

## 小型実験船の自動避航システム

佐藤 圭二\*, 小林 充\*, 平田 宏一\*\*

### Automatic Ship Collision Avoidance System for Small Ship

by

SATO Keiji\*, KOBAYASHI Mitsuru\*  
and HIRATA Koichi\*\*

#### Abstract

This paper presents an automatic ship collision avoidance system installed on the small experimental ship “Shinpo” managed by the National Maritime Research Institute (NMRI), as well as the results of experiments conducted around the Innoshima Island area using the ship. The system on the experimental ship can be connected to various devices using a programmable logic controller (PLC) as a hub. The automatic ship collision avoidance system works on a Windows tablet PC and displays information on the screen, including the other ships and obstacle zone by target (OZT), which expresses areas where ships will collide with each other in the future, as well as a planned route and a recommended route to be taken to avoid a collision. An automatic ship collision avoidance experiment was conducted by directly operating the rudder of the experimental ship by connecting the automatic ship collision avoidance system. Automatic navigation of Shinpo around the Innoshima Island demonstrated that target ships on the planned route could be avoided on the basis of the safe passing distance set in the automatic ship collision avoidance system.

---

\* 知識・データシステム系, \*\* 自動運航船プロジェクトチーム

原稿受付 令和4年7月22日

審査日 令和4年8月26日

## 目 次

1. まえがき	34
2. 相手船による航行妨害ゾーンを用いた避航操船システム	34
2.1 相手船による航行妨害ゾーン	34
2.2 相手船による航行妨害ゾーンを用いた避航航路計画アルゴリズム	35
2.3 船舶操船制御	36
2.4 避航操船システム	36
3. 避航操船実験	37
3.1 小型実験船「神峰」	37
3.2 実船による避航実験	37
3.3 実験結果	38
4. おわりに	39
謝 辞	40
References	40

## 1. まえがき

近年、特に内航海運業界では船員の高齢化や人手不足が課題となっている。一方で、日本国内での過去5年間における衝突事故は2,177隻発生しており<sup>1)</sup>、その原因の多くが見張り不十分や、操船不適切等のヒューマンエラーとなっている。これらの課題を解決するための要素技術の1つとして自動避航操船があげられ、海外でも多数研究がなされている<sup>2)3)</sup>。海上技術安全研究所では自動運航船の技術開発を進めており、当所所有の小型実験船「神峰」を用いた実船実験をおこなっている。本稿では、現在開発している避航操船システムと、神峰を用いた因島周辺での実船実験について報告する。

## 2. 相手船による航行妨害ゾーンを用いた避航操船システム

## 2.1 相手船による航行妨害ゾーン

相手船による航行妨害ゾーン (OZT: Obstacle Zone by Target, 以下、「OZT」と記す) とは、その名の示す通り、自船の変針に対して、相手船に妨害される進路を、相手船の予定進路上に領域として示したものである。本節では、今津<sup>4)</sup>により改良された線分形式のOZT表示について述べる。図1にOZTの概略を示す。まず、自船Oにあらかじめ設定した安全航過距離 $r$ の円に相手船Tが接する場合の自船の2つの進路 $C_1$ 、 $C_2$ を求める。この進路を衝突進路と呼び、自船がこの進路の範囲内にある場合には2船間の航過距離が安全効果距離の範囲内となる。衝突進路は(2.1)式により求められる。

$$C_o = Az \pm \sin^{-1}(r/d) - \sin^{-1} \left\{ \frac{|\vec{V}_T|}{|\vec{V}_o|} \sin(Az \pm \alpha - C_T) \right\} \quad (2.1)$$

ここで、 $r$ は安全航過距離、 $d$ は自船と相手船との距離、 $Az$ は相手船の絶対方位、 $|\vec{V}_o|$ と $|\vec{V}_T|$ はそれぞれ自船速力と相手船速力、 $C_T$ は相手船の進路、 $\alpha$ は相手船Tから自船を中心とした距離 $r$ の円へ引いた接線の角度である。つぎに、それぞれの衝突進路をもとに(2.2)式で最接近時間 (TCPA: Time to Closest Point of Approach) を算出する。

$$TCPA = \frac{d \cos(C_R - Az + \pi)}{|\vec{V}_R|} \tag{2.2}$$

ここで、 $C_R$ は自船が衝突進路上を航行した場合の自船と相手船との相対進路、 $|\vec{V}_R|$ は相対速度である。図1の点 $T_1$ 、点 $T_2$ は、相手船が初期位置 $T$ を起点として、自身の進路 $C_T$ 上をそれぞれ $TCPA_1$ および $TCPA_2$ の時間航走して到達する点、また点 $O_1$ 、点 $O_2$ は、自船が初期位置 $O$ を起点として、衝突進路 $C_1$ 、 $C_2$ 上をそれぞれ $TCPA_1$ および $TCPA_2$ の時間航走して到達する点を描いたものであり、このとき他船は自船の安全航過距離の円と接することとなる。OZTは点 $O_1$ と点 $O_2$ を結ぶ直線により表現することができる。このOZTに入らないように操船することができれば、相手船との距離を安全航過距離 $r$ 以上に保つことができる。

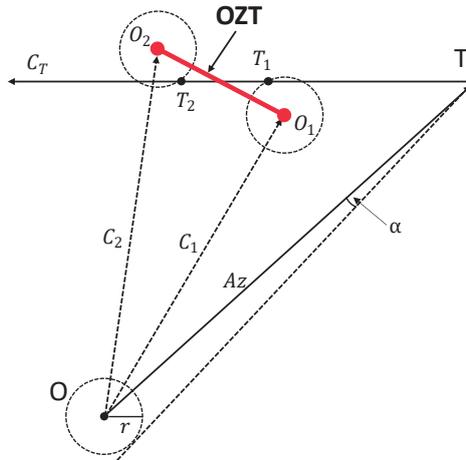


図1 線分OZTイメージ

## 2.2 相手船による航行妨害ゾーンを用いた避航航路計画アルゴリズム

神峰で使用した避航アルゴリズムは、OZTをもとに避航航路を立案するものである<sup>9)</sup>。自船前方に経路の候補となるネットワークを張り巡らせ、その中で自船がOZTと重ならないような避航航路を作成することで、相手船と衝突を避けることができる航路が生成できる。図2に航路を生成するために用いるネットワークのイメージを示す。自船から角度を $\theta_{interval}$ 刻みで、長さ $d_{interval}$ のネットワークをそれぞれ $n$ ステップ分作成する。線分をエッジ、エッジが結びつく箇所をノードと呼ぶ。最後に、次の変針点へ向け、変針点の両脇に終着点の候補を複数作成する。その後、各エッジに対してコストを付与し、コストが最小となる経路を選択する。コストの計算式は以下の通りである。

$$Cost_i = d_i + Penalty_{i1} + Penalty_{i2} \tag{2.3}$$

$$Penalty_1 = \beta \times \frac{1}{d_{OZT}} \tag{2.4}$$

$$Penalty_2 = \begin{cases} 0 & (\text{turn right}) \\ \gamma & (\text{turn left}) \end{cases} \tag{2.5}$$

ここで、 $Cost_i$ は、 $i$ 番目のエッジのコスト、 $d_i$ は $i$ 番目のエッジの長さ、 $d_{OZT}$ はエッジに一番近いOZTとの距離、 $\beta$ 、 $\gamma$ は外部から与える。 $Penalty_1$ の項はOZTとの距離によるペナルティーである。 $\beta$ が大きければ大きいほど、OZTから離れた経路が得られやすくなる調整係数である。OZTとの距離を求める際には、自船がネットワークのそれぞれのノード上に辿り着いた時点でのOZTを用いる。 $Penalty_2$ は海上衝突予防法(COLREGs: Convention

on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea) を意識した項で、 $\gamma$ の値が高いほど右転する避航航路が得られやすくなる。海上衝突予防法では相手船を右手に見る船を義務船、その反対を保持船と称し、義務船は保持船の進路を妨げてはならず、避けなければならない。一般に衝突のおそれなくなるように相手船の後ろを通過するため、右に舵を切る操船を行うことが多い。

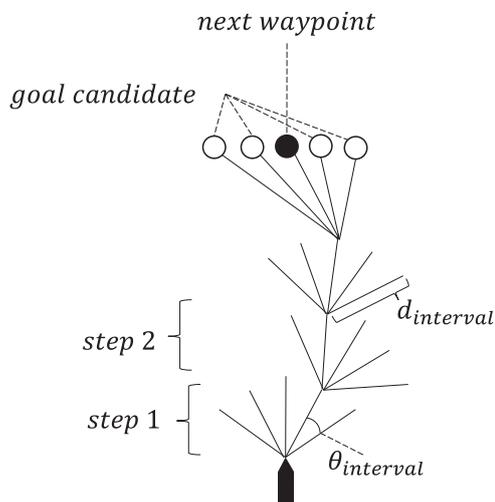


図2 避航航路用ネットワーク作成

### 2.3 船舶操船制御

船舶制御について、Pure pursuit 法を用いた<sup>6)</sup>。図3に Pure pursuit 法のイメージ図を示す。Pure pursuit 法は、あらかじめ設定された変針点 (way points) に対し、現在位置から一定距離先の点を前方注視点 (Target Point) として定め、この点を追従する手法である。前方注視点を逐次更新して適切に移動させることで、なめらかな操船を実現する。前方注視点へ進路を向けるために、舵角の制御を自船の進路を出力値、前方注視点への方位を目標値として出力値と目標値の差をもとにPID制御 (Proportional-Integral-Differential Control) を用いて操船を行う。

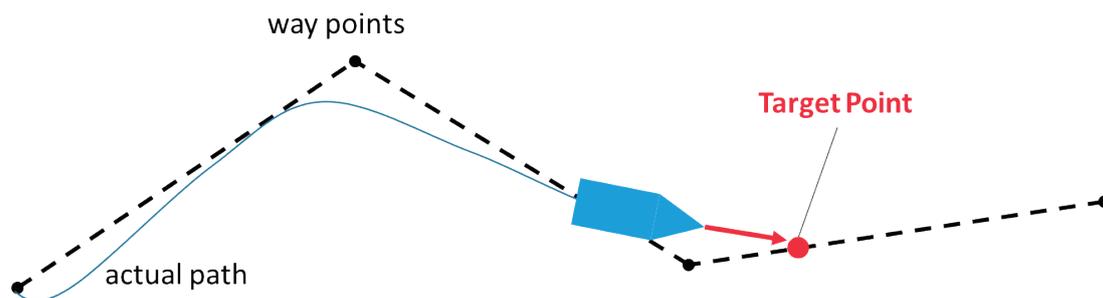


図3 Pure pursuit イメージ

### 2.4 避航操船システム

避航操船システムは、自船の位置情報であるGNSS (Global Navigation Satellite System) 情報や、船舶自動識別装置 (AIS : Automatic Identification System) で取得した相手船情報、レーダーで捕捉した相手船情報 (TT: Target Tracking) はLAN (Local Area Network) 経由でUDP (User Datagram Protocol) 通信により取得する。避航操船システムに入力された他船情報をもとに前述の避航航路をもとめ、航路に追従するように舵角指示を出力する。図4に避航操船システム情報表示画面を示す。船橋視点表示は自船の船橋からの視点で相手船とOZTを描画する表示方法で、横軸は自船の進路を中心とした方位を、縦軸は自船からの距離を表している。レーダー表示は一般の

レーダー画面と同様の PPI (Plan Position Indicator) 表示による表現方法で、自船を中心に Head Up で相手船と OZT を描画する。OZT は、相手船との最接近距離 (DCPA : Distance of Closest Point of Approach に応じて色を分けて表示する。船舶シンボルをクリック、または各船舶の OZT をクリックすることで選択する事ができ、強調表示されるとともに詳細情報が画面に表示される。避航操船システムは Windows タブレットで動作し、タッチ操作で手軽に情報の選択および表示切り替えの実施が可能である。また、神峰には周囲監視カメラシステムが導入されており、カメラで検知した他船の方位情報が入力され、レーダー表示画面にその方位情報を表示することができる。

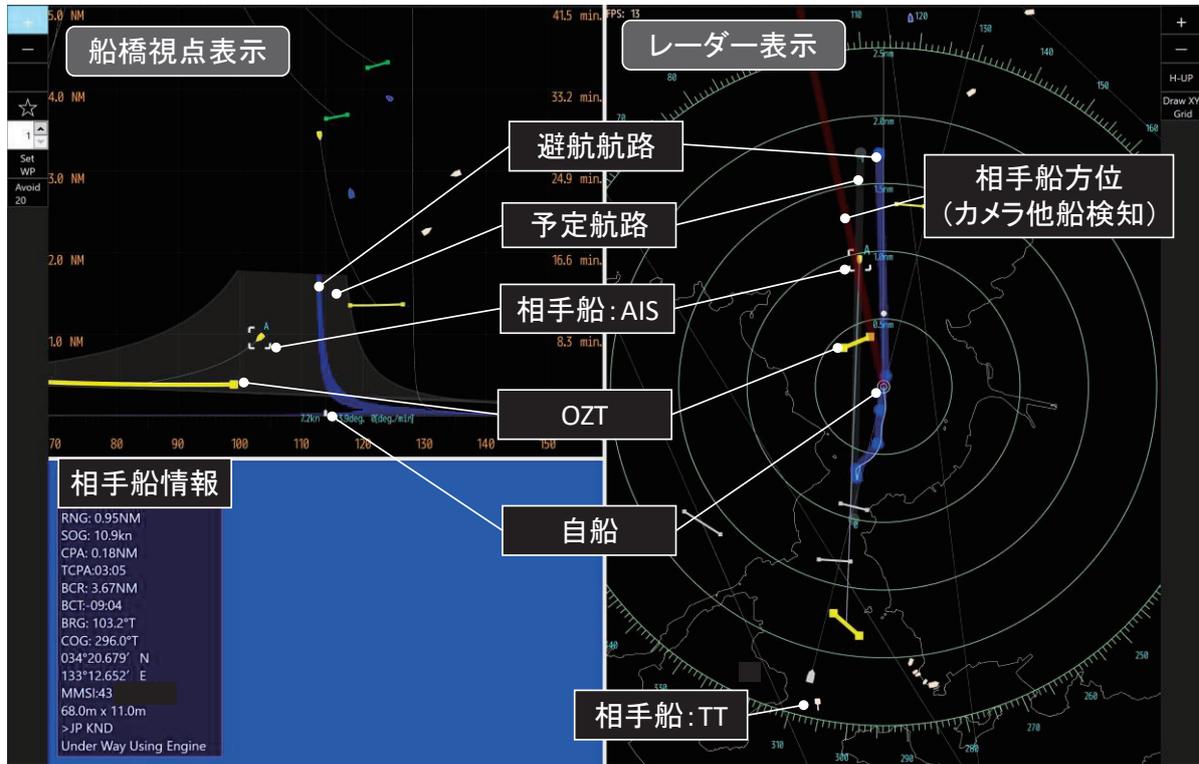


図4 避航操船システム情報表示画面

### 3. 避航操船実験

#### 3.1 小型実験船「神峰」

図5に当所が保有する小型実験船神峰の外観を示し、図6に機器構成を示す。神峰は一軸一舵の小型船舶（総トン数約17トン、全長14.9メートル）である。図6に示すように本船のエンジン・クラッチや油圧操舵装置に専用の制御装置を設け、それらをコンピュータプログラムによって制御できる。PLC (Programmable Logic Controller) 側で避航操船システム PC の入力受付の ON/OFF を手動で即座に切り替えられるため、船上ではいつでも人による操船に切り替えることができる。避航操船システム PC への入力、LAN で PLC 経由で位置情報、方位情報、AIS 情報を、レーダーと他船検知システムからはそれぞれ TT 情報、カメラによる他船検知結果となっている。避航操船システム PC から PLC への出力はシリアル通信で舵角指示をする。

#### 3.2 実船による避航実験

図7に実験エリアと予定航路を示す。2022年3月13日10時頃に因島マリーナを出発し、小佐木島を反時計回りに周回して因島マリーナに戻った。当日は小佐木島周辺には釣り船が多数存在していた。レーダーのトラッキングについては、船上で人手で実施し、避航航路の再計算の指示は都度人手で行った。避航操船システムの設定値として、OZT の安全航過距離  $r=100\text{m}$ 、 $\theta_{\text{interval}}=10$  度、 $d_{\text{interval}}=0.25\text{NM}$ 、 $\beta=0.1$ 、 $\gamma=185.2$  と設定した。



図5 神峰外観

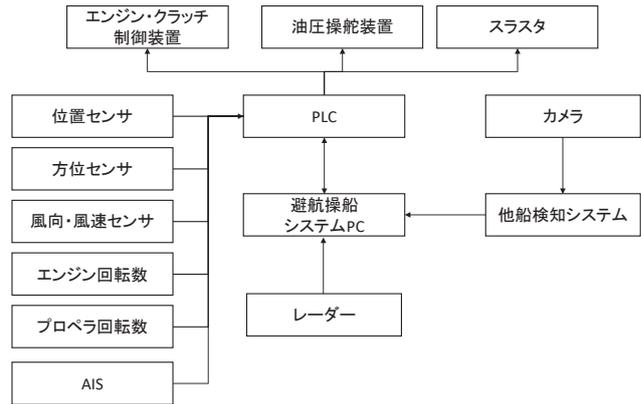


図6 神峰機器構成図



図7 実験予定航路

### 3.3 実験結果

図8に航跡と避航箇所を示す。基本的に予定航路に沿って航行していたが、図の左側の点線の枠で囲った場所が予定航路と航跡とがずれている。これは、この周辺では予定航路上に釣り船が複数存在していたため、これらを迂回するように避航した結果である。図9に避航開始時点での避航操船システムのキャプチャ画像の切り出しを、図10に避航開始時点の左舷側の写真を示す。図10を見ると、本船の左舷側に複数の船舶が存在していることが見て取れる。図9の避航操船システムの画面をみると、予定航路上にOZTが重なっており、それらを避けるように避航航路が求められていたことが分かる。船舶はこの避航航路上をたどって航行し、避航航路の最終地点に到達した後は予定航路に沿って運航を開始した。

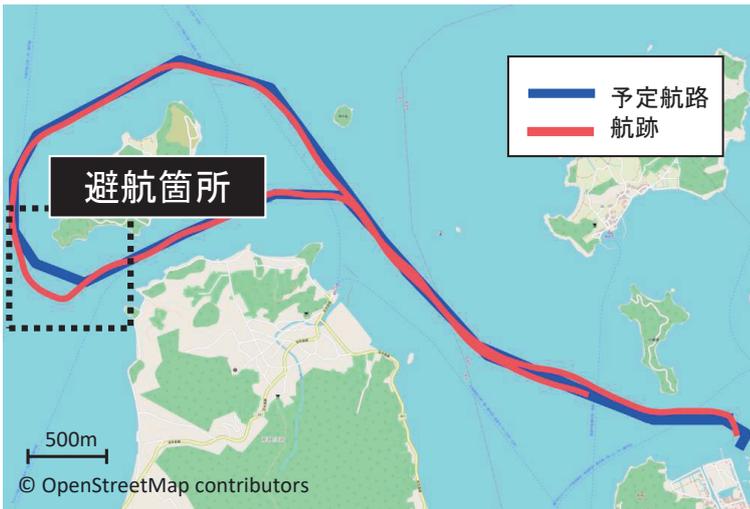


図8 実験航跡



図9 避航操船システム画面キャプチャ (図8の避航箇所地点)



図10 避航開始時点での本船左舷側の様子

図11に避航箇所での自船と相手船との相対航跡を示す。自船を原点として縦軸が自船の船首尾方向、横軸が自船の横方向を表しており、自船の船首が上方向とした場合の相手船との相対位置をプロットしており、自船を中心とした100mの円を描画している。左側の点群のまとまりが自船からみて小佐木島方向にある船舶群となっており、どの点も100m以上離れている事が分かる。システムに設定した安全航過距離は100mであり、設定値どおりに相手船との距離を保って避航できていたことが分かる。

#### 4. おわりに

本稿では、当所が保有する小型実験船「神峰」に搭載した避航操船システムについて紹介し、因島周辺での実船実験結果を報告した。神峰はPLCをハブとして様々な機器との接続が可能となっており、今回は避航操船システムを接続して神峰の舵を直接操作して避航操船実験を行った。因島周辺で島を一周自動運航で運航した結果、予定航路上に存在する船舶を、避航操船システムへの安全航過距離の設定値通りに避航することができた。一方で、島を一周する間に一部手動操船に切り替えるなどの操作を行うこともあり、安心してシステムに操船をあず

けるためには、さらなる改良が必要であることも分かった。今後も実船実験で得られた知見・改善点をもとに、引き続きシステムの改良，検証，および実装に向け研究を進めていく。

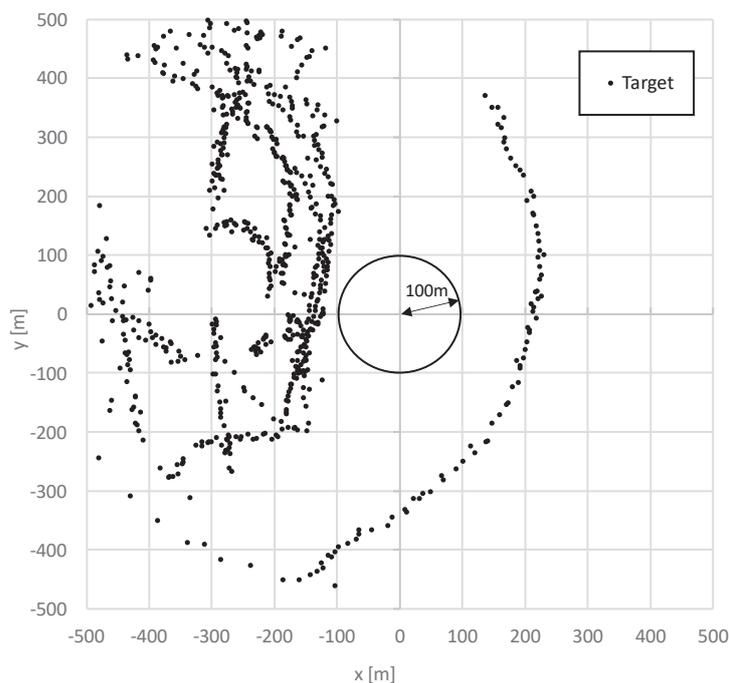


図 11 相対航跡 (Head up)

## 謝 辞

避航操船システムの研究の一部は、株式会社商船三井，MOL マリン&エンジニアリング株式会社，商船三井テクノトレード株式会社，株式会社 YDK テクノロジーズ，東京海洋大学との共同研究，JSPS 科研費 JP20K14968 の助成をうけ実施した。関係各位に深く感謝申し上げます。

## References

- 1) 令和 2 年 海難の現況と対策，海上保安庁，(2021).
- 2) MUNIN documents web site: <http://www.unmanned-ship.org/munin/> (accessed 2022-7-10).
- 3) Varas, J.M., et al.: MAXCMAS project. Autonomous COLREGs compliant ship navigation, Proceedings of the 16th Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (2017), pp.454-464.
- 4) 今津 隼馬：新 OZT とその特性について，第 2 回 航行妨害ゾーン(OZT)の利用と展望 (2019).
- 5) 佐藤 圭二，齊藤 詠子：OZT をもとにした避航操船アルゴリズムの開発，海上技術安全研究所報告第 22 巻第 1 号 (2022), pp.59-68.
- 6) Amidi, O. and Thorpe, C. E.: Integrated mobile robot control. In Mobile Robots V, Vol. 1388 (1991), pp. 504-523.