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

PROTOTYPE DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS-MOBILE FLOATING-ROBOT FOR AUTOMATIC VELOCITY MEASUREMENT IN NATURAL RIVERS

山上路生¹・金子泰洸ポール²・戸田圭一³
Michio SANJOU, Taikou-Paul KANEKO and Keichi TODA

¹正会員 博(工) 京都大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²学生会員 京都大学修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³正会員 Ph.D 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

It is of special importance to measure mean velocity and discharge in natural rivers for preventing flood disasters. This study developed autonomous-mobile floating-robot for the purpose of automatic measurement of mean velocity in an open-channel flow. A PID control method could keep the position of the floating-robot against main stream, and then mean velocity could be evaluated reasonably by a rotational speed of screw propeller. Accurate laboratory experiments using LDA provide the calibration curve that connects the propeller speed and mean current velocity. Furthermore, it was recognized that our robot can move successfully in the horizontal plane from the start point to the target one.

Key Words : *automatic velocity measurement, autonomous mobile robot, PID control and open-channel*

1. はじめに

河川の流量観測とそのデータベース構築は、適切な河川整備計画や治水事業を進めるにあたって必要不可欠である。また河川洪水時には正確なダム操作が求められるため、流況のリアルタイム観測は極めて重要である。実河川における流速観測は浮子法が最も主流であるが、浮子が必ずしも主流に追随しないことや、目視のために計測の主観性が排除できないという課題がある。このような背景から、様々な方法が提案され実用化に向けて鋭意研究されている。今日注目されている手法として曳航式浮体に取り付けた計測装置によるものがあげられる^{2,3)}。これはADCPを用いるもので水深方向の流速プロファイルを得ることができるため、流量の正確な評価が期待できる。さらに最近では土砂濃度の同時計測手法も開発されている⁴⁾。

またビデオカメラや赤外線カメラの画像情報より流速の瞬時情報を取得する方法も注目されている。藤田らはPIVを河川流へ適用したLSPIV⁵⁾やSTIV⁶⁾とよばれる高精度画像手法を開発している。さらに悪天候時や夜間でも映像情報の取得が可能な赤外線カメラを用いた方法は実用性においてはさらに有利である⁷⁾。これらの利点は平面の流速2次元データが得られることであり、流量観測に留まらず、ボイル渦に代表される河川の乱流渦の解明に大きく貢献することが期待され、学術面においても有

用である。電波流速計^{8,9)}は表面流を対象とするが、天候や時間帯に左右されず高速流が計測できるメリットがあり今後のさらなる普及が期待される。

しかしながら、これらの方法はいずれも長所だけでなく解決すべき課題も有しており、この短所を補完する新しい技術や手法の開発が求められる。例えば、曳航式ADCP法では係留のために観測ポイントが橋梁近くに限定される。画像手法では、計測精度が画質に大きく依存しデータ信頼性の確認には時間を要することや、目視できない暗渠部における観測が難しいことなどの課題がある。そこで著者は新しい計測手法として、自律移動を可能とする無人ボートを開発すれば、船体が流れに対して静止することで推進力から流速を評価できると考えた。

実用化には数年の開発期間を要するが、この発想の可能性を検証すべく、マイコン制御によって目標地点まで移動して静止状態を維持できる試作機を作成し、幅の異なる2種類の室内実験水路でテストした。機体にはサイドスラスト(スクリュウ)を取り付けて横方向移動も可能とした。3つのサーボモータによって、水流に対抗する推進、横推進および方向舵を独立にPID制御するアルゴリズムを開発し、室内実験程度の低レイノルズ数流れでは、目標地点で静止させることができた。またレーザ流速計(LDA)における校正より、主流速と推進用モータの回転速度の対応関係が得られ、本手法によって流速計測が原理的に可能であることを示した。

写真-1 浮体ロボット (RX01) 外観と構成パーツ

図-1 超音波センサ傾き時の補正

2. ボートロボットの機体駆動と姿勢制御

(1) パワートレインと機体

写真-1は試作機 (Type-RX01) の概観である。全長39cm, 全幅25cmである。制御系とシャーシはレゴ社製のマインドストームEV3のパーツによって組み上げた。EV3のインテリジェントブロックは各種センサ信号を入力し、モータへの命令信号を出力できることからロボット工学の研究教育現場において幅広く利用されている。

試作機には推進用モータにシャフトを介してスクリューを取り付けた。また横方向への移動を可能とするためにサイドスラスト (サイドスクリュー) を重心横断軸近くに付けた。ヨー角 (船体の向き) の制御には方向舵 (ラダー) を用い船尾に設置した。なお1°単位で動作するサーボモータにプラ板製のラダーを取り付けた。これらのモータにはレゴマインドストーム用のMモータ (定格トルク: 0.08Nm, 停動トルク: 0.12Nm) を用いた。推進機構には平ギアを組み合わせでスクリュー回転数を25倍 (サイドスラストは5倍) に増速させた。スクリューはいずれも外径25mmのプラスチック製である。

機体の平面位置情報をリアルタイムで取得するために後述の超音波センサ (レゴ社EV3専用センサ) を2つ (主流方向用, 横方向用) 取り付けた。また船体の方向を計測するためにコンパスセンサ (Hitech社) を取り付

図-2 ヨー角発生時の超音波センサ補正の検証

けた。フロート部分はヨー安定を期待して双胴型を採用した。280mlペットボトルを4本使い、2個ずつ前後に配置した。喫水は4.0cmである。

(2) 超音波センサ

安定かつ正確な自律制御を実現するには信頼性の高い位置情報の取得が必要である。本実験では水路に基準面となる平板を設置し、これに超音波を発信することでx方向の移動距離や絶対座標を得る。また同時に水路側壁への超音波発信によってz方向の位置情報を取得する。試作機に取り付けたレゴ社の超音波センサは最大250cmまでの距離計測が1mmの解像度で可能である。ここで問題となるのは機体にヨー角が生じた場合の処理である。基準板に対して超音波が斜め入射になるため次式による補正を行った。

$$S' = S \cos \theta$$

(1)

ここでSは実測距離値, S'は補正距離値, θ はヨー角である。この補正を検証するために図-1のように船体を鉛直方向の重心軸に回転させて実測距離と真値との関係を調べた。真値は20cm, 50cm, 80cmおよび140cmの4通り用意した。図-2に検証結果を示す。対象計測距離が小さい

図-3 モータ回転センサとスクリューの回転速度の対応関係

図-4 制御フロー

ほど S および S' と真値のずれは小さい。一方で対象距離が大きいと補正しても真値からのずれは無視できない。またこの傾向はヨー角が大きいほど顕著となる。ただし機体の静止時の最大瞬間ヨー角は $5\sim 10^\circ$ 程度でありこの範囲では式(1)の実用性は十分であると考え。

(3) 回転速度センサ

本計測システムでは静止時における推進スクリーウの回転速度から対向流速を評価する。EV3の専用Mモータには回転速度センサが組み込まれている。このセンサからは-100から100の範囲をもつ無次元量で信号が出力される。そこで空気中においてスクリーウ回転速度を系統変化させ光学式タコメータによって回転数を実測した。図-3に実測回転速度とセンサ出力値の関係を示す。線形関係が得られセンサ値は確かに回転速度を示している。なおモータを逆回転させればセンサ値は負となる。モータ回転数を指定するために、出力値と同様にパワー値と呼ばれる無次元量(-100~100)を与える。入力した値に対応した回転速度が得られるが、一般に伝達ロス等により最大値100を入力しても最大出力は得られない。本結果でも最大出力は75前後であり、水中ではさらに減少する。以下この入力無次元量を I_p 、回転速度センサによる出力無次元量を O_p とよぶ。

3. 制御アルゴリズム

(1) PID制御

PID制御 (Proportional/Integral/Derivative Control)¹⁰⁾は、目標値と出力値の偏差に対応させて入力値を決定する比例操作、出力値のオフセットを修正する積分操作および

外乱発生時に速やかに出力値を目標値に近づける微分操作からなる代表的なフィードバック制御である。本研究では静止させるためにモータをPID制御した。超音波センサによる時々刻々の静止目標地点からの距離 x_n をフィードバックさせて、 n 時刻における入力値 I_{p_n} を次のように与えた。

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

$$\Delta I_{p_n} = K_p(x_n - x_{n-1}) + K_i x_n + K_d\{(x_n - x_{n-1}) - (x_{n-1} - x_{n-2})\} \quad (3)$$

式(2)の右辺第1項は比例操作、第2項は積分操作、第3項は微分操作である。ここでは前時刻と現時刻の入力値の偏差を ΔI_{p_n} とした。 K_p 、 K_i および K_d はそれぞれの操作パラメータであり、さまざまな最適値の決定法があるが、ここでは系統変化させて選定した。

(2) 全体の制御フロー

主流方向および横断方向をそれぞれ x および z とする。これら2方向の運動をそれぞれ担う推進用スクリーウとサイドスラストおよびラダー角を独立制御する。図-4にスクリーウとスラストの制御フローを示す。

推進スクリーウについては、目標地点への移動の前に、まず現在地点においてPID制御によって静止させる。このとき、 $\Delta I_{p_n} < 0.1$ となるサンプル時刻が20以上続けば静止と判定し、この20サンプルの平均 $\bar{I}_p$ を求める。式(2)のフローに基づけば目標点で静止するはずであるが、数10cm程度下流側にずれるため、 $|x|$ の0.1倍値を $\bar{I}_p$ に加算あるいは減算させてスクリーウ回転速度を更新し、目標地点まで移動させる。 $|x| < 3\text{cm}$ となれば直ちに再びPID制御により静止させる。サイドスラストについてもほぼ同様の制御フローである。この仕組みでは何らかの外乱により一旦目標地点から離れてもすぐに戻ることができる。ラダーについてはコンパスセンサ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、機体主流と平行になるように姿勢制御する。

4. 室内水路テスト (40cm幅水路)

(1) 実験方法と水理条件

幅40cmおよび幅150cmの2種類の可変勾配水路にて試作機のテストを行った。制御パラメータの決定や流速とスクリーウ回転数の相関関係の検討には、レーザ流速計 (Dantec製2成分LDA) による主流速計測を行うため40cm幅水路を使用した。一方で野外計測では岸部に着水させた機体を目標計測点まで自動移動させるため、横断方向の比較的長い距離の航行が必要とある。5. で述べるようにこの平面2次元運動を150cm幅水路にてテストした。前述した様に超音波センサによる x - z 座標位

図-5 実験システム

置をリアルタイムに取得する必要がある。z方向のセンサは水路片側のガラス製内壁に超音波を反射させる。同様にx方向のセンサ用に反射板を図-5に示す通り水路横断軸に沿って設置した。

40cm幅水路の実験では設定流速を最小0.68cm/sから最大15.0cm/sまでの計14通りに変化させ、水深は8cmに固定した。なお機体を水路より除いた状態で上流端より7m地点の水面下1mmをLDAによって計測した。

(2) 主流方向の静止とPIDパラメータの調整

まず比例制御について検討する。 K_p を0.2, 0.5, 1.0および2.0の4通り選んだ。 K_i は0, K_d は0.1に固定した。40cm幅水路において基準板より120cm下流のセンターラインに流れに平行になるように機体をセットした。主流速が10.2cm/sのケースを対象とした。プログラム開始と同時に支えをはずしこの時刻を $t=0$ とする。図-6はこの後の反射板からの機体の距離 Δx とモータへの入力値 I_p の時系列変化をそれぞれの K_p について示す。

$K_p=2.0$ の場合は機体が流下方向に振動し定位置に静止しない。 $K_p=1.0$ では初期時間に振動があるものの収束する。 $K_p=0.1$ では変化が滑らかであり時定数も小さいが、30sまでの間、機体が流されることがわかる。このように K_p が過小であれば、支えをはずした直後にモータ加速がおいつかず機体が大きく流下してしまうため、今回は $K_p=0.5$ を採用した。

前述のとおり目標点からの静止位置のずれは積分制御で対処できそうであるが、これについては続報で詳細に検討し、今回は積分制御を考えない。微分制御パラメータ K_d については、0.0, 0.1, 0.5および1.0の4通り選択し同様の実験を行った。 $K_d=1.0$ では I_p に微小振動が含まれたが、他の3ケースではこのようなノイズはなく収束した。ここでは $K_d=0.1$ を採用した。

図-6 比例制御係数の検証

図-7 横断方向移動量の時系列変化

図-8 ヨーとラダー角の定義

図-9 ヨーとラダーの角度の関係

(3) 横断方向の静止特性

40cm幅水路の流速10.2cm/sのケースにて機体の横断方向挙動を図-7に示す。水路センターラインに静止する様を設定した。サイドスラストによって40秒後には変動がセンターラインから±1cm以内に収まっている。本水路にて実施した全てのケースにおいて同様の結果が得られており、横断軸方向の位置制御は良好であるといえる。

(4) ヨー制御

機体のヨー角とラダーの変位角の定義を図-8に示す。本システムではコンパスセンサでヨー角を検出し、変位に応じてラダーを動作させる。空気中で機体を鉛直重心軸周りに回転させてその時のラダー変位角を計測した。ラダー制御にもMモータを用いたがこれには変位角センサが内蔵されている。図-9はこれらの関係を示す。正負のヨー角変化に比例してラダーが制御されることがわかる。これにより機体は常に流軸方向を保持する。

(5) スクリュー回転速度による流速評価

スクリューの回転速度から水面の時間平均主流速を評価するためにLDAによる検定を行う。機体を取り除いた状態で40cm幅水路において等流状態を作り、超音波セ

図-10 校正曲線

ンサの反射板位置より100cm下流側のセンターラインにて流速計測を行った。機体が受ける抗力 F_D およびスクリューによる推進力 F_T はそれぞれ次のように表せる。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_D \quad (4)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \rho m^2 D^4 C_T \quad (5)$$

ここで ρ は水の密度、 U は流速、 A は機体の投影面積、 m はスクリューの回転速度(rpm)、 D はスクリュー羽の直径である。 C_D および C_T はそれぞれ抗力係数および推力係数である。静止時にこれらがバランスするとすれば、次のように対向流速はスクリュー回転速度に比例する。

$$U \propto \pi D m \quad (6)$$

図-10に実測した主流速 U および計測点にて機体を静止させたときのスクリュー回転速度に対応する $\overline{O_p}$ 値の関係を示す。ここで $\overline{O_p}$ は静止時に計測された O_p 値の平均である。 $U > 10 \text{ cm/s}$ では式(6)の線形関係が成立するがこれより低流速側では線形関係からのずれが認められる。また摩擦抵抗が圧力抵抗に対して相対的に大きくなるためと考えられる。低流速側も評価するために補正関数を導入して下記の校正式を提案する。図に示すように実測値に良好にフィットすることがわかる。

$$U(\text{cm/s}) = \overline{O_p} e^{-0.5\{1-\overline{O_p}/10\}} \quad (\overline{O_p} < 10) \quad (7)$$

$$U(\text{cm/s}) = \overline{O_p} \quad (\overline{O_p} \geq 10) \quad (8)$$

5. 平面2次元運動テスト (150cm幅水路)

野外計測を想定すれば、機体のリリース地点は岸部である。河川中央部など手が届かない場所を計測するためには、目標地点まで正確に自動航行させる必要がある。そこで幅150cm水路を用いて機体の平面2次元運動テストを行った(写真-2)。水理条件は水深10cm、断面平均流速10cm/sの1ケースとした。

写真-2 150cm幅水路における実験の様子

図-11 平面運動の軌跡

リリースおよびターゲット座標（単位cm）はそれぞれ、 $(x, z)=(162, 42)$ および $(60, 80)$ とした。図-11はリリース時刻から175秒間の機体位置を0.5秒ごとに時系列に示したものである。計測終了直前の15秒間については●印でマークした。なおターゲット地点における電磁流速計（ケネックVP3000）および本機による実測流速は各々11.9cm/sおよび11.6cm/sで、誤差2.5%であった。 x 運動に注目すると $t=15$ 秒まで上流側へ移動し $t=15-20$ 秒の間には横断方向のドリフトが発生するが、同時にメインスクリュウの仮の静止回転数が計算される。またサイドスラストによりドリフトは $t=20$ 秒では一時的に抑制される。 $t=25-35$ 秒ではスクリュウが増速されて目標地点に向かって遡上する。さらに $t=35$ 秒以後は z 方向について目標座標へ近づく。先に x 運動が収束しその後、 z 運動が振動しながら収束する。 $t=160-175$ 秒におけるターゲットポイント周りの z 方向の変動は最大 ± 2 cmであった。この変動幅は今後、スラスト位置、モータ選定、制御パラメータの再検討を通じてより改善できるものと考えられる。

6. おわりに

自律航行し水流に対して静止して流速計測を行うポート型ロボットを試作した。室内水路を用いてPID制御のパラメータ調整を行い、実用性を視野に入れた2次元運

動テストによりリリース地点からターゲット地点への速やかな移動が確認できた。またレーザー流速計によって推進スクリュウの回転速度と対向流速の校正曲線を求めた。本ロボットシステムは、軽量コンパクトでありリリース後は全自動のため計測作業が簡便である点、極端な暴風河川を除けば自然要因の影響は少なく確実性に長ける点などが魅力である。流速計測に限らず各種センサの移動式ベースとすれば手の届かない河川中央部等における河床形状や水質調査も可能である。最近ではラジコン潜水艦に装着した水中カメラによる河川の魚類探査の報告例¹¹⁾もあり、河川探査への幅広い応用も期待できる。

一方で実用化には多くの課題がある。本試作機が適用できる領域は準定常の直線河道区間で、機体形状を改良しても最大で20cm~30cm/s程度の低速場に限定される。時間平均的な主流速は評価できるがマイクロスケールの乱流変動には追従できない弱点がある。また機体位置センシングに用いる反射板の設置は現実的でなく、GPSや加速度センサあるいはトランスポンダによる位置同定が必要である。さらに浮体式の場合、風によるドリフトが避けられず潜水化が求められる。洪水河川で使用する際には、流木等の漂流物を回避する運動制御も組み込まなくてはならない。演算装置にarduino等の小型マイコンを採用し機体のコンパクト化を目指すとともに推進モータの高出力化やPID制御の改良を行うことで、より大きな流速や細かな非定常変動への対応を実現したい。

参考文献

- 1) 二瓶泰雄・酒井雄弘, 実河川洪水流における浮子の更生係数, 土木学会論文集B, Vol.66, No.2, pp.104-118, 2010.
- 2) 二瓶泰雄, 河川流量モニタリング, ながれ, Vol.29, pp.187-192, 2010.
- 3) 萬矢敦啓・岡田将治・橋田隆史・菅野裕也・深見和彦, 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, 2010.
- 4) 岡田将治・萬矢敦啓・本永良樹・橋田隆史, ADCPによる洪水流況・掃流砂・浮遊砂量の同時計測技術構築のための基礎的検討, 土木学会水工学論文集, 第57巻, I_751-I_756, 2013.
- 5) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A., Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, Journal of hydraulic research, Vol.36, pp. 397-414, 1998.
- 6) 藤田一郎・安藤敬済・堤志帆・岡部健士, 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, 2009.
- 7) 藤田一郎, 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, 2013.
- 8) 山口高志・新里邦生, 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, 1994.
- 9) 萬矢敦啓・大平一典・菅野裕也・深見和彦, 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, 2010.
- 10) 森泰親, 演習で学ぶPID制御, 森北出版, 2009.
- 11) 鬼束幸樹・秋山壽一郎・小野篤志・芹川泰介, 潜水艦模型と超小型ワイヤレスカメラを用いた魚類の生息調査, 水工学論文集, 第53巻, pp.1255-1260, 2009.

(2014. 9. 30受付)