

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12854

研究課題名(和文)洪水河川の迅速な流況観測を実現する無人潜水艇ロボットの開発

研究課題名(英文)Development of autonomous robot for real-time observation of velocity / discharge in flood rivers

研究代表者

山上 路生(Sanjou, Michio)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80362458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：実河川の流況把握は、治水、環境、利水の全てにおいて重要な役割を担うが、現状は十分でない。様々な最新手法が提案されているがいずれも課題が残る。本研究ではロボットを用いた流速流量観測法を提案した。ロボットが指定まで自動航行しそこで静止する。静止に必要な推進力は対向流速に比例することから、スクリュウ回転数より、流速を評価する。研究前半では実験水路にて、校正作業と2次元航行特性を調べた。後半では実河川での野外テストに行った(WRRに掲載)。位置制御には岸边に設置したUSBカメラを用いた。特により広い範囲での自動計測を実現するために、PTZカメラ開発して20m幅河川での実施可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Although real-time observation is required to manage properly natural rivers, convenience and reliable methods are still not established. The present study suggested an epoch-making automated system to measure the river flow velocity. PID control could enable the boat-type robot to remain in position against the mainstream. This results in reasonable evaluation of the mean velocity by a rotation speed of the screw propeller. Reliable laboratory experiments with the prototype robot and electromagnetic velocimetry were conducted to obtain a calibration curve. We conducted not only in the laboratory flume but also in a natural river. The robot could move smoothly from the starting point near the operator's site toward the target point where the velocity is measured, and it could evaluate the cross-sectional discharge. Further, developing PTZ camera system, we indicated possibility of use in 20-m width river.

研究分野：水理水工学

キーワード：自動流速計測 自律制御ロボット 自然河川

1. 研究開始当初の背景

自動航行するボートロボットを用いた流速計測法のアイデアは非常にシンプルである。図-1に運用イメージを示す。ロボットは観測者のいる川岸から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。後述するように、静止時に機体が受ける抗力とスクリューの推進力がバランスするためスクリュー回転数は対向流速に比例する。別途、回転数と流速の関係式（校正式）を室内試験で算出していれば、スクリューの回転数から実河川の流速を逆算できる。

本研究では、この原理を具現化するために試作機を開発し、実験水路および実河川にて性能検証を行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、安全かつ迅速に洪水河川流速を計測する潜水艇ロボットの開発で、リアルタイム洪水流量データのスピーディな取得・伝達の点から洪水対策に貢献するものである。現状の浮子による洪水流速計測は精度や機動性に問題があり、また流速計を使用する際も橋梁や流れ中に固定台を設置する大掛かりで危険な作業が要求される。申請者はかつて実河川の乱流計測を実施した際、その手間や危険性を実感し思案を重ね、流れに対して静止する無人ボートの推進スクリュー回転数より主流速を計測する新しいアイデアを思いついた。実際にマイコン基盤を用いたボート型の試作機を開発して水路試験と野外河川におけるテストを実施した。

3. 研究の方法

H28年度は基本システムの開発・改良をベースとして、室内水路試験をメインに実施した。H29年度は野外での使用を念頭に実河川におけるテストを繰り返した。本システムは自律制御ロボットのリアルタイム位置座標を画像センシングによって実現するもので、計測サイトにUSBカメラを設置するセットしロボットのスタート位置と目標計測位置を一画面に収まるように調整する。カラートラッキングを利用するため、背景とコントラストが大きくなる色の目印を船体上部に取り付ける。単一カメラを河岸から使用する際、斜め上方から見下ろす形で撮影することになる。矩形領域の四隅を基準点として射影変換し、変換画像上でポジショニングおよびヨー角検出を行った。

本研究では複数タイプのロボットを試作した。一つのタイプでは帯状発光体（LED）を主軸に沿って配置して位置だけでなく船

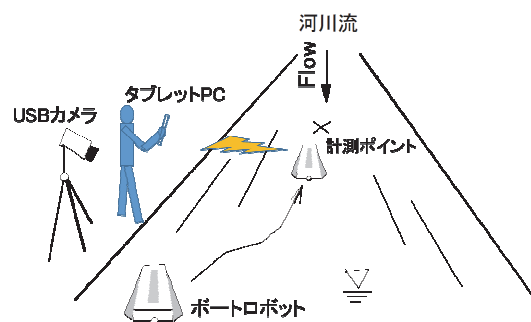


図-1 本システムの運用イメージ

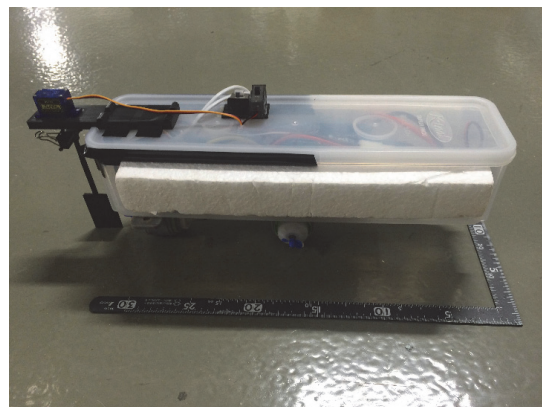


図-2 試作機外観

体の向き（ヨー角）もカメラ画像で検出することができた。船体が流線に常に平行になる様にラダーを制御した。別のタイプではコンパスセンサーによりヨー制御した。室内水路では既知流速とロボットの推進スクリュー回転速度の関係（校正ライン）の算出と、2次元移動特性をテストした。さらに岐阜県の自然共生センターの実験河川（幅 3m 程度の小河川）および桂川の狭窄部（幅 20m 程度）において野外テストした。実験水路と同様にロボットを横断方向に移動させて計測した、同時に電磁流速計によっても流速を実測し、ロボット法の精度検証を行った。特にこれを空間方向に積分すれば流量が評価でき、電磁流速計による計測値を用いて精度検証を行った。

4. 研究成果

4.1 試作機概要

本研究で開発したボートロボットの試作機の写真を図-2に示す。全長 30cm 程度、重さ 1kg 程度とコンパクトなサイズである。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ーにより二次元移動を行い、ラダー（舵）によって自律的に姿勢制御する。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⁾及びオーブ

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。またロボットの位置特定（ポジショニング）には WEB カメラによるカラートラッキング法を用いた。さらに計測点におけるロボットの静止制御には PID 法を用いた。

4. 2 基本原理

本研究で開発したロボットの流速計測原理を以下で説明する。一般的に機体にかかる抗力の大きさは機体の代表面積 S に比例し、以下の式(1)で表される。

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

ここで D : 抗力, ρ : 流体の密度, U : 機体と流体の相対速度, S : 機体の代表面積, C_D : 機体の抗力係数である。代表面積 S には、流線に垂直な平面への機体の投影面積を用いる。機体後部での剥離渦を考慮すると、抗力の最小化のためには、機体形状には角を極力少なくした流線方向に長いものが適している。また、ロボットには機体の後方下部と中央下部にそれぞれスクリューを取り付け、モーターで回転させる。推進力は機体後方下部のモーター（以下、推進用モーター）が回転することで生み出しており、機体中央下部のモーター（以下、サイドモーター）は主流と垂直方向の位置調整のため回転する。これらを用いて、機体が地上に固定された座標系に対して相対的に目標地点で静止するように、スクリューの回転数を自動制御する。機体が地上座標に対してちょうど相対静止した時、機体を受ける抗力とスクリューの推進力が釣り合っていることとなる。このとき機体と流体の相対速度（対向流速）は、一樣流の主流方向流速 U と等しくなるので、抗力 D とスクリューの推進力 F の関係は次式の通りになる。

$$F_0 = D_0 = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_D \quad (2)$$

ここで F_0 : 機体が相対静止した時のスクリューの推進力, D_0 : 機体が相対静止した時の流体から受ける抗力, ρ : 流体の密度, U : 主流方向流速, S : 機体の代表面積, C_D : 機体の抗力係数である。また、一般的にスクリューによる推進力 F は次式のように表され

る。

$$F = \rho K_t n^2 R^4 \quad (3)$$

ここで K_t : 推力係数, R : スクリューの直径である。ここで F_0 と F が等しければ、式(2)と式(3)より、式(4)のように主流方向流速 U はスクリューの回転数 n の一次関数となる。したがってスクリューの回転数 n を求めれば、以下の式にしたがって主流方向流速 U を逆算することができるはずである。

$$U = n \left[\frac{2K_t R^4}{S C_D} \right]^{1/2} = f(n) \quad (4)$$

また、ロボットにはスクリュー後方にラダー（舵）とコンパスセンサ等による自動姿勢制御システムを搭載し、機体長軸方向と流線が一致した状態で相対静止できるように機体の向きをコントロールするものとする。

以上より本研究で用いる流速計測原理は、ロボットが地上座標に対し相対静止しているときのモーターの回転数とその位置での主流方向流速値に比例することを利用するもので、とてもシンプルなものである。本研究の開発においては、回転数と流速の関係式を求めることが重要であるが、今回は実際のスクリューの回転数ではなく、モーターへの入力値（デューティ比）が回転数と比例するという仮定の下でモーターへの入力値 I_p の関数 $g(I_p)$ を用いて、

$$U = f(n) = g(I_p) \quad (5)$$

とする。なお I_p 値は無次元で 1500 の時、モーター回転数はゼロである。この式からモーターの性能が適切に発揮されている状態でのモーター入力値は推進力と線形関係をなすと考えられる。実際に、本研究に関連して開発されたこれまでの試作ボートロボットでもモーターへの入力値と流速に線形的相关があることは実験的に確認されており、本研究においても後に述べるようにある程度の範囲で同様に線形関係が確認された。本研究ではこの線形関係の関係式を、流速評価式として用いている。

関係式を導出する校正試験の手順は次の通りである。主流方向流速が既知の室内の実験水路でロボットを運転させ、目標地点を設定したあと主流に対して相対静止するように自動制御する。この時のモーターへの入力値 I_p と流速 U と記録する。以上の作業を流速

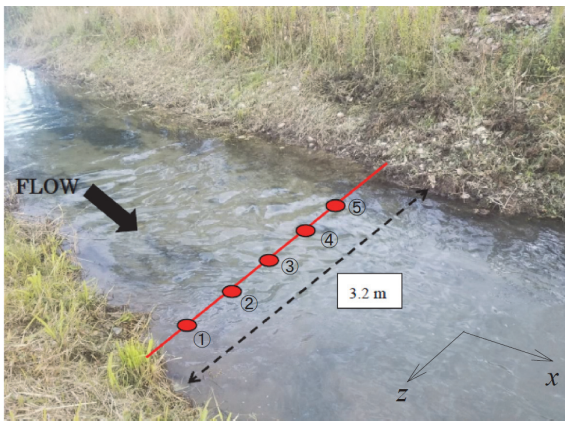


図-3 流量計測テストを実施した自然共生研究センターの実験河川

U を変化させて行い、モーターへの入力値 I_p と流速 U を軸にとりグラフを作成すると、両者の関係を表す校正式 $U = g(I_p)$ が得られる。校正式を導出すれば、以降の室内水路および実河川での試験についてはこれらを参照することでモーターへの入力値を用いて流速を逆算評価することが可能となる。本試作機については、京都大学乱流水理実験室の1.5m幅水路において、水深を系統変化されて次式の校正式を得た。

$$U(\text{cm/s}) = I_p \times 0.2217 - 316.34 \quad (6)$$

決定係数は 0.8548 となり、 I_p 値と流速はおおむね比例する。実河川での流速計測ではこの式を用いて、 I_p 値から対向流速を逆算する。

4. 3 フィールド試験

(1) 観測サイトと実施条件

本節では、自然共生研究センターの実験用人工河川において実施した計測精度検証について説明する。C 河川とよばれる人工河川の直線部を観測対象とした。観測当日(2017年11月23日)の水温は14.0℃であり、流速は30cm/s程度と比較的穏やかな条件であったため、推進モーターは小型のRS260を用いた。WEBカメラは川岸に設置した。図-3に自然共生研究センター人工河川の写真を示す。計測ポイントにおける川幅は3.2mであった。点①から点⑤の計測点を図中では

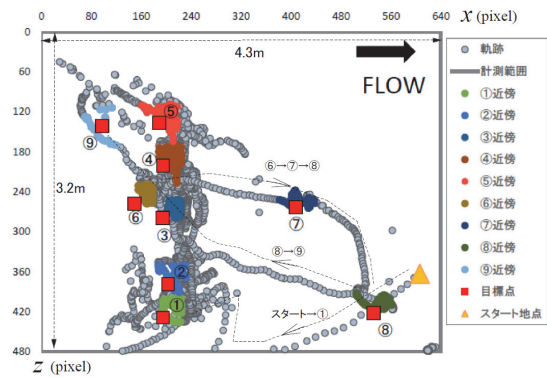


図-4 ロボットの平面2次元軌跡

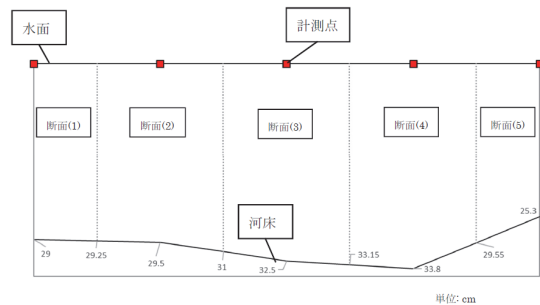


図-5 分割断面と河床形状(数値は局所水深, 単位 cm)

赤い丸で示している。

この5点では比較検証のために電磁流速計による計測も行った。水路に脚立を入れて、プローブを水深方向に移動できるようにした。流速の横断分布を積算して流量の真値を求めるため、各点について、水深方向にトラバースして水面近傍、半水深、河床近傍の3点を計測した。さらに河川中央部の1点(点③)については水深方向の流速分布を考察するために、水深方向の9か所にて計測データを得た。各点40秒間計測したデータの時間平均値を実流速データとして採用した。

(2) ロボットの2次元挙動

図-4にロボットの軌跡を示す。点①から点⑨は目標点を示しており、うち点①から点⑤が上述の電磁流速計による計測点である。点⑥から点⑨は二次元移動の確認のために付加的に設定した。スタート地点(△)から①, ②, ③・・・と番号順に目標地点へ移動・静止を繰り返すテストを行った。①~⑤においては静止に必要な I_p 値より表面流速を算出し、流量評価に用いた。各目標地点では静止した後、次の地点に移動する様子が理解できる。

表-1 分割断面情報と計測主流速の比較

計測点	計測した I_p 値 (cm/s)	校正水深平均流速 (cm/s)	水深平均実流速 (cm/s)	各断面面積 (cm ²)	各断面流量 (電磁流速計) (cm ³ /s)	各断面流量 (ロボット) (cm ³ /s)
①	1568.1	27.4	21.96	1160.27	25.48	31.79
②	1571.69	28.09	31.33	2375.31	74.42	66.72
③	1608.88	35.31	31.33	2572.51	80.6	90.83
④	1576.79	29.08	26.8	2595.41	69.56	75.46
⑤	1559.81	25.79	14.18	1092.54	15.49	28.17
電磁流速計によって算出された流量 (ℓ/s)					265.55	
ロボットによって算出された流量 (ℓ/s)					292.97	
誤差 (%)					10.33	

(3) 計測結果の検証

電磁流速計で実測した流速分布と 1/7 乗則はよく一致した。したがって、1/7 乗則を通じて、ロボットで計測した表面流速から水深平均流速を算定する。この水深平均流速を分割区間の代表流速として分割区間の面積を乗じることで分割区間流量を算出する。図-5 分割断面と長尺で実測した河床高のデータである。この分割区間流量の総和を全幅流量とした。分割区間断面面積は各断面を台形近似することで求めた。今回は分割区間の数を 5 とした。

また表-1 に各計測点の I_p 値、校正後流速、各分割区間の断面面積と算出された流量を示す。本ロボットで算出された流量は 292.97 (ℓ/s) となった。電磁流速計を用いて算出した流量は 265.55 (ℓ/s) であり、誤差は 10.33% となった。この誤差の主な原因としては I_p 値が電磁流速計によるものよりも全体的に大きくなってしまった点にある。これは自然共生研究センターの実験用人工河川では計測を 20 分以上行ったことで電池が大きく消費され、推進用モーターにかかる電圧が低下してしまっただけであると考えられる。

(4) PTZ カメラの試験導入

中規模スケールの河川でのテストを行った。対象サイトは桂川で中州によって分岐した片側の河道である (図-6)。ここは川幅が 20m 程度で、固定カメラ法では全川幅領域をカバーできない。そこでパン・チルト・ズーム (PTZ) 機構を組み込んだカメラシステムによる位置制御を試みた。ただし、今回はズーム機構はつけておらず、パン・チルトのみの制御である。水面からカメラまでの高さ、およびパン・チルトの各首振り角度が既知の場合、ロボットの平面 2 次元座標が計算できる。この試験ではこの方法によってロボット

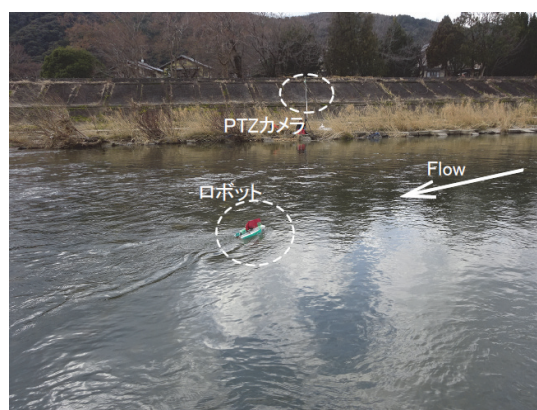


図-6 桂川における PTZ システムのテスト

のポジショニングを行い、数十 m オーダー幅の中規模河川への適用を検証した。ズームを組み込んでいないため、カメラとロボットの距離が大きい場合、精度が低下するが、自律航行および静止は制御できた。今後精度向上のため研究を継続する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

*本課題に関係するもののみ

1) 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.

2) Okamoto, T., Kashihara, Y. and Sanjou, M.: Experimental study on drag force and pitching moment stability of drifting object, Proc. of International Symposium on Engineering and Applied Science, Osaka, pp.123-132, 2017.

[学会発表] (計 2 件)

*本課題に関係するもののみ

1) 講演者: 山上路生, Recent works of hydraulics laboratory in Kyoto University YTU-MES-JSCE joint seminar 2017, Yangon, 2017 年 10 月

2) 講演者: 山上路生, Experimental study on drag force and pitching moment stability of drifting object International Symposium on Engineering and Applied Science, Osaka, 2017 年 8 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山上 路生 (SANJOU Michio)
 京都大学・工学研究科・准教授
 研究者番号: 80362458