

離着棧操船時の実船尺度操縦運動評価のための自由航走模型試験法

北川 泰士*, 塚田 吉昭*, 中西 徹*, 澤田 涼平**

Free-running Model Test Methodology for Realizing Ship's Maneuvering Motion in Full-scale During Berthing or Unberthing Operation

by

KITAGAWA Yasushi*, TSUKADA Yoshiaki*, NAKANISHI Toru* and SAWADA Ryohei**

Abstract

Automatic berthing is one of the technologies that makes up the navigation system of an autonomous ship. However, the forces that control the ship's planar motion are weak due to limitations in the propeller thrust and rudder. Therefore, to ensure the safety of an automatic berthing algorithm in a full-scale test, the algorithm must be preliminarily validated by a numerical simulation or a tank model test. Toward the development of a validation method for the automatic berthing algorithm, in this study we develop a methodology for the free-running model test, which controls actuators of a ship model to realize similar motion to a full-scale ship in the same operation. The developed methodology is an expansion of the rudder effectiveness and speed control (RSC) method, which controls the propeller rotation speed, rudder angle, and output of the auxiliary thruster system (ATS). The developed method can realize the effectiveness of the rudder and total acting force in the longitudinal direction, which correspond to low-speed maneuvering of a full-scale ship. Furthermore, the wind force equivalent to that of the full-scale ship can be introduced by incorporating the wind load simulator (WiLS). In this study, the free-running model test of the automatic berthing applying the developed methodology was conducted. The automatic berthing algorithm consists of the Pure Pursuit and Autopilot method and the setting tactic of the engine speed for gradual stopping. In this test, with measured results of the maneuvering motion, the tuning process of parameters of the algorithm and ship's behaviors even in windy situation are successfully shown, as demonstrations to show usefulness of the developed method.

* 流体性能評価系, ** 知識データ・システム系

原稿受付 令和6年7月23日

審査日 令和6年8月23日

目 次

1. 緒言	49
2. 実船の離着岸時操縦運動を再現するための自由航走模型試験法	49
2.1 船速舵効き修正法 (RSC 法)	49
2.2 RSC 法の低速時操縦運動用拡張 (拡張 RSC 法)	51
2.3 風荷重模擬装置の導入	52
3. 拡張 RSC 法による自動着岸アルゴリズムの検証	52
3.1 対象船, 実験設備	53
3.2 適用する自動着岸アルゴリズムと検証の趣旨	54
3.3 着岸操船のシナリオと試験結果と考察	55
3.3.1 平水中試験結果	55
3.3.2 強風下想定シナリオにおける試験結果及び考察	57
4. 結言	58
References	58

記 号

A_R : 舵の側面積 [m ²]
B : 船幅 [m]
C_B : 方形係数 [-]
d : 喫水 [m]
d_{SW} : SCM における目標停止位置からモード切替点までの経路上距離 [m]
D_P : プロペラ直径 [m]
H_R : 舵高さ [m]
I_Z : 船体の回頭方向の慣性モーメント [kg・m ²]
J : プロペラ前進定数 [-]
J_Z : 船体の回頭方向の付加慣性モーメント [kg・m ²] [-]
k_x : プロペラ増速率 [-]
k_{xPR} : 逆転時のプロペラ増速率 [-]
K_D : 微分ゲイン [s]
K_P : 比例ゲイン [-]
K_T : プロペラ推力係数 [-]
L_{pp} : 船の垂線間長 [m]
m : 質量 [kg]
m_x : 前後方向付加質量 [kg]
m_y : 左右方向付加質量 [kg]
n : プロペラ回転数 [RPM]
r : 船体の回頭角速度 [1/s]
R_T : 平水中船体抵抗 [N]
t_P : プロペラ推力減少率 [-]
T : プロペラ推力 [N]
T_A : 補助推力装置で与える補助推力 [N]
u : 船体の前後方向速度 [m/s]
u_R : 舵位置の前後方向流入速度 [m/s]
u_{SS} : 計画速力 [kt] or [m/s]

v_m : 船体の横流れ速度 [m/s]
 w_P : プロペラ位置の有効伴流率 [-]
 w_R : 舵位置の有効伴流率 [-]
 x_G : 前後方向重心位置 [m]
 δ_R : 舵角 [deg] or [rad]
 η : 舵面積の中でプロペラ回転流が作用する割合 [-]
 Ψ : 方位角 [deg] or [rad]
 （文中で定義を詳述しているものは省略する）

1. 緒 言

自動運航船の要素技術の内、自動離着棧は難易度の高い技術と見なされている。これは、離着棧操船時にはプロペラ回転数を低くするため推進力が低くなり、プロペラと舵による主たる制動力も低くなるためである。この状態では風波や潮流による外乱にも相対的に弱くなる。よって、自動離着棧アルゴリズムを設計する際は斯様な制動力の低さに留意することが前提となる。そして、この実証の際には岸壁との衝突等の船体や岸壁設備の物損に関する事故は必ず避けなければならない、事前に制御アルゴリズムの安全性検証を行う必要がある。この安全性検証の手段として、操縦運動の数値シミュレーション、及び模型船を用いた自由航走試験、を用いることが想定される。数値シミュレーションを介する方法は、離着棧操船時のような低速操縦運動時の流体モデルの構築に関しては未だ研究途上であるものの、基本的には自由航走試験等の模型試験に掛かる労力を要しないため、実用面で優位な手法と言える。一方、自由航走試験による検証は対象船のアクチュエータ設定や制御アルゴリズムを組み込んだ模型船制御装置の利用等でコストや労力を有するが、物理則が陽に考慮された計測値として制御結果が取得できるため、説得力のある検証結果が得られる。しかし、模型船と実船の間の流体力学的尺度影響について、低速操縦運動時における研究は未だ途上であると言わざるを得ない。以上の通り、自動離着棧アルゴリズムの安全性を検証するための両方のアプローチについては、それぞれに研究課題がある状況である。

海上技術安全研究所では離着棧操船時の操縦運動を評価するための取り組みとして、この両アプローチに関する研究を進めている所である。本論文では、自由航走試験による離着棧操縦運動評価に関する取り組みとして、実船の離着棧操縦運動を再現できる自由航走模型試験法の開発に関する研究成果を報告する。この手法が実現すれば、模型試験で実証された自動離着棧アルゴリズムにおける制御パラメータ等の制御設定が基本的にはそのまま実船での検証に適用できることになる。本論文では、開発した自由航走試験法についてその前提となる手法からその根幹のアイデアを解説し、この開発手法を用いて設定シナリオにおける自動着棧アルゴリズムの検証を自由航走試験で行った結果を報告する。

2. 実船の離着棧時操縦運動を再現するための自由航走模型試験法

本章では本研究で開発した離着棧操船時の実船の操縦運動を再現するための自由航走模型試験法について解説する。まず、開発した試験法の前提となる船速舵効き修正法（Rudder effectiveness and Speed Control. 以降、RSC法）¹⁾について概要を説明する。次に低速時の実船操縦運動を再現するために拡張した船速舵効き修正法（以降、拡張RSC法）^{2),3)}、及び風による外乱影響を自由航走試験で再現できる風荷重模擬装置⁴⁾について説明する。

2.1 船速舵効き修正法（RSC法）

Uenoら¹⁾は、模型船に作用する流体力学的尺度影響を合理的に考慮した上で、実船の操縦運動を再現するための自由航走模型試験法を提案している。本節ではその概要を説明する。まず、前提となる座標系を図1に示し、運動方程式及び外力項を(2.1)式及び(2.2)式にそれぞれ示す。

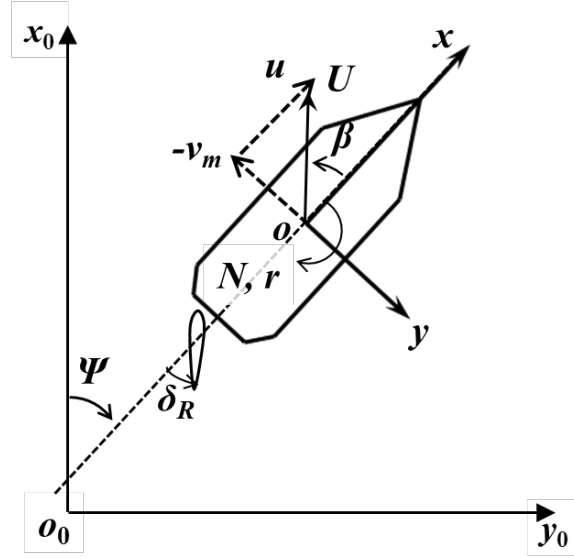


図1 平水中3自由度操縦運動の座標系

$$\begin{cases} (m + m_x)\dot{u} - m(v_m r + x_G r^2) = X \\ (m + m_y)\dot{v}_m + (m + m_x)ur + mx_G r = Y \\ (I_Z + mx_G^2 + J_Z)\dot{r} + mx_G(v_m + ur) = N \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} X = X_H + X_P + X_R + X_A \\ Y = Y_H + Y_P + Y_R + Y_A \\ N = N_H + N_P + N_R + N_A \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで、(2.2)の添字について、 H は操縦運動によって船体に作用する流体力、 P はプロペラ作動による流体力、 R は舵によって生じる流体力、 A は風による風圧力及び風圧モーメント、を表す。

これらはMMG型の定式化であり、巡航速力時の外力モデルはYasukawaら⁹⁾が詳細を示しているため本論文では省略する。なお、巡航速力時の定式化では Y_P と N_P は通例では値をゼロと見なして無視するが、離着岸操船の際に用いられることがあるプロペラ逆転時には舵中央においても船体に横力や回頭モーメントが作用することが知られているため⁹⁾、本研究では定式化に含めているものである。

Uenoらは巡航速力時における外力モデルを前提とし、フルード相似則で運動方程式及び外力モデルを無次元化した上で、同じ操縦運動をしている実船と模型船の両尺度の運動方程式から(2.3)式が導出されることを示した。

$$u'_{RM} = u'_{RS} \quad (2.3a)$$

$$(1 - t_p)T'_M - R'_M + T'_A = (1 - t_p)T'_S - R'_S \quad (2.3b)$$

ここで、添字の M は模型尺度、 S は実船尺度、アポストロフィは無次元値であることを示す。

つまり、この方程式を満足するように模型船のアクチュエータを制御すれば模型船の操縦運動を実船相当にすることが可能となる。この(2.3a)式は舵への前後方向有効流入速度が両尺度で等しいこと、(2.3b)式はプロペラ有効推力や平水中船体抵抗を含めた船体前後方向の合計の外力が両尺度で等しいことを示している。舵の前後方向有効流入速度モデルは複数のモデルが提案されているが、それらは基本的にプロペラ回転数やプロペラ推力に応じて値が算定されるものである。そこでUenoらは、(2.3a)式のモデル中係数の内で尺度影響を考慮した上で実船尺度と同じ舵有効流入速度となるように模型船のプロペラ回転数を決定し、そのプロペラ回転数において模型船に作用するプロペラ有効推力と船体抵抗を考慮した上で実船の前後方向外力と等しくなるよう補助推力量を与え、これにより(2.3)の方程式を満足させることを提案した。このため、模型船の前方向にプロペラ推力以外で推進力を与えられる補助推力装置⁷⁾の利用が前提となる。この手法は船速舵効き修正法(RSC法)と呼称され、Uenoら

は RSC 法によって算定されるプロペラ回転数が Ship-point 条件と Model-point 条件の中間的な値を取ることを示している。

2.2 RSC 法の低速時操縦運動用拡張（拡張 RSC 法）

RSC 法によって自由航走する模型船の操縦運動が実船相当となれば、自動離着棧アルゴリズムに則って自動操縦される模型船の操縦運動も実船相当となり、実船尺度における自動離着棧アルゴリズムの検証が模型試験で行えることになる。一方で、Ueno らの定式化は巡航速力時かつプロペラ正転時の舵有効流入速度モデルを前提としたものである。よって、離着棧操縦運動時の実船相当の舵有効流入速度を再現するためには、離着棧操船時における舵への有効流入速度モデルを適宜用いて RSC 法に基づくプロペラ回転数の算定を行う必要がある。以降、本節では舵有効流入速度モデルに焦点を当てて本研究で開発した手法を解説する。

まず、巡航速力時かつプロペラ正転時の舵の前後方向流入速度(u_R)は MMG 型の標準モデル⁵⁾より、(2.4)式の通り表せる。

$$\begin{cases} u_R^2 = \eta u_{R1}^2 + (1 - \eta) u_{R2}^2 \\ u_{R1} = u_{R2} + k_x u (1 - w_P) \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \\ u_{R2} = u (1 - w_R) \end{cases} \quad (2.4)$$

ここで、 u_{R1} は舵の有効流入速度の内、プロペラ回転流による成分、 u_{R2} は船体の伴流による成分、を表す。

本モデルの係数の内、尺度影響が有意であるのはプロペラ位置での有効伴流率(w_P)、舵位置での有効伴流率(w_R)、プロペラ推力係数(K_T)である。 u_{R1} のプロペラ回転流成分はプロペラ単純運動量理論に基づいて導出されており⁵⁾、模型試験から得られる係数であるプロペラ増速率(k_x)によって増速流の寄与が算定されている。一方で、例えば船体前進時でプロペラ逆転時など、回転流と基礎流場の方向が反対である場合はプロペラ単純運動量に基づく解が成立せずに(2.4)式の u_{R1} の増速流成分がそのまま適用できないため、離着棧操縦運動時に適用するためにはプロペラの作動状況に応じた舵有効流入速度のモデリングが必要となる。

以上より、離着棧操縦運動時に想定される舵の有効流入速度モデルについて考える。まず、プロペラ逆転時や船体後進時には、プロペラ回転流成分(u_{R1})と船体伴流成分(u_{R2})が逆方向になったり、全体の有効流入速度が負（流入方向が船体前方）となることも想定される。そのため、全体の有効流入速度及び流れの方向(u_{Rsgn})は(2.5)式の通り定義する。

$$\begin{cases} u_R^2 = |\eta u_{R1}| u_{R1} + (1 - \eta) u_{R2} |u_{R2}| \\ u_{Rsgn} = \text{sign}(\eta u_{R1}|u_{R1}| + (1 - \eta) u_{R2}|u_{R2}|) \end{cases} \quad (2.5)$$

以降、逆転時も含めたプロペラ作動状況毎の舵有効流入速度モデルについて示していく^{2),3)}。前述の通り、プロペラ回転流成分と船体伴流成分の方向が異なる場合は(2.4)式の定式化がそのまま適用できない。このため、離着棧操船時は低速航行することが基本的な前提であることを考慮し、(2.4)式中の u_{R1} モデルは船速をゼロと仮定することで、船速は極低速及びゼロの状況下における舵有効流入速度モデルを(2.6)式の通り与える。

$$\begin{cases} u_{R1} = k_x \cdot nD \sqrt{8K_T/\pi} \\ u_{R2} = u (1 - w_R) \end{cases} \quad (2.6)$$

次に、船体が前進していてプロペラが逆転している状況においては、(2.6)式の近似モデル表現を適用しつつ基礎流場の項を加え、(2.7)式の通り与える。

$$\begin{cases} u_{R1} = u_{R2} + k_{xPR} \cdot nD \sqrt{8|K_T|/\pi} \\ u_{R2} = u (1 - w_R) \end{cases} \quad (2.7)$$

次に、船体が微速で後進していてプロペラが正転である状況においては、(2.6)式の近似モデル表現をそのまま適用しつつ、後進時のため u_{R2} は船体伴流影響が無視できると見なし、(2.8)式の通り与える。

$$\begin{cases} u_{R1} = k_x \cdot nD\sqrt{8K_T/\pi} \\ u_{R2} = u \end{cases} \quad (2.8)$$

そして、船体が後進時かつプロペラが逆転している状況においては、回転流と船体伴流の流れの方向が一致することから、(2.4)式に沿いつつも船体伴流影響を無視して(2.9)式の通り与える。

$$\begin{cases} u_{R1} = u \left\{ 1 + k_{xPR} \left(\sqrt{1 + 8|K_T|/\pi J^2} - 1 \right) \right\} \\ u_{R2} = u \end{cases} \quad (2.9)$$

以上の通り、離着操船時に想定されるプロペラ作動状況における舵有効流入速度モデルについて示した。これらモデルを操船状況に合わせて切り替えながら RSC 法に基づいてプロペラ回転数の算定と補助推力量を与えれば、実船の離着棧操縦運動を合理的に模型試験で再現できることになる。本研究ではこの手法を拡張 RSC 法^{2),3)}と呼称することにする。

一方、低速操縦運動時における舵力モデル及び舵有効流入速度モデルにおける研究は途上段階である。このため、本研究で提案したモデルも現状では検証が不十分であることは記しておき、今後の研究で十分な検証を経たモデルが提案されればそれらを適宜利用することも選択肢である。

2.3 風荷重模擬装置の導入

前節までに RSC 法の基本概念や拡張 RSC 法における舵有効流速モデルについて説明したが、これらは平水中で操縦運動する模型船を対象としたものであり、自動離着棧アルゴリズムの外乱に対する挙動を検証したい場合は別の方策が必要となる。外乱影響の内、波による外力は基本的にフルード相似則に則って考慮できるため造波機を有する水槽設備であれば造波能力の範囲内で検証が可能となる。また、潮流による影響は潮流発生装置を有する水槽設備なら検証可能である。風による風圧力の影響は水線面上の上部構造物も含めた模型船を用いつつ、自由航走する模型船に適用可能な送風装置を利用すれば与えることが可能である。一方、自由航走状況を前提とするなら送風装置自体が平面移動することから送風装置への空気の流入状況も時々刻々変化するため、想定する風況場を保証すること自体の技術的ハードルが高いことは留意する必要がある。しかし現実問題として、離着棧が行われるのは港湾内であるため、有意な影響と言える風外乱を考慮できることは重要である。

そこで本研究では、塚田らが開発した風荷重模擬装置⁴⁾を用いて自由航走試験における風による影響を考慮することとした。風荷重模擬装置は補助推力装置⁷⁾と同様の装置構成及び制御機構を持つ。具体的な装置構成は、6基のダクトファン・複数の検力計・各ファンの回転数調整コントローラー・模型船に作用する実船相当の風圧力の演算装置及びそれに相当する指令信号出力器、である。制御仕様は、操縦運動中の船体に与えるべき風による前後方向・左右方向・回頭方向の外力及びモーメントをリアルタイムで算定し、それらを目標値にして、検力計の計測値から算定される前後方向及び左右方向の力に基づいて各ファンの回転数をフィードバック制御するものである。この装置を導入すれば実船に作用する風による外力を自由航走する模型船に実用的に与えることが可能となり、自動離着棧アルゴリズムの風外乱による影響の検証に有用である。

3. 拡張 RSC 法による自動着棧アルゴリズムの検証

本章では前章で提案した拡張 RSC 法を適用して実際に自由航走模型試験で自動着棧アルゴリズムの検証を行った結果を報告する。本論文では一部は簡易に示すが、詳細については文献³⁾を参照願う。自動着棧アルゴリズムとして採用したのは Sawada らが小型実験船“神峰”で実証した制御アルゴリズム⁸⁾である。具体的な検証フ

ローは、当該実験船で自動着岸が成功した制御パラメータ群を起点として、模型試験の対象船としたケミカルタンカー船型で自動着岸が成功する制御パラメータ群を拡張 RSC 法による自由航走試験で試行を重ねて探索、というものである。加えて、平水中条件で成功した制御パラメータ群を対象に、風荷重模擬装置を用いて風外乱中の挙動評価を行った結果も示す。

3.1 対象船、実験設備

本試験の対象船は海技研で船型を設計したケミカルタンカーとした。主要目を表1に示し、模型船の外観や艤装した風荷重模擬装置周辺の写真を図2に示す。本船の計画速力は15.3kt、喫水は計画満載である。

表1 対象船の両尺度主要目

Scale	L_{pp} [m]	B [m]	d [m]	C_B [-]	D_P [m]	A_R [m ²]	H_R [m]
Model	3.90	0.634	0.229	0.799	0.151	0.0180	0.204
Full	170.5	27.7	10.0		6.60	35.2	8.9



図2 対象船の模型船（左から：全体外観・艤装時の船首部及び船尾部，赤丸：風荷重模擬装置ダクトファン）

拡張 RSC 法の計算に必要な流体力特性は第2章で説明した通りであり、これらは別途実施した拘束模型試験結果から解析して求めた³⁾。風荷重模擬装置を使用する上で必要となる風圧力特性や上部構造物に関する主要目は Kitamura ら⁹⁾が開発した風圧力特性簡易推定プログラムを用いて推定した。なお、尺度影響を有する係数であるプロペラ位置の有効伴流率(w_p)について、実船尺度値は模型尺度値を航走中のレイノルズ数を用いて ITTC 推奨法¹⁰⁾で実船尺度修正することで算出している。舵位置の有効伴流率(w_R)の実船尺度値は、(3.1)式に示す通り、プロペラ有効伴流率の実船尺度値と模型尺度値の比を用いて換算した。

$$w_{RS} = w_{RM} \frac{w_{PS}}{w_{PM}} \quad (3.1)$$

本試験は海上技術安全研究所の実海域再現水槽¹¹⁾で実施した。本水槽は80m×40m×4.5mの寸法である。曳引台車は副台車を用いた平面動作が可能であり、副台車のターンテーブルにより回頭運動に対応できる。また、自由航走する模型船を副台車位置で自動で追尾できる模型船自動追尾システムを備えており、副台車が模型船を追尾することにより電力線や信号線を模型船と副台車の間で交わせるため、バッテリーレスで自由度の高い自由航走試験のセッティングが可能となる。曳引台車の自動走行範囲は水面中央から±29m×±12.5mであり、この走行範囲内で後述の試験シナリオを計画している。加えて、曳引台車からは自由航走中の模型船の位置・速度・方位がリアルタイムで計測信号として出力されるため、拡張 RSC 法及び3.2節で解説する自動着岸アルゴリズムのための入力信号として利用可能である。

拡張 RSC 法及び後述の自動着岸アルゴリズムのリアルタイム制御プログラムは MATLAB/Simulink プロダクトシリーズ¹²⁾を用いて開発し、リアルタイムアプリケーションの生成や演算実行及び信号入出力はエムアイエス社の Seagull Mini 及び付属のソフトウェアを利用した¹³⁾。

3.2 適用する自動着岸アルゴリズムと検証の趣旨

本研究では Sawada らが提案した自動着岸アルゴリズムを対象に拡張 RSC 法の試行を行った。Sawada らが提案したアルゴリズムは、経路追従の Pure Pursuit and Autopilot アルゴリズム（以降、PPA）、及び着岸目標地点に向けて船速を落としつつ舵効きの担保も考慮した Speed Control Method（以降、SCM）であり、経路生成は 3 次ベジェ曲線により無理のない曲率の曲線で開始地点と目標地点を結ぶものとした。PPA 法は経路上の Look ahead distance (L_T) 分離れた点と現在位置を結んだ直線の方位と現船首方位の差(α_T)を入力とした PD 制御が基本概念である。本研究の対象船は操舵範囲が ± 35 度であるため、操舵指令角(δ^*)の算定は元文献⁸⁾と異なり(3.2)式の通りとした。

$$\delta^* = \text{clip} \left(K_P \alpha_T - K_D r, -35 \frac{\pi}{180}, 35 \frac{\pi}{180} \right) \quad (3.2)$$

SCM では経路を 4 モードに分割し、各モードでプロペラ回転数指令の基本方針を以下の通り与える。

- モード 1（経路追従モード）：アプローチ船速相当のプロペラ回転数を保ち、舵効きを担保した上で経路追従する。
- モード 2（ニュートラルモード）：船速を落とすためプロペラ回転指令をニュートラルにする。（プロペラ回転を遊転状態にさせる）外乱の影響等で船速が所定値より低くなれば、プロペラ回転数を再び所定値にする。
- モード 3（旋回モード）：目標地点に所定方位で停止させるため、所定の条件になればプロペラ回転数を所定値にして舵効きを担保する。
- モード 4（停止モード）：船体を目標地点で停止させるため、船速が所定値以下になるまでプロペラ逆回転指令を与える。

PPA 法と SCM の概念図⁸⁾を図 3 に示す。

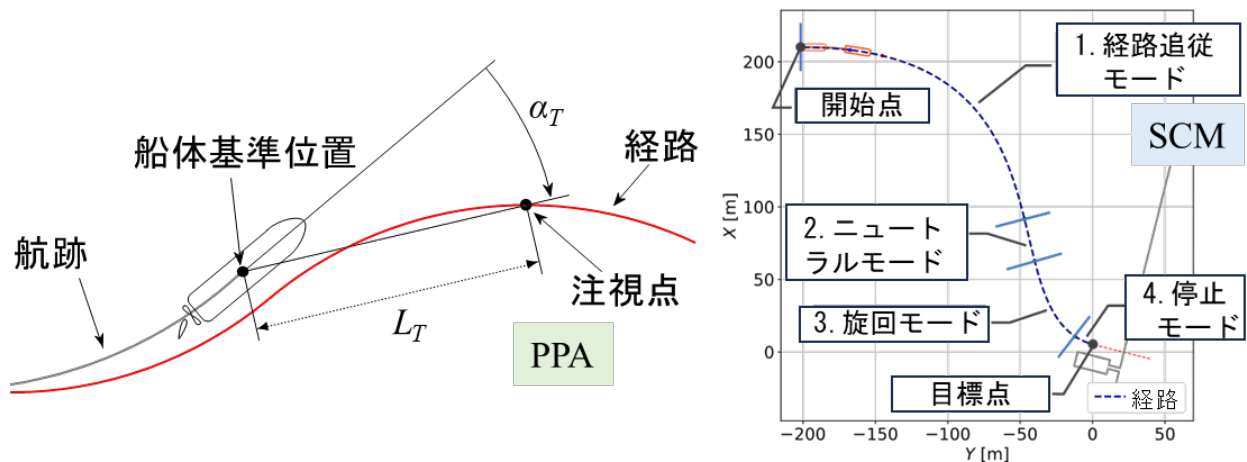


図 3 Sawada らの自動着岸アルゴリズムの概念図（左：PPA，右：SCM）⁸⁾

Sawada らは全長 16.5m の小型実験船“神峰”を用いて提案したアルゴリズム及び経路生成法の実証試験を行い、後述の表 2 の初期パラメータ群(“Initail”)で自動着岸が成功することを示している。本研究における拡張 RSC 法の検証においては、Sawada らの自動着岸アルゴリズムは既に小型船で成功が実証されているが他船への適用は検討例が少なく本研究の対象船は垂線間長 170.5m とサイズ感が全く異なるため、拡張 RSC 法によって実船尺度相当の条件下でアルゴリズム検証が合理的に行えることを念頭に置き、「小型船で成功した制御パラメータ群がサイズの違う船にそのまま適用できるか?」、「自動着岸が失敗する場合、成功するパラメータを自由航走模型試験のみで探索できるか?」、という観点で試行するものである。

3.3 着栈操船のシナリオと試験結果と考察

本対象船は実船の建造がなく運航計画も設定されていないため、本試行における着栈操船のシナリオは著者らで定めた。まず着栈経路は、曳引台車の自動走行範囲を広く使うことを留意して開始点と目標停止点を定め、Sawada らの3次ベジエ曲線を用いて経路を生成した。定めたシナリオ及び着栈の成功基準を以下に順に示す。

- A) 経路開始点では船速は25%計画速力（3.83kt）相当とし、侵入方位角は経路に沿うものとする。（水槽内座標系における-120度とする。）
- B) 経路追従の成功基準：経路追従の失敗は経路から外れた際に復帰できないこととする。
- C) 目標地点での停止位置に関する成功基準：停止した際、目標地点から0.5船長以内であること。
- D) 目標地点到達時の速度に関する成功基準：船速が1%計画速力より低く抑えられれば停止と見なす。
- E) 目標地点停止時の方位に関する成功基準：停止時の方位が西向き（水槽座標系における-180度）であり、誤差が±5度以内であること。

図4に設定シナリオの概要、SCMのモード切替点の初期設定、3.3.2項の強風下想定シナリオにおける風向きと風速、台車自動走行範囲、を共に示す。

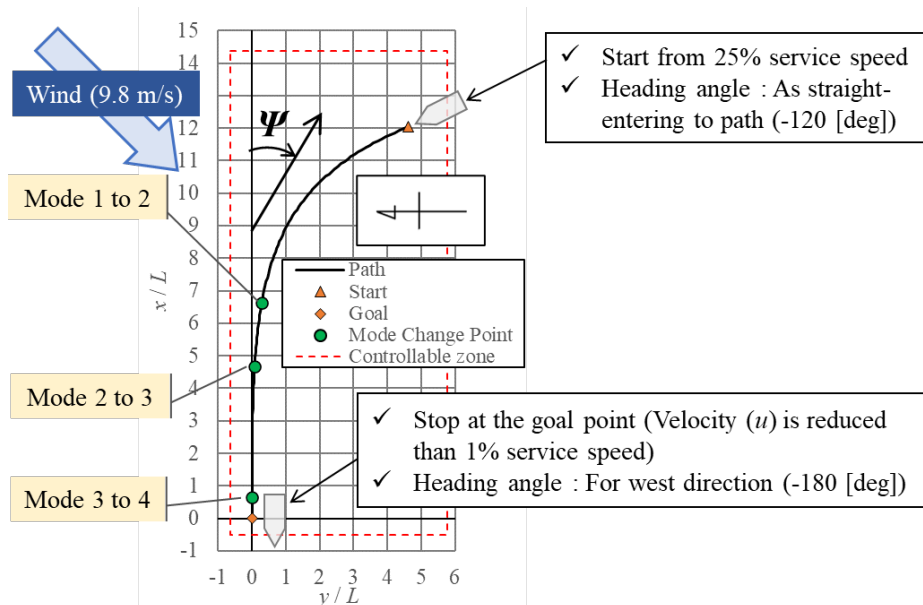


図4 着栈シナリオ概要図及び着栈経路（赤点線（“Controllable Zone”）は台車自動走行範囲）

3.3.1 平水中試験結果

拡張RSC法による自動着栈の試行は平水中条件から行った。まず結果の概要を説明する。最初にSawadaらが小型船で自動着栈を成功させた制御パラメータ群を初期設定値として前述シナリオの自動着栈を試みたが失敗に終わった。そこで、後述の制御パラメータ設定方針を考慮しつつ試行を重ね、前述の成功基準を満足させる制御パラメータ群の探索に成功した。その制御パラメータ群の初期設定値（図表中，“Initial”）及び試行により成功に辿り着いた調整値（図表中，“Tuned”）を表2に示す。表2に示しているプロペラ回転数設定値は実船尺度の値であり、拡張RSC法ではこの値から操縦運動状況に応じて実船尺度の舵有効流入速度をリアルタイムで計算し、その値に基づいて相似な舵有効流入速度を与える模型尺度のプロペラ回転数を同じくリアルタイムで算定している。

表2 PPA法及びSCMの主要制御パラメータと実船尺度プロペラ回転数設定値

Method	PPA			1st Mode of SCM		2nd Mode of SCM		3rd Mode of SCM		4th Mode
Parameter	L_T/L	K_P	K_D (s)	n_S (RPM)	d_{SW}/L	n_S (RPM)	d_{SW}/L	n_S (RPM)	d_{SW}/L	n_S (RPM)
Initial	1.6	3.0	-1.0	32.1	6.7	32.1	4.7	32.1	0.67	-32.1
Tuned	1.0	4.5	-4.5	32.1	9.0	24.1	6.0	24.1	1.5	-24.1

以降に試験結果の詳細を説明する．図5に平水中条件で実施した自動着舷の試験結果として，航跡及び船速・方位・舵角・実船尺度プロペラ回転数・SCMのモードNo.の時系列を示す．各時系列は，失敗の場合はC)の停止位置に関する成功基準を満足しなくなった時点まで，成功の場合はD)の速度に関する成功基準を満足した時点まで，を示している．また，初期設定値の船速の時系列には目標位置通過時の時刻を点線で示している．なお，調整値の結果は船体停止時（船速が1%計画速力になった時点）に目標位置の僅か手前であったことから，通過時刻の点線を示していない．まず初期設定値の結果2例を分析する．図4の通り目標停止位置は(x,y)座標上の(0,0)となるが，初期設定値による結果は目標位置を基準値より通り過ぎて船速が10%計画速力程度までしか落とされおらず，失敗に終わっていることが確認できる．また，経路追従は問題なく行っているものの，経路の中間程度の位置では航跡と若干の差がある．Sawadaらも指摘⁸⁾しているが，本研究の大型船では小型船と質量や慣性モーメントが全く異なるため，停止のための制御設定が同じで同様に成功する保証は全くなく，適切な制御パラメータ設定は個船ごとに検討されるべきであろう．

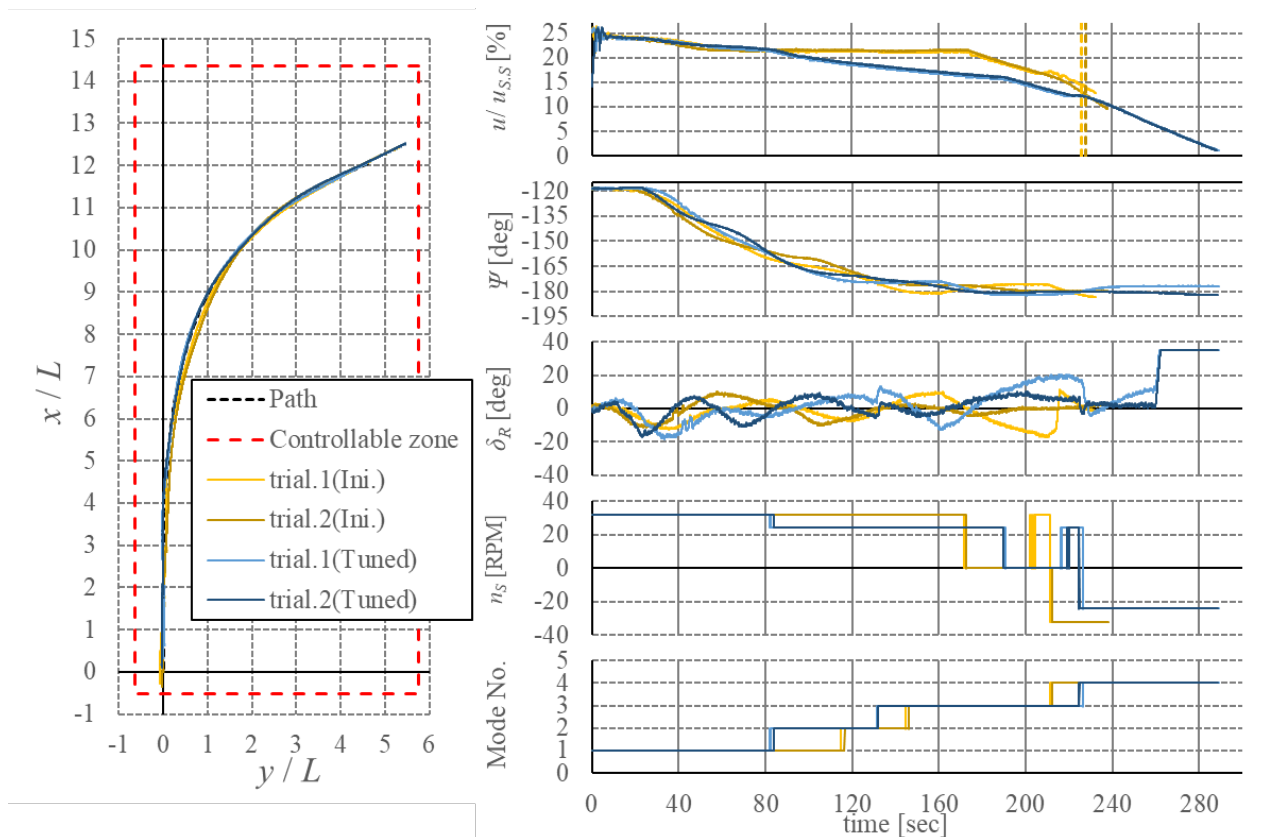


図5 平水中条件における自動着舷試験による航跡及び時系列結果（制御パラメータ群は，“Ini.”：初期設定，“Tuned”：試行により探索した成功時設定値，船速時系列の点線は目標位置通過時刻を示す）

この失敗状況を考慮して，著者らは自動着舷が成功基準を達成できるよう制御パラメータの調整を行いながら試行を重ねた．ここで，パラメータ調整時に前提としたPPA法及びSCMの制御パラメータの相関関係や調整方針について述べておく．まず，Look ahead distance (L_T)について，直進時においては L_T を長くすることは方位差 α_T を抑制することに繋がり，これは比例制御の入力角（誤差量）を減らすことと同じであるため，操舵量も抑制される傾向となる．よって， L_T を長くすることは方位角の揺れを抑制することに繋がる．一方で， α_T が抑制されることは自船と経路との垂直距離が縮まりにくいことに繋がるため，この垂直距離を縮めたい場合は L_T を短くするべきである．PPA法の制御ゲイン K_P と K_D も α_T の増減に寄与し，これらの調整により垂直距離の抑制や方位角挙動を安定させることが可能である．SCMにおいては，モード切替位置やモード毎のプロペラ回転数設定を調整することで船速の減速を調整できる．今回の失敗状況を考慮すると，モード切替位置を開始点側に前倒しすればより早く減速させることが可能であろう．加えて，減速のためにはモード4の停止モードにおいてプロペラ逆転時

の回転数を上げることが有効である。しかし、プロペラ逆転時には舵中央を取っていて左右方向及び回頭方向に流体力が発生することが知られ、具体的には船尾を左方向に振って右回頭させてしまうケースが多い。そのため、目標地点付近における方位角の挙動に留意しながら逆転時プロペラ回転数の設定を行うべきであり、プロペラ逆転による停止時方位角への影響が顕著ならばモード切替点を停止位置側にずらすことも検討するべきであろう。以上の方針を念頭に置きながら試行を重ね、成功基準を満足させる制御パラメータ群の探索に成功した。表2の“Tuned”にそのパラメータ群を示し、図5にその成功例を2例示す。なお、表2の制御パラメータと別の制御方針変更点として、プロペラ逆転時の右回頭を抑制することを目的に、プロペラ逆転時は舵角を正の最大値（+35度）を取ることにした。結果から確認できる通り、停止位置において船速を成功基準まで落とすことが出来ており、その際の方位角も基準内に収まっている。また、経路の中間位置で生じていた若干の航路との差も、 L_T を短くしつつ制御ゲインの調整も行ったことで改善傾向となった。

3.3.2 強風下想定シナリオにおける試験結果及び考察

風荷重模擬装置を用いた風外乱下における自動着棧アルゴリズムの検証として、前項で示した成功時制御パラメータ群を用いてビューフォート風力階級5相当下の条件で自動着棧を試行した。具体的には、真風速は実船尺度で9.8m/sとし、真風向は図4に示す通りの南西向きで一様風が吹くものとした。想定される相対風向としては、経路の開始点から中間位置手前までは右横から、中間位置から停止位置までは右斜め後方から、風を受ける状況である。

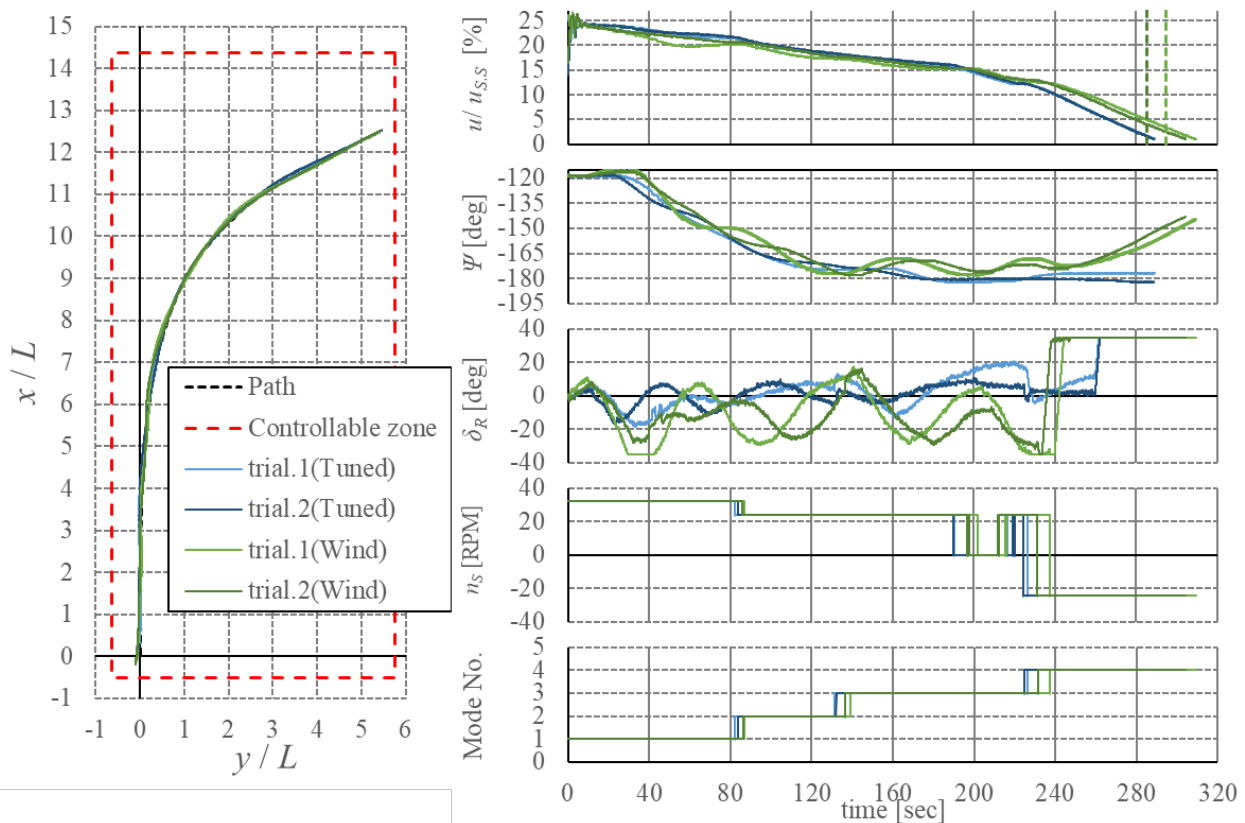


図6 ビューフォート風力階級5相当風速下における自動着棧試験による航跡及び時系列結果（“Tuned”：図5の平水中条件の成功時と同じ，“Wind”：風外乱下結果、船速時系列の点線は目標位置通過時刻を示す）

図6に風外乱下想定自動着棧試験結果と平水中の成功時結果の比較を示す。図示要領は図5と同様であり、平水中の成功時結果も図5と同じである。結果を分析すると、この風条件では停止位置に至るまでの船速低下が平水中と比較して遅くなり、目標位置を通過していることが確認できる。これは右斜め後方からの風に船体が押されたことが要因である。また、方位と舵角の挙動より、試験開始初期の40秒付近に風外乱下では平水中より舵角を大きく取っているが方位の応答は平水中より遅い。これは風による回頭モーメントと操舵によりモーメント

が相対しているためである。以降も風外乱下では平水中より操舵量や方位の変動が大きく、風圧力や風圧モーメントに対する応答が確認できる。加えて、モード4の停止モードに切り替わった以降はプロペラ逆転が発動しているが、風外乱下ではそれを起点に右回頭が発達していることが確認できる。これは、プロペラ逆転によって舵による制動力が失われ、風圧モーメントに為されるがまま右回頭を防げない状況であることを示す。

以上により、設定した条件での風外乱下における自動着棧は成功基準を満足できなかった。なお、紙面の都合により省略したが、同風速で真風向を45度刻みで変更して同制御パラメータ群で自動着棧の成否を確認した。その結果、成功と言える風向条件も確認できたが、多くの風向条件で失敗に終わった。例えば真風向が東向きの条件では、経路上で最終的に向かい風になるため風に押されて成功基準位置まで辿り着けない結果となった。本試行では試験期間の都合で風外乱下においても成功を収める制御パラメータ群の探索を行えなかったものの、成功に向けたアプローチとして、

➤ 平水中も風外乱下においても両方で成功できるよう制御パラメータ群の最適化を施す。

➤ Sawada らが別途提案¹⁴⁾するような風外乱に対する補償制御を導入する。

が考えられるが、この実施は今後の機会としたい。

風外乱下における自動着棧の成否に関しては以上の通りの総括とするが、本研究の主題として、拡張RSC法の導入により合理的に実船相当と見なせる条件下で自動着棧アルゴリズムを検証できる方法論を示し、風荷重模擬装置を併用することで風外乱下における検証が可能となる点も含め、実際に自由航走模型試験によってその試行を行った。提案手法による模型船操縦運動が真に実船と相似であるかは一義的には実船試験との比較で以て検証されるものであるが、従来のModel-pointベースの自由航走試験と比較すると、提案手法は自動離着棧アルゴリズムの検証ツールとして明らかに有用である。勿論、文中で述べた通り、離着棧操縦運動時における舵有効流入速度モデルの研究等も別途進めることで拡張RSC法の精度向上も見込めるが、斯様な流体力モデルの研究も含め、今後も自動離着棧の評価技術の向上のため研究を進めていく。

4. 結 言

本研究では自動離着棧アルゴリズムの安全性評価を行うための模型試験法として、Ueno らが提案したRSC法¹⁾に基づき、実船の離着棧操縦運動を合理的に模型船で再現できる拡張RSC法^{2),3)}を提案した。加えて、風荷重模擬装置⁴⁾を併用することで、拡張RSC法の適用によって風外乱下も含めて自動離着棧アルゴリズムを合理的に実船相当な状況で検証できることを示した。そして、ケミカルタンカー模型船を対象船にして、Sawada らが示した自動着棧アルゴリズム⁸⁾を対象に拡張RSC法を適用した自由航走試験によって平水中や風外乱下の自動着棧検証試験を行うことで、拡張RSC法による自動着棧アルゴリズム検証のデモンストレーションを示した。

References

- 1) Ueno, M., Tsukada, Y.: Rudder effectiveness and speed correction for scale model ship testing, Ocean Engineering, Vol.109, (2015), pp.495-506.
- 2) Kitagawa, Y., Tsukada, Y.: Development of a Methodology of a Free-Running Model Test to Realize Harbor Maneuvering of a Full-Scale Ship and Its Application for Investigations on an Algorithm of Automatic Berthing, Conference Proceedings of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.18, (2014), pp.63-68.
- 3) Kitagawa, Y., Tsukada, Y., Nakanishi, T., Sawada, R.: Development of a low speed free-running model test method considering scale effect in maneuvering and its demonstration on automated berthing, Proceedings of 10th PAAMES and AMEC 2023, Paper No. C-2-02, (2023).
- 4) Tsukada, Y., Suzuki, R., Ueno, M.: Development of a Wind Loads Simulator and Free-running Model Ship Tests in Actual Sea Condition, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.17 No.3, (2018), pp.381-400.

- 5) Yasukawa, H., Yoshimura, Y.: Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions, Journal of Marine Science and Technology, Vol.20, (2015), pp.37-52.
- 6) e.g., Fujino, M., Kirita, A.: On the Manoeuvrability of Ships while Stopping by Adverse Rotation of Propeller (1st Report), Journal of Kansai Society of Naval Architecture, Vol. 169, (1978), pp.57-70.
- 7) Tsukada, Y., Ueno, M., Tanizawa, K., Kitagawa, Y., Miyazaki, H., Suzuki, R.: Development of an Auxiliary Thruster for Free-running Model Ship Tests, Journal of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.20, (2014), pp.71-79.
- 8) Sawada, R., Hirata, K., Kitagawa, Y., Saito, E., Ueno, M., Tanizawa, K., Fukuto, J.: Path following algorithm application to automatic berthing control, Journal of Marine Science and Technology, Vol.26, (2021), pp. 541-554.
- 9) Kitamura, F., Ueno, M., Fujiwara, T., Sogihara, N.: Estimation of above water structural parameters and wind loads on ships, Ships Offshore Struct, Vol.12 No.8, (2017), pp.1100-1108.
- 10) ITTC performance committee: REPORT OF PERFORMANCE COMMITTEE, Proceedings of 15th ITTC, (1978), pp. 359-404.
- 11) Tanizawa, K., Ueno, M., Taguchi H., Fujiwara, T., Miyazaki H., Sawada, H., Tsukada, Y.: The Actual Sea Model Basin, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.10 No.4, (2011), pp.343-382.
- 12) e.g., Homepage of The MathWorks, Inc.: <https://jp.mathworks.com/>
- 13) Homepage of MIS Co., Ltd.: https://www.mtis.co.jp/items/dsp_sys/seagull/
- 14) Sawada, R., Hirata, K., Kitagawa, Y.: Automatic berthing control under wind disturbances and its implementation in an embedded system, Journal of Marine Science and Technology, Vol.28, (2023), pp.452-470.