

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04858

研究課題名（和文）最適制御理論と人工知能技術の融合による自動着岸技術の研究

研究課題名（英文）On Automatic berthing/docking by combining optimal control theory and artificial intelligence technology

研究代表者

牧 敦生 (Maki, Atsuo)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50556496

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では近年特に注目をされている自動離着岸技術について、最適制御理論と機械学習を融合した研究を行った。ここでは、これら2つの技術を主に軸とし、船を岸壁まで完全に自動で着岸をさせるためのアルゴリズムを複数提案をした。そして、外乱環境下における自由航走モデル試験によって検証を行い、提案したすべてのアルゴリズムにより、自動離着岸が行いうることを示した。一方、外乱に対するロバストをより向上させる必要があることなどの技術課題も浮き彫りとなった。本研究成果は、確実・安全な自動離着岸技術実現への一歩であり、我が国の造船・海運産業の国際競争力の強化と、自動運航技術の将来の飛躍につながるものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、自動運航船に関する大規模プロジェクトが各国で行われており、日本でも2025年までの自動運航船の実用化を目指しています。その中で自動離着岸技術に関する研究開発スパンは、他の研究課題よりもより長期に亘ると想定されており、この課題がよりハードルの高いものであることを示しています。離着岸時の船では、風外乱等の影響が大きく、操縦流体力も水深等により変化するため、制御の不安定性や不確実性が高まります。本研究で実施した船の動的システムのモデリング、オフライン離着岸航路計画、オンライン修正航路計画、オンライン制御というそれぞれの個別技術の大きな進展は、自動離着岸技術の早期実現に寄与するものです。

研究成果の概要（英文）：In this study, we establish the automatic berthing/docking algorithms by combining the optimal control theory and machine learning. Based upon these technologies, we proposed several algorithms in order to achieve automatic berthing under the external disturbance such as random wind. The proposed algorithms were well validated by a free-running model experiment in a disturbed environment, and we showed that all the proposed algorithms are capable of performing automatic berthing. On the other hand, the study also highlighted some issues, such as the less robustness of the algorithms for the strong wind disturbances. The results of this research are a step toward the realization of reliable and safe automatic berthing technology, and are expected to strengthen the international competitiveness of Japan's shipbuilding industries.

研究分野：Marine Engineering, Control Theory

キーワード：Automatic berthing Autonomous vessel Optimal control Machine Learning Reinforcement learning

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

平成29年6月、自動運航船の2025年の実用化を目標とした研究開発を行うことを示した政府方針が閣議決定されました(未来投資戦略2017)。また、その後の平成30年3月に策定された、自動運航船実現に向けてのロードマップにおいて、自動離着棧は2025年頃以降の「フェーズ3」という最終段階での実現に向けた研究開発が進められることになりました。自動離着棧の研究開発スパンは、ほかの研究課題よりもやや長期に亘って設定されており、この研究課題がよりハードルの高いものであることを示しているとも言えるでしょう。また、特に近年、内航海運の船員不足が深刻なものになりつつもあり、船員への労働負荷の大きい自動離着棧技術の早期実現が叫ばれるようになってきました。

離着棧時の船は低速であるため舵効きが悪く、通常航行時のような操船はできません。また、特殊な船を除き、通常の内航貨物船では、十分な余裕あるサイドスラスターの能力を有しているとは必ずしも言い切れず、船長の優れた操船技術により離着棧が行われているのが現状です。上記のような船員不足が将来より顕在化すると、経験に基づく高い技量の要求される離着棧操船の安全性が保てなくなる心配がありました。本研究は、そのような問題を一挙に解決すべく、離着棧操船を完全に自動化するための基礎技術の開発を目的として行いました。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記背景を鑑み、完全な自動離着棧アルゴリズムを確立することを目的として、要素技術の確立を目指した基礎研究を行いました。自動離着棧技術の研究開発は、1980年代まで遡ります。80年代後半の時点で、すでに実船を用いた自動離着棧試験に成功するなど、この研究課題は比較的長い研究の歴史を有しています。その際に用いられた船は、サイドスラスターや可変ピッチプロペラなど、アクチュエータを普通の船よりもかなり多く装備をした船でした。一方、上で述べたように、内航海運に従事する貨物船の多くは、そのような十分なアクチュエータを有しているわけでは必ずしもありません。従って、比較的制御の冗長性の乏しいシステムについても、安全かつ素早く自動で離着棧をするシステムを開発する必要がありました。

1980年代後半と比較すると、計算処理速度が飛躍的な向上を遂げています。従って、本研究課題の実施に際しては、ある程度高度な計算処理を要する計算方法が選択できると考えられました。例えば、時々刻々、比較的大規模な最適化計算をリアルタイムで行うことや、大きなニューラルネットワークで構成される制御器を最適化することなど、当時ではとても行いえなかったアプローチで問題を根本的に解決するための方法論の確立を試みました。

### 3. 研究の方法

本研究では、難易度の高い自動離着棧操船技術を、次のような3つの技術的課題に分けて取り組むこととしました。

#### (1) 船の運航データのみを用いた動的モデル(運動方程式)の逆推定手法

離着棧制御を考える上で、船舶の運動を支配する動的モデル、すなわち運動方程式を得ることは必要不可欠です。動的モデルを得ることにより、制御則のチューニングや制御の安定性の検討を初めて行うことができるようになります。日本では過去、操縦運動の動的モデルについての研究が熱心に行われてきており、動的モデルの推定法もある程度確立されています。しかし、通常の方法では水槽試験の実施が必須であり、大きな時間とコストを要することが実用上の問題と考えられました。そこで、この研究では、船の運航データから動的モデルを逆推定する、いわゆる System Identification 手法を、大規模な最適化技術を軸として確立することとしました。

#### (2) 船長が行うような、高いリアリティーを有するオフラインでの離着棧軌道の自動生成手法

本研究の最終目的は、自動離着棧をオンラインで行うことにありました。しかし、リアルタイムで離着棧航路をゼロから毎回求めることは難しく、現時点では現実的ではないと考えられました。そこで、予め求めた離着棧の参照軌道を、オンラインのトラッキング制御手法により追従するアプローチをとることとしました。そのためには、現実的な離着棧軌道を簡便且つ自動的に生成するアルゴリズムが必要となります。この研究では、あたかも船長が行うような現実的かつ安全な離着棧軌道の自動生成アルゴリズムを確立することとしました。

#### (3) オンラインでの離着棧制御手法

本研究での最終課題である、オンラインの離着棧制御手法は、上記のように参照軌道の追従制御により行うこととしました。具体的な追従制御手法としては、モデルベースのPID制御技術に加え、機械学習を用いた制御技術など、いくつかのアプローチをとることとしました。また、自動制御に際しては、その制御アルゴリズムの入力に用いる船の時々刻々の状態量を精度良く推定することが必要となります。そのため、本研究では、非線形な状態空間モデルを用いることが可能な高度なカルマンフィルタ手法を用いてオブザーバーを構成することも試みました。

#### 4. 研究成果

一つ目の課題(1)である、System Identification 手法については、本研究で提案した手法では、動的モデルの中に含まれている数十から数百というオーダーの未知パラメータを、大規模な大域的最適化により求めることが可能となりました。その結果、最適化された運動モデルは、水槽実験で得られる係数を用いた運動モデルよりも優れた精度で、複雑な低速操縦運動を推定できることが分かりました。この成果により、大きな時間とコストを要する水槽試験を省略し、さらに従来手法以上の推定精度を有する動的モデルを得ることができる可能性があることが分かりました。

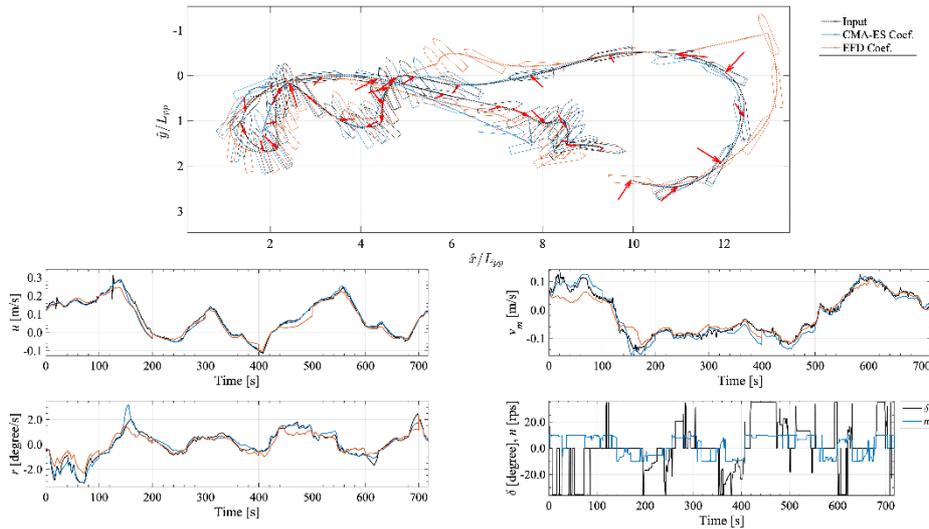


図 低速操縦時のモデル同定・逆推定の例

二つ目の課題(2)である、オフラインでの離着棧軌道の自動生成手法については、本研究で提案した手法により、あたかも人間が行うかのような現実的な着棧航路を自動的に生成することが可能となりました。この方法はもちろん離着棧の自動化にも直接寄与をしますが、そのみならず、経験の浅い船長に理想的な着棧航路の情報が提供できるようになる、という点でも大きなアドバンテージを有しているといえるでしょう。

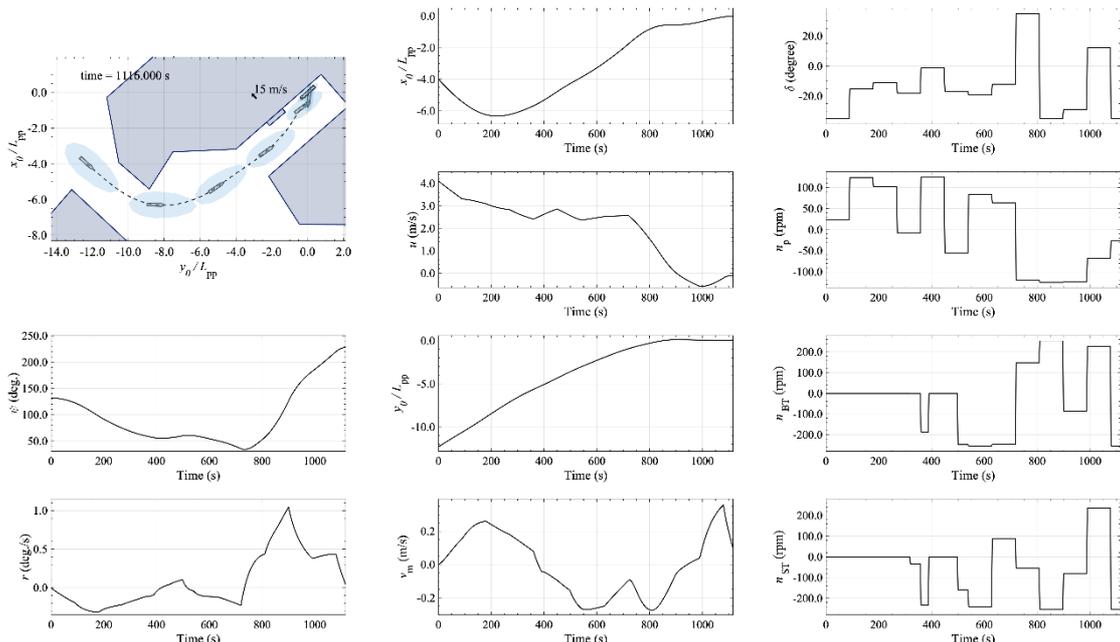


図 申請者らのアルゴリズムにより得られた大阪港での着棧航路計画の例

三つ目の課題(3)である、オンラインの離着棧制御手法については、本研究で提案したいくつかの制御手法により、自動離着棧が可能となりました。特に、自動離着棧のデモンストレーションで行われることの多い「入船」の自動着棧制御のみならず、岸壁の前で180度ターンをする

ような「出船」での自動着棧制御も行い、いずれについても精度よい制御が行いことが示されました。これらの手法は、大阪大学実験池での実証実験でもその性能を確認することができました。

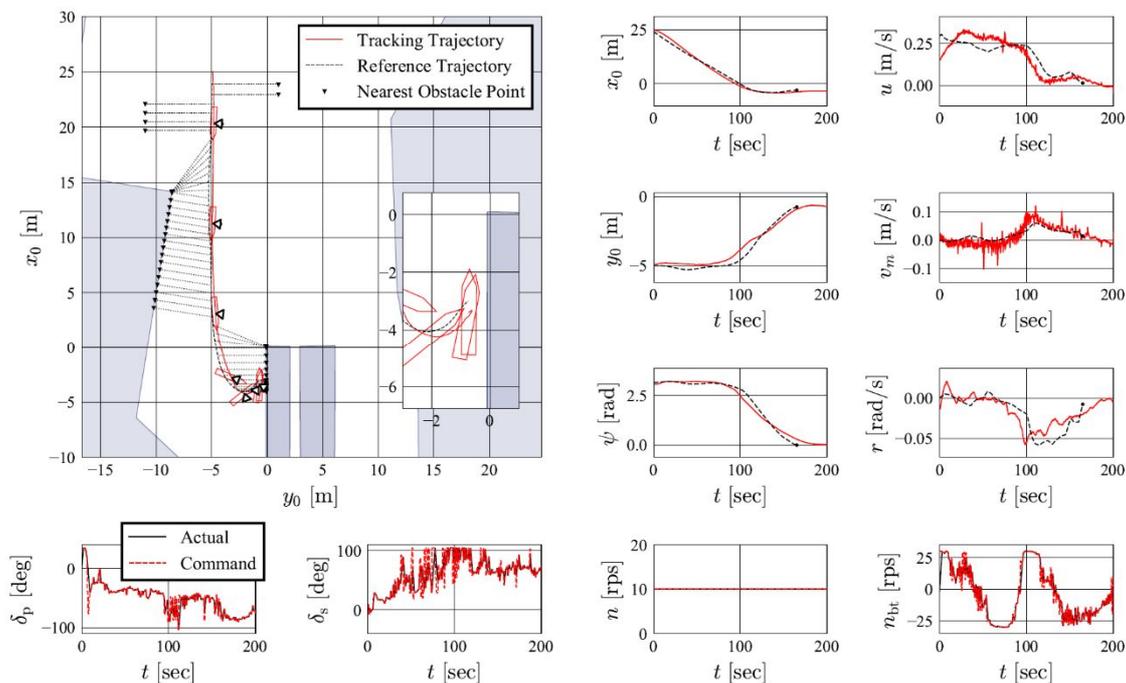


図 模型船による自動離着棧実験の結果

一方、この研究により新たな課題も浮き彫りになりました。まず、動的モデルの推定を本研究では行っていますが、高度なモデルを作成しても、誤差を完全にゼロにすることは不可能です。よって、その生じる誤差を陽に考えたうえで、さらにロバストな制御則を求める必要があることが分かりました。加えて、本研究では、上述のように、二つ目の課題（2：オフラインの航路計画）と三つ目の課題（3：オンラインの着棧制御則）を完全に分けて検討してきましたが、これらは実際には不可分ではない可能性があることも改めて認識されました。すなわち、オンライン制御をする際の参照軌道として、より「質」の高いものを用意する必要があることとなります。そして、オンライン制御の側面から、オフラインでの計画航路を考え直す必要があることが分かりました。その際の「質」についても、単に人間の行う操船に近いものを目指すのみでは難しく、トラッキング制御に一時的に失敗をした際に、それでもなお衝突をせず、元の航路に復帰しやすいものとする必要があると考えられます。

新たに採択された課題（基盤研究（B））「デジタルツイン・機械学習・確率理論を融合した自動港内操船制御則に関する研究」では、これらの課題を踏まえ、より安全な自動離着棧を可能とする自動制御アルゴリズムの研究を行いたいと考えます。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Rachman Dimas M., Maki Atsuo, Miyauchi Yoshiki, Umeda Naoya	4. 巻 252
2. 論文標題 Warm-started semionline trajectory planner for ship's automatic docking (berthing)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 111127 ~ 111127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2022.111127	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 Akimoto Youhei, Miyauchi Yoshiki, Maki Atsuo	4. 巻 2
2. 論文標題 Saddle Point Optimization with Approximate Minimization Oracle and Its Application to Robust Berthing Control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Evolutionary Learning and Optimization	6. 最初と最後の頁 1 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3510425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Miyauchi Yoshiki, Sawada Ryohei, Akimoto Youhei, Umeda Naoya, Maki Atsuo	4. 巻 245
2. 論文標題 Optimization on planning of trajectory and control of autonomous berthing and unberthing for the realistic port geometry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 110390 ~ 110390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2021.110390	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 Wakita Kouki, Maki Atsuo, Umeda Naoya, Miyauchi Yoshiki, Shimoji Tohga, Rachman Dimas M., Akimoto Youhei	4. 巻 27
2. 論文標題 On neural network identification for low-speed ship maneuvering model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 772 ~ 785
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-021-00867-1	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 Maki Atsuo, Akimoto Youhei, Naoya Umeda	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of optimal control theory based on the evolution strategy (CMA-ES) to automatic berthing (part: 2)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-020-00774-x	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28件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Rachman Dimas M, Umeda Naoya, Maki Atsuo
2. 発表標題 Warm-started Online Trajectory Planner for Ship's Docking (Berthing) under Wind Disturbance
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koike Hiroaki, Dostal Leo, Miyachi Yoshiki, Amano Nozomi, Fueki Yuta, Maki Atsuo, Umeda Naoya
2. 発表標題 Nonlinear Filtering for Low Speed Maneuvering Motion Using a 3DoF Maneuvering Model
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 巢山凜, 牧敦生, 宮内新喜, 白川真一
2. 発表標題 遺伝的プログラミングを用いた船体運動モデル同定 における入力端子の影響について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田翠星, 牧敦生
2. 発表標題 操船システムの実装と評価を繋ぐデジタルツイン環境の実現(第1報)自動運航船の研究開発を促進する汎用的実機システムの構築
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 脇田康希, 牧敦生, 秋本洋平, 巢山凜, 宮内新喜, 青木佑介, 梅田直哉
2. 発表標題 着陸制御に向けた不規則風外乱下における経路追従及び定点保持制御の強化学習を用いた獲得手法について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮内新喜, 牧敦生, 秋本洋平, 梅田直哉
2. 発表標題 離着陸・低速時複雑運動を再現する四象限Abkowitzモデル
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牧敦生, 丸山湧生, Dostal Leo, 酒井政宏, 澤田涼平, 笹健児, 梅田直哉
2. 発表標題 自動運航性能評価のための不規則風外乱の高速計算アルゴリズムの開発
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牧敦生, 星野健太, Leo Dostal, 丸山湧生, 羽根冬希, 芳村康男, 梅田直哉
2. 発表標題 確率外乱が針路不安定性に与える影響に関する一考察
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牧敦生, 星野健太, 天野希海, 羽根冬希, 梅田直哉
2. 発表標題 非線形性を考慮したオートパイロットについての一考察
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笛木 雄太, 小池 弘顕, 正司 公一, 谷口 拓也, 梅田 直哉, 牧 敦生
2. 発表標題 制御入りARMA モデルを状態空間モデルとして用いたカルマンフィルタによる船舶の状態量推定に関する一考察
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Koike, Leo Dostal, Koichi Shoji, Nozomi Amano, Atsuo Maki
2. 発表標題 Nonlinear Filtering for Parameter Estimation of 1DoF Maneuvering Model
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牧 敦生, 脇田 康希, 秋本 洋平
2. 発表標題 ベクトル舵のジョイスティック操船の高機能化に向けた予備的研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水 彰馬, 白川 真一, 牧 敦生
2. 発表標題 教師あり学習と強化学習による着桟制御則の獲得
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋本 洋平, 宮内 新喜, 牧 敦生
2. 発表標題 モデル化誤差に対してロバストな着桟制御に向けた検討
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 脇田 康希, 秋本洋平, 正司公一, 宮内 新喜, 梅田直哉, 牧 敦生
2. 発表標題 理想環境下で学習された船舶追従制御方策の 現実環境への転移について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牧 敦生, 脇田 康希, 正司公一, 宮内 新喜, 梅田直哉
2. 発表標題 CMA-ES による大域的最適化に基づく低層なニューラル・ネットワークを用いた船舶のトラッキング制御について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Miyachi, Atsuo Maki, Naoya Umeda, Dimas M Rachman, Tohga Shimoji, Koki Wakita, Youhei Akimoto
2. 発表標題 On the System Identification for Low-speed Maneuvering Model by Using CMA-ES (4th Report) -Estimation on Random Maneuver-
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田凱, 清水彰馬, 白川真一, 牧敦生
2. 発表標題 日本船舶海洋工学会春季講演会
3. 学会等名 階層型強化学習による着棧制御則の獲得
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下地冬芽, 牧敦生, Dimas M Rachman, 梅田直哉, 白川真一
2. 発表標題 遺伝的プログラミングによる低速操縦運動に関する動的システム同定手法の基礎的研究 (第一報)
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 牧敦生, 青木佑介, 戸田保幸, 有井俊彦, 岡居真菜美, 小林章浩, 梅田直哉
2. 発表標題 高機能VecTwin 舵の特殊操舵時における流体性能に関する一考察 (第一報)
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 脇田康希, 牧敦生, 下地冬芽, 梅田直哉, Dimas M Rachman, 秋本洋平
2. 発表標題 低速船舶操縦運動モデルのシステム同定手法 (第一報: ブラックボックスアプローチ)
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西川博之, 牧敦生, 梅田直哉, Dimas M Rachman, 下地冬芽, 秋本洋平
2. 発表標題 進化計算法CMA-ES を用いた低速操縦性モデルのパラメータ同定に関する基礎的研究 (第三報) ~自由航走試験を用いた検討~
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 牧敦生, 天野希海, 梅田直哉, Dimas M Rachman, 正司公一
2. 発表標題 自動着岸問題へのリアルタイム制御適用に関する一考察
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Dimas, M.R., 牧敦生, 梅田直哉
2. 発表標題 Numerical Simulation of Automatic Berthing by CMA-ES in Real Time
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下地冬芽, 牧敦生, 宮内新喜, Dimas, M.R.
2. 発表標題 遺伝的プログラミングによる低速操縦運動に関する動的システム同定手法の基礎的研究 (第二報)
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮内新喜, 牧 敦生, 梅田直哉, Dimas, M.R., 下地冬芽, 脇田康希, 秋本洋平
2. 発表標題 On the System Identification for Low-speed Maneuvering Model by Using CMA-ES (4th Report) -Estimation on Random Maneuver
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 脇田康希, 牧敦生, 下地冬芽, 梅田直哉, 宮内新喜, 秋本洋平, Dimas, M.R.
2. 発表標題 低速船舶操縦運動モデルのシステム同定手法 (第二報: ブラックボックスアプローチ)
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 牧敦生, 梅田直哉他
2. 発表標題 進化計算手法CMA-ES を用いた低速操縦性モデルのパラメータ同定に関する基礎的研究 (第二報)
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集(2019)
4. 発表年 2019年

〔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
研究分担者	梅田 直哉 (Umeda Naoya)  (20314370)	大阪大学・工学研究科・教授  (14401)	
研究分担者	秋本 洋平 (Akimoto Youhei)  (20709654)	筑波大学・システム情報系・准教授  (12102)	
研究分担者	白川 真一 (Shirakawa Shinichi)  (90633272)	横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授  (12701)	

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		
ドイツ	ハンブルグ工科大学		