

自律運航船の実現に向けた操船システムの開発

— アプローチ操船制御と自動着岸操船の速報 —

三好 晋太郎*, 五百木 陵行**

1. はじめに

1.1 背景

近年、船陸間通信の高速化に伴いIoTや人工知能(AI)技術等の情報通信技術、処理制御技術を活用した様々なデジタル化の動きが海洋産業分野においても活性化している。その機運の高まりと共に船舶運航の自動化・自律化に関して、技術開発が加速しており実用化に向けた具体的な動きが活発になりつつある。特に欧州では、自律運航による無人化船について野心的なコンセプトが打ち出され、技術開発に向けた複数の取り組みがなされている。我が国においても、様々な技術開発が進められている。

一方、国内経済における産業基礎物資の輸送の約8割を支える内航海運に目を向けると、ベテラン船員の減少と高齢化が進んでおり、図1内航船員の年齢別構成¹⁾に示す様に50歳以上の割合が37%を超えており、船員年齢層の大きな山は60歳以上へ移行しつつある。また、我が国近海での海難事故においては、人的要因がその7~8割を占めており、輸送品質を確保するためには、ヒューマンエラーの防止による海難事故リスクの低減が重要である。

このように、船員数の不足と高齢化が急激に進んでいる現在、労働環境を改善し、船員の労務負担を軽減することによるヒューマンエラーの防止は喫緊の課題である。

このような社会的背景に対する取り組みの一つとして、船舶運航の自律化を目的とした技術開発が挙

げられ、さらにその先の無人化を目指した日本財団によるMEGURI2040プロジェクト²⁾の始動により、船舶運航の自律化・無人化を目指した技術開発が急速に加速している。

1.2 概要

著者らが所属する三井E&Sグループでも、国土交通省「自動離着岸機能の安全性に係る実証事業」を2018年から3ヶ年計画で(株)商船三井殿及び東京海洋大学殿と共同で実施している。また、公益財団法人日本財団によるMEGURI2040プロジェクトにおいて、「無人運航船@横須賀市猿島」と「内航コンテナ船とカーフェリーに拠る無人化技術実証実験」2つのコンソーシアムに属し、自律操船システムの開発に取り組んでいる。

船舶の運航における操船は、目視、レーダー、及び船舶自動識別装置(AIS: Automatic Identification System)等を用いて収集した周辺航行中の船舶や海域の情報、気象海象条件、機関の運転状況等、及び関連する法規も含めた情報を総合的に評価し、状況判断と意思決定が常に要求される。特に港内操船では、水深や航路等の地形的な制限のもと、低速で航行することにより相対的に外乱の影響を大きく受ける状況下で操縦特性を考慮して、舵、プロペラ、スラストなど複数の操船デバイスを同時に操作することが求められる。

これまでに、約100隻に搭載実績があるジョイスティックを用いたシステム操船装置(Mitsui ship Maneuver control System, 以下MMSという)やDPS(Dynamic Positioning System)³⁾の開発に携わっており、操縦運動及び制御技術、その中でも特に低速での操縦運動制御に関して高い技術を有しており、この技術を活用して自律運航船の実現に向けた操船制御システムの開発に取り組んでいる。

本稿では、操船システムの開発の概要、次に港内操船システムの中で最も難易度が高い自動でのアプローチ操船制御、及び実船を用いて実岸壁に対して実施したアプローチと着岸操船制御について速報としてその一部を報告する。

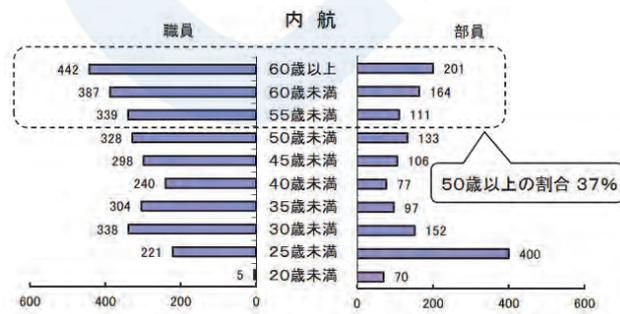


図1 内航船員の年齢別構成

* 三井E&S造船株式会社

** 株式会社三井造船昭島研究所

2. 自律操船システム開発の概要

2.1 条件設定

自律運航を実現するために不可欠な操船システムを構築するために、システムの目的及び目標、運用条件、開発システムへの要求等の条件設定を実施した。その内容を以下に示す。

- 船橋で行われている船舶を航行させるための作業を自動化・自律化するシステムとすること
- 与えられた航海計画をもとにBerth to berthをハンズフリーで航行することを目的とすること
- 常に乗組員が自船及び周囲の状況を把握していること
- システムの限定領域外又は航行の安全が維持できないと予想された時には乗組員によるフォールバックを行うこと
- 陸上からの支援なしでも機能するシステムとすること
- 製品化を考慮したシステムとすること
- 製品コストを抑えるため機器故障等に対する冗長性は考慮せず、フォールバックを要求すること
- 通常の船舶に搭載可能で且つ既存船に搭載可能なこと
- ワンアクションで乗組員が既存の操船デバイスでの操船が可能とすること
- 既存のセンサ・機器からの入力、及び既存のアクチュエータへの出力を前提とし、特にアクチュエータの制御権は常に明確にすること
- 船舶搭載機器の安全を考慮した接続とすること
- 海気象による限定領域は、個船の性能及び航行海域ごとに設定すること

2.2 操船システムに要求される機能

自律運航船を実現するために自律操船システムに求められる機能を抽出するために、乗組員が船橋で行っている作業を調査した。次に調査した作業の中で、前項で示した設定条件を考慮して自律操船システムに要求される機能を抽出し、その機能を実現するための情報の流れなどに注目して、4つ主要なタスクにまとめた。そのタスクを以下に、各タスクに分類した代表的な機能を表1に示す。

- 航海状態制御
- 状況把握
- 自動避航（航法・航路計画管理）
- 操船制御

表1 操船システムに要求されるタスク及び機能

タスク	サブタスク階層1	サブタスク階層2	
1. 航海状態制御	1.2 自律操船制御の可否判断	1.2.2 システムによる判断	
		1.3.1 目標WP管理	
	1.3 モード管理	1.3.2 モード移行（離岸操船→港内操船）	
		1.3.3 モード移行（港内操船→港外操船）	
		1.3.4 モード移行（港外操船→港内操船）	
		1.3.5 モード移行（港内操船→着岸操船）	
	1.3.6 避航操船管理		
2. 状況把握	2.1 見張り	2.1.1 他船動静把握	
		2.1.2 航行海域把握	
		2.1.3 浮遊物他把握	
		2.1.4 座礁の危険性判断	
		2.2.1 自船位置	
		2.2.2 自船運動把握	
	2.3 気象海象観測	2.3.1 風向風速	
	2.4 船舶運転状態把握	2.4.1 主機運転状態の把握	
		2.4.2 船内電力状態の把握	
	2.5 アクチュエータ応答評価	2.5.1 アクチュエータ状態把握	
	2.5.2 応答値評価		
	2.6 システム健全性管理	2.6.1 システム作動状態監視(システムによる監視)	
	3.2 航路の確認	3.2.1 妥当性・安全性確認	
		3.2.2 実行計画航路管理	
4. 自動避航	4.1 航行空間（海域）リスク演算	4.1.1 航路環境設定	
		4.1.2 地形・水面環境設定	
		4.1.3 他船衝突リスク演算	
		4.1.4 総合航行リスク演算	
	4.2 避航計画	4.2.1 避航計画策定	
		4.2.2 避航航路策定	
	4.2.3 策定航路評価		
5. 操船制御	5.1 離着機操船（バーシング）	5.1.1 操船計画演算	
		5.1.2 操船制御	
		5.1.3 操船計画演算	
	5.2 港内操船（ディスプレイ、アプローチ）	5.2.1 操船制御	
		5.2.2 操船制御	
		5.2.3 操船制御	
	5.3 港外操船	5.4 外力推定	5.4.1 前後方向外力推定
			5.4.2 横方向外力推定
			5.4.3 回頭方向外力推定
			5.4.4 定常航路偏差成分推定
5.4.5 風圧力推定			
5.5 制御の状態確認・評価		5.5.1 制御結果評価	
		5.5.2 制御結果予測	
	5.5.3 GNSS誤差要因評価		

2.3 システム構成

自律操船システムを構築する際に開発のためのコストと期間を圧縮するために、1章で示したMMSを活用することとした。MMSは、既に船級を取得済みであり、航海計器等との接続機能、操船デバイス（プロペラ・舵・スラストなど）を安全に制御する機能を有している。さらに、ジョイスティック操船、方位保持、定点保持等の制御機能を実現していることから、大幅に開発期間とコストを削減することができると同時に、信頼性の高い制御システムの構築が可能であると考えた。

また、操船者に制御を受け渡す際に、一人の操船者がジョイスティックとダイアルだけで操船が可能なることも、非常に有効である。

図2に示すように、自律操船の制御演算を行う自律操船制御システムを、MMSに接続して機能させることで、自律操船を実現する操船システムの開発を行っている。

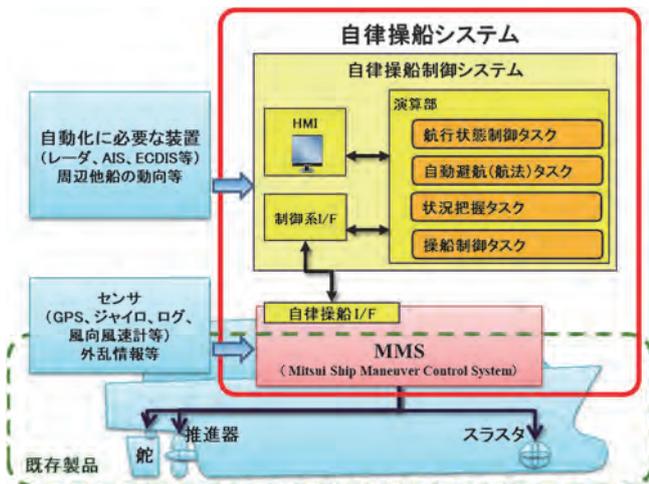


図2 自律操船システム構成図

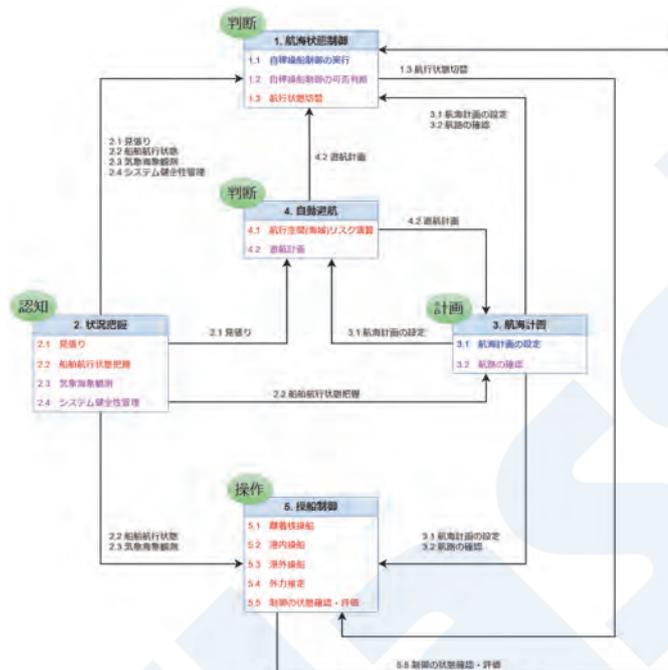


図3 自律操船制御機能タスクブロック構成図

自律操船システムは、自律操船のための制御演算を行う「自律操船制御システム」と新しく開発した自律操船とのインターフェースを備えたMMSによって構成され、MMSで入力されたセンサ等の情報を自律操船制御システムに引き渡し、演算された制御指令をMMSから舵、プロペラ、スラスト等のアクチュエータを制御することにより自律操船を実現するものである。

次に前節で分析した操船システムに要求される機能を実現するためのタスク及びタスク間のデータフローを、図3に示す。

3. 操船制御システム

3.1 操船制御システムの概要

運航フェーズによって外洋や沿岸を航行する港外操船と港湾内を航行する港内操船に分類できる。さらに港内操船は、離棧・ディスプレイ・定常速力での航行(含む狭水道)・アプローチ・着棧に分類でき、それぞれで考慮する内容や運動自体も大きく異なるため、これらをすべて同じロジックで制御することは現実的でない。そこでそれぞれの操船フェーズに対して適した制御ロジックを用いることとした。本稿では、この中で難易度が高く海難事故につながる可能性が高いアプローチ操船制御について、説明する。

3.2 アプローチ操船制御

アプローチ操船の特徴として、一般的に航路や防波堤などの地形的に制限された水域を、減速しながら着棧点に向けて船位や船首方位を制御しながら航行するものである。

特に地形的な制限でやり直しが難しく一発勝負となること、減速することで船体運動特性が大きく変化し続けること、同時に船速が低下することで相対的に外乱の影響が大きくなることから、アプローチ操船制御を実現する上での課題として挙げられる。

3.2.1 構成

アプローチ操船は、やり直しが出来ず、運動特性や外乱影響が変化することで、単純な制御では対応ができない。そこでアプローチ操船制御を実現するために、操船者の操船を参考に複数のアルゴリズムを組み合わせることとした。

その制御アルゴリズム等の一覧を以下に示すと同時に、構成図を図4に示す。

- 航法フィルタ
- 航路保持フィルタ
- 航路保持をするためのフィードバック制御
- 定常外力に対するフィードフォワード
- 予測操船フィードフォワード制御
- 船速制御

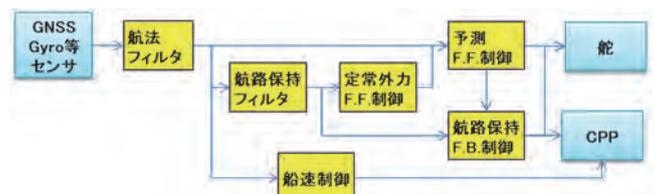


図4 アプローチ操船制御機能ブロック構成図

3.2.2 航法フィルタ

本システムにおいてはRTK測位 (Real Time

Kinematic) のGNSS受信機を使用するために測位誤差は小さいが、それでもノイズ成分が含まれているために対地速度を演算する際に位置情報を微分する必要がある。そこで、滑らかで確からしい位置と速度を推定するため、今村⁴⁾、福田(田丸)⁵⁾により使用されている航法フィルタと呼ばれる線形のカルマンフィルタを採用した。

図5に示すような、基準となるWay Point (WP) を原点、北方向をX軸及び東方向をY軸の正となる地球固定の2次元座標系を定義し、定義した座標系における時刻tkの船体の位置、速度、加速度を状態変数とする(1)の様に定義する。(以下、上付き添字のTは転置行列を示す。)

$$x_n = [p_x(n), p_y(n), v_x(n), v_y(n), a_x(n), a_y(n)]^T \quad (1)$$

これらによって(2)式に示すような状態方程式と観測方程式からなる状態空間表現を得る。

$$\begin{aligned} \text{状態方程式} \quad x(n+1) &= Fx(n) + G\omega(n) \\ \text{観測方程式} \quad y(n) &= Hx(n) + v(n) \end{aligned} \quad (2)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 & \Delta T^2/2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 & \Delta T^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

F, G, Hはそれぞれ状態遷移行列、駆動行列、観測行列を示す。ここで、y(n)の第1要素はカルマンフィルタから得られる緯度情報、第2要素は経度である。カルマンフィルタを使うことによってこれら2つの信号が得られたときに、(2)式の内部表現で位置、速度、加速度の推定値が得られ、スムージングされた位置と速度を求める事が出来る。

3.2.3 航路保持フィルタ

アプローチ操船を実現するために、設定されたアプローチラインを保持する航路保持制御問題と定義し、三好による最適トラッキング制御⁶⁾と同様に操縦運動モデルから得られる状態空間表現における状態変数の推定にカルマンフィルタを用いることとした。

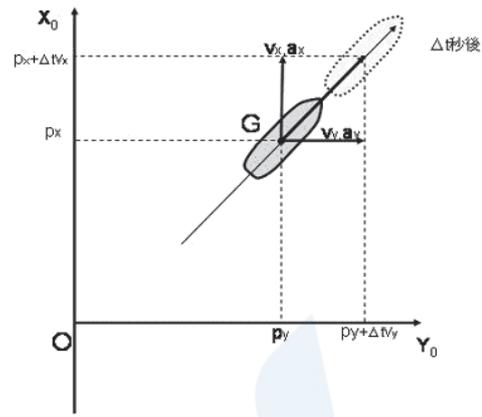


図5 航法フィルタにおける座標系

図6の座標系に示す、横方向速度：v、角速度：r、航路に対する船首方位の偏差：φ、航路から自船位置の偏差としてクロストラック偏差量：Yd、舵角：δを採用し、(3)式に示すような制御に用いるため運動モデルを用いる。その際に(3)式におけるa₁₁, a₁₂, a₂₁, a₂₂, b₁₁, b₂₁も三好⁶⁾による線形化された操縦運動モデルから求める手法を採用した。この手法では船体要目から運動モデルを求めることが可能であり、汎用化及び製品化に適した方法であることから採用した。

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{Y}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & U_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ r \\ \phi \\ Y_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta \quad (3)$$

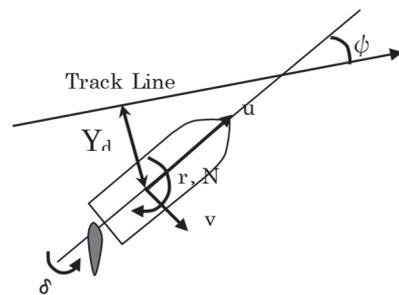


図6 航路保持制御における運動モデルの座標系

(3)式に示した連続型線形化モデルから、サンプリング時間Δtで離散化したモデルを(4)式によって計算し、(5)式のように離散表現が得られる。

$$\Phi = e^{A\Delta t}, \quad \Gamma = B \int_0^{\Delta t} e^{A(\Delta t-t)} dt \quad (4)$$

$$\mathbf{x}(n+1) = \Phi \mathbf{x}(n) + \Gamma \mathbf{u}(n) \quad (5)$$

$$\mathbf{u}(n) = -\mathbf{L}(n) \mathbf{x}(n) \quad (9)$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & 1 & 0 \\ \Phi_{41} & \Phi_{42} & \Phi_{42} & 1 \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_{11} \\ \Gamma_{21} \\ \Gamma_{31} \\ \Gamma_{41} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{x}(n) = [v \ r \ \phi \ Y_d]^T, \quad \mathbf{u}(n) = \delta(n)$$

さらに定常外力に対応するために、航路に対する横方向への変位速度 d_y を追加し(6)に示す状態変数として、(7)式の状態方程式に示す様に、システム表現の最終行で、クロストラック偏差が定常な性質を持つと表現した。

$$\mathbf{x}(n) = [v(n) \ r(n) \ \phi(n) \ Y_d(n) \ d_y(n)]^T \quad (6)$$

状態方程式

$$\mathbf{x}(n+1) = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & 1 & 0 & 0 \\ \Phi_{41} & \Phi_{42} & \Phi_{43} & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v(n) \\ r(n) \\ \phi(n) \\ Y_d(n) \\ d_y(n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Gamma_{11} \\ \Gamma_{12} \\ \Gamma_{13} \\ \Gamma_{14} \\ 0 \end{pmatrix} \delta(n) + \boldsymbol{\varepsilon}(n) \quad (7)$$

観測方程式

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{H} \mathbf{x}(n) + \mathbf{w} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

\mathbf{H} : 観測行列, $\boldsymbol{\varepsilon}$: システムノイズ, \mathbf{w} : 観測ノイズ

この状態空間表現における状態変数をカルマンフィルタによって推定することにより、航路保持に関する船体運動の推定を行った。

ただし、このモデルには船速に依存する項があるためアプローチ開始から終了まで大きく船速が変化するためそのままでは適応することができない。そこで複数の船速でトラッキングモデルを設計し、船速ごとのモデルをメンバーシップ関数とするモデルを用いて、対応する船速に応じた状態変数の推定値を求めた。

3.2.4 航路保持フィードバック制御

アプローチ操船制御を実現するために、前項でえられた状態変数を用いてフィードバック制御を行った。具体的には(9)式に示す様に状態変数 $\mathbf{x}(n)$ に制御ゲイン $\mathbf{L}(n)$ を乗じて操舵量 $\mathbf{u}(n)$ を求めた。

ここで評価関数などを用いて $\mathbf{L}(n)$ の最適値を求める手法は一般的であるが、今回は船速の変化などの不確定要素が多いことからシミュレーションによるトライ&エラーで $\mathbf{L}(n)$ を決定した。

3.2.5 定常外力に対するフィードフォワード

これまでに述べたように、アプローチ操船では船速が低く外力の影響を大きく受けるため、アプローチ操船制御でも船体が受ける外力を考慮することが重要となる。そこで、3.2.3で述べたカルマンフィルタによって演算された、航路に対する横方向への変位速度 d_y を用いて、定常外力に対するフィードフォワード制御⁹⁾を付加した。

図7の左図に示すように、航路保持をして航行中の船舶は、 d_y と前後速度 u の合成方向に速度 U で航行する。その際に船首方位から ϕ_s の角度を持った方向に移動する。この時、 ϕ_s は微小であることから、 $d_y \approx d_y'$ として航路からの船首方位の偏角 ϕ を最適制御則に渡す際に ϕ_s を考慮することによって、図7の右図に示すように、定常的な航路偏差を小さくすることが可能になる。具体的には、この ϕ_s を次項の予測操船フィードフォワード制御で考慮することで、定常外力を考慮することができる。

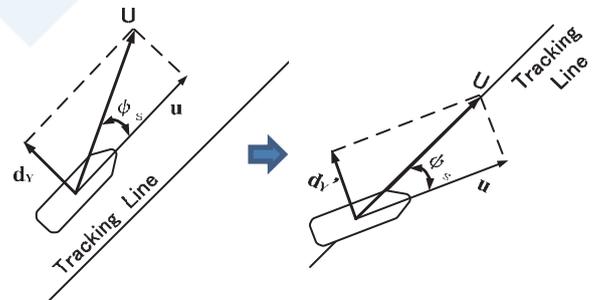


図7 定常外力に対する制御イメージ図

3.2.6 予測操船フィードフォワード制御

一般的に操船者は、現状の操船目標との偏差のみならず数十秒から数分後の自船の位置及び船首方位を予測した操船を行う。これまで着岸操船に関していくつかの研究^{9) 10) 11)}がなされていたが、いずれの研究においても減速しながらアプローチする操船フェーズにおいては、通常の操船者が行う予測操船を考慮したフィードフォワード制御は必要であると提唱されている。

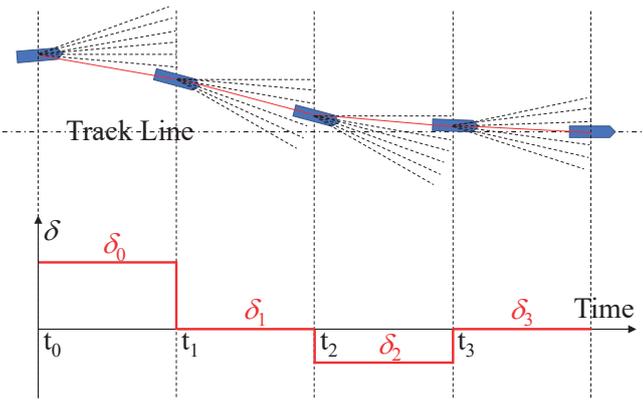


図8 シューティングメソッド探索イメージ

このような予測制御にはDeep Learningなどを用いる方法¹²⁾も考えられるが、教師データの収集などに大きな時間がかかると考え、著者らは実用化を考慮してシューティングメソッドを用いて最適な操舵計画を求めることとした。

その探索イメージを図8に示す様に、開始点から舵角を複数回変更しながら航路に復帰する最適舵角を計算する。図8の左端の航路偏差が生じた状態から一定時間ごとに舵角を変更し、航路に復帰する最適操舵を探索するイメージを示している。

そのシューティングメソッドを用いた探索方法の手順を以下に示す。

- ① MMGモデルを用いた高速シミュレーションを用意する
- ② 舵角の候補 δ をT秒間維持し、途中n回変更する組み合わせを用意する
例：
 δ [deg]={ $\pm 15.0, \pm 10.0, \pm 5.0, \pm 2.5, 0.0$ }
T[sec]=30, n=4
- ③ 高速シミュレーションを用いて最適となる組み合わせを探索する
最適の定義は(10)式の評価関数が最小となること

$$J = \sum_{i=0}^n (q^{n-i}(W_y Y_{d,i}^2 + W_\psi \Delta\psi_i^2 + W_r r_i^2) + W_\delta \delta_i^2) \quad (10)$$

q : 減衰係数

W : 各種重み

$Y_{d,i}$: i 段階目終了時の航路偏差

$\Delta\psi_i$: i 段階目終了時の方位偏差

r_i : i 段階目終了時回頭角速度

δ_i : i 段階目の舵角

この時に、 $\Delta\psi_i$ を求める際に参照する航路の方位に、前項で求めた ϕ_s を考慮した方位を用いた。

4. 実証試験

これまでに説明したアプローチ操船制御とDPS等の技術を応用した着岸制御を組み合わせた港内操船制御システムを用いて、実船での実岸壁に対するアプローチ・着岸操船制御の実証を行った。本章ではその速報として、実証試験の概要を報告する。

本実証試験は、国土交通省「自動離着岸機能の安全性に係る実証事業」の(株)商船三井殿及び東京海洋大学殿と共同で実施したもので、実岸壁での実施の前に港外に仮想岸壁を設定して、十分な制御性能があることを確認したのちに実施した。

4.1 試験条件

4.1.1 供試船

実証には商船三井フェリー株式会社殿のカーフェリー「さんふらわあ しれとこ」を用いた。供試船の主要目を表2に、写真を図9に示す。

表2 「さんふらわあ しれとこ」の主要目

● 総トン数	11,410	ton
● 全長	190.0	m
● 垂線間長	175.0	m
● 型幅	26.4	m
● 型深	20.5	m
● 喫水(計画満載)	6.85	m
● 試運転最大速力	25	Kts
● 最大搭載人数	180	名
● 主機関	4cycle中速Diesel×2基 14,580kW×400rpm(/1基)	
● 推進器	CPP×2	軸
● スラスト	バウ×2	基
	スターン×1	基



図9 カーフェリー「さんふらわあ しれとこ」全景

4.1.2 試験海域及び操船シナリオ

実証試験は、茨城県大洗港及び中央西岸壁バース

で実施した。その際に用いた操船シナリオを図10に示す。また、目標着岸点は、通常運航時の着岸点より手前に配置し、前方及び右舷側の岸壁に対しそれぞれ25m及び10mのクリアランスを確保するように設定した。

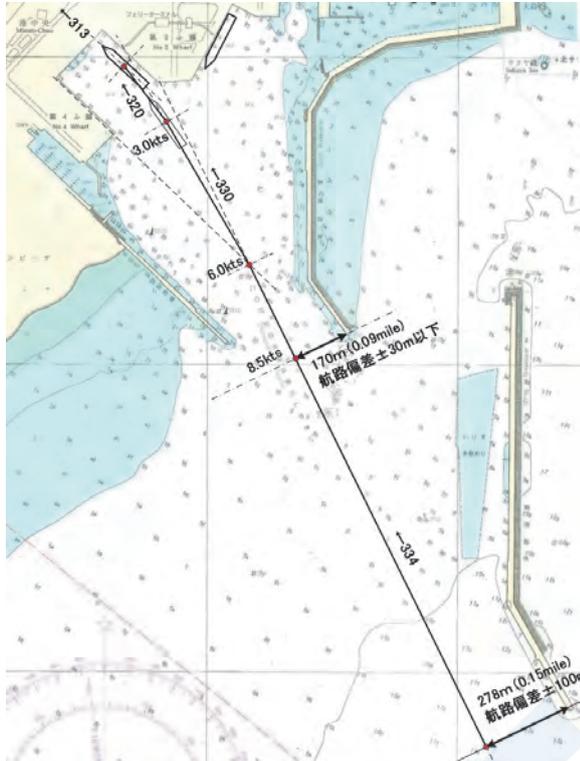


図10 実証試験操船シナリオ

4.1.3 試験条件

実証試験を実施した際の試験条件を表3に示す。また試験は図10に示した大洗港沖防波堤先端付近の最初のWP (Way Point) の手前約1.0マイルの地点から初期船速12.0ktsで開始した。

表3 実証試験条件一覧表

海気象条件	
天候	晴
視程	良好 (約12Mile)
風向	NE~ENE
風速 (港外)	10.0~14.0 m/s
風速 (港内)	4.5~10.0 m/s
波高 (港外)	1.5 m
波向き (港外)	NE
その他の条件	
試験時間	昼間
喫水	6.4 m

4.2 試験結果

実岸壁に対し4回の実証試験を実施した。いずれ

の試験も設定した操船シナリオに沿って航路保持及び減速し、目標着岸点に対し0.5~2.0mの精度で停船 (船速0.1kts未満) 出来たことを確認した。

その一例として航跡図を図11に、試験システムの時系列画面を図12に示す。尚、本稿では速報ということで時系列に関する説明は割愛する。

航跡図から分かる様に、沖防波堤・防波堤の間・内側の防波堤を通過時に蛇行しているのがわかる。この現象はシミュレーション及び港外での仮想岸壁での試験では確認できなかった。原因として防波堤による遮蔽によって風速が大きく変化したこと、及び防波堤の間に局所流が発生していた等の環境変化が大きく影響したと考えられる。

4.3 考察

今回の実証試験において、これまでに開発した操船制御システムの有効性が確認できた。一方、実際の港湾及び実岸壁では、地形等の影響による外乱変化が、船体運動に大きく影響を及ぼすことを改めて確認すると同時に、外乱変化に素早く対応可能な制御システムが要求されることを確認した。

実証試験時に予測操船 (シューティングの結果) と実際の船体運動に差異が出ることを確認された。これは港内に入ると水深が浅くなりUKCが0.8~1.5mになっていて、浅水影響により操縦運動モデル自体が変化していたと考えられ、対策の検討が必要であることを確認した。

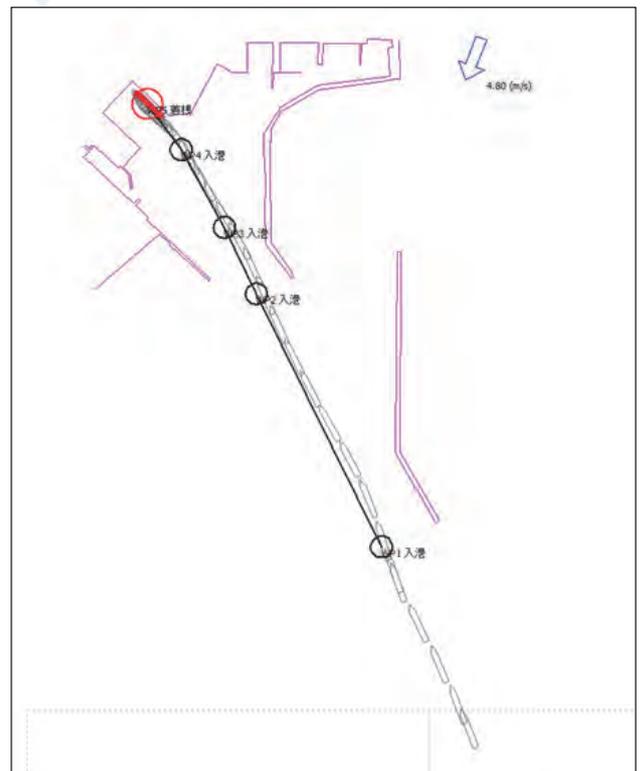


図11 実証試験航跡

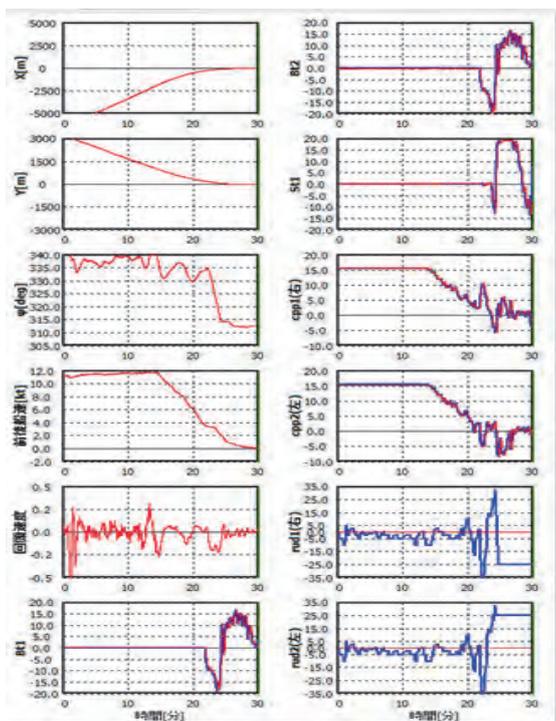


図12 試験システムの時系列画面

5. まとめ

自律運航を実現するために不可欠な操船システムの要件を示した後に、概念設計及び基本設計の概要について説明した。

次に、操船システムを構成する重要な機能で、船舶の動きを制御する操船制御システム、特に本稿ではアプローチ操船制御について構成及び技術的な説明を行った。

最後に、説明したアプローチ操船制御及び着岸制御が組み込んだ港内操船制御システムを用いて、実際の大型フェリーで実岸壁に対して、アプローチ・着岸操船制御の実証試験の速報について報告した。

現在開発している船舶の自律運航を目指した操船システムの有効性が確認されたが、同時に様々な課題も明らかになった。

今後も操船制御を中心とした技術開発を行い、シミュレーションや実船試験などで安全性や実用化に向けた課題を明らかにし、自律運航のための操船システムの実用化に向けた技術開発を続けると同時に、航海機器メーカーを含めた関連する技術を有する企業と協力し、出来るだけ早く自律運航船を実用化して、日本の海運業界に貢献していくことを目指す。

謝辞

本研究開発の一部は、MEGURI2040プロジェクトの助成により行われており、研究開発の機会を頂

いた日本財団に御礼申し上げます。また、技術開発のために多大なるご指導を頂いた東京海洋大学岡崎教授、実証試験にご協力いただいた株式会社商船三井フェリー殿及び「さんふらわあ しれとこ」の乗組員の方々、特に実証試験の成功には、「さんふらわあ しれとこ」の吉田船長のご尽力が不可欠なものでした。改めて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省海事局：平成30年度船員需給総合調査結果報告書の概要，P3
- 2) 日本財団ホームページプレスリリース：
<https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2020/20200612-45056.html>, 2021.05
- 3) 三井E&S造船ホームページ,
<https://www.mes.co.jp/shipbuilding/business/special/system.html>, 2021.05
- 4) 今村智之：船舶の自動着岸システム構築に関する研究，東京商船大学修士論文，1999.
- 5) 福田（田丸）人意，金城智仁，大津皓平，小山健夫：船位推定フィルタディファレンシャルGPSを用いた推定方法の開発，電子情報通信学会誌B Vol.J84-B No.12, pp.2220-2226, 2001.
- 6) 三好晋太郎，原洋輔，大津皓平：カルマンフィルタを用いた最適トラッキング制御に関する研究，日本航海学会論文集，Vol.118号，2007.
- 7) 三好晋太郎，原洋輔，大津皓平：線形化モデルを用いた最適トラッキング制御に関する研究，日本航海学会論文集，Vol.117号，2007.
- 8) 三好晋太郎：船舶の最適トラッキング制御システムに関する研究，東京海洋大学博士論文，2008
- 9) 正司公一，大津皓平：最適制御理論による操船の最適化と自動化について，日本造船学会論文集，No.172, pp365-373 (1992)
- 10) 大和 裕幸ほか，エキスパートシステムによる自動着岸制御，日本造船学会論文集，No.174, pp.327-337
- 11) 岡崎忠胤，大津皓平，福田人意：学習型フィードフォワード制御方式による自動着岸制御システムの設計
- 12) 岩本 才次，学習型フィードフォワード制御方式による自動着岸制御システムの設計，日本船舶海洋工学会論文集2005年2巻pp.179-188