



| | |
|--------------|---|
| Title | 着棧操船の自動化に向けた人工ニューラルネットワークを用いた船舶操縦モデルと軌道追従制御 |
| Author(s) | 脇田, 康希 |
| Citation | 大阪大学, 2025, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/101677 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (脇 田 康 希)

論文題名

着岸操船の自動化に向けた人工ニューラルネットワークを用いた船舶操縦モデルと軌道追従制御

論文内容の要旨

近年、内航海運では人材不足が深刻化しつつあり、船員の労働負担を軽減する目的などから、自動運航船の研究開発が活発化している。着岸操船は、外洋と比べ、操作する操船装置が増加する点、風や潮流などの外乱影響を強く受ける点、さらに岸壁や他船との距離が近い点などから、船舶運航の中でも特に船員の負担が大きいセーフティクリティカルなタスクの一つである。そのため、着岸操船の自動化は船員の負担を軽減する重要な課題である。着岸操船の自動化には制御アルゴリズムや状況認識技術に加えて、操船システムの設計および評価のための数値シミュレーション技術が必要不可欠である。そこで本研究では、着岸操船の自動化に向けて、少ない計算資源で船舶の操縦運動シミュレーションを可能とする操縦モデルの推定手法と着岸操船シナリオを実行可能な軌道追従のための制御手法に関する研究に取り組んだ。

本論文は以下の6章で構成した。

第1章は序論であり、研究背景、関連研究および研究目的について述べた。

第2章では、本論文で前提となる数学的表記法、船舶操縦運動に関する基礎知識、供試模型船の実験システム構成および拘束模型試験や経験式により獲得したMMGモデルについて説明した。

第3章では、人工ニューラルネットワーク (ANN) を用いた操縦モデルの推定手法を提案した。従来、ANNを用いた操縦モデルの推定問題では、入出力関係を学習するために加速度に関する計測値が必要とされてきたが、実環境では観測ノイズや誤差が生じやすく、これが操縦モデルの精度低下を招く要因となっていた。そこで本研究では、数値シミュレーションで予測された操縦運動軌道の予測誤差を最小化する最適化問題として定式化し、加速度の計測値を必要としないネットワークパラメータの推定手法を提案した。また、低速操縦運動の予測精度を向上させるため、従来のジグザグ操船や旋回操船のデータに加えて、ランダムにアクチュエータを操作した操縦試験データを訓練データとして用いた。自由航走模型試験データを用いた数値実験では、提案手法により低速操縦運動を含む着岸操船軌道の予測精度が向上し、拘束模型試験や経験式によって得られたMMGモデルと同等またはそれ以上の予測精度を持つ着岸操船のための操縦モデルが得られることを示した。

第4章では、ANNを用いた操縦モデルの推定のためのデータ拡張手法を提案した。第3章では、ANNにより高精度な操縦モデルを推定可能であることを示したが、大量の操縦運動データが必要不可欠であった。そこで本研究では、データ量が限定される状況でもANNを用いた操縦モデルの推定精度を向上させるため、スライシングとジッタリングと呼ばれるデータ拡張手法の適用を提案し、第3章で述べた軌道推定ベースのパラメータ推定手法への適用手法を示した。そして、自由航走模型試験データを用いた実験により予測精度の改善を確認した。

第5章では、着岸操船軌道を追従するための制御方策の強化学習による獲得手法を提案した。着岸操船では、障害物との距離が近く、衝突を避けながら多様な軌道パターンに対応する必要がある。そこで、着岸操船で遭遇する可能性のある多様な軌道パターンを学習させるため、アクチュエータがランダムに操作された参照軌道を生成し、その軌道との追従誤差を最小化する訓練手法を提案した。その結果、着岸操船軌道のような高速領域と低速領域の両方を含む軌道を追従可能な制御方策が得られることをシミュレーションおよび模型船を用いた実験により示した。また、ランダムに生成された参照軌道に応じて静的擬似障害物を生成し、衝突を引き起こす可能性のある追従誤差に追加のペナルティを報酬関数へ加えることで、制御方策に静的擬似障害物を考慮させる手法を提案した。これにより、着岸操船軌道の追従実験における衝突確率が減少することをシミュレーション実験により確認した。提案手法は、訓練のための操縦シミュレーション環境を必要とするが、ANNを用いて推定した操縦モデルを利用可能である。そこで、提案手法は、操縦運動データが与えられれば、操縦シミュレーション環境を構築し、軌道追従制御を獲得可能であることをシミュレーション実験により示した。

第6章では、以上の内容を総括し、今後の課題と展望について述べた。

論文審査の結果の要旨及び担当者

| | | | | |
|-----------------|---------|-------|------------------------|--|
| 氏 名 (脇 田 康 希) | | | | |
| 論文審査担当者 | (職) 氏 名 | | | |
| | 主 査 | 教 授 | 牧 敦 生 | |
| | 副 査 | 教 授 | 箕 浦 宗 彦 | |
| | 副 査 | 准 教 授 | 酒 井 政 宏 | |
| | 副 査 | 准 教 授 | 秋 本 洋 平 (筑波大学 システム情報系) | |

論文審査の結果の要旨

近年、特に内航海運では技能の高い船員の高齢化等の問題が顕在化しつつあり、船員の労働負担を軽減する目的などから、自動運航船の研究開発が活発化している。着栈操船は、外洋と比べ、操作する操船装置が増加する点、風や潮流などの外乱影響を強く受ける点、さらに岸壁や他船との距離が近い点などから、船舶運航の中でも特に船員の負担が大きいセーフティクリティカルなタスクの一つである。そのため、着栈操船の自動化は船員の負担を軽減する重要な課題である。着栈操船の自動化には制御アルゴリズムや状況認識技術に加えて、操船システムの設計および評価のための数値シミュレーション技術が必要不可欠である。そこで本研究では、着栈操船の自動化に向けて、少ない計算資源で船舶の操縦運動シミュレーションを可能とする操縦モデルの推定手法と着栈操船シナリオを実行可能な軌道追従のための制御手法に関する研究に取り組んでいる。

本論文は以下の 6 章で構成されている。

第 1 章は序論であり、研究背景、関連研究および研究目的について述べている。

第 2 章では、本論文で前提となる数学的表記法、船舶操縦運動に関する基礎知識、供試模型船の実験システム構成および拘束模型試験や経験式により獲得した MMG (Maneuvering Modeling Group) モデルについて説明している。

第 3 章では、人工ニューラルネットワーク (ANN) を用いた操縦モデルの推定手法を提案している。従来、ANN を用いた操縦モデルの推定問題では、入出力関係を学習するために加速度に関する計測値が必要とされてきたが、実環境では観測ノイズや誤差が生じやすく、これが操縦モデルの精度低下を招く要因となっていた。そこで本研究では、数値シミュレーションで予測された操縦運動軌道の予測誤差を最小化する最適化問題として定式化し、加速度の計測値を必要としないネットワークパラメータの推定手法を提案している。また、低速操縦運動の予測精度を向上させるため、従来のジグザグ操船や旋回操船のデータに加えて、ランダムにアクチュエータを操作した操縦試験データを訓練データとして用いている。自由航走模型試験データを用いた数値実験では、提案手法により低速操縦運動を含む着栈操船軌道の予測精度が向上し、拘束模型試験や経験式によって得られた MMG モデルと同等またはそれ以上の予測精度を持つ着栈操船のための操縦モデルが得られることを示している。

第 4 章では、ANN を用いた操縦モデルの推定のためのデータ拡張手法を提案している。第 3 章では、ANN により高精度な操縦モデルを推定可能であることを示したが、大量の操縦運動データが必要不可欠であった。そこで本章のアプローチでは、データ量が限定される状況でも ANN を用いた操縦モデルの推定精度を向上させるため、スライシングとジッタリングと呼ばれるデータ拡張手法の適用を提案し、第 3 章で述べた軌道推定ベースのパラメータ推定手法への適用手法を示している。そして、自由航走模型試験データを用いた実験により予測精度の改善を確認している。

第 5 章では、着栈操船軌道を追従するための制御方策の強化学習による獲得手法を提案している。着栈操船では、障

害物との距離が近く、衝突を避けながら多様な軌道パターンに対応する必要がある。そこで、着棧操船で遭遇する可能性のある多様な軌道パターンを学習させるため、アクチュエータがランダムに操作された参照軌道を生成し、その軌道との追従誤差を最小化する訓練手法を提案している。その結果、着棧操船軌道のような高速領域と低速領域の両方を含む軌道を追従可能な制御方策が得られることをシミュレーションおよび模型船を用いた実験により示している。また、ランダムに生成された参照軌道に応じて静的擬似障害物を生成し、衝突を引き起こす可能性のある追従誤差に追加のペナルティを報酬関数へ加えることで、制御方策に静的擬似障害物を考慮させる手法を提案している。これにより、着棧操船軌道の追従実験における衝突確率が減少することをシミュレーション実験により確認している。提案手法は、訓練のための操縦シミュレーション環境を必要とするが、ANNを用いて推定した操縦モデルを利用可能である。そこで、提案手法は、操縦運動データが与えられれば、操縦シミュレーション環境を構築し、軌道追従制御を獲得可能であることをシミュレーション実験により示している。

第6章では、以上の内容を総括し、今後の課題と展望について述べている。

以上のように、本論文は、自動運航船の実現に必要不可欠な、低速操縦運動モデルと軌道追従制御アルゴリズムのいずれについても、人工ニューラルネットワークを用いた全く新しい方法論を提案している。前者の成功は、制御に必要なモデルの構築にあたり、実船の運航データのみからモデルの推定が可能となり、将来的にはコストの大きな水槽試験の必要性を減少させることを意味している。後者の成功は、推定されたモデルが与えられれば、着棧にも用いることができる誘導制御アルゴリズムが自動的に生成できることを示している。加えて、いずれの技術についても屋外環境下での実験検証が行われており、これは特筆に値する。これらの両技術の自動化への有効な方法論を示したことは、今後の工学の発展に対して、裨益するところ大なるものとする。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。