

## 小型実験船の自動着棧システム

澤田 涼平\*, 平田 宏一\*\*, 北川 泰士\*\*\*

### Automatic Berthing System of Small Experimental Ship

by

SAWADA Ryohei\*, HIRATA Koichi\*, and KITAGAWA Yasushi\*\*

#### Abstract

Berthing is one of the most demanding tasks for crews. In order to reduce their workload, we have been conducting research and development on the support and automation of berthing operation through onboard full-scale ship experiments using the small experimental ship "Shinpo," managed by National Maritime Research Institute of Japan. Because berthing maneuvering is based on a low-speed approach, the ship's motion is more easily affected by disturbances such as wind than in conventional ship maneuvering. Thus, we have developed an automatic berthing control technique based on a path-following control that automatically generates and follows a berthing path. We verified the performance of the system through experiments using Shinpo. This report presents the results of research regarding automatic berthing control. First, we introduce the architecture of the onboard control system consisting of a programmable logic controller (PLC) for automatic berthing. The experimental vessel can be controlled by a PLC or a personal computer connected via RS-232C. Then, the numerical simulation and experimental results of automatic berthing using the experimental ship with the proposed system are presented. As future prospects, we also present the results of a study on advanced path planning and redundant position measurement utilizing a LiDAR sensor.

---

\* 知識・データシステム系, \*\* 環境・動力系, \*\*\* 流体性能評価系

原稿受付 令和4年7月22日

審査日 令和4年8月19日

## 目 次

1. まえがき .....	8
2. 対象船と自動着棧システムの概要 .....	8
2.1 小型実験船「神峰」 .....	8
2.2 操船自動化システム .....	9
2.3 自動着棧の制御・監視用 GUI .....	10
3. 数値シミュレーションのための運動モデル .....	11
4. 自動着棧制御アルゴリズム .....	13
4.1 自動着棧アルゴリズムの概要 .....	13
4.2 風外乱補償制御 .....	14
5. 結果 .....	15
5.1 自動着棧制御の数値シミュレーション結果 .....	15
5.2 自動着棧制御の実船実験結果 .....	16
5.3 模擬故障によるシステムの検証 .....	17
6. LiDAR を用いた自動着棧に関する研究 .....	18
6.1 障害物を考慮した経路計画システム .....	18
6.2 SLAM による自己位置推定 .....	19
7. 結言 .....	21
References .....	21

## 1. まえがき

着棧操船は、船員への負荷の高い作業のひとつである。船員への負荷低減を目的として、著者らはこれまで、海上技術安全研究所が管理する小型実験船「神峰」を用いた実船実験を通して、着棧操船の支援や自動化に関する研究開発を進めてきた。着棧操船は低速でのアプローチを基本とするため、通常の操船と比べて船体運動が風などの外乱の影響を受けやすい。筆者らはこれまで、着棧のための計画経路を自動生成し、低速航行かつ風外乱下においてもこれを追従する経路追従制御技術を開発してきた<sup>1)2)3)4)</sup>。本報告では、これまでに開発してきた自動着棧システムと、これを搭載した実験船「神峰」の数値シミュレーションおよび実船実験結果を示す。また、より発展的な技術として、LiDAR センサを活用した高度な経路計画や船位計測手段の冗長化に関する検討結果<sup>5)6)</sup>についても示す。

## 2. 対象船と自動着棧システムの概要

## 2.1 小型実験船「神峰」

本研究では、海上技術安全研究所が管理する小型実験船「神峰」(図1)を対象として自動着棧システムの開発を行った。神峰の主要目を表1に示す。本船は、一軸一舵であり、自動着棧においては油圧操舵システムや主機の制御を PLC (Programmable Logic Controller) により行う。神峰では自動着棧操船システムに用いる計測機器として、位置情報にセンチメートル級測位補強サービス (CLAS) に対応した準天頂生成システムみちびき (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) の受信機を搭載し、方位角センサにサテライトコンパス Furuno SC-50 を搭載している。その他にプロペラ回転数、エンジン回転数、主機負荷の推定値、風向・風速等の各種のデータを計測することが可能で、モニタリングや制御等に利用することができる。



図1 実験船「神峰」

表1 実験船「神峰」の主要目

Subjects	Value
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

## 2.2 操船自動化システム

実験船のアクチュエータの制御および、センサ等との通信については、PLCを中心とした操船自動化システムを開発し搭載している。操船自動化システムの構成を図2に示す。操船自動化システムの中核をなすPLCにはタッチパネルが接続されており、各種センサ値等の状態モニタリングやアクチュエータ等の制御を行うことができる。また、操船自動化システムへはRS-232Cを介して指令コマンドを送信することで制御、センサ値の読み取りを行うことができる。この機能を利用することで制御用パーソナルコンピュータ(PC)から実験船を制御することができる。本報告では、自動着岸制御の計算および指令はPCで実行した。PCによる自動制御中、操船者は任意のタイミングでPCからの通信を遮断し手動操船に切り替えることができる他、タッチパネルから起動できる緊急停止機構を安全策として用意している。

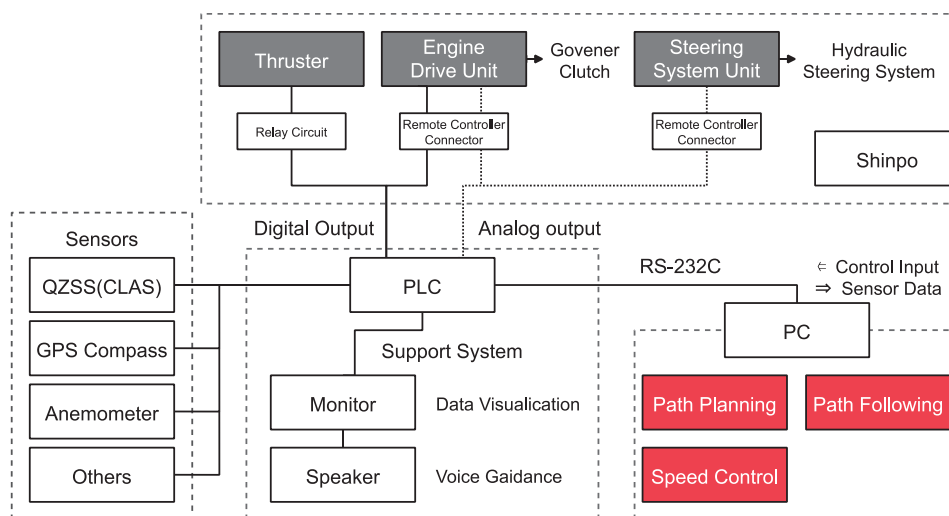


図2 操船自動化システムの構成

## 2.3 自動着栈の制御・監視用 GUI

実験船やシミュレータによる自動着栈の検証において、PC上で動作する自動着栈のプログラムを操作するためのグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）を開発した。図3に開発したGUIのスクリーンショットを示す。GUIには、実験船で取得できる情報と、制御計算を実行するPC上の計算結果などを統合し、素早く状況認識ができるようにデータを配置、可視化している。3Dプロットエリアでは、自船および陸地の情報はWebGLを用いて3DCGで表示する。3DCGプロットエリアはマウスや画面上部のボタンにより視点を変更可能で、経路追従制御中の状況を簡単に把握できる。また各種データについても、例えば舵角や回頭角速度に関しては値だけでなくメータ表示や過去の時系列をあわせて表示することで、将来的な危機予測が可能ないように設計している。可視化のフロントエンド部は描画能力に優れたJavaScript（Electron）、制御・通信を行うバックエンド部は高速な処理が可能なプログラミング言語であるJuliaで実装している。図4に自動着栈ソフトウェアの構成を示す。可視化と制御・通信のプロセスを切り分けることで、制御・通信の処理が可視化処理によって遅延なく処理できるように設計した。

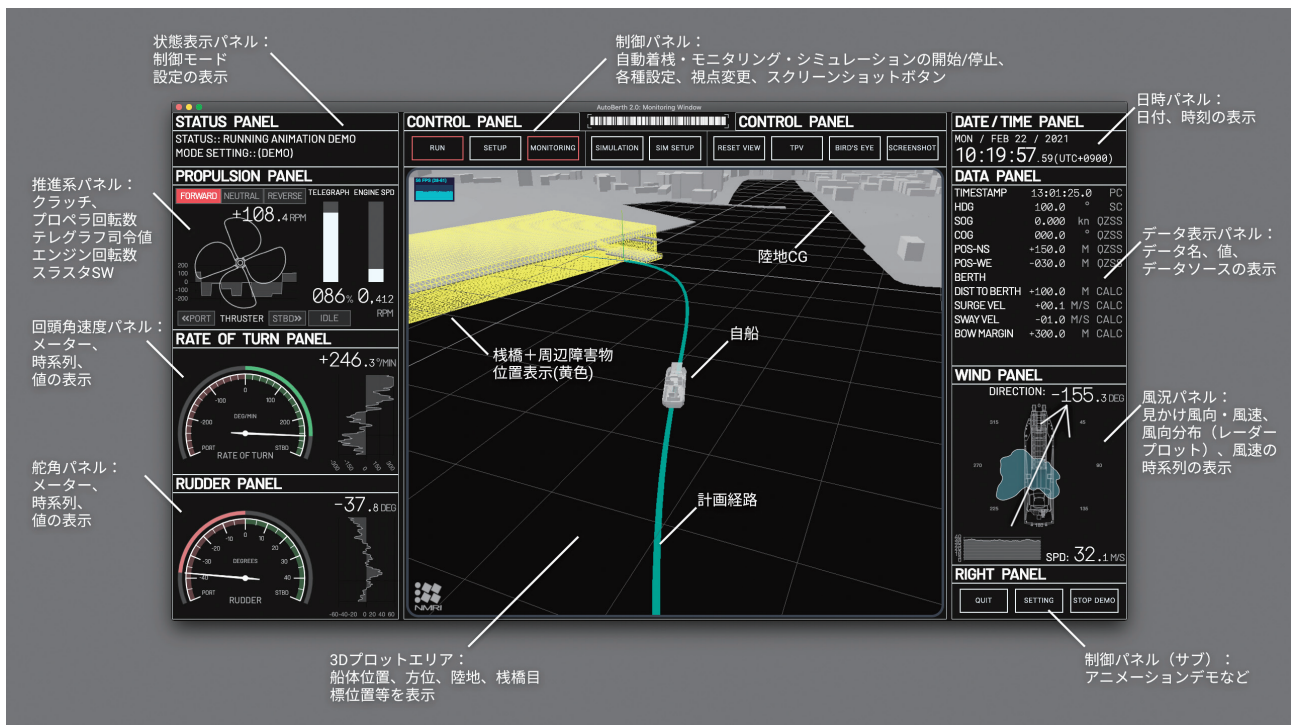


図3 自動着栈制御と状態監視のためのグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）

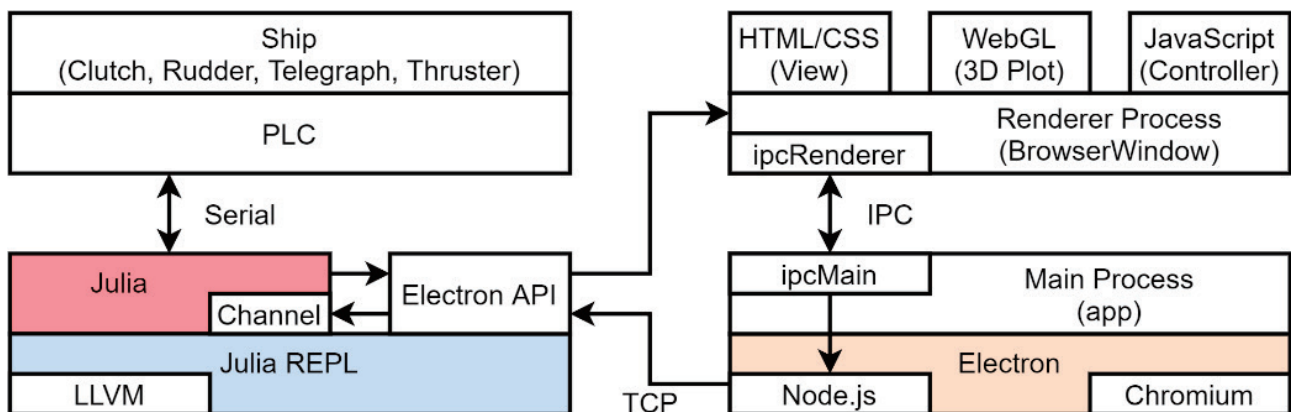


図4 パーソナルコンピュータ上で動作する自動着栈ソフトウェアの構成

### 3. 数値シミュレーションのための運動モデル

本節では、小型実験船「神峰」の操縦運動数学モデルの概要を示す。自動着棧システムの開発のための神峰の船体運動数学モデルについては、文献1)に詳しく説明しているので参照されたい。

船体運動の座標系を図5に示す。空間固定座標系 $o_0-x_0y_0z_0$ は、 $x_0$ を北、 $y_0$ を東向きに取る。船体固定座標系の原点 $o$ を船体のミッドシップ位置に取る。アルゴリズムの設計において、低速航行時の応答と外乱、特に風の影響を評価することが必要である。この目的のもと、次式のようなMMGモデルをベースとした操縦運動数学モデルを用いた。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - m(vr + x_G r^2) &= X \\ (m + m_y)\dot{v} + mx_G \dot{r} + (m + m_x)ur &= Y \\ (I_{zz} + mx_G^2 + J_{zz})\dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) &= N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

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 (surge)、左右方向速度 (sway)、回頭角速度 (yaw) を表し、速度成分の時間微分を上付きのドットで表す。 $X, Y, Z$ はそれぞれ船に働く surge, sway, yaw 方向の外力であり次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R + X_A \\ Y &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_A \\ N &= N_H + N_P + N_R + N_A \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、

$X_H, Y_H, N_H$ : 操縦運動によって船体に作用する流体力、

$X_P, Y_P, N_P$ : プロペラによる流体力、

$X_R, Y_R, N_R$ : 舵による流体力、

$X_A, Y_A, N_A$ : 船体に働く風圧力。

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次式の芳村のモデル<sup>7)</sup>を用いた。

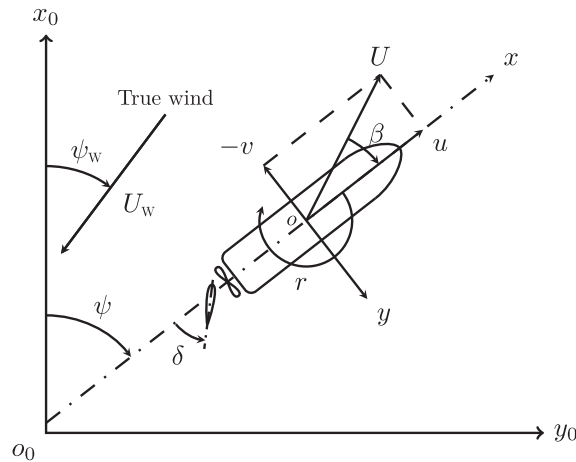


図5 船体運動と風の座標系

$$\left. \begin{aligned} X_H &= \frac{1}{2} \rho L d \left[ \left\{ X'_{0F} + (X'_{0A} - X'_{0F}) |\beta|/\pi \right\} uU + (m'_y + X'_{vr}) Lvr \right] \\ Y_H &= \frac{1}{2} \rho L d \left[ Y'_v v|u| + Y'_r Lur - \frac{C_D}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} |v + C_{rY}rx| (v + C_{rY}rx) dx \right] \\ N_H &= \frac{1}{2} \rho L^2 d \left[ N'_v vu + N'_r L \cdot |u|r - \frac{C_D}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} |v + C_{rN}rx| (v + C_{rN}rx) x dx \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $X'_{0F}$ は前進時の抵抗係数、 $X'_{0R}$ は後進時の抵抗係数、 $X'_{vr}, Y'_v, Y'_r, N'_v, N'_r$ は流体力の微係数であり、 $C_D, C_{rY}, C_{rN}$ は Cross-flow drag に関する係数を表す。付加質量は元良チャートの重回帰式<sup>8)-10)</sup>より、前進および後進時の抵抗係数は実船のアイドリグ航行時の速力試験結果および過去の水槽試験結果より決定した。微係数の値については、文献1)を参照願う。

船体に働く風圧荷重による surge 方向および sway 方向の力および回頭モーメントは次式の通り計算し、計算に必要なパラメータは北村らの方法<sup>11)</sup>を用いて求める。

$$\left. \begin{aligned} X_A &= \frac{1}{2} \rho_A A_F U_A^2 C_{AX}(\psi_A) \\ Y_A &= \frac{1}{2} \rho_A A_L U_A^2 C_{AY}(\psi_A) \\ N_A &= \frac{1}{2} \rho_A A_L L_O U_A^2 C_{AN}(\psi_A) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで $\rho_A$ は空気の密度、 $A_F$ および $A_L$ は水線面上の構造物の正面および側面の投影面積、 $U_A$ は見かけの風速。風圧力係数 $C_{AX}, C_{AY}, C_{AN}$ は図6に示すとおりである。ただし、 $\psi_A$ は北村らの論文の定義<sup>11)</sup>に倣い船体に対する迎角として定義されているため、真風向 $\psi_W$ とは角度方向の正の向きが逆の関係にある。また $\psi_A$ は船首方位からの風を0度とする。真の風ベクトル $U_W$ と見かけの風ベクトル $U_A$ の関係は次式で与えられる。

$$U_A = [u_A, v_A] = \begin{bmatrix} -U_W \cos \psi_W - u \cos \psi + v \sin \psi \\ -U_W \sin \psi_W - u \sin \psi - v \cos \psi \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

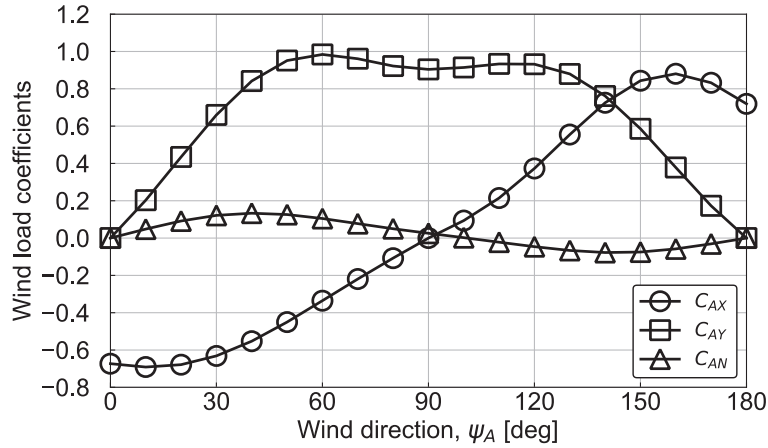


図6 推定した風圧力曲線

変動風のシミュレーションは次のように行う。再現する変動風の風速と風向の確率分布はそれぞれ Weibull 分布と正規分布で表されるとした。

$$f_{U_W}(U_W | \bar{U}_W, a, \lambda) = \frac{a}{\lambda} \left( \frac{U_W}{\lambda} \right)^{a-1} \exp \left( - \left( \frac{U_W}{\lambda} \right)^a \right) \quad (6)$$



$$f_{U_W}(\psi_W | \bar{\psi}_W, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\psi_W - \bar{\psi}_W}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

ここで $\bar{U}_W$ は真風速の設定値、 $\bar{\psi}_W$ は真風向の平均値を表す。(6)式の形状係数 $a$ は2.0に設定した。また、尺度パラメータ $\lambda$ は次のように計算できる。

$$\lambda = \frac{2\bar{U}_W}{\sqrt{\pi}} \quad (8)$$

#### 4. 自動着棧制御アルゴリズム

##### 4.1 自動着棧アルゴリズムの概要<sup>1)</sup>

本節では、海技研で開発している自動着棧制御アルゴリズムの概要を示す。自動着棧制御アルゴリズムは、経路計画と経路追従制御の2つからなる。

経路計算では、自船の初期位置と船首方位角度、あらかじめ設定された目標の着棧位置と最終船首方位角の条件を満たす着棧経路を設定する。着棧経路はベジェ曲線を用いて表現され、制御の開始地点から目標の着棧位置へとなめらかに接続する経路が計画される(図7の(a)中の破線)。この経路を追従する制御にはPure pursuitをベースとした経路追従制御が使用される(図7の(b))。Pure pursuitは、ここでは経路上を移動する自船前方の目標点に対して、自船の船首方位角を合わせるように制御する手法である。目標点の方位へ船首方位角を制御するためには、PD制御により構成されたオートパイロットが用いられる。さらに、追従時の風外乱の影響を小さくするために、船体横方向の風圧力と舵の横力をバランスさせるフィードフォワード制御を組み合わせた2自由度制御系を構成している。これについては次節で述べる。船速については、実験の安全性を確保するためにエンジン回転数を最低限のアイドル状態にした上で、クラッチの切り替えにより前・後転および中立状態の切り替えを行うことで制御する。さらに図7の(a)に示すように経路上を4つの区間に分けて制御モードを切り替える設計としており、船速の目標値やクラッチ制御の設定を変更しながら自動着棧制御を実行する。

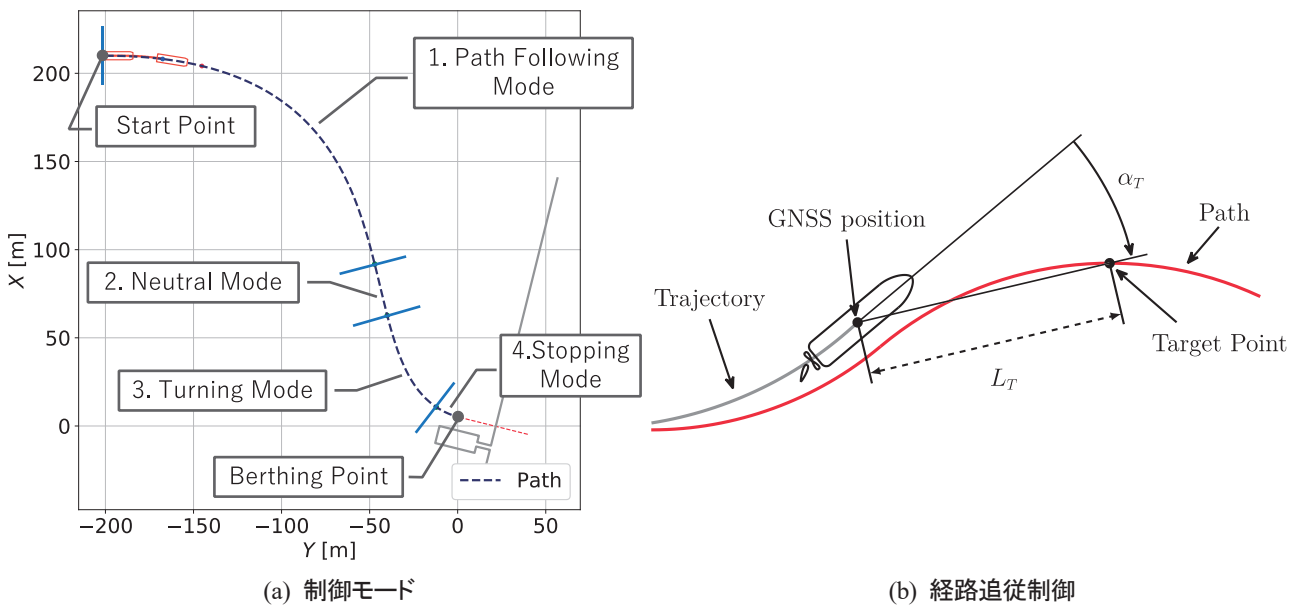


図7 自動着棧制御アルゴリズム<sup>4)</sup>

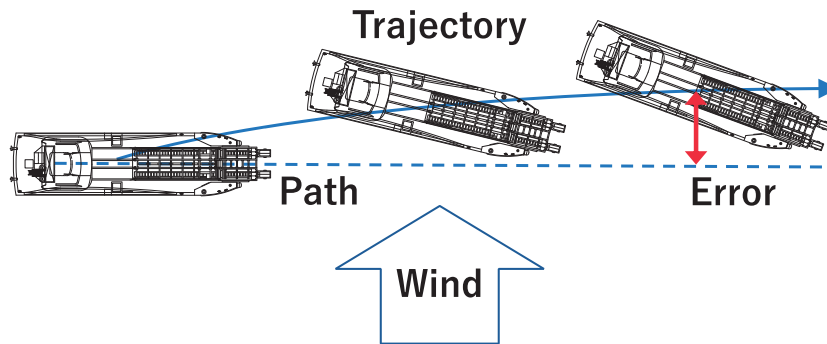
4.2 風外乱補償制御<sup>2)</sup>

図8 経路追従制御中の風外乱の影響

本節では、前節で示した自動着棧の経路追従制御に関して、風外乱下で自動着棧を想定した制御手法を説明する。風外乱による経路追従制御への影響として、経路からの偏差が発生する様子を図8に示す。経路からの逸脱が大きくなる要因の一つに、船が横から風を受ける場合がある。この風により発生する経路偏差を軽減することで経路追従制御の精度を高めることができる。

そこで風圧力の船体横方向にかかる成分をキャンセルするような、操舵量を決定するフィードフォワード制御系を設計する。そのために、操舵による船体に働く横力について、神峰の実船試験のデータから構築した前節の操縦運動数学モデルを解析した。解析対象のシミュレーション条件は表2に示す、前進・ニュートラル・逆転の状態に対応する各運動である。前進とニュートラルに関しては主機アイドリング回転数で船が直進するときの運動状態を基準としている。逆転については、自動着棧制御における停止モードでのみクラッチが逆転に入るため、船速がゼロの状態を基準として解析した。解析結果を図9に示す。 $D_y$ は舵を切ったときの、船体横方向に働く舵力を $F_{dy}$ としたときに、次の線形の関係式を満たすように求めた係数である。

$$F_{dy}/(m + m_y) = D_y \delta \quad (9)$$

ここで $m$ は船の質量、 $m_y$ はSway運動の付加質量、 $\delta R$ は操舵量である。このうち、操舵量がゼロのときの $D_y$ の値はそれぞれ前進：-0.003272、ニュートラル：-0.002771、逆転：0.0となった。この係数を用いて各クラッチの状態における操舵により発生する横力を推定する。風圧力については前節で説明した通り、北村らの方法を用いて計算されている。船体横方向にかかる風圧力 $Y_A$ は風圧力係数 $C_{AY}$ を用いて(10)式で計算される。

$$Y_A = \frac{1}{2} \rho_A A_F U_A^2 C_{AY}(\psi_A) \quad (10)$$

ここで、 $\rho_A$ は空気の密度、 $A_F$ は水線面上の構造物の側面投影面積、 $U_A$ と $\psi_A$ はそれぞれ風向風速計の設置位置における見かけの風速および風向を表す。ただし、 $\psi_A$ は北村らの論文<sup>11)</sup>の定義に倣い船体に対する迎角として定義されている。

表2 係数推定のためのシミュレーション条件

	Forward	Neutral	Reverse
$u$ [m/s]	2.072	2.072	0.0
$v$ [m/s]	0.0	0.0	0.0
$r$ [deg/s]	0.0	0.0	0.0
$nP$ [rps]	3.09	0.0	-3.09



結局、横方向風圧力をキャンセルする操舵量は、(9)式および(10)式から  $Y_A = F_{dy}$  を解くことで求めることができる。求められた舵角に基づいて転舵することで、風圧力の船体横方向成分をキャンセルできるが、あくまで推定値であり、旋回方向の風圧モーメントや潮流など他の外乱要素やセンサ値の誤差が生じる可能性がある。これらの要因で発生する誤差は、フィードバック機構を持つ Pure pursuit と Heading Control System がまとめて補償する。結局、風圧力補償のフィードフォワード制御部が計算する操舵量  $\delta R_{ff}$  と Pure pursuit と Heading Control System のフィードバック制御部から計算される操舵量  $\delta R_{fb}$  の和  $\delta R_{ff} + \delta R_{fb}$  が実際に操舵する量となる。以上が風外乱補償型経路追従制御の流れとなる。

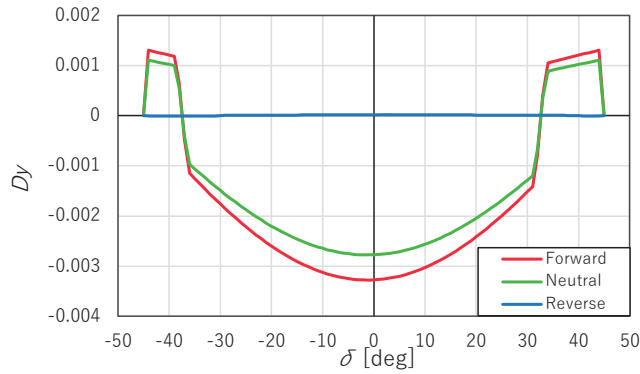


図9 舵により発生する横力の係数曲線

## 5. 結果

### 5.1 自動着棧制御の数値シミュレーション結果<sup>3)</sup>

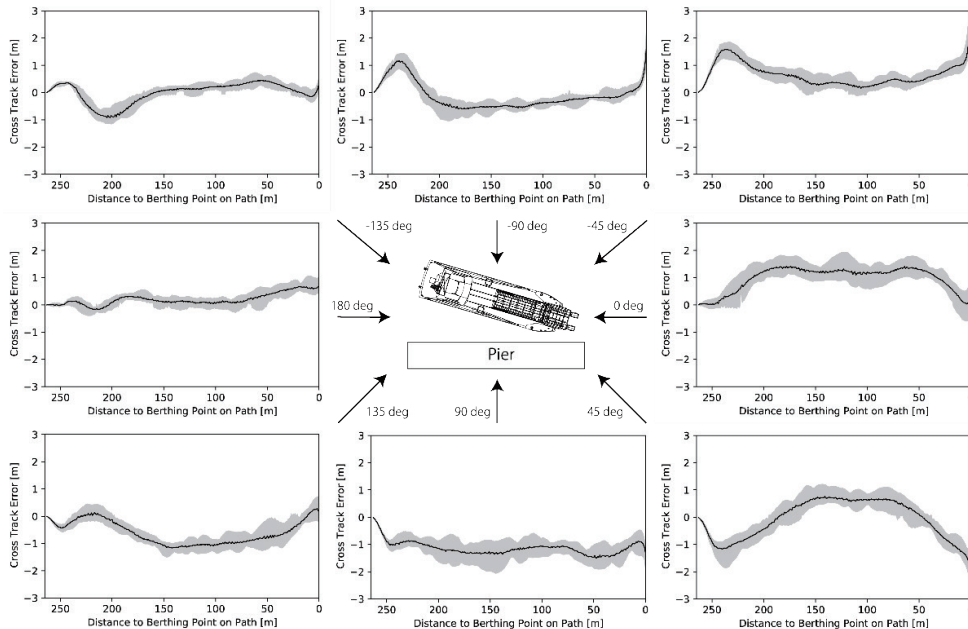


図10 変動風下 (8方向) における自動着棧制御中の経路偏差

風外乱補償制御を導入した自動着棧制御の性能を評価するため、神峰の運動モデルを用いて数値シミュレーションを実施した。図10に数値シミュレーションの結果として、自動着棧制御中の経路偏差を示す。ここでは着棧時の角度 (棧橋に並行) を0度として、8方向から変動風が吹いている状況でのシミュレーションとなってい

る。変動風は、因島マリーナ付近で一定期間計測された風向の分布に基づき、与えられた平均風向に対して、分散が $\sqrt{30}$  deg となるように正規分布でサンプリングされた。風速は、Weibull 分布に基づきシミュレーションしている。この例では、各風向ごとに 10 回ずつシミュレーションを実施し、プロットにおいては着栈点から 1 m 毎に経路偏差の最大値と最小値を算出してグレーの領域として示している。黒の実線は、10 回のシミュレーションの平均値を表している。風速は平均が 7.0 m/s となるように設定してあるが、いずれのケースにおいても着栈に成功した。風外乱により経路偏差が発達することなく制御できていることがわかる。

## 5.2 自動着栈制御の実船実験結果<sup>2)</sup>

風外乱補償のフィードフォワード制御を組み込んだ経路追従制御の効果を確かめるため、実船による試験を行った。実験は広島県尾道市因島周辺海域（因島マリーナ）で実施した。この実験では、栈橋周辺にある浅瀬を回避するように経路を自動生成し、これを追従することで自動着栈制御を実施する。実験では浮き栈橋への右舷付による着栈を行った。目標の着栈位置から栈橋までの直線距離は、制御の誤差と係船ロープが取れる距離のバランスを勘案して、5 m とした。

図 11 と図 12 に、風外乱補償型経路追従制御の実船実験結果を示す。この実験では、図 12 に示すように平均して 6.38 m/s の真風速が吹いている状況であるが、最初に生じた偏差を徐々に小さくしていき、栈橋から 50 m/s の距離、つまり制御精度が要求される回頭モードの前までに偏差はほとんどなくなっている。

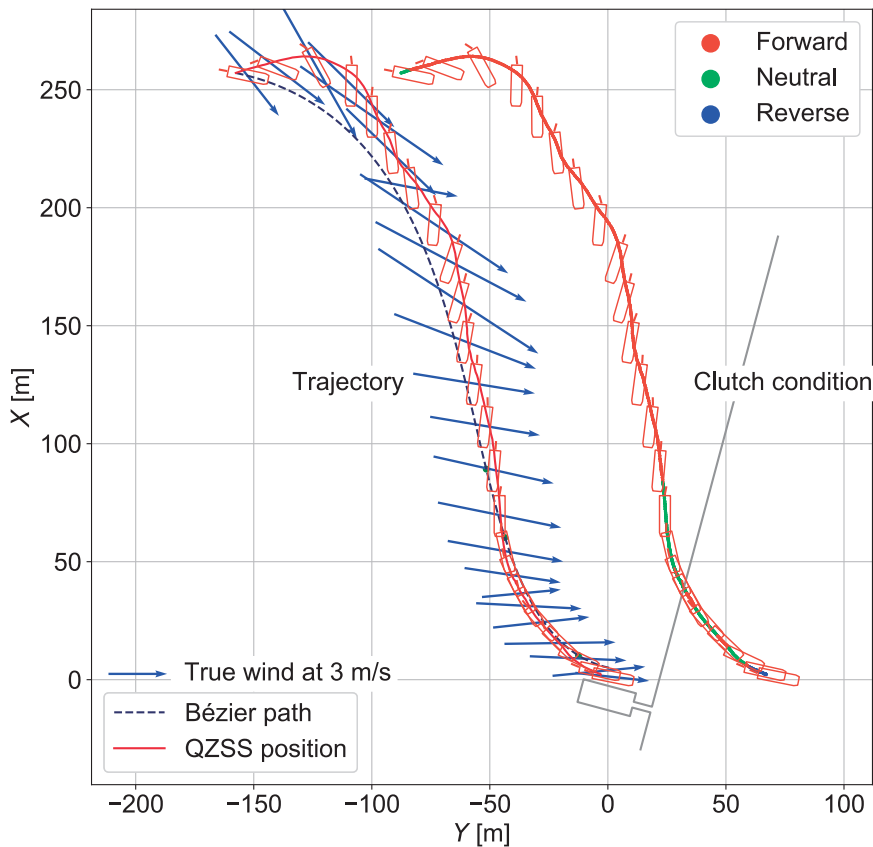


図 11 実船による自動着栈制御の航跡

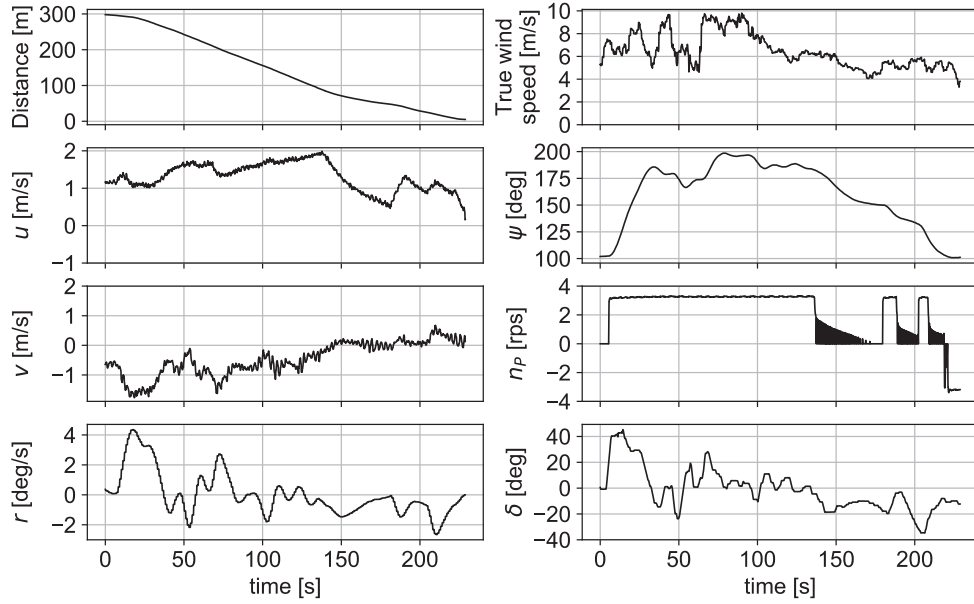


図12 図11の実験における各計測値の時系列

### 5.3 模擬故障によるシステムの検証<sup>4)</sup>

自動運航システムの一部として、自動着棧システムの安全性の検証は重要な課題である。本節では、その一例としてセンサ系の故障を想定した実験である「模擬故障」の検証結果の一部を示す。詳しくは文献<sup>4)</sup>を参照されたい。ここでは、QZSSの代替として船用GPSを使用した場合について、自動着棧の実験結果を示す。結果を図13に示す。GPSに切り替えた場合でも、制御への影響は小さいことが見て取れる。ここで、みちびきについては、実験船に搭載する2社の製品とも10Hzで動作するが、GPSは1Hzで動作する。今回の実験結果からは、データの更新周期が異なっても、着棧制御に大きな影響は見られなかったと言える。

一方で、GPSとQZSSとの計測値の比較を行った。図14が自動着棧時の棧橋までの距離、また緯度・経度方向の位置を直交座標系に変換した値の差分を示したものである。この例では、着棧直前では誤差が小さくなったため着棧は成功したものの、速度が出ている自動制御中盤における位置誤差が大きくなっていることがわかった。このような誤差に対するキャリブレーション等の必要性などセンサ冗長系の課題の洗い出しができた。

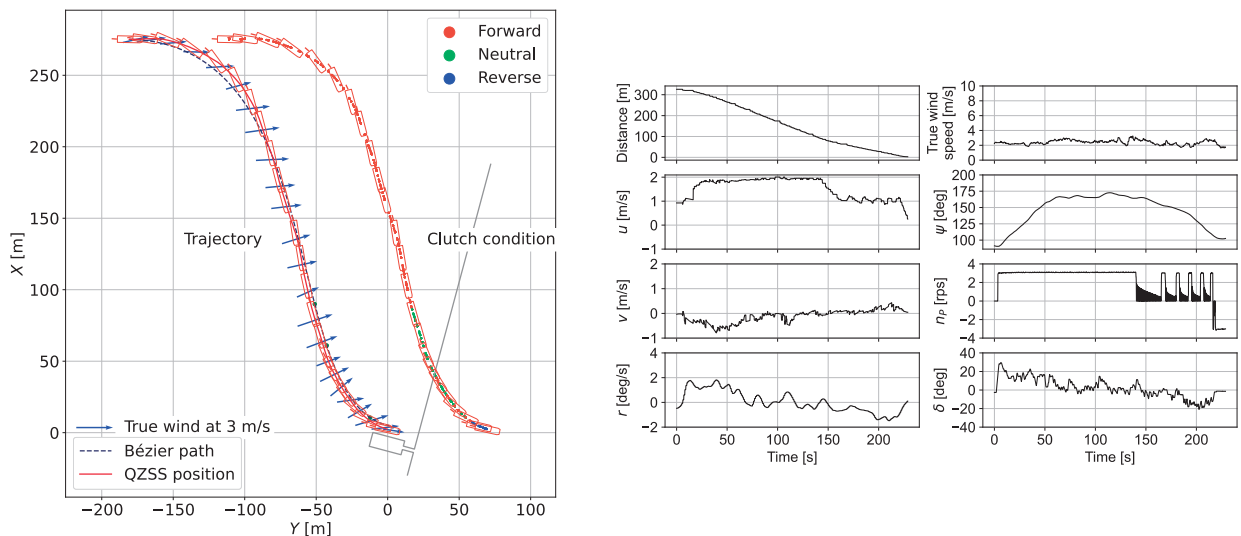


図13 GPSセンサを船体位置情報として利用した場合の自動着棧制御の航跡(左)と計測値(右)

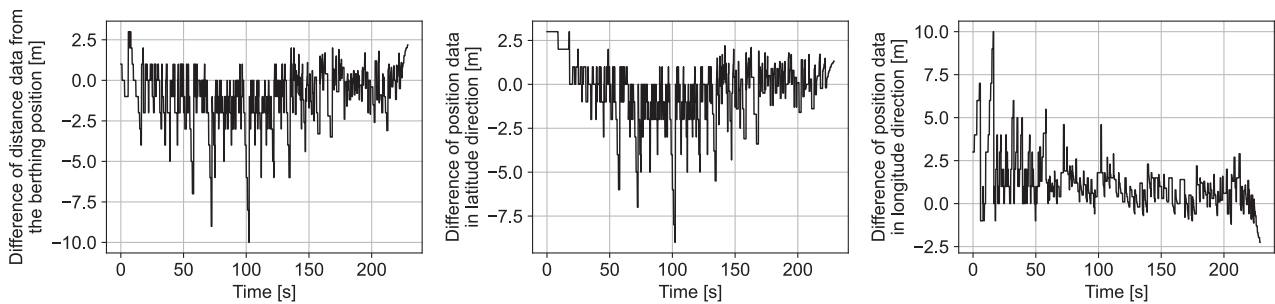


図 14 GPS と QZSS から得られた位置データの誤差

## 6. LiDAR を用いた自動着栈に関する研究

自動着栈システムの高度化を目的として、LiDAR を活用した研究も進めている。LiDAR とはレーザを物体に照射し、その反射光が帰ってくるまでの時間等から物体までの距離を図るセンサである。本章では、LiDAR を用いた経路計画に関する研究と、船体の自己位置推定に関する研究を報告する。

### 6.1 障害物を考慮した経路計画システム

まず、障害物を考慮した経路計画システムとして、実験船に搭載した LiDAR を用いて計測した栈橋周辺の点群データに基づいて、経路計画の計算を行った例を示す。前節までに説明してきた経路計画の部分では、自船の位置と船首方位をもとに、栈橋までの滑らかな経路を自動で生成するために、ベジエ曲線を用いた経路計画アルゴリズムを採用した。このアルゴリズムある程度船の初期位置が変化しても、栈橋への適切な進入角度を維持する経路を生成できる。一方で、このアルゴリズムは周囲の地形や栈橋の周囲にある浅瀬等の航行環境を考慮せずに船体位置と着栈の目標点から幾何学的に経路を計算するため、自船の初期位置によっては当然ながら実際に航行ができないような経路を生成してしまう問題があった。そこで、経路探索アルゴリズムのひとつである Hybrid-state A\* アルゴリズムを適用し、航行環境を考慮した着栈制御に適切な経路を生成する手法を検討した。

Hybrid-state A\* アルゴリズムの概要を図 15 に示す。Hybrid-state A\* アルゴリズムは、A\* と呼ばれる古典的な経路探索アルゴリズムをベースとしている。ベースとなった A\* では、まず探索領域をグリッド状に分割し、ゴールまでの経路を探索する。Hybrid-state A\* アルゴリズムでは、この探索方法を工夫することでグリッド状に分けられた探索空間において連続的に経路を求めることができたり、袋小路となるような経路を避けて効率的な探索が行えるなどの利点を有する。これ以上の詳細な説明は本報告では割愛するが、このアルゴリズムを用いることで、障害物を考慮した経路計画を行うことができる。

実際に実験船を用いて計測した因島マリーナ付近の点群に基づいて、Hybrid-state A\* アルゴリズムにより経路計画の計算を実施した例が図 16 である。図中には、地図の上に経路の探索時に計算したコストマップを表している。コストが高い部分は、障害物等により栈橋から遠い経路になることを意味している。実線で描かれた経路は、自動着栈の開始直後、自船前方にある岸壁から距離を取るために後進しながら船の向きを栈橋に向けるような経路を計算している。このように周囲の状況に応じた経路計画についても検討を進めている。

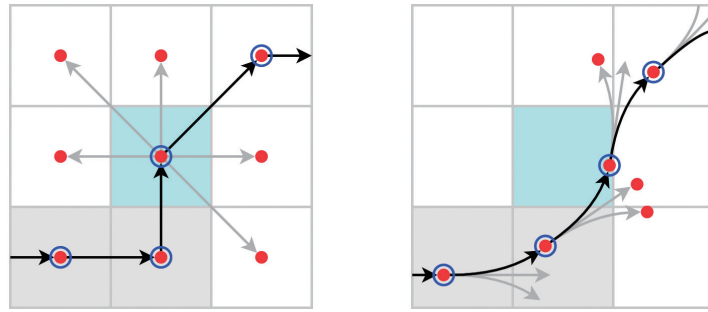


図 15 探索アルゴリズムの比較：古典的な A\* (左) と Hybrid-state A\* (右) <sup>5)</sup>.

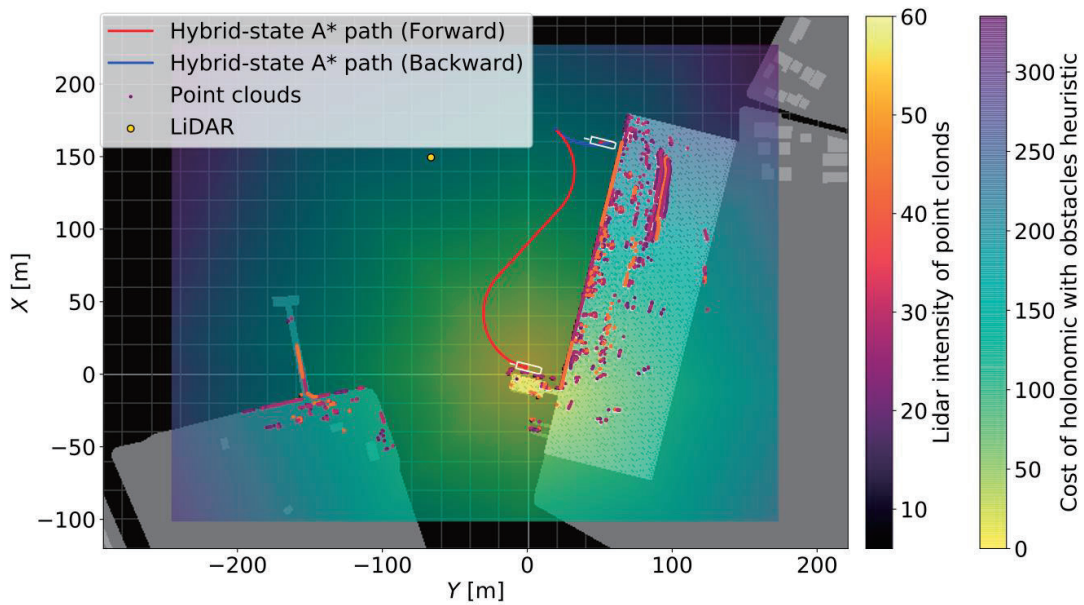


図 16 LiDAR で計測した点群データに対する Hybrid-state A\*を用いた経路計画の例 <sup>5)</sup>.

## 6.2 SLAM による自己位置推定

別の研究として、GNSS とは別の測位及び船首方位角の推定的手段として、特に高い精度が要求される着岸時の利用を想定して、LiDAR を用いた自己位置推定技術についても実験を行っている。ここでは、LiDAR を用いた SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術を海上に適用し、棧橋周辺の海岸の点群地図の作成と位置測位および船首方位角推定の性能を検証した結果を示す。この研究では、図 17 に示すように LiDAR と 9 軸の慣性センサ (IMU) を船上に設置し、海上から因島マリーナ周辺の陸地の点群を測定した。使用したセンサは LiDAR が Velodyne VLP-32C である。また、LiDAR の値を補正するために利用する IMU は 9 軸センサ (3 軸加速度+3 軸ジャイロ+3 軸地磁気) の WitMotion 社製センサを使用した。9 軸センサについては、出力の周波数を 50Hz に設定した。9 軸センサを用いて LiDAR の本体の動きを計測するために、地磁気センサへの影響を考慮して積層式 3D プリンタを用いて PLA 樹脂で治具を作成し、LiDAR へ固定した。治具は、IMU のケーブルを除いて、LiDAR のレーザの照射範囲を遮らないように設計した。LiDAR 等のセンサーデータを海上で取得した後、rosbag という ROS のデータベース形式で保存したのち、陸上で SLAM による地図作成と自己位置推定を実施した。SLAM のアルゴリズムとして、LIO-SAM<sup>12)</sup>をベースとして、これに船体の揺れや海上計測特有の問題を回避するための拘束条件を SLAM の計算に加えたものを用いた。





図 17 実験に用いた LiDAR<sup>6)</sup>

実際に SLAM により作成された点群地図を図 18 に示す。参考までに Google Earth から取得した衛星画像を重ねているが、桟橋周辺の海岸の点群地図が大きな歪みなく作成できていることがわかる。また、SLAM により推定された船体位置と、同時に計測したみちびき(QZSS)と船用 GPS の航跡の比較を行った。この結果を図 19 に示す。QZSS および GPS、SLAM の位置データから船体ミッドシップ位置の計算を行い、そのミッドシップ位置の航跡を示している。QZSS と GPS はそれぞれが搭載する GPS コンパスの機能より算出される方位角を、SLAM は LIO-SAM で推定された姿勢から求められる Yaw 角を用いてミッドシップ位置を計算した。ここで、SLAM による自己位置情報の原点および座標軸の角度は、QZSS の初期値を基準にして修正している。また計測中の QZSS の測位情報は常に Fix 解となっていた。この例では、桟橋付近では SLAM による推定値は、普段自動着桟制御に利用している QZSS の計測値と比較しても、よい一致を示しており、十分な精度で船体位置を推定できることがわかる。

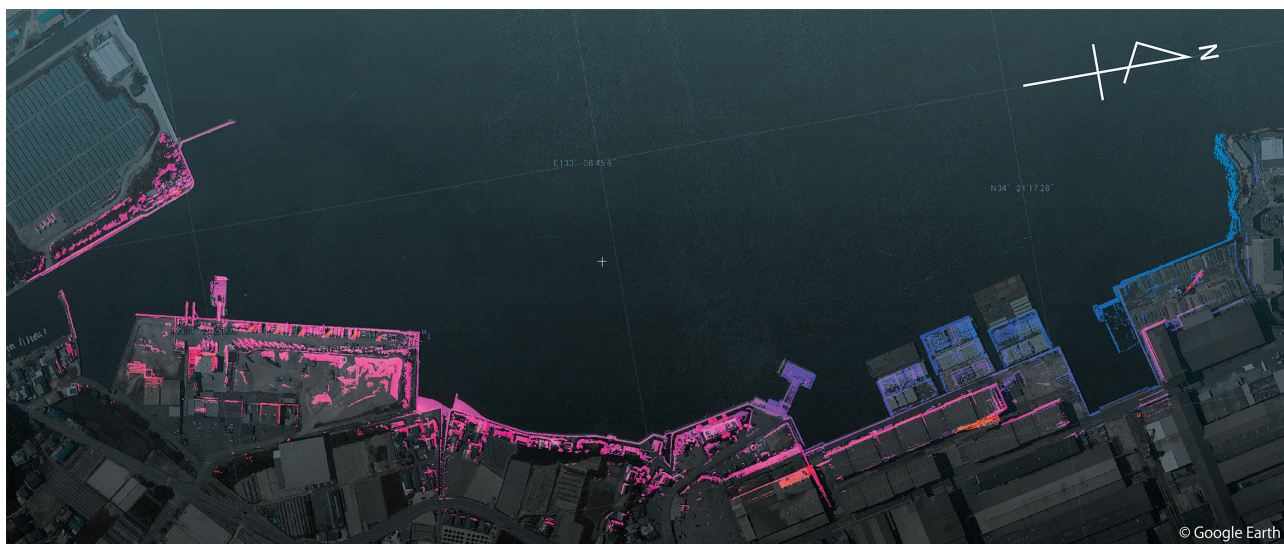


図 18 改良した LIO-SAM アルゴリズムを用いて作成した因島マリーナ周辺の点群地図<sup>6)</sup>。



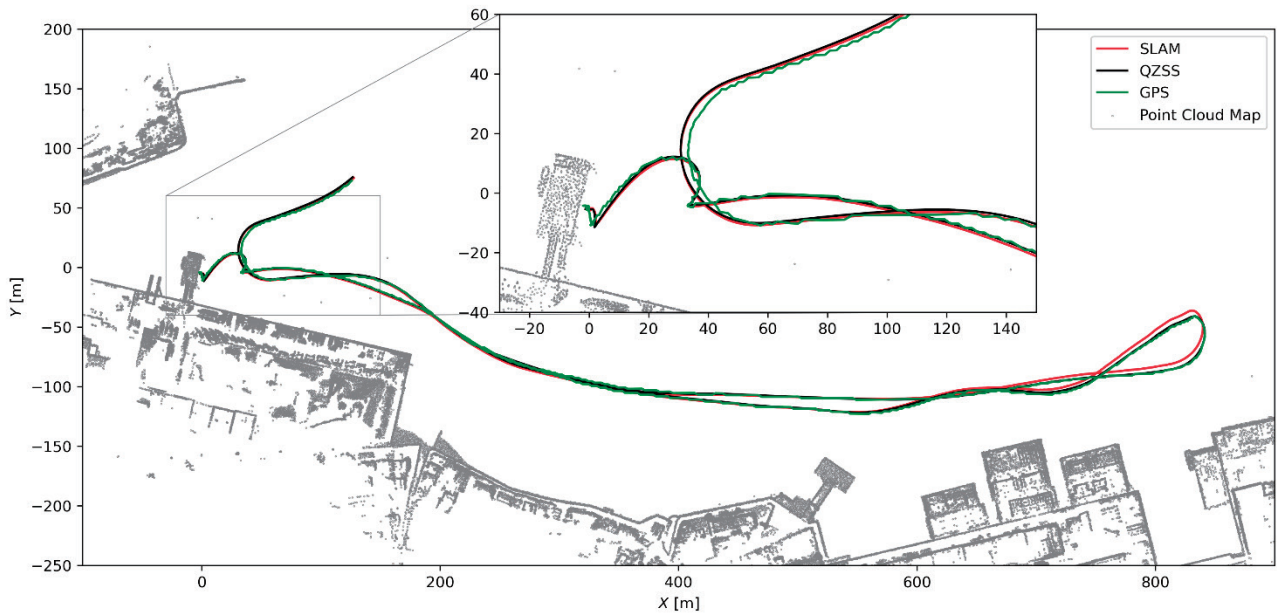


図 19 SLAM, QZSS および GPS により得られた航跡の比較

## 7. 結言

本論文では、これまでに海技研で実施された実験船「神峰」を用いた自動着岸システムに関する研究について報告した。まず、実験船の概要とこれに搭載している操船自動化システム、そして自動着岸の制御・監視用 GUI について説明した。続いて、自動着岸の開発に用いている運動モデルの概要を示し、自動着岸制御アルゴリズムと特に風外乱下での制御手法について述べた。この手法を用いて、風外乱下の数値シミュレーションおよび実船実験を実施し、提案手法によって自動着岸ができることを示した。また、自動着岸システムの安全性の検証として実施したセンサの模擬故障の実船実験結果についても示し、測位センサを変えても自動着岸制御が動作することを確認した。最後に自動着岸システムの高度化を目的とした、LiDAR を用いた 2 つの研究結果を示した。今後も、制御手法の改良および安全なシステムの設計を目的として、自動着岸システムの研究を進める。

## References

- 1) R. Sawada, K. Hirata, Y. Kitagawa, E. Saito, M. Ueno, K. Tanizawa, J. Fukuto: Path following Algorithm Application to Automatic Berthing Control, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 26 (2021), pp. 541–554.
- 2) R. Sawada, Y. Kitagawa, K. Hirata: Automatic Berthing Control Using Path Following with Compensation of Wind Disturbance, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (JASNAOE), Vol. 32 (2021), pp.11-16.
- 3) R. Sawada, K. Hirata: Path Following Control of Curved Track aiming Automatic Berthing, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (JASNAOE), Vol. 33 (2021), pp.9-15.
- 4) R. Sawada, K. Hirata, et al.: Tests of automated ship handling system for autonomous ship, The Proceedings of the Transportation and Logistics Conference (TRANSLOG2021), Vol. 2021.30 (2021), TL3-2.
- 5) R. Sawada, K. Hirata: Path Planning for Automatic Berthing Control with Waterway Geometry, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (JASNAOE), Vol. 32 (2021), pp. 37-40.
- 6) R. Sawada, K. Hirata: Building a Point Cloud Map and Localization using LiDAR for Automatic Berthing, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (JASNAOE), Vol. 34 (2022), pp.1-4.
- 7) Y. Yoshimura *et al.*: Unified Mathematical Model for Ocean and Harbour Maneuvering, Proceedings of MARSIM 2009,

(2009), pp. 116-124.

- 8) S. Motora: On the measurement of added mass and added moment of inertia for ship motions, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 1959, No. 105, (1959), pp. 83–92.
- 9) S. Motora: On the measurement of added mass and added moment of inertia for ship motions, part 2. added mass abstract for the longitudinal motions, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 1960, No. 106, (1960), pp. 59–62.
- 10) S. Motora: On the measurement of added mass and added moment of inertia for ship motions, part 3. added mass for the transverse motions, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 1960, No. 106, (1960), pp. 63–68.
- 11) Kitamura F. et al.: Estimation of above water structural parameters and wind loads on ships, *Ships and offshore structures*, Vol. 12 (2017), Issue 8, pp.1100-1108.
- 12) T. Shan, B. Englot, D. Meyers, W. Wang, C. Ratti, D. Rus: LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2020), pp. 5135-5142.