

# 自動操舵による海底地形復元艇の構築

田房 友典\*\*・澤村 幸輝\*

## Development of the Bathymetry Reconstruction boat by Automatic Steering

Tomonori Tabusa \*\* and Kouki Sawamura\*

### Abstract

Bathymetry is important support information for small fishing vessels and vessels operating in coastal areas. In this study, we have developed a system that scans the sea by the automatic steering to create a bathymetric map. Bathymetry is used to create three-dimensional reconstruction software and fishfinder with GPS. Targeting vessels that do not require a license, I have developed a new algorithm automatic steering. automatic steering Program incorporates to Arduino. By experiment, we evaluate based on the ship's track.

### 1. はじめに

海底地形は沿岸部で操業を行う小型漁船や運航する船舶にとって、重要な支援情報である。また、津波や高潮など災害に対する予測シミュレーションを行うためにも海底地形の把握が必要である。国内では、財団法人日本水路協会<sup>[1]</sup>が発行する航海用電子参考図が広く利用されている。しかし、基となる海の基本図が十分に整備されていない海域が少なくないことから実際の海底地形を正確に反映されていないことが多い。

海底地形の把握には Real Time Kinematics GPS (RTK-GPS) とマルチナロービーム超音波測深機<sup>[2]</sup>を用い、広範囲を一度に測深する方法が一般的に用いられている。しかし、本校が所在する上島町等の沿岸部では浅瀬が多いため、喫水が深いマルチナロービーム超音波測深機を搭載した調査船は物理的に航行できない。このため、浅い海域の詳細な海底地形を測深することが出来ない。

近年、GPS や測深機の高性能化や低価格化により、小型船に搭載可能な漁業用 GPS 付き魚群探知機でも容易に計測が行えるようになり、海底地形の把握に十分利用できる。しかし、海底地形の把握には大量の位置情報と水深情報を必要とし、それらの取得には時間と手間がかかる。また、船の長さが 3m 以上かつ推力 1.5kW 以上の船舶を運転するためには免許が必要となり、調査には免許取得者の協力が必要となる。

そこで自動操舵を用いて海底地形図作成作業の効率化を図る。大型船では、様々な自動操舵が実用化されており、小型船舶においてもファジー理論を利用した自動操舵の研究<sup>[3]</sup>が報告されているが、対象は全長 10m の小型船舶免許を必要とする船舶である。

本研究は、免許を必要としない小型船舶用の自動操舵アルゴリズムを開発し、目標となる位置情報(以下 Waypoint とする)を与えるだけで、海上を自動で走査し、海底地形図を作成するシステムの開発を行った。

開発した自動操舵アルゴリズムを用いて操船実験を行い、Waypoint から構成される航路と実際の航跡を比較し考察する。

### 2. 海底 3 次元方法

海上を走査することで海底地形を 3 次元復元するソナーおよびソフトウェアは市販されており、船舶に取り付けることが出来れば、操船によって、海底地形図を得ることが出来る。

図 1 は本校の実習船(全長 17m) に GPS 付き魚群探知機を搭載し、弓削島周辺の海域を走査した航跡、図 2 に取得したデータを 3 次元復元した結果を示す。弓削島周辺の海域には、魚の住み家となる漁礁を人工的に設置している。この漁礁を中心に手で実習船を操船し、水深データを取得した。取得したデータは 3 次元復元ソフト (DrDepth) を用いて 3 次元復元する。

\*\* 情報工学科

\* 生産システム工学専攻



図 1 実習船の航跡



図 2 3次元復元画像

## 2. 1 システム構成

海底の 3 次元復元に必要なデータは、その点の位置情報と水深情報である。本システムでは GPS 付き魚群探知機を用いて測位及び測深を行う。構成したシステム図を図 3、システムを実装した外観を図 4、船舶の仕様を表 1 に示す。

船舶の制御として、陸上の PC から無線通信で送られてくる信号をもとに船舶を制御する遠隔制御と GPS より取得した情報をもとに船舶の自動操舵を行う。それぞれのプログラムは、マイコン (Arduino) に組み込んでいる。また、陸上から遠隔制御を行うために、小型無線モジュール (ZigBee) を搭載し、パソコンとの無線通信を可能にしている。遠隔制御では、非常時の緊急停止や旋回操作等を行う。

本研究で利用した魚群探知機は位置情報、水深情報を NMEA0183 フォーマットでシリアル出力することができる。自動操舵では、この出力をマイコンに入力し、自動操舵アルゴリズムをもとに自動航行船舶を制御する。

本システムは動力として、エレキモータ (RIPTIDE RT55/SP/AP) を使用する。このエレキモータは付属のリモートコントローラで操作することができる。本システムでは、このリモートコントローラを用いてマイコンから制御できるようインターフェースを作成し、船舶を制御する。

電源として 12V のバッテリーを 2 個設置した。GPS 付き魚群探知機、エレキモータや Arduino はこの電源から電力を供給する。

図 3 中の右上の枠内は陸上のシステムを示し、ZigBee を介して海上のシステムとシリアル通信している。陸上からの遠隔制御、船上から送信されたデータの監視およびソフトウェア (DrDepth) を用いて海底の 3 次元表示を行う。

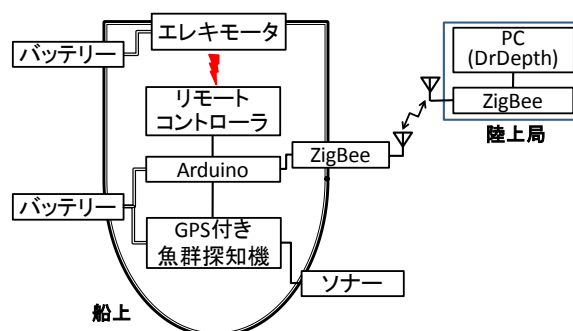


図 3 システム構成



図 4 システムの外観

表 1 船舶の仕様

船の長さ	2.96m
幅	1.34m
深さ	0.56m

## 2. 2 GPS 付き魚群探知機

本システムでは GPS 付き魚群探知機 (図 5, 仕様表 2) を用いて測位および測深を行っている。GPS 付き魚群探知機を用いることで GPS からの位置情報とソナーからの水深情報の同期を容易に取ることができる。本研究で使用した GPS 付き魚群探知機を図 5 に示す。この魚群探知機は、50kHz と 200kHz の 2 周波を持っている。50kHz の場合には走査角が 35 度と広く、広範囲の探査に適し、深いところまで探査できる。一方、200kHz の場合には走査角が 12 度と狭くなるが、分解能が良く、細かい探知には適している。本システムは浅瀬を対象としており、海底地形を細かく把握したいため、本研究では分解能の良い 200kHz を使用した。また、この GPS 付き魚群探知機には、SD カードスロットがあり、測定した情報を SD カードに保存することができる。走査終了後に SD カードを回収して、既存の 3 次元復元ソフトウェア (DrDepth) を用いて、海底地形を 3 次元復元する。魚群探知機のソナー部は図 6 のようにエレキモータに固定している。

## 自動操舵による海底地形復元艇の構築（田房・澤村）



図5 Lowrance HDS-5

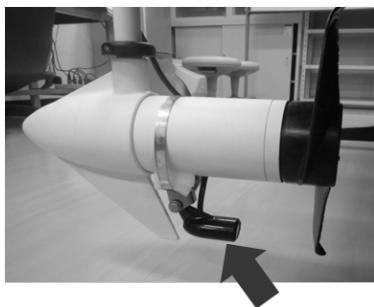


図6 魚群探知機のソナー部

表2 HDS-5の仕様

内蔵GPS	受信チャンネル数	16チャンネル
	NMEA0183出力	GGA 他
	精度	水平5m
ソナー	周波数	50/200kHz
	出力パワー	最大250W
	計測範囲	0.4m~1500m
	精度	1.5%FS以内
	分解能	1cm
パワー	電力供給	10~18vDC

### 2.3 GPSとArduino間の接続について

GPSなどRS232Cレベルの機器とマイコンなどのTTLレベルの機器は信号レベルが異なるため直接つなぐことはできないため、GPS信号をレベル変換してマイコンに接続する。実際には、反転回路を用いて負電圧の信号をTTLレベルに変換する。

### 2.4 エレキモータ

本研究で船舶の動力として利用したエレキモータはミンコタ社製のRIPTIDE RT55/SP/APである。このエレキモータは付属のリモコンで操作することができる。本システムでは、このリモコンを用いて、マイコンからエレキモータを制御するためのインターフェースを作成した。作成したインターフェースを図7に示す。左側の枠内はエレキモータのリモコンである。リモコンはプロペラの回転のON/OFFや加速、減速、左右へのステアリングの制御することができる。

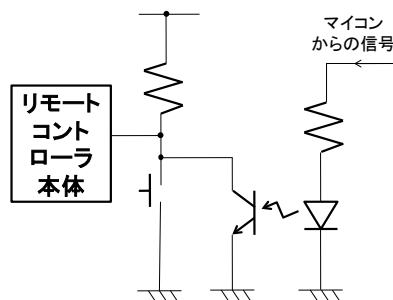


図7 インターフェースの回路図

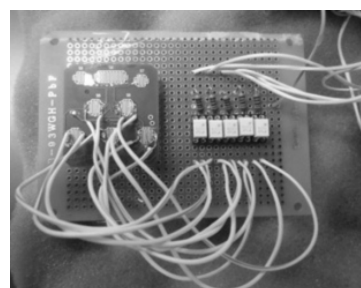


図8 インターフェースの外観

同図の右の枠内はスイッチングに用いたフォトカプラ群である。リモコンの電源は内蔵電池から供給されているため、マイコンとリモコンはそれぞれ独立した電源を持っている。本システムでは回路間で絶縁を保ったまま信号伝達を行えるフォトカプラをスイッチングに用いた。マイコンからそれぞれの操作に対応するフォトカプラに信号を送ることで船舶の制御を行う。

## 3. 自動操舵アルゴリズム

自動操舵アルゴリズムの概要を図9に示す。本システムでは、GPSから送られてくるNMEAフォーマットのデータの中から、緯度、経度、船首方位、速度を取得し、制御に用いる。図9の処理A内でNMEAフォーマットのデータを取得し、必要な情報を随時更新していく。そして、制御間隔を3秒とし、タイマー割込みをかけ、同図の処理Bを実行し、船舶の舵角制御を行う。これらを繰り返す、複数のWaypointを自動操舵する。

Waypointに到着したかを判断させるために、現在の位置からWaypointまでの距離を算出する。距離の計算式として、ヒュベニの計算式<sup>(4)</sup>(1)を用いる。

$$D = \sqrt{(M \times \Delta P)^2 + (N \times \cos P \times \Delta R)^2} \quad (1)$$

Dは2点間の距離(m)、Pは2点の平均緯度、 $\Delta P$ は2点の緯度差、 $\Delta R$ は2点の経度差を示す。子午線曲率半径をMとし、以下の式で求める。

$$M = \frac{6334834}{\sqrt{(1 - 0.006674 \times (\sin P)^2)^3}} \quad (2)$$

また、卯酉線曲率半径を N とし、以下の式で求める。

$$N = \frac{6377397}{\sqrt{1 - 0.006674 \times (\sin P)^2}} \quad (3)$$

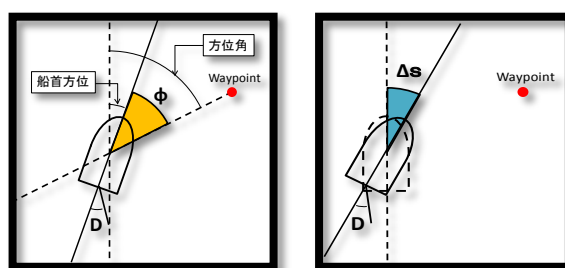
Waypoint から半径 10m 以内の範囲に Waypoint 到着エリアと判断し、次の Waypoint に切り替える。Waypoint に到着していなければ、現在の位置から見た Waypoint の方位角を算出する。また、方位角と船首方位の差を目標設定角  $\phi$  と定義する。さらに、3 秒前の船首方位から現在の船首方位を引くことで船首旋回量  $\Delta s$  を求める。この船首旋回量を制御間隔で割った値を旋回角速度 S と定義する。また、モータの現在の位置を舵角 D と表す。これら算出した情報を元に船舶の舵角制御を行う。定義した所領を図 9 に示す。同図の(b)の実線で描かれた船舶は現在の船舶、破線で描かれた船舶は 3 秒前の船舶を表す。

### 3. 1 船舶の舵角制御

図 10 - ①における船舶の舵角制御の流れを図 11 に示す。同図中の目標設定角  $\theta$  と旋回角速度 S は上限を 180 度、下限を -180 度とし、時計回り方向を正、反時計回り方向を負で表す。本制御は目標設定角による第 1 制御、旋回角速度による第 2 制御、旋回角速度からの予測による第 3 制御の 3 段階による制御

から構成される。

第 1 制御は、目標設定角によって、船首をどちらに向けるべきか判断する。頻りに船首を左右に振ってしまう現象 (ハンチング) を防止するために、 $-5 < S < 5$  の範囲は Waypoint に船首が向いていると判断する。第 2 制御は、旋回角速度によって、船舶がどちらに旋回しているかを判断する。第 3 制御は、旋回角速度による予測制御を行っている。船首が Waypoint の方向を向いても、惰性で逆方向に行き過ぎてしまうことを防止するため、3 秒後、目標設定角の符号が変化すると予想できる場合、逆方向に舵を切る操作 (旋回角速度を小さくする操作) を行う。



(a) 目標設定角の定義 (b) 旋回角速度の定義  
図 9 各定義のイメージ

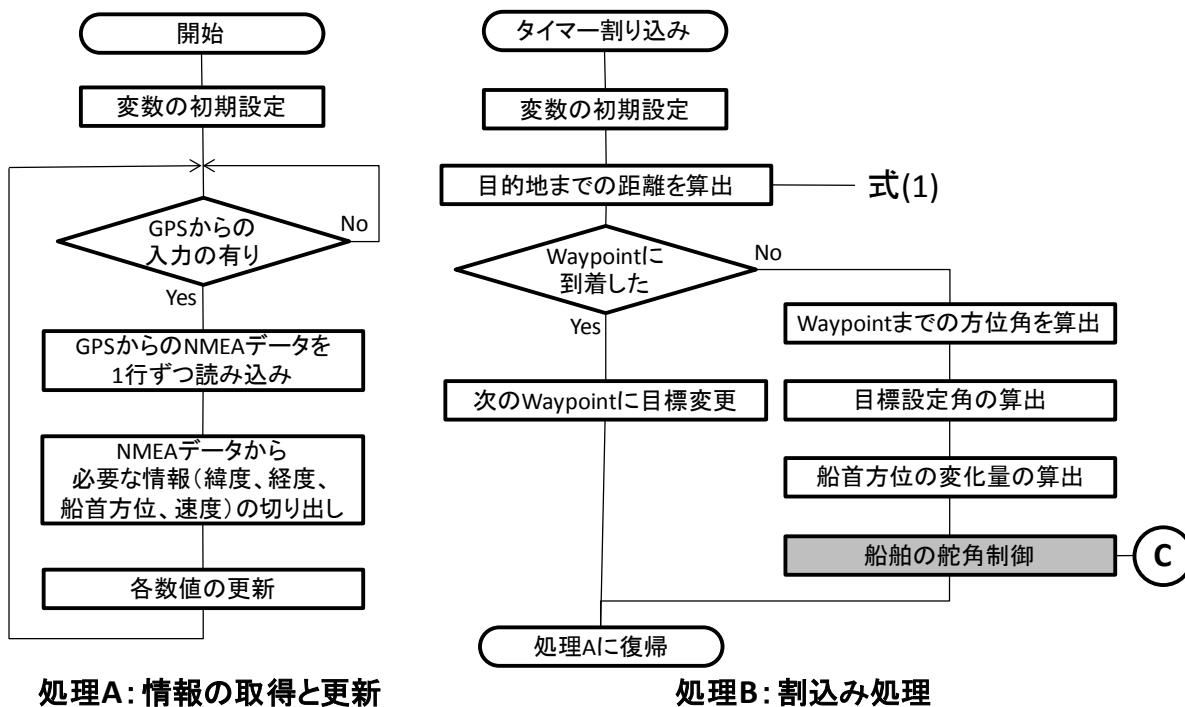


図 10 自動操舵アルゴリズムの流れ

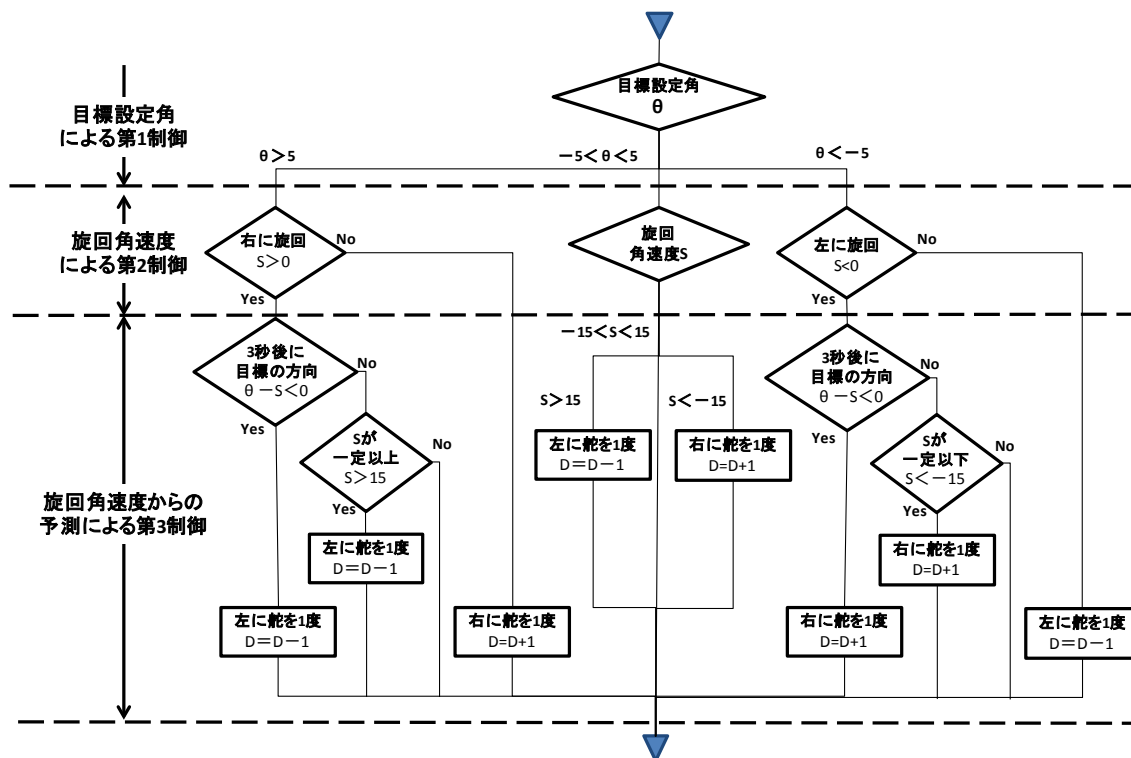


図 11 船舶の舵角制御の流れ

#### 4. 実験

作成した自動操舵アルゴリズムを用いて、3点のWaypointで構成される航路の操船実験を行った。愛媛県越智郡上島町弓削松原海岸沖にて、Waypointを3点設定し、実験を行い、各結果を以下に示す。破線がWaypointから構成される航路、実線が実際の航跡を表す。

##### 4.1 第1回操船実験

図11のアルゴリズムを用いて、制御した結果を図12に示す。1秒間隔でデータを取得し、取得データをGoogleEarthにマッピングした。

図11のアルゴリズムで制御を行った場合、航跡が図の上方向に大きく膨らんでいることがわかる。これは、船首がWaypointの方向に向こうとしても外乱（潮流や風）の影響で上方向に流され、船首がWaypointに向かうよう旋回速度が変化するまでに時間がかかりすぎているためである。この問題を解決するため、一定であった舵角の操作量を短時間で反映させる工夫を行った。前回の制御からWaypoint方向に旋回速度が変化しない場合、舵角の操作量を増加させる処理を加えた。また、舵角の操作量が増加すると舵を戻す際に時間がかかるため、その後に対向方向に舵を切る処理を加え、処理後の操作量を抑えながら、旋回角速度を増加させた。

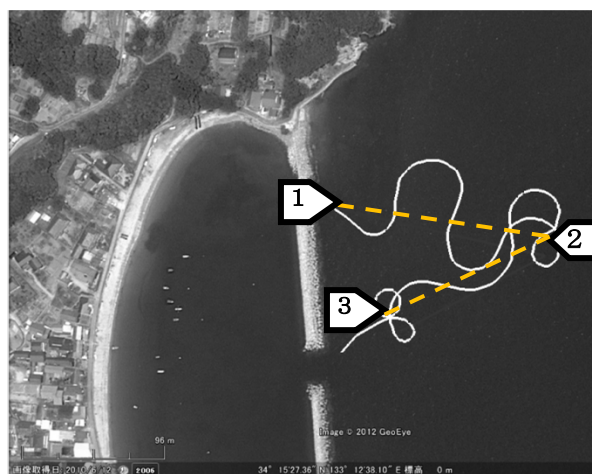


図 12 自動操舵の航跡

##### 4.2 第2回操船実験

第1回の実験結果をもとに改良を行った。改良前後の姿勢制御の流れを図13に、航跡を図14に示す。図13の制御(a)(b)は、どちらも右に1度舵を切る制御である。しかし、制御(b)は3度切ることで旋回角速度への影響を大きくし、2度戻すことで旋回角速度の連続した変化を抑えた。これにより舵を切っても船首方位がWaypointの方向に変化しなかった問題を改善した。

改良前と比べ、航跡がなめらかとなり、Waypointへの船首方向の戻りが速くなったことがわかる。ま



た、船舶が回転することもなくなった。しかし、目標の航路より大きく膨らんだ形の航跡となった。このため、制御間隔を 2 秒とすることで、制御回数を増やし、再度実験を行った。この航跡を図 14 に示す。

制御間隔 2 秒にした結果、細かく制御を行えるようになり、航路から大きく外れることはなくなった。しかし、航跡が波打つようになり、Waypoint に達した後、船舶が回転してしまった。

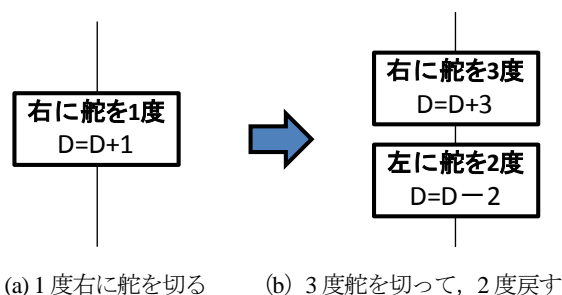


図 13 改良前後の姿勢制御の流れ

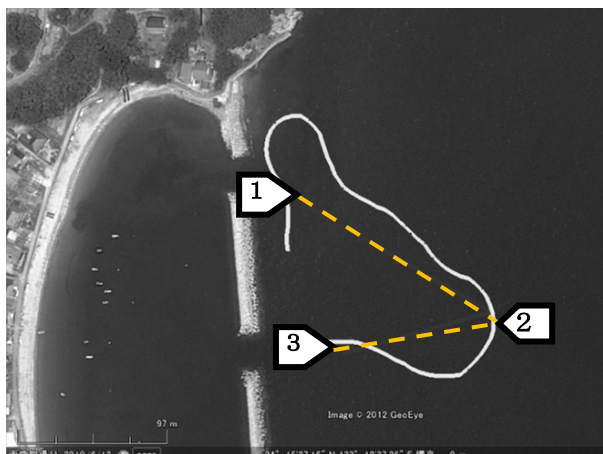


図 14 改良後の航跡

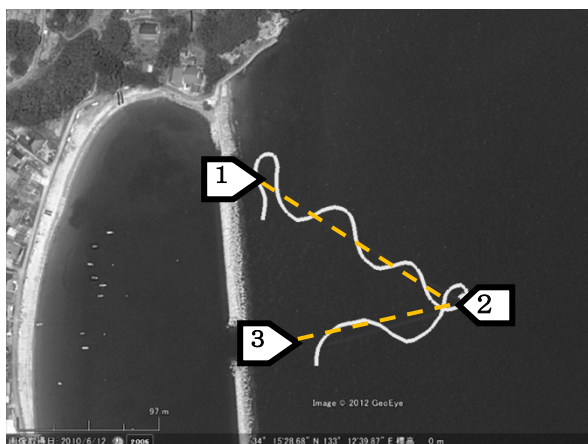


図 15 制御間隔 2 秒の場合

## 5. おわりに

本研究では、海底地形図作成作業の効率化を図るため、免許を必要としない小型船舶用の自動操舵アルゴリズムを作成し、Waypoint を与えるだけで、海上を自動で走査し、海底地形図を作成するシステムの開発を行った。

改良前のアルゴリズムでは舵角  $D$  の操作量が旋回角速度  $S$  に反映されるまでに時間がかかりすぎるため、舵角の操作量を状態によって変化させるようアルゴリズムを改良した。改良前の実験結果と比較すると航跡がなめらかとなり、船舶が回転することがなくなった。しかし、Waypoint 到着後、大きく回り込む形で次の Waypoint に向かっていることがわかる。目標設定角が大きい場合、船首を Waypoint に向ける操作に時間がかかり、外乱の影響により上方に大きく流されるためであると考えられる。制御間隔 2 秒にした場合、制御回数が増え、船首の戻りが速くなったが、航跡が波打つ結果となった。これは、旋回角速度が増加するため、惰性が大きく働き、逆方向への旋回角速度を抑えられないためだと考えられる。

今後の改善策として、Waypoint 到着時に、次の Waypoint に対する目標設定角の大きさによって舵角の操作量を変化させることが考えられる。また、旋回角速度による予測方法も改良する必要がある。本研究は、天候が比較的穏やかな環境でのデータである。現段階では、喫水が浅く、外乱の影響を受けやすいため、悪天候の場合に制御は不可能である。このような問題に対しては、ハードウェア側の観点からも改良が必要である。

海底地形を把握するため、把握したいエリア内に探査抜けがあってはならない。3 次元復元ソフトにより補間することができるが、探査抜けを防ぐために Waypoint の設定に条件を設定する必要がある。把握したいエリア内をジグザグに航行する航路を想定していたが、船舶を急激に旋回させることは難しい。そのため、急激に旋回させる必要のない航路の設定が必要である。この他にも、陸上局から 3 次元復元画像をリアルタイムで監視することも必要がある。

## 参考文献

- [1] 財団法人日本海路協会, <http://www.jana.or.jp/>
- [2] 内田圭一, 宮本佳則, 武田誠一, 東海正, 柿原利治, 塩出大輔: GPS と魚群探知機を用いた沿岸浅海域における海底地形図の簡便作成法
- [3] 前田仁, 山川烈: ファジー理論を用いた小型船舶用適応型オートパイロット