

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04499

研究課題名（和文）人間共存型自動離着桟操船システムの研究開発

研究課題名（英文）Development of human coexistence type automatic ship berthing system

研究代表者

岡崎 忠胤（Okazaki, Tadatsugi）

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：70392686

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、船舶を港の桟橋に自動運転で停止させる自動着桟システムの研究開発を実施した。自動着桟システム利用時は、無人ではなく船長や航海士が船舶に乗船しているため、自動運転の操縦方法が人間の行う操縦方法とかけ離れていれば、船長や航海士は自動運転に対し不信感を持つ。そこで本研究では、船長の好みに応じた操縦方法を選択実行できる自動着桟システムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、船舶の自動運転の研究開発が積極的に行われているが、自動運転システムで対応が困難な局面に遭遇した場合は、人間に操縦を交代することを開発の前提条件としている。船長の行う操縦方法とかけ離れた自動運転から、急に手動運転に切り替えた場合、船長によるその後の安全確保は困難な作業となる。本研究で開発した自動着桟システムは、自動運転中の船の状況を船長が理解できるシステムなので、急な手動変更時にも船長は安全確保が可能なシステムとなっている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted research and development of an automatic docking system that automatically stops a ship at a pier in a port. When using an automatic docking system, the ship is not unmanned, but has a captain and a navigator on board. Therefore, if the operating method of the automatic driver is far removed from the operating method used by humans, the captain and navigators will be distrustful of the automatic driver. Therefore, in this study, we developed an automatic docking system that can select and execute the operating method according to the captain's preferences.

研究分野：システム工学

キーワード：自動着桟 システム信頼性 バーチャルリアリティ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動離着棧の研究は、1982年の高信頼度知能化船プロジェクトを始めとして、いくつかのプロジェクトのもとで実施されているが、実用的なシステムの製品化はなされていない。この理由として、前述の離着棧操船時に人間による作業が多く介在する点があるが、もう1つの潜在的理由として自動離着棧操船システムのユーザーである船長が自動システムの操船を信頼できない点があると推測される。船長は自身の経験を元に安全マージンを設定して離着棧操船を行う。そのため、例えば自動システムによる棧橋へのアプローチ速度が船長の想定より遅ければ効率が悪い操船と考え、速すぎれば危険な操船だと考える。では安全マージンをどのように設定するかが問題となるが、水先人と大型客船の船長の操船に問題解決の糸口がある。水先人は、毎回異なる船舶を操船するため、操船中にアクチュエータが故障しても大きな事故につながらないよう安全マージンを設定する。一方で大型客船の船長は、水先人の操船と比較するとかなり速い船速で棧橋へアプローチする。そのため操船中にアクチュエータが故障した場合は、事故となる可能性が高い。しかし大型客船は、一般商船と比較してアクチュエータが冗長化されており、メンテナンスも頻繁に行われているためアクチュエータの信頼性が高い。つまり、水先人と大型客船の船長の操船方法の差異は、船舶のアクチュエータへの信頼度の違いに起因すると推測される。

そこで本研究では、対象船のアクチュエータの信頼度に基づいた安全マージンを設定した上で、効率的な操船を行う自動離着棧操船システムの研究開発を行う。

### 2. 研究の目的

本研究では、船長から信頼される人間共存型自動離着棧操船システムを開発することを目的とした。船長から信頼される自動制御システムを構築するためには、利用者である船長が納得できる安全マージンを設定した操船計画を立案し、その操船計画を遂行する自動制御システムを開発することになる。その上で、外乱環境に応じた効率的な自動操船を実施するシステムが要求される。また、自動操船中にシステムがどのような誘導目標を設定してどのようにアクチュエータが利用されているか(操船の意図)がモニタリング可能でなければ、船長は自動システムに操船をゆだねることは難しい。そこで、自動操船中の操船の意図を船長が理解できる自動操船システムの機能が要求される。

着棧操船時の安全マージンとは、自動離着棧操船中にアクチュエータの故障が発生しても岸壁等への衝突を別のアクチュエータを用いて回避できるよう誘導経路と誘導速度を制限するものであり、船体運動モデルを用いた解析から検討することになる。そしてアクチュエータの故障発生確率は、信頼性解析手法を用いて導出することになるが、船用機器においては経年劣化とメンテナンスが重要なポイントになる。そこで本研究では、経年劣化とメンテナンスの周期を考慮した時変の故障率を利用するシステム信頼性解析手法を用いてアクチュエータの信頼性を推定し、安全マージンとの関係について明らかにすることを目指す。一方で、船長の操船スキルにより心理的安全マージンは変化する可能性がある。そこで操船者のスキルに応じた安全マージンの変化についても明らかにすることを目指す。

効率的な着棧操船を実施するためには、船舶の操縦運動性能に基づいた操船計画と制御システムが必要となる。そこで対象船舶の運動モデルを開発し操船計画を立案し、操船計画を遂行する自動制御システムの開発を目指す。なお開発した自動着棧システムを評価するためには、実船環境のみならず、バーチャルリアリティ空間での検証も必要となる。そこで着棧操船を再現可能なVR操船シミュレータを構築し、同システムで自動着棧システムの検証を行うことを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、船長から信頼される人間共存型自動離着棧操船システムを開発することを目指し、以下の研究項目を実施する。

#### (1) 操船計画の立案

3種の船舶を対象に、船舶のアクチュエータのシステム信頼性解析を実施し、アクチュエータの信頼性と安全マージンの関係について分析する。また、着棧操船時にアクチュエータの一部が動作しなくなる場合を、操縦運動モデルでシミュレーションし、岸壁などへの衝突を回避するために必要な余裕距離や船速について検討を行う。物理的要因による安全マージン以外に、操船者のスキルに依存する心理的安全マージンを考慮するために、着棧操船時の AIS データを分析し、操船者のスキルに応じた操船計画について検討する。

効率的な着棧操船を実施するためには、船舶の操縦運動モデルに基づいた操船計画を立案する必要がある。そこで、外乱を考慮した問題設定で、船舶の操縦運動から最短時間制御解を導出し、操船計画の基礎データとすることを検討する。

#### (2) 着棧制御システムの研究開発

立案した操船計画を実行する追従制御システムとして、本研究ではディープニューラルネットワーク(DNN)を制御器として採用する検討を行う。安全マージンを設定した操船計画を基に、船舶の操縦運動モデルを用いて着棧操船時の制御解を事前に導出し、これを教師データとし DNN に学習させ、着棧操船時の状況に即した着棧操船制御を学習済みの DNN により実施することを検討する。

#### (3) 評価システムの研究開発

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた VR システムで、離着棧操船をシミュレートできる VR 操船シミュレータを構築し、本研究で開発した自動離着棧システムの評価実験を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 操船計画立案システム

##### 【アクチュエータの信頼性解析と安全マージン】

着棧位置付近で主機が故障した場合、事故が発生するため、着棧位置へ近づく速度には安全マージンが含まれる。そこで、着棧位置までの残り距離が  $1L$  (船長) での船速と着棧操船時のアクチュエータである主機の信頼性の分析を行った。主機の信頼性が異なる貨物船、大型客船、フェリーを解析対象とし結果を Fig.1 に示した。図は主機のアンアベイラビリティと棧橋までの残り距離  $1L$  における船速の関係を示しており、直線の上側の領域は、安全マージンが小さい着棧操船を意味し、直線の下側の領域は安全マージンが大きい着棧操船を意味する。Fig.1 に示す検討結果は、データ数が少ないため信頼性に問題があるが、着棧操船の安全マージンを検討する 1 つの指標となる可能性がある。

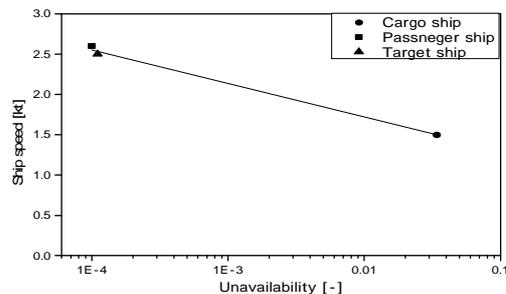


Fig. 1 着棧位置まで  $1L$  での船速と主機のアンアベイラビリティ

ピリティと棧橋までの残り距離  $1L$  における船速の関係を示しており、直線の上側の領域は、安全マージンが小さい着棧操船を意味し、直線の下側の領域は安全マージンが大きい着棧操船を意味する。Fig.1 に示す検討結果は、データ数が少ないため信頼性に問題があるが、着棧操船の安全マージンを検討する 1 つの指標となる可能性がある。

### 【船長の心理的安全マージン】

操船者のスキルに依存する心理的安全マージンを考慮した結果を示す。操船者の着岸操船のスキルは、着岸位置までの減速方法で評価できるとの先行研究に基づき、AIS データを分析し、着岸時の船速について分析した。対象岸壁は東京港の大井埠頭とし、対象船舶は内航コンテナ船とした。45 隻の着岸データを分析した結果、減速方法は Fig.2 に示す 3 つのパターンに分類すること

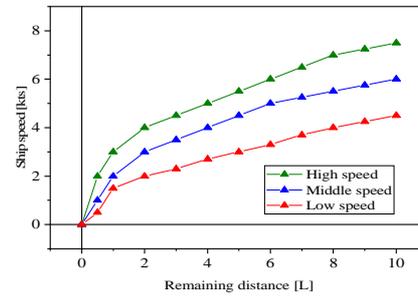


Fig.2 着岸位置までの距離と船速の分析結果

ができた。操船スキルが高いと分類した緑色の結果では、着岸位置までの距離が 10L で 7kt の船速であるのに対し、操船スキルが低いと分類した赤色の結果では、着岸位置までの距離が 10L で 4kt の船速であった。そこで Fig.2 に示す減速方法を操船者のスキルに応じた安全マージンとし、操船計画を立案するシステムを構築した。

### (2) 着岸制御システムの研究開発

操船計画を実行する制御システムとして、ディープニューラルネットワーク(DNN)を制御器として採用した。Fig.2 に示した操船計画に基づき、船舶の操縦運動モデルを用いて着岸操船時の制御解を事前に導出し、これを教師データとし DNN に学習させ、自動着岸操船のシミュレーションを実施した。Fig.2 に示す操船スキルに応じた操船計画の中で High speed を学習した結果を Fig.3 に示す。上段の図は、着岸位置までの距離に応じた船速

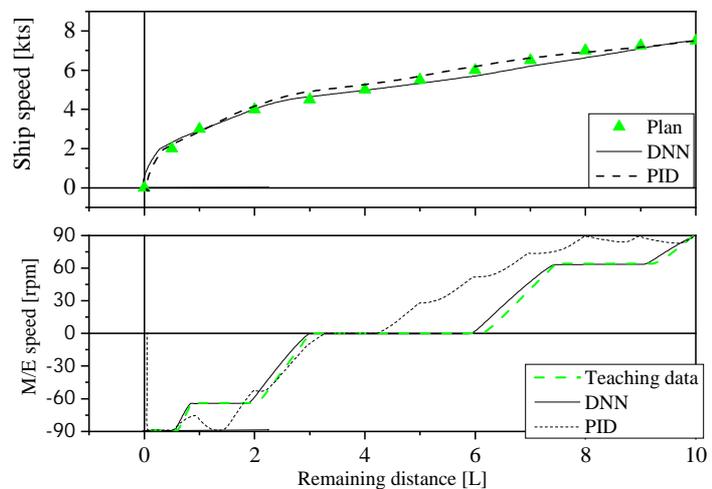


Fig.3 High speed の操船計画の制御結果

の変化を示しており、図中の点が操船計画である。下段の図は、制御入力である主機の回転数を示している。比較のため、従来の PID 制御システムで主機の回転数を制御した結果を合わせて示している。本システムの特長として、主機の回転数の変化が、船長が操縦するときと同じように階段状に変化していることが読み取れる。一方で、PID 制御システムの結果は、人間には理解しづらく小刻みに主機回転数が制御されていることが読み取れる。言い換えれば、本システムでは船長と同じ手法で船速を制御しており、船長は自動操船中においても操船の意図を理解することが可能であると言える。

本研究で研究開発した手法の有効性を確認するために、実船実験が可能な練習船汐路丸を対象に、様々な風外乱条件下での着岸操船方法を導出し DNN に学習させた。そして様々な風外乱に対応した着岸操船方法を学習した DNN を用いて、風向・風速の異なる条件下で 2 回の自動着岸の実験を実施した。実験結果を Fig.4 および Fig.5 に示す。Fig.4 の実験では、向岸風の影響で

着棧位置付近で船が岸壁方向に流されることを考慮し、岸壁から離れた位置から進入して着棧している。一方で Fig.5 の実験では、離岸風の影響で着棧位置付近で船が岸壁から離れる方向に流されることを考慮し、岸壁に接近した位置から進入して着棧している。この結果より、本研究の提案手法は、風外乱下でも適切に動作することが確認できた。

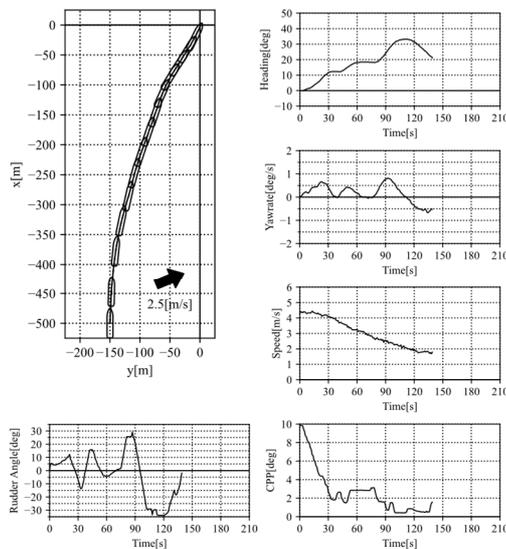


Fig.4 向岸風の自動着棧実験結果

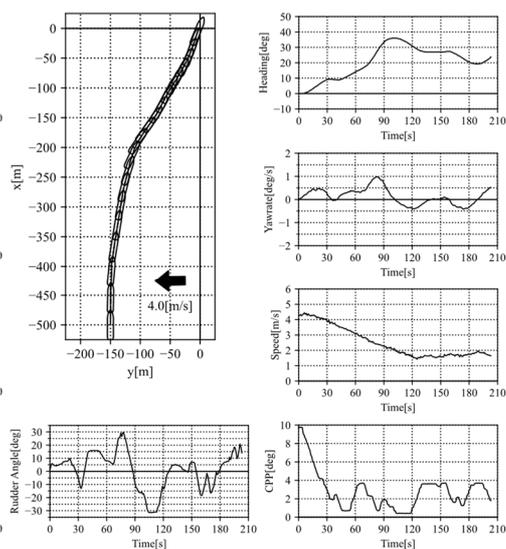


Fig.5 離岸風の自動着棧実験結果

### (3) 評価システムの研究開発

本研究では、着棧操船をシミュレートできる VR 操船シミュレータを構築した。被験者は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装備することで、VR 空間の船橋から自動着棧の状況を体験できる。Fig.6 に自動着棧シミュレーション時の船橋からの映像例を示した。なお被験者実験では、船橋からみた岸壁までの距離感が把握しづらいとの課題が残った。



Fig.6 自動着棧システムが船橋内に表示された VR 空間

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Darasiri, A. Ohkawa, and T. Okazaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of an Automatic Berthing System Adapted to Navigator's Skill	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 ONLINE
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SII58957.2024.10417313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H.Kashiwagi, and T.Okazaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Ship Control of Approach Maneuvering under Wind Disturbance using a Deep Neural Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics 2023	6. 最初と最後の頁 pp.1583-1588
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SMC53992.2023.10394658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y.Hirai, H.Ota, T.Okazaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Remote Assistance system for Navigational Watchkeeping using Virtual Reality	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of SICE 2023	6. 最初と最後の頁 pp.1168-1173
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/SICE59929.2023.10354132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H.Ota, Y.Hirai, and T.Okazaki,	4. 巻 1
2. 論文標題 Remote ship control system using Virtual Reality	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics 2022	6. 最初と最後の頁 pp.2220-2225
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SMC53654.2022.9945082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 柏木秀仁, 岡崎忠胤	4. 巻 1
2. 論文標題 風外乱下におけるニューラルネットワークを用いた船舶の誘導制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SI2021講演論文集	6. 最初と最後の頁 p.241-245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 太田浩紀, 岡崎忠胤	4. 巻 1
2. 論文標題 Virtual Realityを用いた遠隔操船システムの研究開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SI2021講演論文集	6. 最初と最後の頁 P.323-328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------