

自律制御ボート型ロボットの開発と河川流速と水位の自動計測

Development of Autonomous Boat-type Robot and Automated Measurements of Velocity and Water Depth in Natural River

山上路生⁽¹⁾・岡本隆明⁽¹⁾・戸田圭一⁽¹⁾

Michio SANJOU⁽¹⁾, Takaaki OKAMOTO⁽¹⁾ and Keiichi TODA⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

Synopsis

This paper describes a prototype of a boat-type robot, which can automatically measure the mean velocity in river flows. The rotational speed of the screw propeller is proportional to the attacking velocity. Reliable laboratory experiments were conducted with the boat robot and electromagnetic velocimetry to obtain a calibration curve that connects the screw speed and mean current velocity. Two-dimensional navigation tests results in that the prototype moves smoothly to the target points and accurately measures the streamwise velocity profiles across the mainstream. Furthermore, the present robot was found to move successfully in a small natural river also, and we could evaluate the cross-sectional discharge.

キーワード: ボート型自律制御ロボット, 自動流速計測, 河川観測技術

Keywords: autonomous boat-type robot, automated velocity measurement, river observation technique

1. はじめに

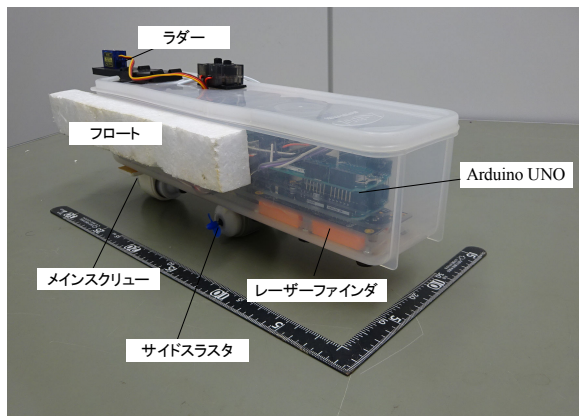
河川の流量・流速の観測及びそのデータベースを構築することは適切な河川整備計画や治水事業を実施するにあたり必要不可欠である。現在平均流速及び流量算定に広く用いられている「浮子法」は、精度や信頼性の面で十分とはいえない。また画像解析手法やADCPなど新たな解析手法も日々鋭意研究が進められているが、それぞれにデメリットがあり確立された計測手法は未だない。そこで本研究では自然河川における流速の自動計測を実現する自律移動型ボートロボット(AUV)の開発を行った。

このロボット計測システムでは目標計測地点で静止するようにメインスクリューを制御し、対向流速によってスクリュー回転数が変化することを利用し

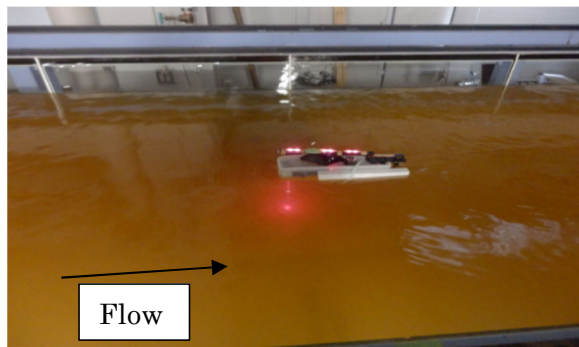
て流速を評価する。サイドスラスターにより平面 2 次元運動も可能である。

前報¹⁾では位置計測に超音波を用いたが、本稿ではカメラ画像によるトラッキング技術を適用する。ロボット投入地点と計測地点を含めた画像の中でロボット位置をリアルタイム追跡し、位置情報をロボットに無線送信して自動航行を実現させる。この方法は GPS 信号が届きにくい屋内水路でも使用可能である。複数のセンサやモータを一括制御し、さらに PC との情報通信を行うために、ロボットの処理装置として Arduino マイコンを使った。

まず室内水路で運動挙動をテストするとともにモータの duty 比(後述する回転数の制御ファクター)と対向流速の校正曲線を求めた。さらにコンパスセンサによるヨー角制御と平面 2 次元運動を試験した。



(a)



(b)

Fig.1 Present robot system

最後に実際の河川にて流速計測を実施した。

2. 計測システムの概要

2.1 計測原理

流速計測の原理はシンプルである。ロボットは目標点まで自律移動し、スクリューの推進力によって静止するようプログラミングされている。静止時に機体が受ける抗力とスクリューの推進力が釣り合うためスクリューの回転数はその位置での主流方向流速値に比例する。事前に回転数と流速の関係式（校正式）を室内試験で導出していることで、実河川で静止したときのスクリューの回転数から流速を逆算することが可能となる。

2.2 試作機

本研究で開発したボートロボット (Fig.1a) は主流方向の推進用モーターと横断方向のサイドスラスタにより二次元移動を行い、ラダー（舵）によって姿勢制御を行った。位置情報の取得と船体の動作制御にはワンボードマイコンの Arduino Uno-R3¹⁾及びオープンソースソフトの Processing²⁾を用いた。Arduino にプログラムを読み込ませて各種センサー及びモーターと接続し、XBee の対をロボットと制御用 PC にそれぞれ搭載し無線制御した。したがって電

力や通信用ケーブルは必要なく、水路や河川で利用できる (Fig.1b)。

2.3 画像処理法

野外計測では制御用 PC に USB 接続された WEB カメラを河岸に設置し河川全体を斜め上方から撮影する。画像内のピクセル単位で座標を設定するが、このままでは単位ピクセルあたりの実際の距離が画像内で異なってしまう。そこで精度を向上させるため、画像の射影変換を行った。これは計測する範囲を予め長方形型に設定し、河川を撮影した PC の画面上で計測範囲を選択することで平面の画像に変換するものである。これにより画像内での単位ピクセルあたりの実距離を均一にすることができる。

2.4 カラーtracking

位置情報の取得に用いたカラーtrackingでは、撮影した画像内で選択したピクセルの輝度情報を読み取り同じ輝度を持つピクセルを画像内で追跡する。このときのピクセルの位置座標データを制御用 PC からロボットの Arduino に無線通信することでロボットが自らの座標情報を得ることができ、これと目標値との偏差を算出してモーターへの入力値の制御を行う。

2.5 制御フロー

自動制御システムにはフィードバック制御方式の一つである PID 制御³⁾ (Proportional Integral Differential Control)を用いた。以下の式で示すようにカラーtrackingで得た船体の位置座標 x_n をフィードバックさせて、目標点の座標 x_T との偏差から n 番目のステップにおける入力値 $I p_n$ を与える。これを連続的に実行することで主流方向 x の推進用モーター及び横断方向 z のサイドスラスタを制御する。

$$e_n = x_T - x_n \quad (1)$$

$$I p_n = I p_{n-1} + \Delta I p_n \quad (2)$$

$$\Delta I p_n = K_p(e_n - e_{n-1}) + K_i e_n + K_d(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (3)$$

ここで K_p, K_i 及び K_d はそれぞれ比例、積分、微分のパラメータであり、今回はロボットの挙動を確認しながらこれらのパラメータを系統変化させて最適値を選定した⁴⁾。ラダーについてはコンパスセンサーにより読み取ったヨー角に比例させて1度単位で動作させ、機体の長軸が常に主流と平行になるよう姿勢制御を行う。

3. 校正試験

野外計測に先立ち、モーターへの入力値を表す I_p 値（PWM制御のduty比に対応）と対向流速の関係を表す校正式の導出を目的とした校正試験を室内水路において実施した。幅1.5mの可変勾配水路の左岸側に幅30cm、高さ20cmの塩ビブロックを3列敷き詰めた状態で行い、実流速はロボットの喫水深さのものを電磁流速計で計測した。主流速17~71cm/sの範囲で実験を行ったところ、低流速ではモーターの初動トルクの問題でばらつきが見られたものの、流速30cm/s以上では両者に線形関係が見られ、モーター入力値を I_p として以下の式に表される。

$$U = 0.0018I_p - 2.6401 \quad (4)$$

ただしduty比1600未満ではデータにばらつきが見られた。これには以下の2つの原因が考えられる。

1 つ目に、モーターの低回転域での不安定さが挙げられる。前章でも述べた通り、モーターにかかる電圧が小さい、すなわちduty比が小さい1440~1540の範囲（1500で中立、1500以上で正転、1500以下で逆転）では初動トルクが不足するため回転しない。さらにこの範囲を抜けてモーターが回転し始めてもある程度duty比が大きくなないと間欠的な回転動作となり安定しない。2 つ目に、姿勢制御の不安定さが挙げられる。ラダーによる姿勢制御ではスクリュウの推進力にラダーの効果が依存しており、流速が小さい範囲ではスクリュウの回転数が小さいためラダーがうまく働かず船体が左右にぶれてしまうケースが見られた。以上2点の要因によりデータのばらつきが生ずると考えられる。

1 つ目の解決策としては、モーターとスクリュウの間にギヤーボックスを挟むことが考えられる。ギヤーボックスは製作者の必要に応じてギヤの減速比を変えることができ、スクリュウに伝わる回転数を落とすことが出来る。これによりトルクを上げてから駆動力をスクリュウに伝えるようにすることで初動トルクによる低回転域での不安定さが除去できると考えられる。ただし機械的エネルギーロス（ギアの摩擦抵抗）が発生することも考慮する必要がある。2 つ目の解決策としてはラダー以外によるヨー角制御（姿勢制御）が挙げられる。例えばロボット後部にスクリュウを2 つ用いる構造（ダブルスクリュウ）にすれば、その回転差によって姿勢制御が可能になると考えられる。また船尾に推進方向と直角方向に推力を発するスラストを設置することも有効である。低速時にはスラストによってヨー制御を行い、一定

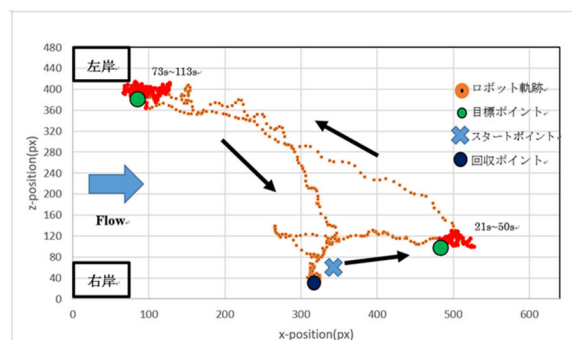


Fig.2 Example of two-dimensional navigation test
(horizontal-axis: streamwise coordinate, vertical-axis: spanwise coordinate)

の流速以上ではラダー制御に切り替えるのが現実的な制御法かもしれない。

今回はモーターの絶対的な回転数ではなく、モーターに与えるduty比を流速との校正に用いた。一般に、モーターに与える電圧を大きくすれば、モーターの回転数は上昇していく。しかしながら、この関係は常に成り立つ保証はなく、モーターへの負荷状況によっては、電圧と回転数が比例しない場合もあるかもしれない。校正に利用したduty比は、電源電圧の何パーセントをモーターへ送り込むかというパラメータである。本ロボットでは電源にラジコン電池を用いたが、ロボットを連続的に駆動させるにつれて電源電圧が減少する。したがって、duty比が同じでも電池が充電された直後の状態と長時間駆動した後の状態ではモーターへ配給される電圧が変わってしまう可能性が高い。そこで将来的にはモーターの絶対的な回転数を調べる必要がある。これにはロータリーエンコーダと呼ばれる回転数計測装置を用いることで解決することが出来るが、本ロボットで使用した防水製のモーターにロータリーエンコーダを取り付けることが非常に困難であった。より正確な対応関係を調べるためにはこの課題を解決し再度モーターの回転数と流速の関係を調べる必要がある。本稿はそこまで開発を進めることが出来なかったが、本ロボットで30cm/s程度から75cm/s程度の範囲で対向流速を評価できることがわかった。

4. 室内水路テスト

4.1 2次元航行試験

校正試験と同じ水路を用いて2次元挙動実験を行った。Fig.2に実験結果の一例を示す。縦軸および横軸はそれぞれ水路幅方向、主流方向である。いずれのケースにおいても画面外に出たり、流されて制御不能になるケースはなく、すべて良好な挙動を示すことが分かった。ただし今回のプログラムでは実行

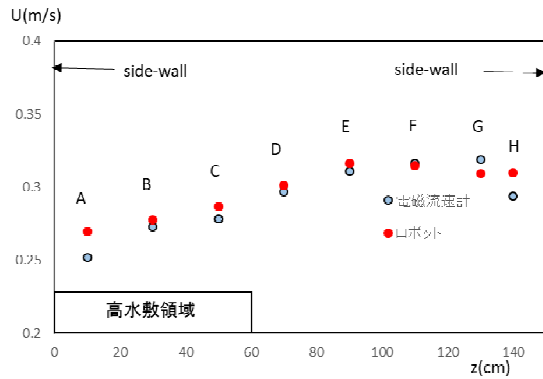


Fig.3 Velocity profile in the spanwise direction for compound open-channel; comparison between the present robot and electromagnetic velocitmetry

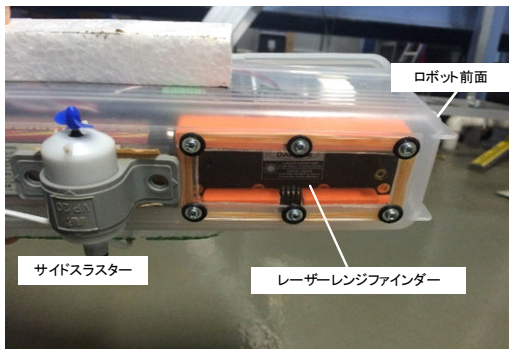


Fig.4 Laser range finder installed on the bottom panel of the robot

中に目標ポイントを指定し直す間にロボットの制御が行われなため、操作を迅速に行う必要がある。

4.2 複断面水路試験

実験水路内に塩ビブロックを敷き詰め人工的に横断方向に流速を変化させた、複断面流れにおける計測を行った。水面からブロック上面まで 12cm、水路底面まで 32cm であり、計測点は 15cm 間隔に 8 点をそれぞれ約 2 分ずつ計測した。Fig.3 に結果を示す。各点におけるロボットによる計測値と電磁流速計計測値は兩岸を除いてフィットした。兩岸はロボットの大きさが無視できず、壁面との相互作用で流れに影響が出たためと考えられる。ロボットの挙動は良好であり、すべて目標ポイント付近で静止した。横断方向に関しては中心から左右に 12cm (ロボットの横幅) の範囲内に 95% ほどの精度で静止することが分かったが、目標点よりも進行方向の右側に多く静止する傾向が見られた。これはモーターが左右対称でないことやモーター製造時の重心のずれ等が原因であると考えられる。

4.3 水深計測試験

流量の算定には、流速分布に加えて河床形状を計測する必要がある。本研究では流速分布評価とともに、LRF (Laser Range Finder) による河床高の計測も行った。Fig.4 に LRF による距離計測実験時における試作機の概観を示す。

レーザー光の挙動は空気中と水中で異なることはよく知られている。水面では反射や屈折が発生し、水中に入射後も水や混在する不純物等による吸収や分散によって著しく減衰してしまう。今回使用した LRF モジュールも空気中で用いられることを想定しており、水中で同じ性能を保つ可能性は低いため、水中用に補正する必要がある。そこで水中での挙動を検証するための実験を行った。Fig.4 に示すようにプラスチック製の大型容器に LRF を下向きに設置し、水深を 24.5cm から 2cm ずつ上昇させて計測を行った。本 LRF モジュールでは水中において実距離とレーザーの測定値の間に線形関係が見られ、その関係は以下の関数となった。

$$y = 1.33x - 15 \quad (5)$$

ここで x : レーザーによる測定値 (mm), y : 実距離 (mm) である。計測範囲に関しては、下限はこれよりも短い距離だとエラー値が増えうまく測定が出来なかった。ここで使用した容器では 45.5cm までしか計測することが出来ず、またこれ以上の水深を許容できる設備がなかったため、上限の計測が行えなかった。ただし、この関数に従えば、レーザーの計測値は 122cm が空気中での上限であるため、理論的には 145cm 程度まで計測可能だが、上述の通り吸収や分散を考慮すると測定上限は 100cm 程度であることが予想される。

上記の実験では、底面を確実に平らにするために鉄板に養生テープを丁寧に貼り付けて実験を行った。これは、鉄板のみで実験を行った場合に明らかなエラー値が検出されたためであるが、このように河床の材質によっては計測が困難な場合も考えられる。本論文ではレーザー距離計と対象材質の相性を確認するための十分な予備実験を実施していないが、今後実河川計測で想定される河床材質について詳しく検証する必要があると考えられる。次に、容器底面に珪砂を敷き詰めて実験したところ、上記と同様の結果が得られた。しかし、珪砂が水中に舞って濁った状態では計測でエラーの頻度が多く、正しく計測することが困難であった。このように水中に不純物がある場合は測定精度を保証することが出来ないことが分かったが、濁度が比較的小さい状況下では空気中と同程度の精度で検証できることがわかった。

4.4 静止精度の検証

流速と同じく、河川流量は川の状態を示す基本的かつ重要な指標となる。本研究のロボットは点計測を行っており、流量を評価するためには横断面の流速分布を知る必要がある。また流量計測の評価精度は目標計測ポイントにおける静止精度幅が小さいほどよい。そこでロボットが目標点でどの程度の範囲内で静止するかを把握するため、流速分布評価とあわせて縦断方向および横断方向の静止精度検証を行った。

本ロボットでは計測開始時からのサンプリング時間、計測時の2次元座標およびduty比が記録されるようプログラムされている。そこでduty比の平均を計算したサンプリング区間内のx座標およびy座標の値に対して目標値からのぶれの分布を解析した。Fig.3の右岸から2点目(B点)のデータに注目してみると、目標ポイントが $(x,y)=(270,390)$ であるのに対して静止座標の平均値は $(x,y)=(295,371)$ であった。また横断方向に注目すると、ロボットの静止位置からの偏差の精度はロボットの中心から $\pm 1/4$ ロボット幅の範囲で73.35%、 $\pm 1/2$ ロボット長の範囲で93.98%となっており、ロボット2個分の範囲で良好に静止していることが分かった。なお、水路幅1.5mが480ピクセルに換算されていることを利用しており、厳密にはピクセル数と実距離は対応していないがここでは1対1関係と考え1cmを3.2ピクセルとして計算した。さらに、ヒストグラムからわかるように中心からの偏差が左右で異なっており、ロボットの中心から左側に34.67%、右側に65.33%となっている。この傾向は各点でも同様に出ているが、これは横断方向への移動に用いているサイドスラスターが構造的に左右対称ではないことや製作過程で生じるわずかな重心のずれに起因すると考えられる。今後はこの非対称性も考慮したモーター値の入力を行う必要がある。縦断方向に関してはそれぞれの点で目標点のやや後方で静止していることがわかる。左岸から4点目では他の点に比べてやや縦断方向のブレが大きかった。これはこの点付近で水深が急激に変わっており、ロボットの左側と右側で流速差が大きいために変動が大きくなったと考えられる。詳細についてはSanjou & Nagasaka⁹⁾を参照されたい。

5. 野外河川テスト

京都市の天神川の狭幅区間(幅4m程度)で流速分布と河床形状の同時計測を行った。Fig.5のように、右岸にUSBカメラをカメラ三脚に取り付け、地面から約2mの高さから川の両端が画面に収まるように撮影した。トラッキングするオブジェクトは用意し



Fig.5 Field test in Tenjin River

た物の中で最もはっきりと認識できた青色ビニール布を使用した。なお計測点の両岸近傍では水際植生による航路妨害や流速の局所低下のため、この領域では安定した計測を行うことが出来なかった。まず流速分布の計測値をFig.6に示す。岸に近い箇所は流速が15cm/s程度しかなく、室内の低速流実験同様、流下方向に前後するような動きを示した。河道中央付近では良好な静止挙動をし、流速評価が行えたが、ロボットの計測値が電磁流速計による実測値よりも全体として小さい値になった。

河床形状についてLRFの計測値をエラー除去してその分布を評価した。

両岸近傍を除いて河道全域でロボットによる計測を行うことが出来たため、計測によって得られた流速分布と横断河床高データを用いて、簡易な流量推定を行った。流量 Q を算出するにあたり、鉛直方向の流速分布が必要になる。ここではべき乗則を適用して、ロボットで計測した水面流速から水深平均流速を算定した。

流量の推定に先立ち、河床形状の分割および分割区間内での平均化を行う。ここでは川幅を10分割し、それぞれの分割区間内で得られた距離の算術平均値から $\pm 3\sigma$ を除去し、区間内の水面からの距離とした。

ロボットによって計測を行った8点の流速のうち、右岸近くの2点が計測できなかったため、ロボット計測流速の一番右岸よりの値で外挿補間を行った。上述の水深データとあわせて流量を評価すると $Q=219\text{ l/s}$ となった。実用化には多くの課題があるが、このようなポータブルシステムによる全自動の河川流量観測は世界初の試みであり今後の展開が期待できる。

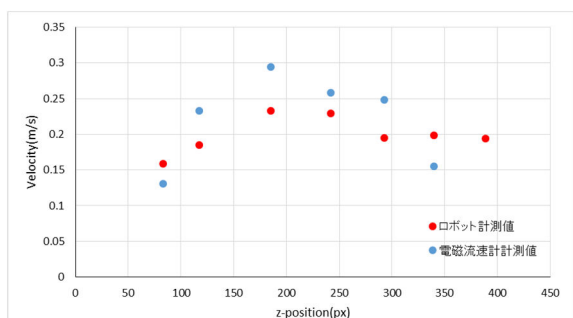


Fig.6 Velocity profile in the spanwise direction in Tenjin River

6. 結論と今後の課題

本研究では、室内実験用水路で自律制御ボートを用いて、船体が静止するときのモーターの回転数と流速が1対1の対応関係をもつ前提条件で校正曲線を導出した。しかし、実河川での運用を考えると課題が残る。例えば、実河川における風の影響があげられる。船体が風によって流線方向の力を受けると、モーターの推進力が流体力と釣り合わず、流体力と風による力の和と釣り合うことになり、校正曲線から得られる流速の値と実流速の間に差が生じてしまう。風の影響を防ぐために、風速センサーなどを用いて風による影響を補正する機能を搭載することや、風による影響がなくなるように船体を完全に水面下に沈めてしまうことなどが考えられる。本研究では、風の影響について考慮せず実験を行ったが、実河川での運用においては風に煽られてロボットの向きが変わってしまったり、強風によって下流側に押し流されるケースも見られたりしたため、風の影響を考慮した船体の設計、工夫が求められる。開発方法としては3Dプリンタによる船体の製作も視野にはいる。さらに、洪水河川での利用を想定すると、流木などの漂流物が船体に引っかかることにより、船体の受ける力が大きくなることが考えられる。本研究では漂流物の影響を考慮していないが、漂流物を捕捉しにくい船体の形状や漂流物を回避する制御プログラムについても検討する必要がある。また、本試作機が適用できるのは、30~80cm/s程度の流速場に

られており、流量が多い日などでは流速に対応できずに流されてしまう場合も見られた。船体の改良やツインスクリュー構造を採用する、あるいは高出力モーターを適用させることによって、より高速な流れにも対応させていく必要がある。

本研究により、流速とモーターの回転数が1対1に対応するという原理が流速の評価に適用できることが示された。しかし、上記の通り解決すべき課題が残されている。実用化に向けて、これら個々の課題について鋭意研究することが必要である。現状の課題をクリアし、新たなシステムを導入するなどして、より正確で簡便な自律流速測定機を実用化できるような工夫が必要である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、当時大学院修士課程学生長坂豪士氏および磯部駿佑氏には、ロボット制作や野外テストにおいて多大な協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 金子泰洸・ポール・山上路生 (2015) : 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, 京都大学防災研究所年報, 第 58 号B, pp.410-416.
- 山上路生・岡本隆明・金子泰洸・ポール (2016) : 自律制御ボート型ロボットの開発と河川流速計測 の試み, 計測自動制御学会論文集, Vol.52(12), pp.721-726.
- Astrom, K. J., & Hagglund, T. H. (2001): The future of PID control. Control Engineering Practice, Vol.9, pp.1163-1175.
- Reas, C. and Fry, B. (船田巧訳) (2011) : Processing をはじめよう, O'Reilly Japan, Inc.
- Sanjou, M. and Nagasaka, T. (2017): Development of autonomous boat-type robot for automated velocity measurement in straight natural river, Water Resources Research, AGU Publications, Vol.53, pp.9089-9105.

(論文受理日 : 2018年6月13日)