

## 16 着棧操船の音声支援と自動着棧制御に関する研究

澤田 涼平\*, 平田 宏一\*\*, 北川 泰士\*\*\*, 齊藤 詠子\*,  
宮崎 恵子\*, 上野 道雄\*\*\*\*, 福戸 淳司\*\*\*\*\*

### Support System for Berthing Operation and Automatic Berthing Control

by

SAWADA Ryohei, HIRATA Koichi, KITAGAWA Yasushi, SAITO Eiko,  
MIYAZAKI Keiko, UENO Michio and FUKUTO Junji

#### Abstract

Berthing operation is one of the most complex tasks for ship operators, as it requires advanced skills to maneuver a ship at low speed. When a ship is at low speed, the maneuverability of the ship is reduced, and the ship becomes vulnerable to disturbances such as a wind. In recent years, due to the shortage of skilled ship officers and the aging population of ship operators, it is necessary to support and automate complex operations that require advanced skills, such as berthing operation. As described in this paper, we implemented a support system for berthing operation and automatic berthing control on our full-scale experimental ship. The system consists of an onboard control system built around programmable logic controllers (PLCs) with a voice assistant and can be controlled via a laptop computer. The controller was developed on the basis of path following algorithm. We report the experimental results of the berthing operation support system using the bridge simulator for navigation risk and full-scale experiments of the automatic berthing system using our experimental ship.

---

\* 知識・データシステム系, \*\* 環境・動力系, \*\*\* 流体性能評価系, \*\*\*\* 研究統括監,  
\*\*\*\*\* 特別研究主幹

原稿受付 令和2年4月30日

審査日 令和2年6月9日

1. はじめに

着岸操船は船舶の操縦作業の中でも船員に対する負荷が高い作業の一つである<sup>1) 2)</sup>。着岸時は船が低速になるため、風などの外乱の影響を受けやすくなる。そのため、着岸操船には一般に高度な技術が求められる。一方で近年では、内航海運における熟練船員の不足や船員の高齢化が深刻化している。このような背景から、着岸等の高度な技術が要求される操船作業の支援や自動化は船員の作業負荷を軽減する目的に対して有効である。

一方で着岸操船は、目標の岸壁との接触など危険性を伴う作業であり、また堤防などの地形や他船などによる航行可能領域に制限がある場合が多く、正確な操船を行うことが求められる。また、ユーザビリティの観点から、着岸の支援・自動化機能が作動中に、現在の船体位置などの運動状態や、環境情報等をユーザーに対して提供することでシステムの状態を把握できるように設計するべきである。さらに、安全性に配慮した自動着岸操船システムを構築することは言うまでもない。

本論文では、海上技術安全研究所（以下、当所という）における着岸操船に関する取り組みとして、新たに開発した着岸操船支援機能と自動着岸制御機能を備えた着岸操船システムについて報告する。そして、本システムを搭載した実験船を用いて行った着岸操船の音声支援機能の被験者実験および自動着岸の実船試験についての結果についても述べる。

2. 実験船のシステム構成と着岸操船支援機能

本研究では、海上技術安全研究所が管理する実験船「神峰」(図-1)を対象船として開発を行った。神峰の主要目を表1に示す。船首にはバウスラスタを搭載した1軸1舵船である。本船には、複数のprogrammable logic controller (PLC)を搭載し、船内LANによって接続されている。PLCは保守性、拡張性、高信頼性が特徴であり、船体に設置してある各種センサーの計測データの収集・記録や船体に装備された舵やプロペラ等の各種アクチュエータの制御司令信号の管理を行うなど、船内システムの中心的役割を持つ。図-2は、船内

表 1 神峰の主要目

Length overall, $L_{oa}$ [m]	16.5
Ship length between perpendiculars, $L_{pp}$ [m]	14.9
Ship breadth (1.0WL), $B$ [m]	4.38
Ship draft, $d_m$ [m]	0.502
Trim, $\tau$ [m]	0.348
Diameter of propeller, $D$ [m]	1.0
Side area of rudder, $A_R$ [m <sup>2</sup> ]	0.780
Height of rudder, $H_R$ [m]	1.05
Mass, $m$ [ton]	21.53
Block coefficient, $C_b$	0.642

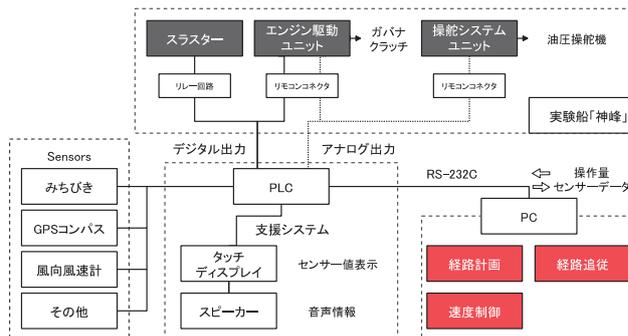


図-2 船体制御システムの構成

に構築した船体制御システムの構成図である。神峰には、開発した自動着岸アルゴリズムに必要な各種センサーが搭載されている。図-3は神峰に搭載されているセンサー類の一部を示している。まず、船首方位はGPSコンパスにより取得される。さらに、高精度な位置情報を取得するために、センチメートル級測位補強サービス (CLAS) 対応のみちびき受信機を搭載した。みちびき用のアンテナは船体上部にある操舵室の屋根上に設置しており、別に風向風速計を備える。他に主機負荷の推定値や、プロペラ回転数、舵角等を含め各種データは、PLCに接続されたタッチディスプレイからリアルタイ

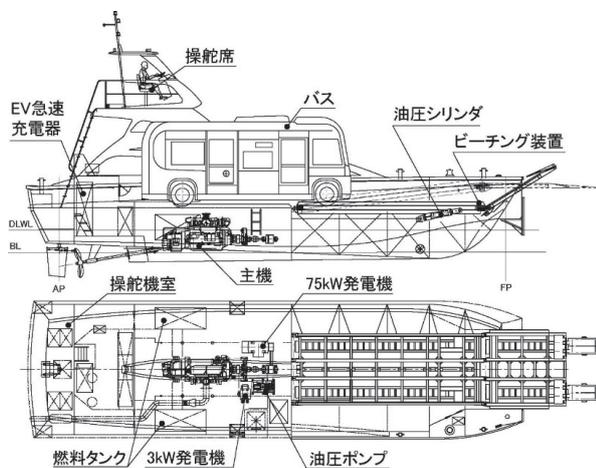


図-1 実験船「神峰」



図-3 神峰に搭載された各種センサー

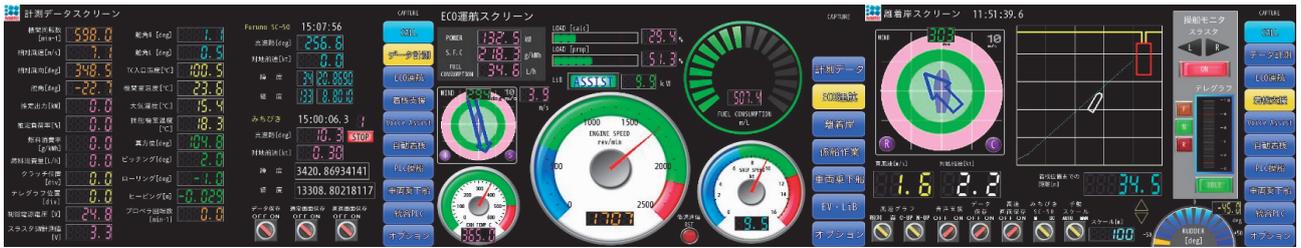


図-4 タッチディスプレイに表示されるグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)の例

ムに確認することができる。また PLC は、スラスタや操舵システムユニット等のアクチュエータの各操作システムにも接続されており、PLC に接続されたタッチディスプレイを操作することで、舵や主機の出力を操作することができる。また、図-2 に示すとおり、制御用パーソナルコンピュータ(PC)から PLC を経由して船体を制御することも出来る。自動着棧制御といった複雑なコントロールは、PC から行われる。制御システムからは、舵、テレグラフ指示値、クラッチ、スラスタを操作することができる。センサーデータのモニタリング、PC/PLC による操船の画面はすべて操縦席に設置してあるタッチディスプレイから行うことができ、ひと目で現在の状況を把握できるように設計されている(図-4)。

### 2.1 非常停止モードの整備

実船実験を行う際、特に自動着棧制御を行う場合は、緊急時にシステムを停止する機能は安全上、必要である。PC 制御を切り、自動制御の信号を停止する機能は PLC が持っており、タッチディスプレイから操作することが出来る。一方で船体を短時間で停止させるためには、アスターン(後転)操作を行う必要がある。今回は、非常時のアスターン操作を自動化し、緊急時にタッチディスプレイから即座に起動できる機能を実装した。図-5 は本機能による自動停止の動作試験結果

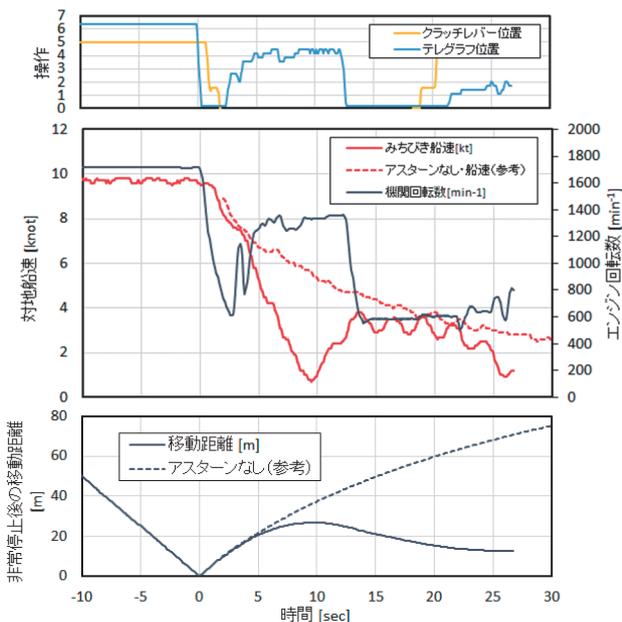


図-5 非常停止機能の動作試験結果

の一つを示している。アスターン操作のシーケンスの制御方法も PLC に接続されたタッチディスプレイ上の GUI から設定することができる(図-6)。

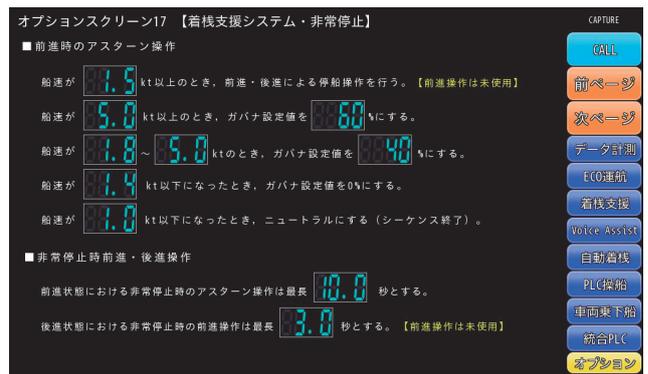


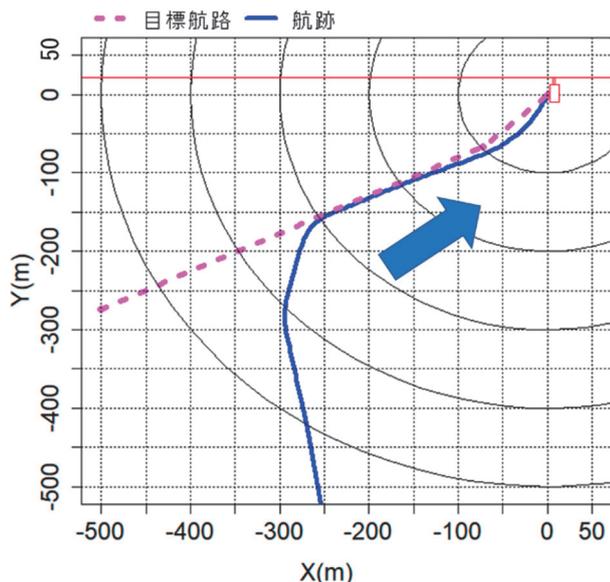
図-6 非常停止機能の設定画面

### 2.2 音声による着棧操船支援機能<sup>3)</sup>

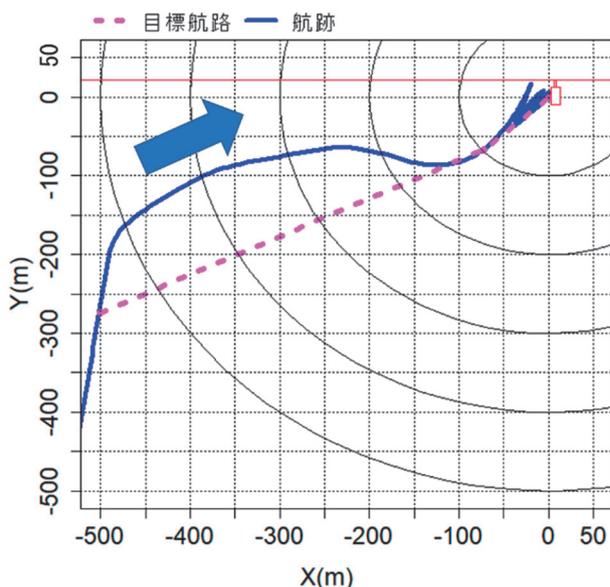
本システムの着棧操船の支援機能について紹介する。前述の通り、操船中、タッチディスプレイには各種のセンサーデータがリアルタイムに表示されているが、着棧操船中にタッチディスプレイを覗きこんでデータを確認しにくい場合もある。そこでタッチディスプレイに接続されたスピーカーから、PLC により入力される人工音声によりモニタリングしているデータを読み上げることで、操船者を支援する機能を実装した<sup>3)</sup>。また、着棧操船を支援するため、設定された目標航路に対して適切なタイミングで音声によるガイダンスを



図-7 音声ガイダンスの例



音声による着岸支援あり (被験者 1)



音声による着岸支援なし (被験者 1)

図-8 操船シミュレータ実験による評価実験から得られた航跡の一例

行う機能も有する。着岸支援の音声ガイダンスの内容の一例を図-7に示す。音声ガイダンスでは図-7中の位置S→位置P, 位置P→位置T, 位置T→位置Oでの変針指示, 位置Tで設定船速にするための減速指示, 風向と風速の情報提供, 位置T, 位置Oまでの距離のアナウンスが行われる。図-8には, 操船シミュレータを用いた, 音声支援の有無に対する着岸操船の比較評価実験から得られた航跡の一例を示す。15名の被験者を対象とした実験により, 音声ガイダンスを活用した着岸操船支援システムを使用した場合, 目標航路に近い航跡が得られており, 音声ガイダンスにより着岸操船の支援に関する一定の効果を確認した。さらに, 支援効果の高い音声ガイダンスを提供することは, 今後の課題である。

ることが出来るよう, 実船で用いられる PC-PLC 間の通信プロトコルを介して, 船体運動のシミュレーションを行えるように設計されている。これにより, 開発中に発生するバグの原因を減らすことで, 制御プログラムの信頼性を向上させた。シミュレーション時の風況は設定した平均風向・風速に基づいて, それぞれ正規分布と Weibull 分布に従って, シミュレーションすることができる。

本数値シミュレーション環境には, (3.1)式に示すような MMG モデルをベースとした操縦運動数学モデルを整備した。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} - m(vr + x_G r^2) &= X_H + X_P + X_R + X_A \\ (m + m_y) \dot{v} + m x_G \dot{r} + (m + m_x) u r &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_A \\ (I_{zz} + m x_G^2 + J_{zz}) \dot{r} + m x_G (\dot{v} + u r) &= N_H + N_P + N_R + N_A \end{aligned} \right\} (3.1)$$

### 3. 自動着岸制御機能の開発

神峰に搭載された制御システムを用いた, 自動着岸制御機能を開発した。本章では, 開発のために構築した数値シミュレーション環境と自動着岸制御アルゴリズムについて述べる。

#### 3.1 数値シミュレーション

システムを開発する上で, 実船でなくとも陸上の開発環境で実装したプログラムの動作を確認できることは, アルゴリズム以外の通信部分を含めた制御プログラム全体の不具合の有無や性能を事前に検証することができるため, システムの安全性を向上させる上でも重要である。陸上での開発環境として, 1. 実船計測結果に基づく低速度域操縦運動数学モデル, 2. 任意の風況の模擬, 3. PLC-PC 間の通信インターフェースを備える数値シミュレーション環境を整備した。本環境で開発された, 制御ソフトウェア実装は一切の変更を加えることなくそのまま本船の制御システムにつないで動作させ

ただし,  $m$ は船の質量,  $I_{zz}$ は船体重心に関する yawing の慣性モーメント,  $m_x, m_y, J_{zz}$ はそれぞれ前後方向と左右方向の

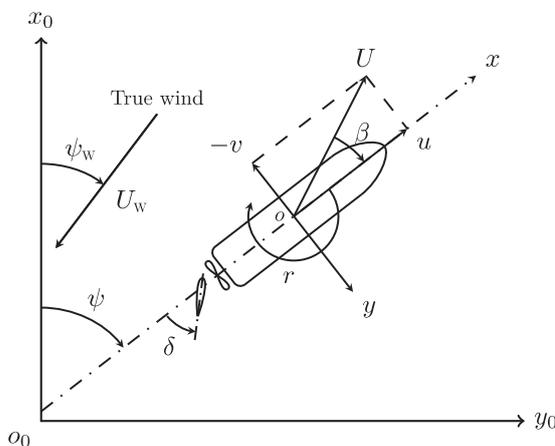


図-9 船体運動の座標系

付加慣性質量と付加慣性モーメント,  $x_G$ はx軸方向の重心位置を表す.  $u, v, r$ はそれぞれ船体中央における前後方向速度, 左右方向速度, 回頭角速度を表し, 速度成分の時間微分をドットで表す.  $X, Y, Z$ はそれぞれ船に働く surge, sway, yaw 方向の外力であり, 添字の  $H \cdot P \cdot R \cdot A$ はそれぞれ操縦運動・プロペラ・操舵・風による成分であることを表す. 船体の流体力の計算には, 必要な係数が少なく, 低速時の大斜航状態の横方向及び回頭方向の流体力を表現できる芳村のモデル<sup>4)</sup>を用いた. さらにプロペラ逆転時の計算は, 発生する不均衡流体力を扱うことができ, 逆転時の舵の流体力を考慮できる北川ら<sup>5) 6)</sup>のモデルを導入した. 風圧力係数は藤原の式より少ない入力パラメータで同様の推定が可能な北村らの手法<sup>7)</sup>を用いて決定した. 今回, 流体力微係数等の同定を行うために, アイドリング状態のプロペラ回転数 3.1 rps を中心に, 舵角 20, 40 度の旋回試験,  $\pm 10$  度,  $\pm 20$  度の Z 試験等の実船計測を実施した. (3.1)式を用いたシミュレーションを行い, 実船実験の計測値と比較して係数の調整を行った. 最終的な数値シミュレーションの結果を図-10 に示す. 調整作業では計測できていない潮流の影響を除外したため航跡に差があるが, 速度成分  $u, v, r$  は実船の運動を概ね再現できている.

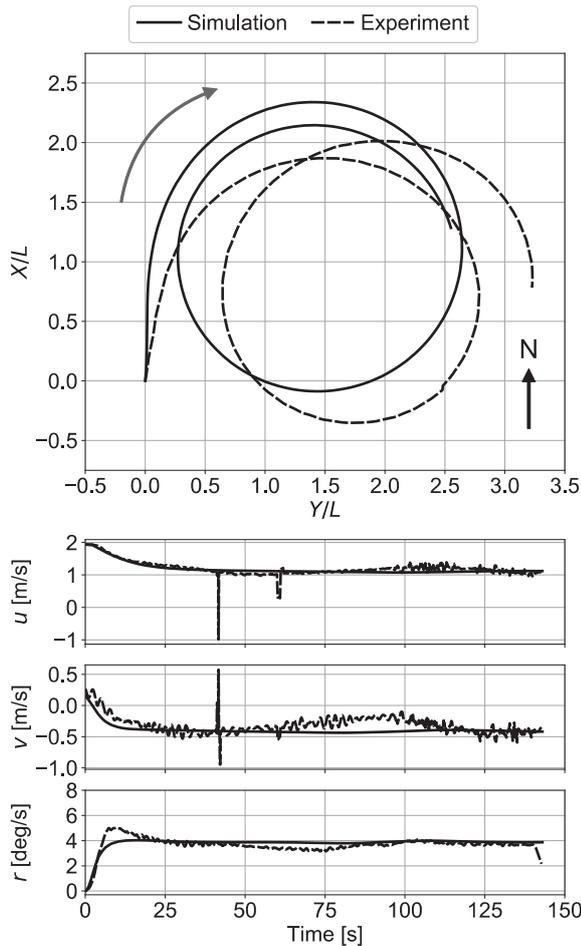


図-10 船回試験の計測値とシミュレーション結果の比較(舵角: 45度, 平均真風速: 2.08 m/s, 平均真風向: 348.4 deg)

### 3. 2 自動着棧制御アルゴリズム

自動着棧制御アルゴリズムは, 自動経路計画と経路追従制御により構成される. 経路追従による着棧操船のメリットはユーザーが予め着棧経路が確認できる点と, 経路と船体位置の偏差を確認することで自動着棧制御が正常に働いているかをユーザーに明示できる点にある. 経路計画では, 制御開始時の船体位置, 船首方位に基づいてベジェ曲線により着棧経路を生成する. 経路を生成した後は, 経路追従アルゴリズムによる着棧操船制御を実行する. 着棧経路を4つ区間に分け, それぞれの区間で制御モードを切り替える. 経路追従アルゴリズムには, 自動運転などで広く用いられている Pure pursuit を採用した. 自動着棧制御は図-11 に示すように青の破線で示される着棧経路上を4つに分けられた区間で制御シーケンスを切り替える方式となっている. さらに本研究では, 主機への過度な負荷を減らすため, 主機はアイドリング回転数固定とし, クラッチの切り替えにより船速を制御する. このため, 減速に必要な距離を確保できるように, 制御モードの切り替え位置を着棧位置から経路に沿って 10, 70, 100 m の位置に配置した. 当然, この切替位置は船毎に各区間で十分に減速するのに必要な航行距離によって調整する必要がある. 船速に関しても図-11 の4つ区間に応じて制御モードを切り替えて制御を行う.

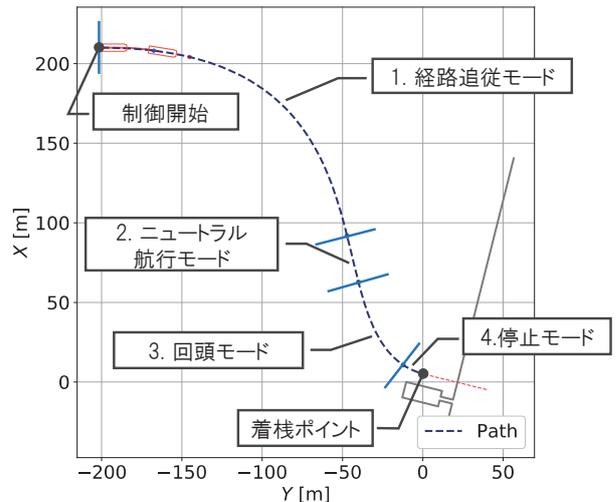


図-11 自動着棧操船の4つの制御シーケンス

### 4. 自動着棧制御の実船試験結果

自動着棧制御機能の検証のために, 広島県尾道市因島の因島マリーナに面する海域にて神峰による実船実験を行った. 図-12 に実験海域の周辺図を示す. 図-12 中央にある棧橋への右舷付けによる着棧操船制御を行った. 棧橋の周辺には, 浅瀬があるため, これを避けるように着棧経路を生成する必要がある. 図-13 に, 自動着棧制御の実験結果を示す. 図中左手に自動着棧制御による航跡を赤の実線で, 10秒毎の自船の位置, 真風向風速を示し, 右手には航跡に対応するクラッチの状態変化を色で示している. このときの計測値の諸量を図-14 に示す. 図-14 において, Distance は着棧目標



図-12 自動着岸制御の実験時の海域図

位置と自船の QZSS 位置の直線距離を表す。制御開始にあつた経路との偏差は棧橋との距離が小さくなるにつれ減少しており、経路に追従できている。船速についても、余裕を持って減速できている。自動着岸制御の終盤では、断続的にクラッチを前進に入れることで船首方位角を調整している。

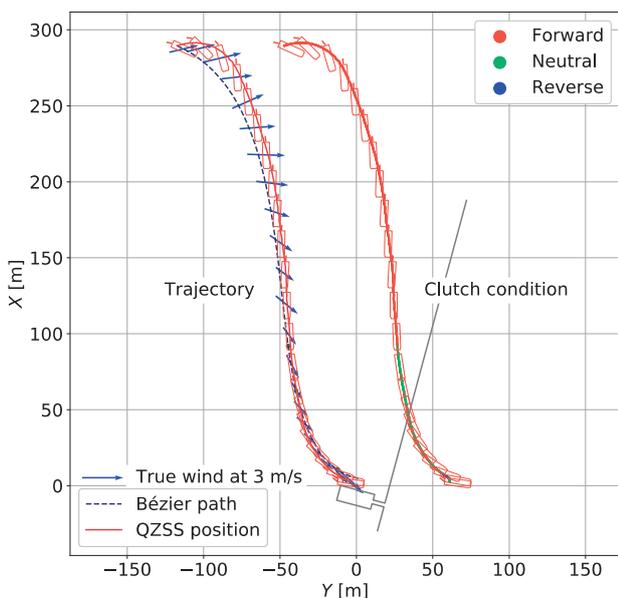


図-13 自動着岸制御の実験結果

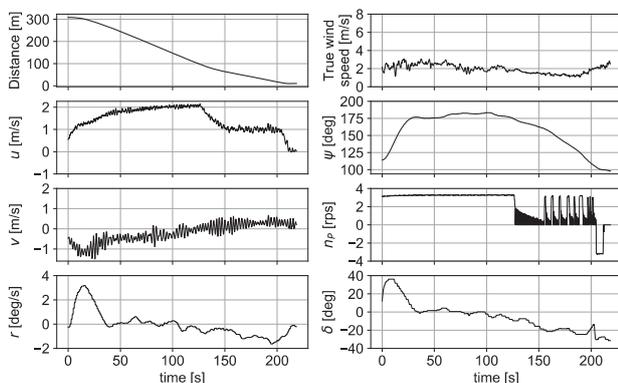


図-14 自動着岸制御時の各計測値

### 5. まとめ

本研究では、実験船「神峰」に実装した着岸操船支援機能と自動着岸制御機能を備えた着岸操船システムについて報告した。ユーザビリティと安全性に配慮した設計を行い、本システムを用いた自動着岸制御の実船試験を実施した。今後、自動着岸アルゴリズムの高度化とともに、着岸操船支援および自動着岸に求められる安全性の評価と向上を併せて行う予定である。

### 謝辞

本報で紹介した音声による着岸操船支援機能の一部は、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの請負調査研究「音声情報を活用した着岸操船支援システムに関する調査」において実施した。また、みちびき対応センチメートル精度測位技術については、電子航法研究所 坂井丈泰様に多大なご協力をいただいた。

### 参考文献

- 1) 角田領, 安藤英幸, 大和裕幸, 宮崎恵子, 宮脇恵治: 離着岸操船における船員の作業負担分析, 日本船舶海洋工学会論文集, 6巻 (2007), pp. 289-295.
- 2) 平田宏一, 宮崎恵子, 齊藤詠子: 小型船舶の運航支援のための着岸操作の分析, 交通・物流部門大会講演論文集, 27巻 (2018)
- 3) E. Saito, M. Numano, K. Miyazaki and K. Hirata: Maneuvering Motion Simulation to Support Berthing Operation of Small Crafts, presented by the International Maritime and Port Technology and Development Conference and International Conference on Maritime Autonomous Surface Ships (2019)
- 4) Y. Yoshimura, I. Nakao and A. Ishibashi: Unified mathematical model for ocean and harbour manoeuvring. Proceedings of MARSIM2009 (2009), 116-124
- 5) 上野道雄, 他: 海難事故に対する初動対応と事故再現・解析技術の高度化に関する研究, 海上技術安全研究所報告 (総合報告), 第17巻第1号 (2017), pp. 1-52
- 6) 北川泰士, 塚田吉昭, 宮崎英樹: プロペラ逆転時のプロペラ・舵の数学モデルに関する検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第20号 (2015), pp. 117-120
- 7) F. Kitamura, M. Ueno, T. Fujiwara, N. Sogihara: Estimation of above water structural parameters and wind loads on ships. Ships and Offshore Structures, Vo. 12, No. 8 (2017), pp. 1100-1108
- 8) B. Paden et al.: A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol. 1, Issue 1 (2016), pp. 33-55.
- 9) R. Coulter: Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm, Technical report, Carnegie Mellon University (1992).