

第Ⅱ部門 沿岸域を対象とする水理観測ロボットの開発

京都大学 学生員 ○鈴木 優志
 京都大学 正会員 山上 路生
 京都大学 学生員 藤村 直樹
 京都大学 学生員 齋藤 遼太

1. はじめに

沿岸域における波浪諸元を正確に計測することは、沿岸域の適切な管理、整備や、沿岸災害の防災を行う上で非常に重要である。本研究では波浪計測手法の中で比較的良好に用いられている漂流式波浪計測ブイ¹⁾に着目し漂流式波浪観測ブイの、進路が不確定であるゆえの安全面やブイの回収における課題を補うため、マイコンによる自動制御を取り入れたボート型水理観測ロボットを開発し、迅速性と安全性に優れた新たな波浪計測システムの構築を目指した。それに伴い、ロボットの自動制御アルゴリズムの構築、PCとロボットの無線通信による制御試験、ロボットの姿勢情報と波浪諸元との関係の考察、水深計測ソナーによる水深計測試験を行った。

2. 自動制御アルゴリズム

自動制御による波浪計測中のロボットのモーターの出力とラダー角制御のアルゴリズムは、次に説明する4つの状態によって異なる。

計測中、ロボットの状態は図-1のようにStage0～Stage3に分類される。計測開始後はStage0からスタートし、一定時間自由漂流させ、ロボットの軌道から流向を求める。Stage1では波に対しその場でロボットが静止するようにモーター出力がなされ、一定時間静止後Stage2に移行する。Stage2では目標点へ高速で移動するようにロボットが制御される。ロボットが目標点近傍に到達するとStage3へと推移し、目標点近傍にロボットがとどまり続けるように、造波方向に対してはモーター出力、横断方向はラダー角度の調節でロボットが制御される。目標点近傍から外れてしまうと再びStage0に戻り流向検知から行う。

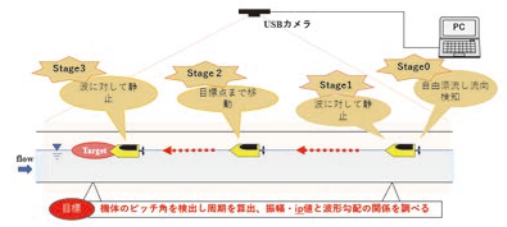


図-1 計測時のロボットの動き

実験には京都大学桂キャンパスの乱流水理実験室に設置されている、幅40cm、長さ16mのマルチフェイズ循環式水槽を用いた。実験は造波周期と振幅の異なる全6ケース行い、信頼性を高める目的で3分間の計測をそれぞれ5回ずつ行った。ロボットはPCとの有線接続により制御した。使用したラジコンボートは全長64.0cm、横幅16.5cm、高さは14.0cm、重量約850gのものである。ロボットにはジャイロセンサ²⁾を搭載しており、造波方向のロボットの回転角であるピッチ角を検出できる。ロボットは波に追従して運動するという仮定より、計測で得られたロボットの姿勢情報から波の周期計測を行った。加えて姿勢情報と波高、波形勾配との関係の考察を行った。実際の波形は水路の設置した波高計で計測した。

(2)波の自動周期計測

ロボットのピッチ角の変動より波の周期を推測した。Stage3に遷移して60秒後から120秒後の間に得られたピッチ角データを用いて推測した周期と波高計から得られた周期の値の結果を表-1に示す。結果としてはいずれのケースにおいても安定した周期の数値が取れた。すべてのケースで、波高計で算出された周期との誤差が1%以内に収まり高い精度で波の自動周期計測が可能であることが実証された。

3. 一次元自動制御による波浪計測試験

(1)実験方法

本試験では試作機の造波方向のモーター自動制御の精度と信頼性の検証を兼ね、一次元自動制御による基礎的な波浪計測試験を行った。

(3) 波高ならびに波形勾配とピッチ角RMSの関係

ロボットのピッチ角の二乗平均平方根であるRMSを算出し、その値と波高、波形勾配との間の相関を調べた。その結果ピッチ角RMSと波形勾配の間に0.987という強い正の相関がみられた。結果を表-2に示す。

表-1 ロボットと波高計による波の周期の解析結果

		case1	case2	case3	case4	case5	case6
周期 $T(s)$	data1	1.622	1.634	1.627	1.936	1.627	1.397
	data2	1.608	1.621	1.627	1.933	1.621	1.394
	data3	1.608	1.624	1.624	1.915	1.615	1.397
	data4	1.613	1.626	1.626	1.934	1.626	1.395
	data5	1.635	1.633	1.625	1.936	1.617	1.397
	average	1.617	1.628	1.625	1.931	1.621	1.396
波高計		1.630	1.622	1.628	1.938	1.622	1.394
誤差 (%)		0.803	0.356	0.157	0.367	0.045	0.161

表-2 波形勾配とピッチ角の RMS との相関係数

	case1	case2	case3	case4	case5	case6	相関係数
波形勾配	0.024	0.035	0.042	0.031	0.036	0.042	
rms 平均	0.612	1.336	2.043	1.077	1.372	2.037	0.987

続く二次元自動制御による波浪計測試験では、波形勾配とピッチ角 RMS の相関のさらなる検証を行った。

4. 二次元自動制御による波浪計測試験

(1) 実験方法

一次元自動制御試験で用いた水路よりも横幅に広い水路を使用してラダーによる水路横断方向の自動制御も加えて同様の検証を行った。使用した水路は、京都大学宇治川オープンラボラトリ第3実験棟に設置されている幅 1m、長さ 45m の多目的造波水路を使用した。水深は 39.6cm に設定し、水深計測のため縦横 30cm、高さ 6cm のブロックを実験区間中央の水路の底に設置した。造波条件は周期を 1.00 秒、振幅を 7.5cm に固定した。実際の波形は水路に設置した波高計を用いて取得した。無線データ通信モジュールである XBee を用いた PC とロボットの無線通信自動制御による波の計測を行った。また水深計測ソナーを用いた水深計測も同時に行った。

(2) ピッチ角 RMS による波形勾配の推定式の導出

一次元自動制御試験と同様にピッチ角 RMS と波形勾配の相関を調べた。結果を図-2 に示す。丸印は一次元制御試験、バツ印は二次元制御試験で得られた結果である。相関係数は 0.99 と非常に強い正の相関を示し、これより回帰分析により推定式を導出した。推定式を以下に示す。

$$H/L = 0.014391\alpha_{RMS} + 0.014846 \quad (1)$$

H は波高、 L は波長、 α_{RMS} はピッチ角の RMS を表す。

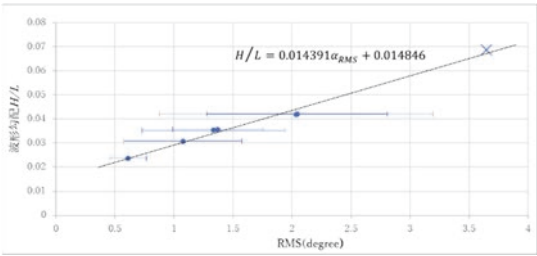


図-2 波形勾配とピッチ角の RMS との関係

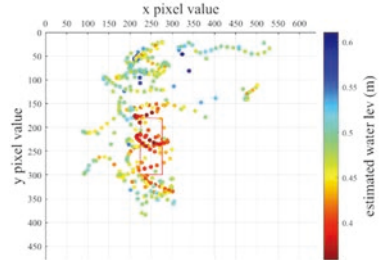


図-3 位置-水深データ

(3) 水深計測

ロボットの底に取り付けた水深計測ソナーを用いて波浪計測と並行して水深計測を行った。図-3 はロボットの位置とそれに対応する水深を表した図である。x 軸は造波方向にとり岸側を正とする。y 軸は水路横断方向にとる。また単位は pixel で表しているが、1pixel 当たり x 軸は 0.37cm、y 軸は 0.208cm に相当する。ブロックは赤い枠であり、その周辺で水深が浅く示されており、波のある状態でも正しく水底の障害物を検知することが可能であると実証された。

5. おわりに

本研究では、沿岸波浪諸元の計測方法としてのボート型自動制御ロボットの開発を行った。結果としては、自動制御アルゴリズムによるロボットの良好な二次元自動制御が可能であることが実証された。またロボットの自動制御により、正確な波の周期計測、重要な波浪諸元である波形勾配の推定式の導出、波浪と水深の同時計測を可能にした。

参考文献

1) <https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/buoy/buoy-info.html>
2) 宇佐見友理・石川和明・高山敏典・柳澤政生・戸川望, スマートフォン搭載 3 軸加速度センサと 3 軸ジャイロセンサを用いた自転車の挙動認識, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウム, 2018