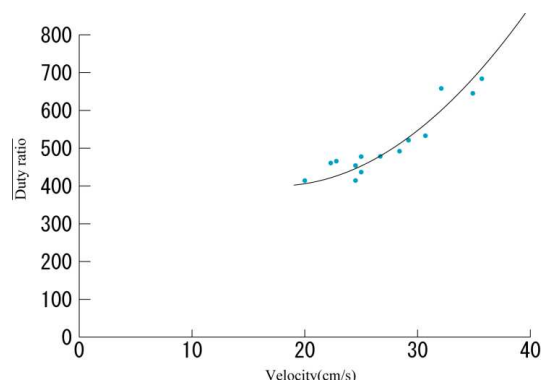


Fig.7 mainstream velocity and output of motor

5. まとめ

本研究では簡便かつ低コストに使用できる流速観測 AUV を提案した。PIC を用いた船型の流速計測ロボットの試作機 (Type-RX03) を製作し、流速 3

5.7cm/s という比較的高速な流速への対応に成功した。またモーター出力数と流速の関係を調べた結果、両者には高い相関性があった。今後はモーターの絶対的な回転数を計測し、流速との関係を調べる必要がある。これからはさらなる高速流への対応をめざし、実河川での試運転を目指していく。

参考文献

- 二瓶泰雄・酒井雄弘，実河川洪水流における浮子の校正係数(2010)：土木学会論文集 B, Vol.66, No.2, pp.104-118.
- 二瓶泰雄(2010)：河川流量モニタリング，ながれ，Vol.29, pp.187-192.
- 藤田一郎・安藤敬済・堤志帆・岡部健士(2009)：STIV による劣悪な撮影条件での河川洪水流計測，水工学論文集，第 53 巻，pp.1003-1008.
- 藤田一郎(2013)：河川流速・流量の画像計測における遠赤外線カメラの活用，ながれ，Vol.32, pp.347-352.
- 山上路生・金子泰洸・戸田圭一(2015)：河川流速の自動計測を目標とする自律移動浮体ロボットの試作開発，水工学論文集，第 59 巻，I, 841-846.
- 山口高志・新理邦生(1994)：電波流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.491, pp.41-50.
- 吉岡均(2004)：PWM 回路の基礎と実験，トランジスタ技術，3 月号，CQ 出版社.
- 萬矢敦啓・大平一典・菅野裕也・深見和彦(2010)：非接触型電波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察，河川技術論文集，第 16 巻，pp.53-58.
- 萬矢敦啓・岡田将治・橋田隆史・菅野裕也・深見和彦(2010)：高速流における ADCP 観測のための橋上操作艇に関する提案，河川技術論文集，第 16 巻，pp.59-64.
- Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1998) : Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, Journal of hydraulic research, Vol.36, pp.397-414.
- Hans W. When and Pierre R. Belanger, Ultrasound-based robot position estimation (1997) : IEEE Transactions on robotics and automation, vol.13, No.5, pp.682-692.
- Tashiro, M., Sato, Y., Matsuda, T., Kume, A., Sakamaki, T., Ura, T. (2013) : AUV Tri-TON –A hover-capable platform for 3D visualization of complicated surface, Underwater Technology Symposium, 2013 IEEE International, pp.1-6.

(論文受理日：2015 年 6 月 11 日)