

令和元年6月10日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06617

研究課題名（和文）実時間非線形最適制御による自動操船システムの高性能化

研究課題名（英文）Improvement of Automatic Ship Maneuvering System by Real-time Nonlinear Optimal Control

研究代表者

水野 直樹（Mizuno, Naoki）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：30135404

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、従来、経験豊かな船長によって行われてきた船舶の自動操船の高性能化に取り組み、自動操船に適した「実時間非線形最適制御手法」と呼ばれる新しい、いくつかの手法を開発した。開発した手法は、それぞれ特徴を持ち、自動操船の要求に応じて、最も適したものを使うことが出来るとともに、提案手法の有効性をすべて、実験によって確認した。さらに、開発した手法は、コンピュータソフトウェアとして船舶の自動操船装置に組み込むことで、既存の船舶の性能を向上させることができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶の運航はこれまで長年の経験を積んだ船員により行われてきた。しかし、先進国での人件費の高騰や船員志願者の不足、また効率的運用や省力化の観点から、操船の自動化が望まれている。操船の中でも着桟操船は船舶の運航上、最も難しい操船であるとされている。それは、着桟操船では船速を落としながら桟橋に向かうため、減速に伴って操舵性が著しく低下し、かつ外乱の影響を大きく受けようになるため高度な操船技術が要求されるためである。本研究では、着桟操船を主な対象として、実用化可能な新しい操船手法を開発し、最終的に実験によってその有効性を確認している点で、今後の人手不足や操船の高性能化への要求に応えるものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, we tried to improve the performance of automatic ship maneuvering system. At present, ship maneuvering is mainly performed by experienced captains. For this problem, we have developed several new methods called "Real-time Nonlinear Optimal Control Method" suitable for automated maneuvering. Each method has its own characteristics, and the most suitable ones can be used according to the requirements of automatic maneuvering, and the effectiveness of the proposed method is confirmed by experiments. Furthermore, the developed method can improve the performance of the existing ship's autopilot by embedding the algorithm into the control system as a computer software.

研究分野：制御工学

キーワード：自動操船 最適制御 非線形制御 着桟操船

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船舶の運航はこれまで長年の経験を積んだ船員により行われてきた。しかし、先進国での人件費の高騰や船員志願者の不足、また効率的運用や省力化の観点から、近年操船の自動化が望まれている。操船の中でも慣性の大きな船舶を巧みに操り、正確に所定の位置に停船させる着岸操船は船舶の運航上、最も難しい操船であるとされている。それは、着岸操船では船速を落としながら岸壁に向かうことになるため、減速に伴って操舵性が著しく低下し、かつ外乱の影響を大きく受けようになるため高度な操船技術が要求されるためである。

着岸操船の自動化については、操船所要時間を基準とした数学的に最適な操船法である最短時間着岸操船法が正司等や大津等によって導出されている。これは、非線形運動モデルを用いて着岸操船を定式化し、数値計算によって導くもので精度の高い信頼性のある操船法であることが示されている。しかしながら最短時間操船法による制御解は収束計算によって得られるため計算に時間を要し、実海域においてその時々々の環境に応じて計算するのは実用的ではない。また、事前にオフラインで求めておくとしても、予めあらゆる状況における制御解を求めておくのは非常に困難であるという問題があった。

2. 研究の目的

本研究は、近年要求の高い船舶の自動操船を「実時間非線形最適制御」によって高性能化し、自動操船によって運用可能な状況を可能な限り広めることを目指すものである。

船舶の自動操船の際に、船体の運動特性が非線形であることを考慮すると、高性能な制御系を構成可能であることはこれまでも明らかにされているが、非線形性を直接考慮した最適制御解の求解には複雑な計算が要求されることが多く、実時間で解を求めることが困難である。実時間性を重視して対象特性を線形近似し最適制御解を実時間で求める手法も提案されているが制御性能の低下は避けられない。それに対して、高性能化した組み込みコンピュータと実用的な非線形制御解の求解アルゴリズムを開発する本研究は実時間性と高い制御性能を同時に目指すものである。

3. 研究の方法

本研究では、これまでに行ってきた研究を基に、最短時間操船制御解の導出を非線形計画問題として定式化し、さらにマルチシューティング法による解法を並列計算によって実時間で求解可能なアルゴリズムの検討、遺伝的アルゴリズムによる最短時間操船制御解の求解と非線形モデル予測制御による制御システムの実装、数値計算によって求められた最短時間制御解のニューラルネットワーク (RNN) による非線形フィードバック制御装置化などを行った。

さらに、構築したアルゴリズムをマルチコアプロセッサを含む組み込みシステムに実装する手法を確立し、実船実験によってその有効性を評価した。

また、関連分野の研究として船舶の定点保持制御手法に関しても検討を行い、船舶の非線形運動特性を考慮することも試みた。

4. 研究成果

主な研究成果としては以下の3件がその代表である。

- (1) マルチシューティング法による最短時間操船解の導出と非線形モデル予測制御による制御系の実装。
- (2) 遺伝的アルゴリズムによる最短時間操船制御解の求解と非線形モデル予測制御によ

る制御システムの実装
 (3) リカレントニューラルネットワークによる最短時間最適制御系のフィードバック制御化

以下では上記のうち、これまでにない新しい考えに基づく(2)の手法の概要をまとめる

はじめに

着棧操船の自動化については、操船所要時間を基準とした最短時間操船によって制御解が数値的に求まることが知られている。しかし、初期条件や終了条件、外乱の条件により、数値計算にバラつきが生まれ、条件によっては制御解が求まらない問題があった。

本研究では着棧操船を目的関数最小化問題とし、遺伝的アルゴリズムを用いた着棧操船制御解導出方法を提案した。また、実船実験を行い、提案手法の有効性の検討を行った。

制御対象と問題の定式化

目的とする着棧操船を図1のように“ある位置において一定方向・速度で航行している船舶を、指定した位置へ、その位置での方向・速度を指定して移動させる操船”と定義する。

ここで、点Aは着棧制御開始位置、点Bは着棧位置手間の誘導目標の位置、座標原点Oは着棧位置で、着棧距離を l [m]とする区間を対象とする。また、 x, y は船体位置座標 [m]、 u, v はそれぞれ前進速度[m/s]、横方向速度[m/s]、 ψ は船首方位[deg]、 r は回頭角速度[deg/s]である。

船舶をある状態からある状態まで最短時間で移動させる操船法については2点境界値問題に置き換え、定式化することで制御解を数値的に解くことができる^[1]。しかし、外乱の条件により、数値計算の収束性が変化するため、実海域においての船舶の状態に応じて計算することは実用的でない。

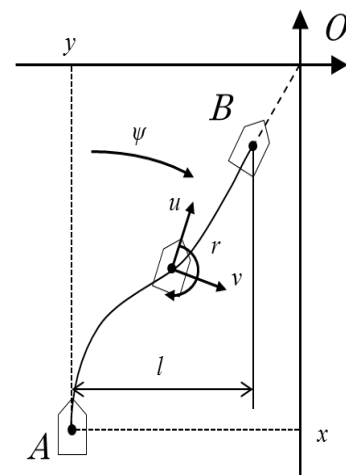


図1：目的とする着棧操船

提案した軌道生成手法

遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)とは、生物の進化過程を模した最適化手法の一つである。GAは集団ベースの探索手法であることから並列計算に向いている。このことから、本研究では評価計算のみ並列化したマスタ・スレーブ型GAを用いて、目的関数最小化問題を解くことで着棧操船の軌道生成を行った^[2]。本研究のGAのフローチャートを図2に示す。GAの設計変数として、舵角・CPP角の傾き、変化開始時間、変化終了時間の合計28変数とし、1変数を8bitで表現するため、224bitの最適化を行う。GAの各パラメータを表1に示す。また、着棧操船の目的関数を式(1)に示す。

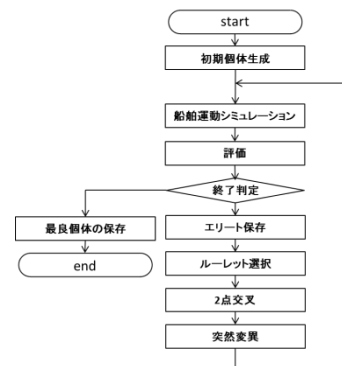


図2：フローチャート

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

$$f = W_\tau \int_0^1 \tau dt + W_{xy} \left\{ (x(\tau) - x_{ef})^2 + (y(\tau) - y_{ef})^2 \right\} + W_u \left\{ (u(\tau) - u_{ef})^2 \right\} + W_\psi \left\{ (\psi(\tau) - \psi_{ef})^2 \right\} \quad (1)$$

τ : 着岸所要時間

$x_{ef}, y_{ef}, u_{ef}, \psi_{ef}$: 誘導目標

$W_\tau, W_{xy}, W_u, W_\psi$: 重み係数

表1: GAのパラメータ設定

最大世代数	母集団	交叉確率	突然変異確率	エリート保存数
2000	512	0.7	0.3	1

軌道生成結果

提案手法と従来手法の比較を行った。着岸距離を245.8[m]とし、無風時、追い風時、横風時の風外乱での軌道生成を行う。軌道生成の計算時間を比較した結果を表2に示す。また、表3、図3に横風時の軌道生成結果を示す。

図3より、従来手法と提案手法とでは、生成された軌道に差があることがわかる。これは、目的関数の差に原因があると考えられる。しかし、表3より、着岸終了位置では、位置、前進方向速度、船首方位の誘導目標を満たしているため、提案手法で着岸操船の軌道生成ができてることがわかる。また、表2より、提案手法では風外乱によらず、約11[s]で計算が終了していることから、風外乱の影響を受けずに軌道生成ができています。

表2: 計算時間

	風向 [deg]	風速 [m/s]	計算時間[s]		計算速度
			従来手法	提案手法	
無風	0	0	2.77	11.07	0.25
追い風	5	180	2.38	11.21	0.21
横風	3	270	353.27	11.17	31.62

表3: 着岸終了時の状態(横風)

	τ [s]	x [m]	y [m]	u [m/s]	ψ [deg]
従来手法	220	-8.00	-4.20	1.29	20.00
提案手法	201	-7.98	-4.20	1.35	20.00

実船実験結果

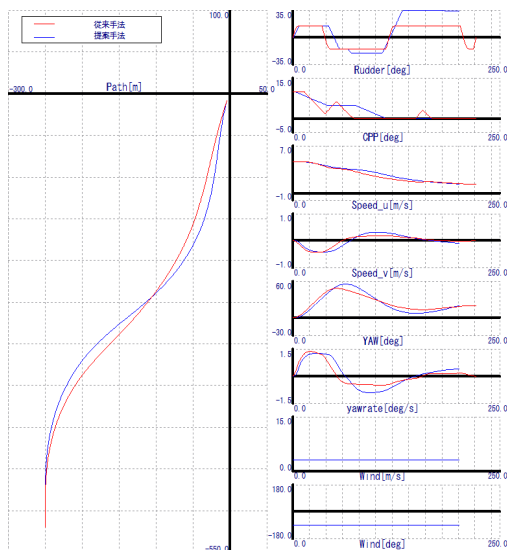


図3: 軌道生成結果

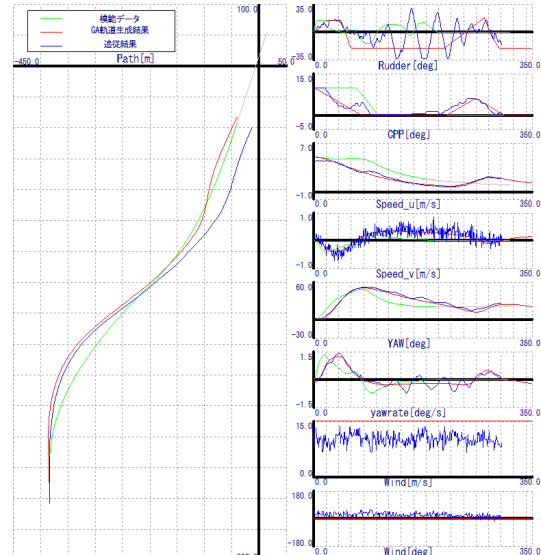


図4: 実海域での実験結果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

着岸距離が344.2[m]の着岸操船実験を行った。使用船舶は東京海洋大学所有の練習船汐路丸である。軌道生成は提案手法で行い、軌道追従制御は各務が提案したGPGPUを用いたモデル予測制御で行った^[3]。実験結果を図4に示す。実験状況の風外乱は風速15[m/s]、風向15[deg]であり、従来手法では計算不可能な外乱である。しかし、提案手法では28.5[s]で計算が終了した。その結果、風外乱が計算開始時と大きく変化することなく着岸操船を開始できている。

おわりに

本研究では、GAを用いた着岸操船制御解導出方法の提案を行い、提案手法での軌道生成を行った。さらに、実海域での着岸操船実験を行うことで、提案手法の有効性を示した。

<参考文献>

- [1] 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(第1報)”，日本操船学会論文集，第172号，pp.365 - 375 (1992)
- [2] 水野直樹，横田紘季，喜多孝公：“Solving Non-Linear Optimal Control Problem using Parallel Genetic Algorithm and Simulation Method”，GTC Japan 2016
- [3] 各務均：“着岸操船の自動化に関する研究”，平成22年名古屋工業大学大学院博士前期課程修士論文

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

N. Mizuno, T. Kita, T. Ishikawa, A New Solving Method for Non-Linear Optimal Control Problem and Its Application to Real System, Proceedings of IEEE IECON 2018, 査読有り, オンライン, 2018

Naoki Mizuno and Ryosuke Shibata, A Study on Simple Dynamic Positioning System based on Weather Vaning, Proceedings of IFAC CAMS2018, 査読有り, CD-ROM 2018

Naoki Mizuno, Naoki Saka and Takuya Katayama, A Ship's Automatic Maneuvering System Using Optimal Preview Sliding Mode Controller with Adaptation Mechanism, Proceedings of IFAC CAMS 2016, 査読有り, CD-ROM 2016

N. Mizuno, Y. Uchida, and T. Okazaki, Quasi Real-Time Optimal Control Scheme for Automatic Berthing, Proceedings of IFAC MCMC2015, 査読有り, CD-ROM 2015

〔学会発表〕(計7件)

窪島 亮, 水野 直樹, リカレントニューラルネットワークを用いた船舶の最短時間操船, 第61回自動制御連合講演会, 2018年11月17日~18日, 南山大学

熊谷 隼也, 水野 直樹, 遺伝的アルゴリズムによる非線形最適制御解の導出と着岸操船への応用, 第61回自動制御連合講演会, 2018年11月17日~18日, 南山大学

N. Mizuno, T. Kita, T. Ishikawa, A New Solving Method for Non-Linear Optimal Control Problem and Its Application to Real System, IEEE IECON 2018, 2018年10月20日~23日, Washington D.C., USA.

Naoki Mizuno and Ryosuke Shibata, A Study on Simple Dynamic Positioning System based on Weather Vaning, IFAC CAMS2018, 2018年9月10日~12日, OPATIJA, CROATIA

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

Naoki Mizuno and Takumi Kudo, On GPU Implementation of Optimal Control Algorithm with Arbitrarily Input Pattern Assignment based on Parallel Simulation and Genetic Algorithm, GTC Japan 2017, 2017年12月12日~13日, 東京

Naoki Mizuno, Naoki Saka and Takuya Katayama, A Ship's Automatic Maneuvering System Using Optimal Preview Sliding Mode Controller with Adaptation Mechanism, IFAC CAMS 2016, 2016年9月13日~16日, Trondheim, NORWAY

N. Mizuno, Y. Uchida, and T. Okazaki, Quasi Real-Time Optimal Control Scheme for Automatic Berthing, IFAC MCMC2015, 2015年8月24日~26日, Copenhagen, DENMARK

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。