

第Ⅱ部門 河川流量観測を目的とする自律制御ボートロボットの開発研究

京都大学	学生員	○重田明日香
京都大学	正会員	山上路生
京都大学	学生員	磯部駿佑
京都大学	正会員	岡本隆明
京都大学	フェロー	戸田圭一

1. はじめに

堆積や浸食，さらには局所豪雨や融雪による水位上昇等の影響を常に受ける自然河川において適切な整備計画や治水事業を実施するためには，平水時ないし洪水時における流量観測は必要不可欠である．特に我が国のような川幅の狭い急勾配河川では短時間で水位や流量が増減するため，流量観測はリアルタイムで迅速に行われなければならない．

現在実河川において実用されている流速計測の既存手法は様々なものが開発されてきているがそれぞれ問題点も多い．本研究では，欠点を補完する新たな流速計測法の一つとして洪水時の流量観測を目的とした自律制御ロボットを開発した．

2. 自律制御ボートでの流速計測の原理

本研究での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．静止時に機体を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．

3. 制御システム

(1) ワンボードマイコン

本研究において開発したボートロボット（図-1）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ト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．

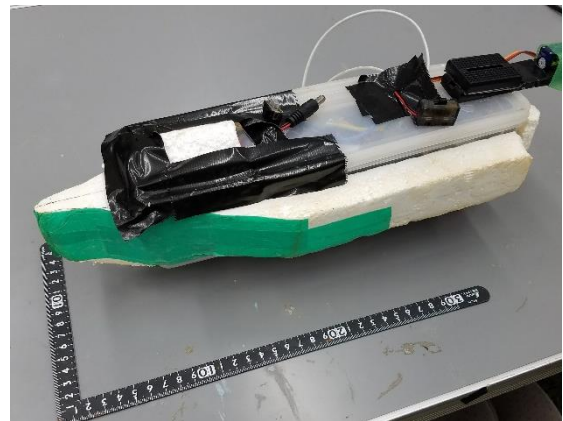


図-1 ロボットの試作機

(2) 画像処理

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．これは予め射影変換後の画像が長方形型になるよう設定し，河川を撮影した PC の画面上で計測したい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³⁾．

(3) カラートラッキング

本研究で位置情報の取得に用いたカラートラッキングでは，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．

(4) 制御アルゴリズム

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

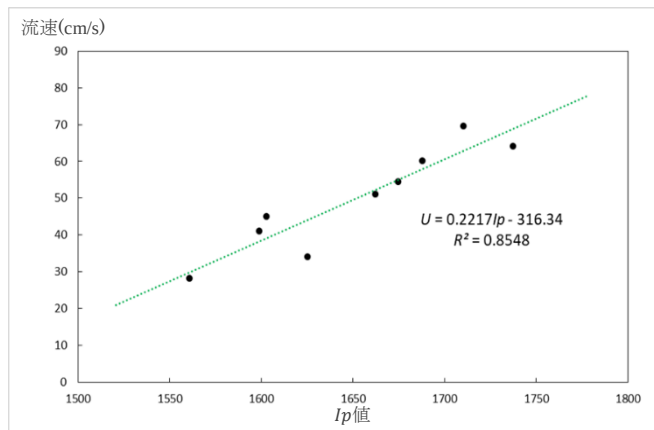


図-2 実流速とモーターへの入力値の関係を表す校正式

Differential Control)を用いた。以下の式で示すようにカラトラッキング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 Ip_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。

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

$$Ip_n = Ip_{n-1} + \Delta Ip_n \quad (2)$$

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

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 Sanjou&Nagasaka³⁾の研究を参考に系統変化させて最適値を選定した。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。

4. 校正試験

野外計測に先立ち, モーターへの入力値を表す Ip 値と対向流速 U と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。図-2及び式(4)に, 線形近似により得られた校正式を示す。決定係数は0.8548となり, Ip 値と流速は比例しているといえる。実河川での流速計測ではこの式を用いて, Ip 値から流速を逆算する。

$$U = Ip \times 0.2217 - 316.34 \quad (4)$$

5. 野外計測

今回は岐阜県各務原市川島にある自然共生研究セ

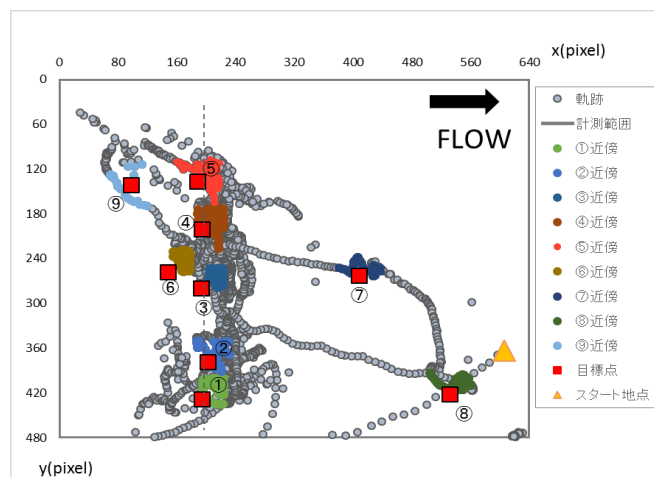


図-3 ロボットの軌跡 (実距離 6.4m×3.2m)

ンターに協力を得て幅3.2mの実験用河川での流速計測及び流量の試算を行い, 電磁流速計での計測結果との比較を行った。このときのロボットの自律移動の軌跡を図-3に示す。点①から⑤は一つの横断面上に設定した計測点を表し, 点⑥から⑨は挙動を確認するために設定した目標点を表す。

河川中央部の点③では電磁流速計により求めた流速分布と1/7乗則が良好にフィッティングした。よって流量は1/7乗則とロボットにより計測した表面流速を用いて計測点①から⑤での水深平均流速を求め, それらを代表流速とする5断面の台形近似により算出した。その結果, ロボットを用いた試算では292.97l/s, 電磁流速計では265.55l/sとなり, その誤差は10.33%となった。誤差の原因としては電源電圧の低下による流速値の過大評価等が考えられるが, 比較的精度の高い流量算出が可能であった。

6. おわりに

本研究で開発した自律制御ボートロボットを用いて野外河川の流量算出をある程度の精度で実施することが可能であることが確認できた。しかし, 風波や複雑な流れといった悪条件下においても正確な計測を行うためには, 今後の継続的な開発研究によって課題をひとつずつクリアする必要がある。

参考文献

- 1) 高橋隆雄:Arduino で電子工作をはじめよう, 秀和システム, 2013.
- 2) Casey Reas, Ben Fry 著, 船田巧訳:Processingをはじめよう, オーム社, 2011
- 3) Sanjou, M. and Nagasaka, T., "Development of autonomous boat-type robot for automated velocity measurement in straight natural river", *Water Resources Research*, AGU Publications, Vol.53, pp.9089-9105, 2017.