

河川砂防技術研究開発

【成果概要】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属	役 職					
		山上 路生（さんじょう みちお）	京都大学工学研究科	准教授					
②技術研究 開発テーマ	名称	ボート型自律制御ロボットによるポータブル流量観測システムの開発							
③研究経費（単位：万円）		平成29年度	平成30年度	令和1年度	総 合 計				
※端数切り捨て。		108万円	108万円	110万円	326万円				
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）									
氏 名		所属機関・役職（※平成 年3月31日現在）							
岡本隆明		京都大学工学研究科・助教							
⑤研究の目的・目標（様式地河-1、地河-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）									
河川流況の正確な把握と速やかな情報伝達は、各種水工構造物の管理やゲート操作において重要な役割を担う。一方、流況の定量計測は困難でその対策は急務である。河川における流速観測は浮子流下の目測が主流であるが、精度や信頼性は観測員の技能や経験に依存するなどの課題がある。 従来の観測法を根本的に見直し、無人ボートを自律制御して流れの中で静止させたときの推進駆動力より流速を計測する新しい方法を提案する。本研究では位置センサ、制御モータ群をマイコン制御するロボット艇を開発し、実河川における無人自動の流況観測の実現を目的とする。このような装置は国内外を通じてなく新規性は高い。 これまでに試作機を作成し室内水路や小規模河川での流速計測については実証済である。本課題ではこれを 10m オーダー幅のサイトでの実用化を念頭に改良・開発を行う。1 年目は定期的な動作テストを淀川・桂川を中心とする実河川域において行う、2 年目以降、流量データと比較検討する。電磁流速計や ADCP による局所計測も併せて行い、ロボットの流速計測や河床分布値の精度検証を鋭意遂行する。途中成果も含めて学会講演会や学術論文集にて発表する。 本装置は既存設備では計測が困難なセクションにおける流量観測値が得られる大きな特長があり、将来の河川管理に貢献できると期待される。特にシステム一式はコンパクトであるため、緊急時における機動性も高い。本課題終了後、当面はシステム性能テストも兼ねて平水時における複数の場所における流量および河床観測に従事して、河川管理に必要なデータベースを提供する。									

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

以下に令和元年度の研究成果について記述する。 1. はじめに 2. 機器構成と計測原理 3. 流向検出システム, 4. 性能試験。

1. はじめに

河川の流況観測・流速計測は、災害対策の情報として非常に重要であるが、技術的に多くの課題が残されている。特に増水時の有人観測は非常に危険である。

これまで主流の浮子法を含めて複数の方法が提案、開発されてきた。これらは大きく接触型と非接触型に分類できる。接触型は実際に河川内にプロペラ流速計や電磁流速計などの計測機器を投入することで流速を計測し、非接触型は橋梁などの外部施設や河岸などに画像センサー（ビデオカメラ）²⁾や電波や超音波式の計測機器³⁾を設置することで流速を評価するものである。

一方で著者らは既存の方法とは異なる、自動航行するボートロボットを用いた流速計測法について研究を続けている。このアイデアは非常にシンプルである。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、スクリュウ推進力の調整によって静止する。後述するように、静止時に機体が受ける抗力とスクリュウの推進力がバランスするためスクリュウ回転数は対向流速に比例する。先に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、スクリュウの回転数から実河川の流速を逆算できる。本システムはコンパクトで携行性に優れていることから、モニタリングカメラや水理観測機器が整備されていない中小河川における運用が期待される。

著者らはこれまで、実験水路における性能を検証してきたが、野外フィールドでの適用は限定的であった。そこで本研究では、このシステムの実河川における適用性に焦点を充てる。特に既存の流速計（電磁流速計）による実測とライブカメラによる STIV のデータ取得も行い、これらの結果と比較することで流速観測の精度を検証する。

2. 機器構成と計測原理

2. 1 機器構成

昨年度までの試作機をバージョンアップさせ、高流速域における計測を行う目的で製作した試作機は、市販のラジコンボートを改造した。全長 70.2cm, 横幅 19.8cm, 高さ 14.5cm, 静水時の吃水 4.2cm, 重さ 1892g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-R3 及びオープンソースソフトの Processing を用いた。Arduino にプログラムを書き込み各種センサー及びモーターと接続した。さらに XBee の親子機ペア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 USB カメラによるカラートラッキング法を用いた。カメラは固定点から河川水面を斜めに見下ろすため、画像に歪みが生じる。そこで射影変換後の画像を用いてロボット位置をトラッキングした。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。

2. 2 計測原理

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形状や涙目形状が適している。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、モーター駆動させる。推進力は機体後方下部のモーター（以下、推進用モーター）の回転により得られ、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移動の際に駆動する。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。

機体を受ける抗力とスクリューの推進力が釣り合う時に、機体が地上座標に対して相対静止する。このとき機体と流体の相対速度（対向流速）は、一様流の主流方向流速 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。

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

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 : 対向流速, 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。

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

ここで K_t : 推力係数, R_s : 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(1)と式(2)より、式(4)のように対向流速 U はスクリューの回転数 n の一次関数 $f(n)$ 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。

$$U = n \left[\frac{2K_t R_s^4}{S C_D} \right]^{1/2} = f(n) \quad (3)$$

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。

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するときのモーターの回転数が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ある。本システムを用いる際には、校正水路において回転数と流速の関係式を求めておく必要がある。ここで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、

$$U = f(n) = g(I_p) \quad (4)$$

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となる。また n と I_p には対応関係があることがわかっていることから⁴⁾モーター入力値 I_p は対向流速 U と対応関係をもつと考えられる。本研究ではこの関係式を、流速評価式として用いる。

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水路センターライン上の目標点まで自動航行させ、そこで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 U を変化させて繰り返し行い、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 幅水路で、流速を 0.28~0.80m/s に系統変化させて校正式を得た。

$$U(\text{cm/s}) = 0.4602 \times I_p - 691.20 \quad (5)$$

I_p 値と流速はおおむね比例する。試作機の形状デザインやモーター出力に依存するが、実河川での流速計測ではこの校正式を用いて、 I_p 値から対向流速を逆算する。

3. PTZシステムの開発

ロボット制御における 4 段階の状態が設定されており、状態によって目標点への移動や静止等のような制御を行うか場合分けしている。まず状態 1 では現在位置での静止を行い、一定時間経過後に状態 2 に遷移する。状態 2 では状態 1 における推進力を増加させて目標点への高速移動するような制御がなされる。そして状態 3 では目標点において静止するような PID 制御がなされ、状態 1 及び状態 2 で目標点に接近し、目標点近傍として設定した範囲内にロボットの現在位置が入った場合に状態 3 へと移行するようになっている。そして流向検知は、移動・静止を制御するこれらの状態に 4 つ目として追加した状態 0 で行うものである。このときの検知原理は、メインモーター及び試作機 I ではサイドスラスターの出力もいずれも 1500 にして回転を停止させ、ラダーも初期値の 90 度にしてロボットを一定時間自由流下させて、その間のロボットの軌道より流向を求めるというものである。カラートラッキング方式では画像からこの軌道を求め、主流方向とする。そしてロボットは検知した流向から新たな x - z 座標を設定し、前述の状態 1 へと移って目標点に対する PID 制御を行うというプロセスである。ロボットによる計測は状態 0 でスタートするよう設定されており、また Processing 上で強制的に状態 0 になるようなコマンドも設定しているため、計測途中で流向が変化した場合にも適切な流向検知が可能である。またロボット制御が自動で状態 0 に遷移するのは、計測スタート直後、状態 1 でロボットが静止しないまま一定時間経過した場合、状態 2 でロボット位置が一定時間変化しない場合、状態 3 でロボットが目標点から大きく外れた場合のいずれかである。状態 0 で自動流下する時間の長さは Arduino のプログラムで変更することができるが、今回は高流速域においては短く、低流速域においては長くなるように、計測領域に応じて都度適切な値を設定するようにした。

自由流下時の画像上の軌跡から流向を求める流向検知システムについて、妥当性を検証するため試作機を用いて挙動テストを行った。この試験は前述の可変勾配型循環水路を用いて行い、位置情報の取得にカラートラッキング方式を採用した。水路の 1.8m 上方に USB カメラをレンズが直下を向くように水平方向に傾けて設置することで、PC 画面上で見かけの斜め流を再現し、水路およびロボットを撮影してリリース地点の上流に目標点を設定しロボットを自律移動させる。この手順に沿って 1) 従来同様に自動流下による流向検知システムがないプログラムと、2) 自動流下による流向検知システムを実装したプログラムの 2 ケースで対照試験を行い、その効果を確認した。自動検知がないと、流れに平行に静止することが難しい。

4. 野外観測テスト

最終年度も昨年と同様に亀岡流量観測所の計測ポイントでテスト開発を行った。実河川は室内水路と異なり河床形状や上下流域の影響を受け、流れが必ずしも一様であるとは限らない。さらに、計測ポイントをわずかに移動させるだけで異なった特徴を持つ流れ場が多数存在する場合もある。桂川における試作機の計測では、中流速域と高流速域の 2 つの流域において計測範囲を設定した。ここでは、中流域における姿勢制御システムの検証試験について述べる。計測範囲は川幅約 20m 地点の右岸側に設定しており、横断方向 3.8m、主流方向 5.1m である。木津川や淀川でも同様のテストを行ったが、特に亀岡地区でのテストでは、流速が 1.5m/s 程度の比較的速い流れ場でのテストも行い、静止させて対向流速の観測に成功した。

⑦研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・これまでに発表した代表的な論文
- ・著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)
- ・国際会議、学会等における発表状況
- ・主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・研究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・企業とのタイアップ状況
- ・特許など、知的財産権の取得状況
- ・技術研究開発成果による受賞、表彰等

(国際会議、学会等における発表状況)

平成31年度土木学会関西支部年次学術講演会(H31.5)にて口頭発表

(学術誌への掲載論文)

Sanjou, M. and Nagasaka, T.: Development of autonomous boat-type robot for automated velocity measurement in straight natural river, Water Resources Research, 53(11), AGU Publications, Vol.53, <https://doi.org/10.1002/2017WR020672>, pp.9089-9105, 2017.

山上ら: 自動水文観測を実現するロボット流速・流量計の研究 ―中小直線河道における実証試験―, 自然災害科学 Vol. 38, 2019

山上: *****, バイオクリニカ

(特許など、知的財産権の取得状況)

自律制御ボート式流速計測システムおよびプログラム(特開2016-102785)

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

1) 京都大学知財管理室(関西TLO)HPにて最新情報を随時アップしている.

<http://www.kansai-tlo.co.jp/contents/patent/patent.php?patent=8>

2) 産学連携イベント・京都大学インダストリアルデイ2018にて口頭発表し、電子機器メーカー等と交流をはかった.

<https://www.kansai-tlo.co.jp/event/201807261134.html>

⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

2018年度 計測自動制御学会 関西支部長賞(技術賞) 受賞(2019.1.21)

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

いくつかの課題があるが、これらを一つずつ解決する度に実用性能が向上する。

1. 現在のシステムでは流向検知ができず、直線部のみ使用可能。流向検知機能(自由流下方式、流向センサ)を組み込んで湾曲部や流向不明の水域でも適用できる様改良をはかる。

2. 風の影響。特に横風を受ける場合、姿勢が不安定になる。向かい風や追い風の場合には室内水路で得た校正ラインがそのまま使えなくなる。この影響を最小限にすべく、船体は半潜水型にすることを検討している。

3. 低水時の場合、ロボットの特性上、ラダーの応答が悪く、補助スラスターの導入も検討する。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本ロボットシステムは、その取り回し性に優れており、特に中小河川での低水時の流量算定に現状モデルでも適用可能であることが示された。

流速・流量観測のみならず、各種スカラー量(水温、水質、土砂濃度、河床形状等)の自動観測が可能となりつつあり、これまで安全面や作業量の問題より計測が困難であった河川のリアルタイム情報の効率的な取得が期待される。

現状では流向を自動検知できないため、湖沼やワンドなどの低速循環域での適用は難しいが、次年度以降で流向検知装置の開発を進める。

淀川河川事務所管轄の桂川・亀岡流量観測所付近でもテストを実施した。また淀川、木津川でもテストを行い、特に木津川では淀川河川事務所管轄のライブカメラによるSTIVとの比較を行った。