

# 風向測定に基づく水上移動ロボットの停留制御

○渡辺 健太郎 (東北大学), 渡辺 敦志 (東北大学), 永谷圭司 (東北大学)

## Station-Keeping Control of an Unmanned Surface Vehicle Based on the Wind Direction Measurement

○Kentaro WATANABE (Tohoku Univ), Atsushi WATANABE (Tohoku Univ),  
Keiji NAGATANI (Tohoku Univ)

Abstract : This paper proposes an attitude control based on a wind direction measurement for the station keeping of Unmanned Surface Vehicles (USVs). Station keeping is a key element for USVs to measure lake bed environment by immersing tethered instruments in water. However, small USVs are significantly affected by wind and flow caused by wind. In this paper, a feed-forward compensation of the wind effect for the attitude control based on the wind direction measurement is proposed. Also, the effectiveness of the proposed method is confirmed by experiments.



Fig. 1: 従来のため池の放射線量の計測作業 [4]

### 1. 緒言

2011年3月11日, 東日本大震災により発生した津波により, 東京電力福島第一原子力発電所において放射性物質漏れ事故が発生した。事故の影響により, 自然環境に浸透しやすい放射性物質が大气, 土壌, 河川, 貯水池, 海洋等の環境中に取り込まれ, 農林水産物の汚染や生活環境の汚染が懸念される状況となった [1]。特に, 人々の生活に密接に関わるため池では, 以下の災害が予想される。

- (1) ため池が決壊することで, 民家に汚染された水や泥が流れ込む。
- (2) ため池に近い民家で火災が起きた場合, 汚染された水で消火活動が行われてしまう。
- (3) ため池の水を農業用水として使用することにより, 汚染された食物が栽培されて体内に摂取される。

これらの事態を避けるためにも, ため池内の環境情報を把握し, 迅速な対処することが求められる。

福島県では, 平成 25 年からため池の水質・底質調査が行われており, 平成 28 年 3 月時点で, 福島県内の約 8 割のモニタリング調査が完了し, 「対策マニュアル」も公表されている [2][3]。しかし, 現状のため池の底質表面の計測方法は, 計測作業員がボートに乗って任意の計測地点に移動し, 計測デバイスを降下させて一定時間計測を行うというものである [4](図 1)。これらの作業は, すべて手作業で行われているため, 多大な労力と時間, 費用を要するだけでなく, 作業員がボートから転落し, 放射性物質を含む泥などを体内に取り込む危険性もある。また, 大雨が降って土砂災害が起きる場合, ため池の底質の状況が変わるため, 再度計測を行うことが望ましい。したがって, ため池の計測作業の迅速化が求められる。これらの計測作業を水上移動ロボットを用いて自動化することにより, 計測の作業効率や作業員の安全性向上が期待される。

著者らの研究グループでは, 水中環境情報を取得する機材を搭載することを目標として, 前後方向のスラスタに加え, 左右にもスラスタを設置した, 水上での全方向移動が可能なロボット”Strider”を開発した [5]。また”Strider”は, 高の倉ダムにおいて, 指定された複数の計測地点において, 自律的に航行, 停留を行うことができ, 実環境での有用性を確認することができた [6]。しかしながら, フィールド試験では, 風と波の抵抗を大きく受けた場面が見受けられた。水上から計測デバイスを降下させて線量計測を行うためには, 水面にて位置・姿勢制御を行い, 計測地点で長時間かつ安定して停留する必要があるが, 風が強くと吹いている状況等においては, 安定した停留が難しくなる。特に大型船に比べ, 小型の水上ロボットほど風の影響を大きく受けやすいため, 風等の外乱に対し, ロボットに制御を実装する必要がある。これまでに, 既存研究としてフィードフォワード制御で, 風による外乱を和らげるといった研究がなされているが [7], 本研究では, 風向に着目し, 風

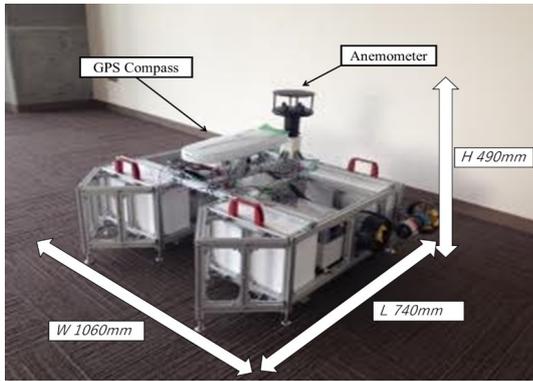


Fig. 2: 水上移動ロボットの概観 (正面図)

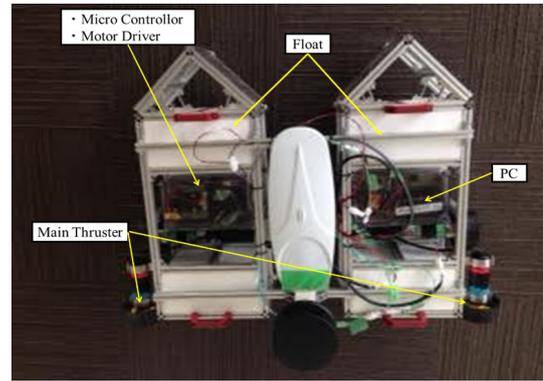


Fig. 3: 水上移動ロボットの概観 (上面図)

向速計から得られる風向に基づいて停留する制御を提案し、新たに開発した水上移動ロボットに実装し、その評価を行った。

本稿では、まず、本研究で開発を行った水上移動ロボットについて紹介し、ロボットに実装した風向測定に基づく停留制御について述べる。また本提案手法の有用性の検証のために行った、評価試験の結果について報告する。最後に、今後の展望について述べる。

## 2. 水上移動ロボットの開発

### 2.1 概観

本研究では、我々の研究グループで開発が進められてきた全方向水上ロボット Strider[5][6]をベースに、新たに双胴船型水上移動ロボットを開発した。ロボットの概観を図2, 図3に示す。ロボットは、長さ740mm, 幅1060mm, 高さ490mmであり、総重量は20kgである。双胴船型にするメリットとして以下の三点が挙げられる。

- (1) 2艘の船をつないだ形状であることから、中央部に広いスペースが作れるため、計測デバイスや各種センサ等を、載せることができる。
- (2) 安定性が高く、水上での停留動作に向いている。
- (3) 実環境にロボットを持って行く際に、一艘ずつ分割して持ち運びができるため、可搬性がある。

ロボットの浮力材として、発砲率50倍、 $120 \times 260 \times 200\text{mm}$ の発砲スチロールを一艘に2つ、計4つ取り付けた。これに加え、電子回路などを収納する $130 \times 250 \times 150\text{mm}$ の2つの防水ボックスで浮力を確保している。現状、中性浮力に比べ、約14kgの余剰ペイロードを有しているが、浮力材の寸法を変更することで、最大、100kgのペイロードを実現できる。

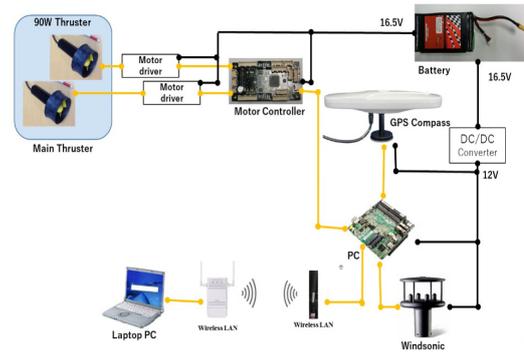


Fig. 4: コントロールシステム構成

### 2.2 システム構成

ロボットのコントロールシステム構成を、図4に示す。ロボットの自己位置・姿勢推定には、GPS Compass (Hemisphere Inc., ssV-102 Simple GPS Satellite Vector) から得られる緯度、経度、方位を利用している。目標地点に到達するための移動機構として、水中ロボット用90Wスラスト (RoboPlus ひびきの社製 RPTH-90V02) をメインスラストとして用いた。このメインスラストを、ロボットの左右に後ろ向きに設置し、それぞれのスラストを正転および逆転させることにより、水上での直進動作と旋回動作を実現する。スラストのモータは、定格電圧24Vであり、本実装では、電源電圧最大16.5Vで動作させている。各スラストは、モータドライバ (HiBot 社製 1-XH DC Power Module) を介して、マイクロコントローラ (STMicroelectronics 社製 STM32F103VF) に接続されている。マイクロコントローラは、PC (Intel 社製 NUC) に接続され、PCから各マイクロコントローラへスラスト制御コマンドを送ることで、PCからの制御を実現している。

ロボットは、ROS (Robot Operating System) の枠組みを用いて構築した。また、無線LANを介して接続したLaptop PCより、ロボットをマニュアル操作するマニ

アルモードとロボットが任意の計測地点へ自律移動し、停留を行うオートモードに切り替えることができる (図 4)。オートモードでのロボットの自己位置・姿勢推定に GPS コンパスを使用し、計測地点へ移動または停留する際は、GPS から得られた位置、姿勢を基に、目的の動作を行うようそれぞれのスラスタをフィードバックにより制御する。オートモードの制御については、[6] で示したシステムを用いた。

## 2.3 風向速計

風に対する制御の実現のため、風向風速を検知することができる 2 次元超音波風向速計 (Gill Instruments 社製 WindSonic-1) を用いた。風向速計は、重量 0.5kg と軽量であり、最大 60m/s の風速と 2 次元全方位の風向を測定できる。詳しい仕様を、表 1 に示す。風向速計は、正確に風向風速を測定するため、他の構成物の干渉で、風が妨げられないようにロボットの後方の高い位置に設置した。なお小型の水上移動ロボットであるため、風向速計が設置している場所の風向と風速を、機体全体にかかっているの風向と風速とみなして用いる。

## 3. 風向測定に基づく停留制御

本研究で実装しているロボットの制御手法について紹介する。ロボットが目的地に移動するときは、3.1 で示す移動制御手法を用いて、目的地へ向かう。目的地の半径 1m 以内に近づいたら、ロボットは停留動作に入り、3.2 で示す停留制御手法で停留を行う。なお、ロボットが目的地から、半径 1.5m 以上離れた場合は、停留失敗とロボットが判断し、再び 3.1 で示す移動制御で再び目的地に戻り、目的地点の半径 1m 以内にロボットが接近したら、再度停留動作に入るようにしている。

Table. 1: 風向速計の仕様

風速	範囲	0 - 60 [m/s]
	精度	± 2[%]
	分解能	0.01[m/s]
風向	範囲	0-359[°]
	精度	± 2[%]
	分解能	1[°]
サイズ	142 × 160[mm]	
重量	0.5[kg]	
通信	RS232	

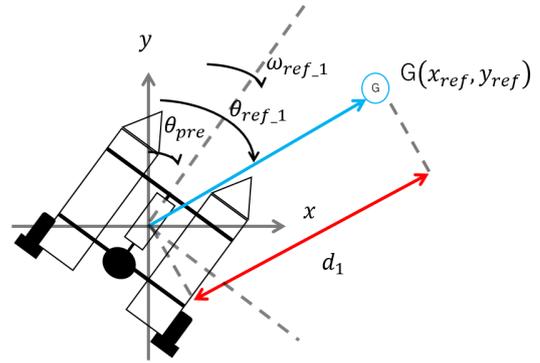


Fig. 5: 2 軸スラスタ機構による目的地移動制御

### 3.1 2 軸スラスタ機構による目的地移動制御手法

2 軸スラスタ機構による目的地移動制御手法を、図 5 を用いて説明する。2 軸スラスタ機構では、固定された 2 つのスラスタの出力調整によって、移動方向を制御することができる。図に示すように  $x$  と  $y$  座標を世界座標系として定義し、目的地  $G$  に対して、目標  $x$  方向距離  $x_{ref}$ 、目標  $y$  方向距離  $y_{ref}$  とする。目的地移動において、ロボットが目的地の方向を向くための目標角速度  $\omega_{ref,1}$  と、目的地に移動するための目標速度  $v_{ref,1}$  を次式より求める。

$$\omega_{ref,1} = K_{\theta}(\theta_{ref,1} - \theta_{pre}) \quad (1)$$

$$v_{ref,1} = K_d d_1 \quad (2)$$

$K_{\theta}$  と  $K_d$  は、角度と距離それぞれの P ゲイン、目標方位角  $\theta_{ref,1}$  はロボットの位置に対する目的地への角度、 $\theta_{pre}$  はロボットの現在向いている方位角、 $d_1$  はロボットの現在地と目的地との距離で  $d_1 = \sqrt{x_{ref}^2 + y_{ref}^2}$  である。

### 3.2 2 軸スラスタ機構による停留制御手法

2 軸スラスタ機構による停留制御手法を、図 6 を用いて説明する。停留する際は、ある指定した方向に姿勢を維持しつつ、目的地に留まる。停留する際の姿勢を維持するための目標角速度  $\omega_{ref,2}$  と、ロボットの位置と目的地の前後方向を制御するための目標速度  $v_{ref,2}$  を次式より求める。

$$\omega_{ref,2} = K_{\theta}(\theta_{ref,2} - \theta_{pre}) \quad (3)$$

$$v_{ref,2} = K_d d_2 \quad (4)$$

目標方位角  $\theta_{ref,2}$  は停留する際に維持する姿勢の角度、 $d_2$  はロボットと目的地の前後方向の距離を表す。なお、2 軸スラスタ機構では、左右移動ができないため、左右方向の制御はできない。

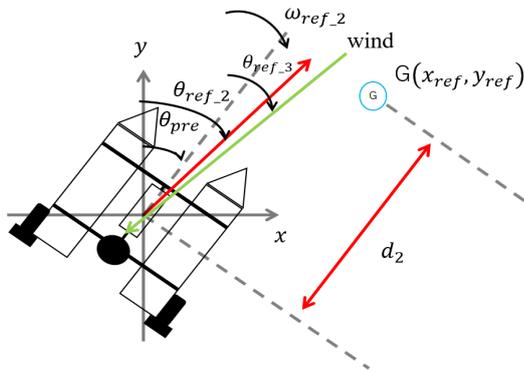


Fig. 6: 2軸スラスト機構による停留制御

ここで、 $\theta_{ref,2}$  は、ロボットが停留の際の目標姿勢を与える。筆者らのこれまでの研究では、あらかじめ決めた固定の値を与えて姿勢の制御に用いた。例えば川で停留を行う場合、川の流れの方向に対して、触先を向ける姿勢を与える。しかしながら、対象調査環境であるため池において、主要な外乱は風と風が起こす流れとなるため、姿勢をあらかじめ決められない。そこで、本研究で提案する停留制御手法は、風向速計から得られた風向を基に、風上にロボットの正面を向けるよう目標姿勢を与えることにした。ただし、風向はロボットに対する相対的な方向として得られるため、停留する際の目標角速度  $\omega_{ref,3}$  は、式 (3) をロボット座標系上に変換し、次式より求める。

$$\omega_{ref,3} = K_{\theta}\theta_{ref,3} \quad (5)$$

ここで、目標角度  $\theta_{ref,3}$  はロボットの座標系における風向である。風向はロボットの正面に風が吹いていると  $0^{\circ}$ 、背面から風が吹いていると  $180^{\circ}$  となるため、風向が  $0^{\circ}$  となるようにロボットを回転させる。

## 4. 評価試験

### 4.1 試験概要

提案手法の有用性を確認するため、2章で紹介したロボットに3章で提案した制御を実装し、検証試験を行った。試験は、東北大学青葉山キャンパス化学・バイオ系棟の屋外プールで、風速が  $1.0\text{m/s}$  以下の環境で、実施した。試験では、開発したロボットに対して、風による外乱を与えた状態で、ロボットが停留動作を行った。その際の挙動を、提案する姿勢制御を適用した場合と、従来の姿勢制御を適用した場合で比較した。

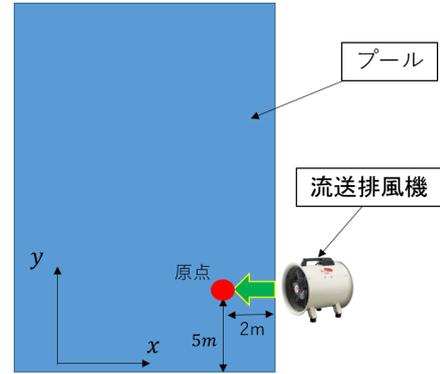


Fig. 7: 試験環境のイメージ

### 4.2 試験内容

試験環境のイメージ図を図7に示す。試験では、図7に示す点を原点とし、プールの短手方向を  $x$  軸、長手方向を  $y$  軸にとる。ロボットは、GPS から得られた座標を基に、原点に留まるよう停留を行い、その際、図7の位置から、 $300\text{mm}$  軸流送排風機 IPNJF-300V-TP を用いて、一定速の風を定常的に与えた。停留動作は5分間行い、停留動作に失敗した場合は、3章で示したアルゴリズムの通りに、原点に向かうよう移動を行い、再度停留を行う。試験は、提案した風向を考慮した姿勢制御と、GPS の情報のみを用いた姿勢制御の2パターンで行い、目標姿勢角  $\theta_{ref,2}$  は、図7の  $y$  軸の正方向にロボットの正面を向けるような姿勢とした。評価指標は、GPS から得られた位置情報と原点との位置誤差で比較を行った。

### 4.3 試験結果と考察

試験結果を図8, 9, 10に示す。図8は、それぞれの制御手法での停留地点からの時系列毎の位置誤差を示し、黒い線は、ロボットが停留失敗と判断する閾値である。閾値以上の位置誤差が出るとロボットは、停留失敗と判断し、目的地に向かって移動するモードに入る。GPS の情報のみを用いた停留制御の場合、 $300\text{s}$  間で5回停留失敗をしており、平均停留時間は、 $42.3\text{s}$  であった。一方、風向を考慮した停留制御の場合、一度停留失敗したものの  $257\text{s}$  間停留を行うことができた。

図9は、それぞれの制御手法での時系列毎の  $x$  軸方向の位置である。本試験では、 $-x$  方向に対して風を吹かせており、GPS のみの制御だと、風に流される時に、ロボットは横方向に対して推力を持っていないため、 $-x$  方向に流されたと考えられる。また、停留が失敗し、移動制御モードで停留地点に戻り、再度停留を試みても、また流されてしまい、停留が維持できないことが見てとれる。一方、提案し

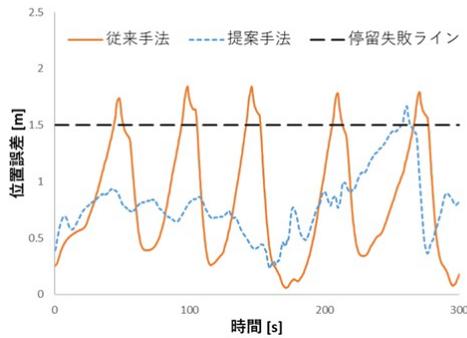


Fig. 8: 停留地点からの位置誤差

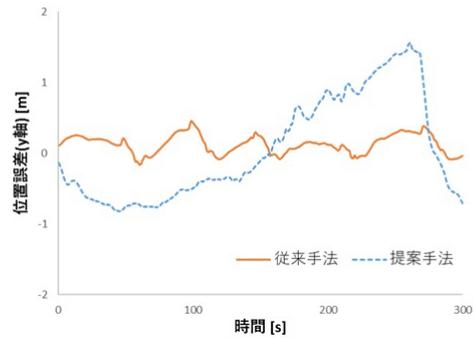


Fig. 10: y 軸方向の位置

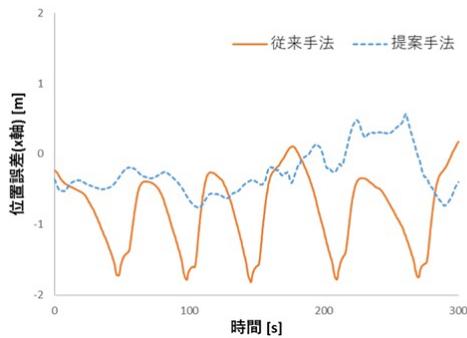


Fig. 9: x 軸方向の位置



Fig. 11: 試験風景

た制御手法では、比較的安定して原点付近にとどまることがわかり、提案手法の有用性が確認できる。

図 10 は、それぞれの条件での時系列毎の y 軸方向の位置である。GPS のみの制御では、姿勢を y 方向に向けており、停留中も、推力の調整で位置を制御できるので、安定して原点付近にとどまっている。一方、提案した制御手法では、一度+y 方向に流れたため、停留が失敗した場面があった。これは、水上移動ロボットの運動が、前後運動、左右運動、回転運動の連成運動となっているため [8]、前後移動と旋回することで、意図せず左右方向に動いたためと考えられる。そのため、2 軸スラスト機構では、停留動作に不十分であることがわかり、全方向移動機構が望ましいと考えられる。また、本研究で用いた送風機が送れる風の範囲を外れ、風による外乱が変化したことも影響していると考えられる。

## 5. 結言

本稿では、水上移動ロボットの停留性向上のため、風向測定に基づいた停留の際の姿勢制御を提案し、新たに開発した水上移動ロボットに提案した制御の実装について述べた。また提案した制御の有効性の検証のため、定常な風が

吹いている環境で評価試験を行った。試験の結果、従来の姿勢制御が、従来の停留制御の平均停留時間が 42.3s であったのに対し、提案した制御手法では、25s 間停留を行うことができた。また 2 軸スラストの機構では、停留動作には、不十分であることも分かった。今後の展望として、全方向移動機構での風に対するフィードフォワード制御を実装していく予定である。

## 謝辞

本研究は、株式会社日本遮蔽技研「水上移動ロボットの位置・姿勢制御に関する研究助成」の支援を受けて、実施された。

## 参考文献

- [1] 経済産業 (山口聡, 近藤かおり), 農林環境課 (小寺正一), "福島第一原発事故とその影響", 国立国会図書館 *ISSUE BRIEF NUMBER 718(2011.6.28.)*
- [2] 農林水産省農村振興局福島農林水産部 "平成 27 年度福島県内のため池等における放射性物質の調査結果について"
- [3] 農林水産省 "ため池の放射性物質対策技術マニュアル"

- [4] (独) 日本原子力研究機構福島技術本部福島環境安全センター眞田幸尚, 鳥居建男, ” 農業用ため池における水底放射能の in-situ 計測法 ”
- [5] 榎本裕次郎, 比嘉翔弥, 山内元貴, 永谷圭司, 武村史朗, 川端邦明, “水中環境情報取得を目的とした全方向水上移動ロボットの開発”, 第 15 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門 講演会 論文集
- [6] 渡辺健太郎, 沢田 一将, 比嘉翔弥, 山内元貴, 渡辺敦志, 永谷圭司, “全方向水上移動ロボットの軌跡追従制御と評価”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2016, 2A1-18a6, 2016.
- [7] Huajin Qu and Karl D. von Ellenrieder, “ Adaptive Wind Feedforward Control of an Unmanned Surface Vehicle for,” In MTS 2015
- [8] 安川宏紀, 芳村康男, “船舶海洋工学シリーズ 3 船体運動 操縦性能編”