

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02381

研究課題名（和文）データ同化と学習理論による小型高速船の実時間運動予測

研究課題名（英文）Real-Time Motion Prediction of Small High-Speed Vessels Using Data Assimilation and Learning Theory

研究代表者

寺田 大介（Terada, Daisuke）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・教授

研究者番号：80435453

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、小型高速船の安全運航支援システムの開発を念頭におき、その要素技術である船体運動の実時間予測法の構築を目的として行った。運動の予測は、逐次データ同化により船体に作用する波浪などの外力を推定した後に、この外力をリカレントニューラルネットワークや放射基底ニューラルネットワークなどの学習理論に基づいてモデル化し、このモデルで予測した外力の時系列を逐次データ同化で使用したシミュレーションモデルの駆動力として与えることにより行った。予測性能は推定した外力の位相情報に依存することが明らかとなった。また、小型高速船に関する新しい模型実験システムの開発が実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

逐次データ同化と学習理論を融合することにより、不規則な運動の予測が物理モデルに基づいて実現できることを示した点は学術的な意義が大きい。また、予測性能を決定づける要因が特定できたことから、今後の研究・開発の進展が見込める。本研究課題の成果を応用することにより、操船者の操船行為に起因する小型高速船の海難は未然に防止できることから、社会的な意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to develop a real-time prediction method for ship motion, which is an elemental technology for the development of a safety operation support system for small high-speed vessels. The motion was predicted by estimating the external forces such as waves acting on the hull by successive data assimilation, modeling these external forces based on machine learning theories such as recurrent neural networks and radial basis neural networks, and giving the time series of external forces predicted by this model as the driving force for the simulation model used in successive data assimilation. This was done by giving the time series of external forces predicted by this model as the driving force of the simulation model. It was found that the prediction performance depends on the phase information of the estimated external force. In addition, the development of a new model experiment system for small high-speed vessels was realized.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海難防止 海上安全

### 1. 研究開始当初の背景

離島間を航行する旅客船、漁船および遊漁船に代表される小型高速船の事故(海難)は、信頼性の高い船体運動理論ならびに種々のセンシングデバイスが開発されている現在においても、未だに発生している。海難の原因には、船の性能に関する知識不足によるものが含まれている。このような船の性能に関する知識不足は、操船者の保有する海技免状のグレードによるところが大きい。したがって、海技免状のグレードに起因する海難を防止するためには、小型高速船に対して、船の性能に関する知識不足を補うフェールセーフな安全運航支援システムの搭載が効果的であると考えられる。システムには、運航モニタリングデータに基づく運動の時系列予測、およびその情報を操船者に提供する機能が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究は、小型高速船の安全運航支援システムの開発を念頭におき、その要素技術である船体運動の実時間予測法の構築を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 予測方法の確立

予測方法は逐次データ同化と学習理論を融合した方法を新たに提案した。具体的には、先ず逐次データ同化により船体に作用する波浪などの外力を推定した。次に、この外力をリカレントニューラルネットワークや放射基底ニューラルネットワークなどの学習理論に基づいてモデル化した。最後に、運動の予測は、このモデルで予測した外力の時系列を、逐次データ同化で使用したシミュレーションモデルの駆動力として与えることにより行った。

#### (2) 検証方法

提案した方法の有効性は模型船実験および実船実験のデータに基づいて検証した。

### 4. 研究成果

対象船は排水量型の漁船、滑走型の旅客船および船外機付きのプレジャーボートとした。予測する運動モードは、漁船に関しては縦揺れ、旅客船に関しては上下加速度およびプレジャーボートに関しては前後揺れ - 左右揺れ - 船首揺れの3自由度連成運動とした。

予測方法は、前述のとおり、逐次データ同化と学習理論を融合した方法を新たに提案した。種々の検討を行った結果、以下の手順によれば、操船者が危険を回避できる時間を確保した予測が実現できることが明らかとなった。

- (1) 対象とする運動モードの運動方程式を離散化し、外力項の時間変動量を推定対象として、逐次データ同化を実施する。ただし、運動方程式の係数は、逐次データ同化を行う際に定係数として、同時に同定する。また、この場合における観測データは船体運動である。
- (2) 推定した外力の時系列をリカレントニューラルネットワークや放射基底ニューラルネットワークなどの学習理論に基づいてモデル化する。
- (3) 運動の予測は、このモデルで予測した外力の時系列を、逐次データ同化で使用したシミュレーションモデルの駆動力として与えることにより行う。

シミュレーションモデルは、対象とする運動に関する運動方程式を陰解法である Newmark-法で離散化したものおよび陽解法である4段4次のルンゲ-クッタ法で離散化したものを検討した。その結果、上下加速度の予測に関しては、Newmark-法で離散化したモデルの方が数値計算を安定して行えるとともに、逐次データ同化を行う際の観測過程においては単純な線形観測モデルとすることが可能となった。縦揺れおよび前後揺れ - 左右揺れ - 船首揺れに関しては、運動の非線形性がそれほど強くないため、いずれの方法を採用しても数値計算の安定性は同程度であった。ただし、観測データとして加速度を使用する場合は、Newmark-法を用いて運動方式離散化したモデルを用いる方が、観測モデルを線形観測モデルが利用できるため便利である。

逐次データ同化で用いた観測データは、漁船に関しては横浜国立大学が実施した漁業調査船「たか丸」の実船実験時に取得した計測データ、旅客船に関しては大阪公立大学が実施した小型旅客船の模型実験時に取得した計測データおよびプレジャーボートに関しては大阪公立大学が実施した古野電気株式会社殿所有の研究船の模型実験時に取得した計測データである。なお、プレジャーボートの模型実験に関しては、図1に示した超小型の船外機模型を製作し、推力とトル

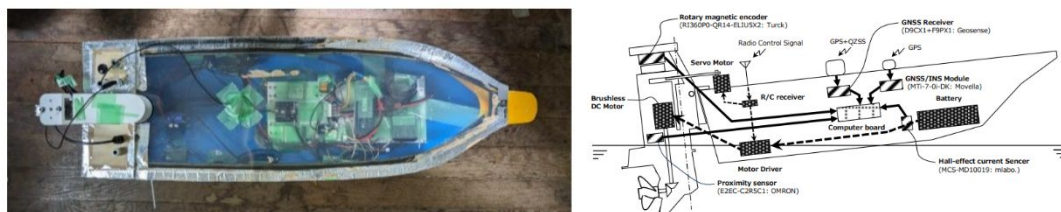


図1 製作した自由航走模型船

クなどの力を計測できる自由航走模型実験システムを新たに構築した。これにより、船外機に関する数学モデルの精緻化を図ることが可能となった。

予測方法に関する詳細な検討は強非線形現象である小型旅客船の上下加速度を重点的に実施した。解析に使用したデータを図2に示す。図は上が上下加速度の時系列であり、下が変位の時系列である。図中の赤枠で囲った部分の時系列を用いて一連の解析・予測を行った。図3は推定した外力とその結果を用いて再現した上下加速度の時系列を示している。この結果から、逐次データ同化で外力が上手く推定できていることおよびその結果を用いて再現した上下加速度が観測データとよく一致していることが分かる。図4は、逐次データ同化で推定した外力を $[0, 1]$ の範囲で正規化し、これをリカレントニューラルネットワークでモデル化して予測した結果である。図5は図4で示した外力の予測結果を用いて予測した上下加速度の時系列を示している。図中の赤色が観測データであり、緑色が予測結果である。この図から、0.2秒程度は上手く予測できているが、その後は予測結果が観測データから乖離することが分かる。この原因を詳細に検討した結果、スパイク上の加速度が生じる際の外力は大きな負の値になる傾向があり、この位相情報を上手くモデル化できていないことが予測精度に関係していることが明らかになった。したがって、今後の検討課題としては、外力の位相情報を適切にモデル化する方法を構築することである。

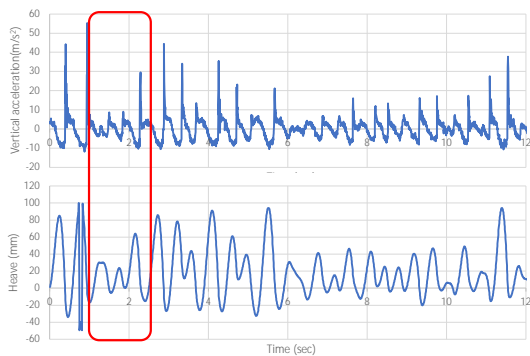


図2 解析に使用したデータ

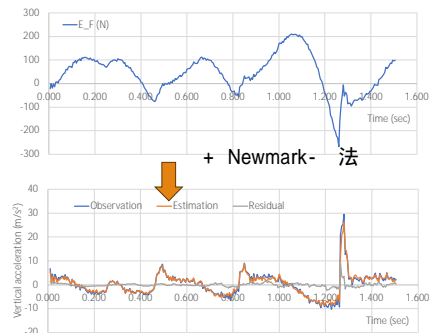


図3 推定した外力とその結果を用いて再現した上下加速度

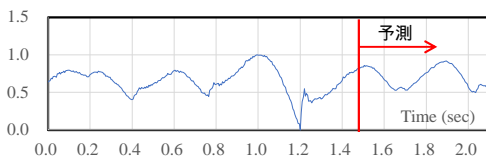


図4 正規化した外力の予測結果

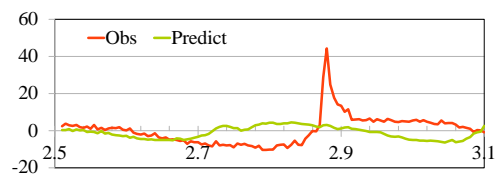


図3 上下加速度の予測結果

予測に係る時間に関しては、縦揺れおよび前後揺れ - 左右揺れ - 船首揺れの3自由度連成運動においては実時間での予測が可能であることを確認した。ただし、強い非線形性を持つ上下加速度に関しては、実時間での予測を実現できていないことから、今後はアルゴリズムの見直しなどを行う必要がある。

なお、深層強化学習によりこのスパイク状の上下加速度の長期予測は良い精度で実現できることを示したが、実験条件が異なるデータに対してはそのデータに対する学習を行う必要があることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 寺田大介、絹笠瑞樹、片山徹、平川喜昭
2. 発表標題 小型高速船に生じる上下加速度の予測について
3. 学会等名 実海域推進性能研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺田大介,片岡優斗
2. 発表標題 船の線形操縦運動数学モデルのパラメータ推定
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺田大介、絹笠瑞樹、片山徹、平川喜昭
2. 発表標題 小型高速船に生じる上下加速度の予測について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会推進・運動性能研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 片岡優斗、寺田大介、松田秋彦
2. 発表標題 データ同化による規則波中で旋回する船に作用する定常波力の推定
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 絹笠瑞基、山内星徳、畠中浩行、寺田大介、片山徹
2. 発表標題 DNNを用いた小型ボートの低速操縦運動推定
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 片山徹、小倉魁一、絹笠瑞樹、谷口友基
2. 発表標題 船外機付き小型ボートの自由航走模型試験システムの開発
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mizuki Kinugasa, Yusuke Yamamoto, Daisuke Terada, Toru Katayama
2. 発表標題 LSTM based model predictive control of Motion Stabilized Platform to equip Doppler Lidar for Offshore Wind Observations
3. 学会等名 42nd International Conference on Ocean,Offshore&Artic Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mizuki Kinugasa, Tomoki Taniguchi, Daisuke Terada, Masahiro Nannba, Toru Katayama
2. 発表標題 Maneuvering Motion Simulation based on Deep Neural Network
3. 学会等名 10th PAAMES and AMEC 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺田大介、絹笠瑞樹、片山徹、平川喜昭
2. 発表標題 不規則波の予測について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会推進・運動性能研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺田大介、絹笠瑞樹、片山徹、平川喜昭
2. 発表標題 不規則波の予測について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 寺田大介
2. 発表標題 自由航走試験データを用いた操縦運動数学モデルのパラメータ推定
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺田大介、絹笠瑞樹、片山徹、平川喜昭
2. 発表標題 不規則波中で小型高速船に生じるスパイク状加速度の予測
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 絹笠瑞基, 寺田大介, 片山徹
2. 発表標題 LSTMを用いた小型高速旅客船の不規則向波中上下加速度の時系列予測
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤雅裕、寺田大介、松田秋彦
2. 発表標題 4自由度操縦運動モデルのパラメータ推定
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 寺田大介
2. 発表標題 4自由度操縦運動モデルのパラメータ推定
3. 学会等名 実海域推進性能研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺田大介
2. 発表標題 2基POD推進船の操縦性能とその推定
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 寺田大介
2. 発表標題 縦揺れ時系列の予測について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会推進・運動性能研究会
4. 発表年 2021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	平川 嘉昭  (Hirakawa Yoshiaki)  (00345480)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授   (12701)	
研究分担者	片山 徹  (katayama Toru)  (20305650)	大阪公立大学・大学院工学研究科・教授   (24405)	

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
---------	---------