

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06978

研究課題名(和文) 統計的モデル予測制御を用いた舵減揺型オートパイロット

研究課題名(英文) Rudder-Roll stabilization autopilot based on statistical model predictive control

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では統計的モデル予測制御による舵減揺型オートパイロットの開発に取り組んだ。モデル予測制御に用いる数学モデルとして、横流れおよび旋回との連成影響を含んだ横揺れ応答モデルを提案した。また、横揺れ応答モデルのパラメータ推定法として逐次データ同化を用いる方法も同時に提案した。さらに、連続時間における横揺れ応答モデルはステップ不変な変換により離散化できることを示した。モデル予測制御に関しては、粒子フィルタを用いる方法を採用し、安定した制御を実現するための評価関数を提案した。提案した制御方法は、数値実験により検証し、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでは不可能であった、操縦運動中における横揺れの応答モデルを構築できた点が非常に大きな成果である。厳密な数学モデルを構築できたことにより、様々な制御方法による舵減揺システムの開発の可能性を切り開いた。この点が学術的な意義である。
船の横揺れを舵のみで減じることができれば、横揺れによる貨物損傷などを防止でき、船の安全運航に大きく貢献できる。さらに、揺れの低減は船の抵抗も減少させるため、経済運航への寄与もある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempted to develop a rudder-roll stabilization autopilot by statistical model predictive control. As a mathematical model used for model predictive control, we proposed a roll response model including the coupling effect of drift and yaw motion. We also proposed a method using successive data assimilation as a parameter estimation method for the roll response model. Furthermore, it is shown that the roll response model in continuous time can be discretized by step-invariant transformation. As for model predictive control, we adopted a method using a particle filter and proposed an evaluation function for realizing stable control. The proposed control method was verified by numerical experiments and its effectiveness was shown.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：操縦性 横揺れ応答モデル ARXモデル モデル予測制御 粒子フィルタ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

舵を効果的に用いることによって船の横揺れを減じることができる。これは、積載貨物の損傷防止などに有効であるため、実用化できれば船の安全運航に多大な貢献ができる。また、横揺れは船体抵抗にも大きく関係しており、横揺れを低減することは経済運航にも多大な貢献ができる。したがって、安全性・効率性を両立した船舶運航システムを確立する上で、舵減揺型オートパイロットの開発は有益である。

2. 研究の目的

前述の背景に基づき、この研究課題では統計的モデル予測制御による舵減揺型オートパイロットの開発を目的とした。

3. 研究の方法

研究の当初は船首方位と横揺れ角速度を被制御変数、舵角を制御入力とする RBF-ARX モデルをモデル予測制御のための数学モデルとして使用することを考えていたが、この方法よりも左右揺れ 船首揺れ 横揺れの 3 自由度操縦運動数学モデルから導出した横揺れ応答モデルを用いた方法が種々の面で有益であることが明らかになった。

- (1) そこで、モデル予測制御のための数学モデルとしては横揺れ応答モデルを用いることとした。なお、横揺れ応答モデルのパラメータ推定法として、逐次データ同化を用いる方法の有効性も同時に示した。
- (2) 次に、横揺れ応答モデルは、ステップ不変な変換で離散化することによって、線形 ARX モデルで表させることを示した。この線形 ARX モデルが操舵直後の過渡的な横揺れ応答をよく表現できることを数値実験に基づいて確認した。なお、この離散化の結果、被制御変数は船首方位と横揺れとなる。
- (3) 統計的モデル予測制御の方法としては、モンテカルロ粒子フィルタのアルゴリズムを応用した方法を提案した。また、安定した制御を実現するために、終端コストを考慮した評価関数の有効性も提案した。
- (4) (3)で構築した統計的モデル予測制御による舵減揺型オートパイロットの有効性は数値実験に基づいて検証した。

なお、計算コードは FORTRAN および C 言語により構築した。

4. 研究成果

前述のとおり、研究当初は RBF-ARX モデルをモデル予測制御のための数学モデルとして使用することを考えていた。しかしながら、横揺れの運動方程式に含まれるパラメータの同定について検討を進める過程で、左右揺れ 船首揺れ 横揺れの 3 自由度操縦運動数学モデルから導出された横揺れ応答モデル(以後、「Y-Y モデル」)が数学モデルとして利用できる可能性に気付いた。そこで、Y-Y モデルの各項を詳細に検討して、2 次系近似モデルが操舵直後の過渡運動をよく表現できる可能性を示した。これに関して数値実験に基づいて確認した。結果の一例を図 1 に示す。結果はコンテナ模型船のデータを用いて生成した数値データに対する比較である。図中の細い実線が真値であり、点線が 1 次系近似のモデル、破線が 2 次系近似のモデルおよび一点鎖線が厳密な 4 次 Y-Y モデルの結果をそれぞれ示している。また、太い実線は舵角である。この図から、2 次系近似のモデルが真値の傾向をよく捉えていることがわかる。2 次系近似のモデルは 4 個のパラメータで表現できることになるが、その推定方法としては逐次データ同化による方法が有効であることを確認した。その結果を図 2 に示す。これらの図からいずれの係数も比較的短時間で真値に収束していることがわかる。一方、RBF-ARX モデルに関してはパラメータ推定に時間を要するという点及び実際の物理モデルとの関連性を厳密に評価できないという課題がある。そのため、今後の研究においては 2 次系近似の Y-Y モデルのみに着目することとした。

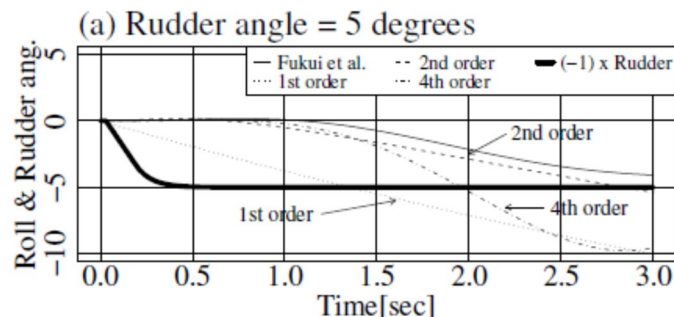


図 1 操舵による横揺れ応答の時系列

次に、2 次系近似の Y-Y モデルはステップ不変な変換により線形 ARX(2,2)モデルで離散近似できることを示した。Y-Y モデルの係数(操縦性指数)が確定していれば、このモデルの自己帰帰係数は操縦性指数を用いて陽に計算できる。実際の船舶運航では、出港後における種々の作業

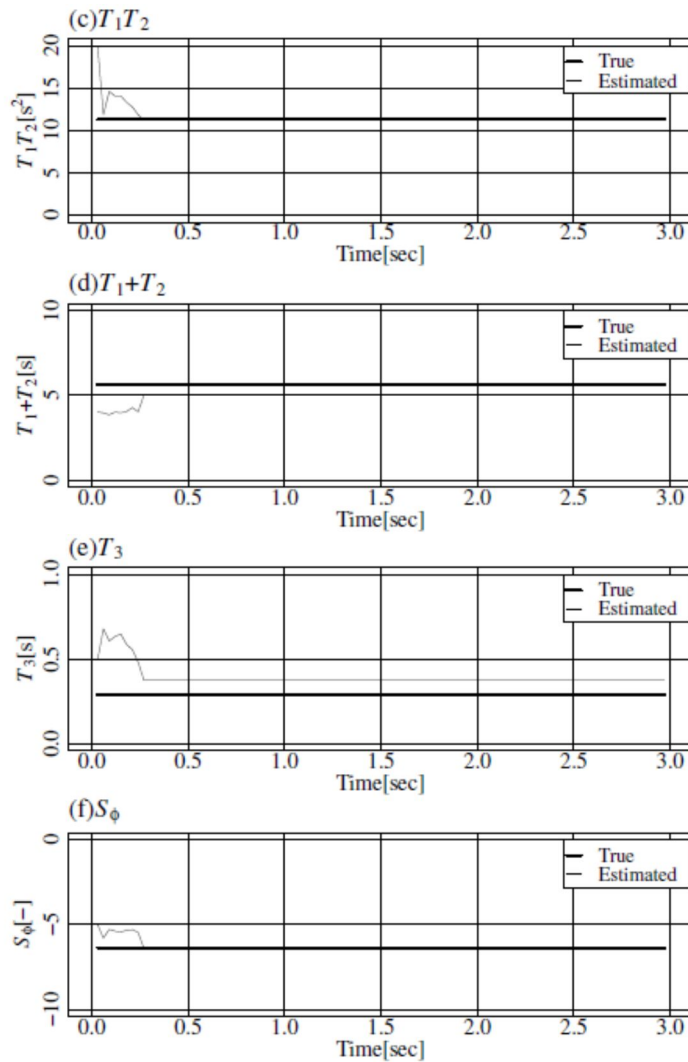


図2 横揺れ応答モデルのパラメータ推定の結果

終了時まで、増速および微小舵角での変針操船を行う。これらの過程で、前述の方法に基づき、操縦性指数の推定が実現できる。したがって、その後は舵減揺型オートパイロットを利用した航海が可能になる。この過程の確立は今後更なる検討が必要である。

以上の研究成果を踏まえ、モンテカルロ粒子フィルタを応用した統計的モデル予測制御の計算機プログラムを構築した。提案した方法を検証するために、前後揺れ 左右揺れ 横揺れ - 船首揺れの 4 自由度操縦運動数学モデルを新たに構築し、同モデルを用いて船体運動の時系列を生成するものとした。この数学モデルで生成した旋回試験の結果の一例を図3に示す。この図は

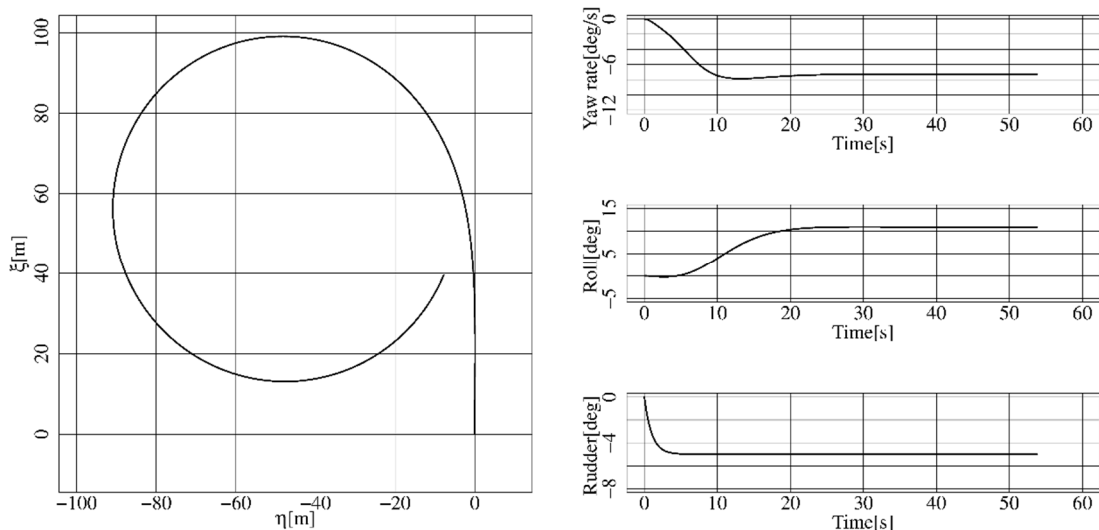


図3 構築した4自由度操縦運動数学モデルを用いて生成した旋回試験の結果

垂線間長さ 25m の漁業調査船を対象としたものであり、左段が船体重心位置の軌跡であり、右段が上から旋回角速度、横揺れ及び舵角をそれぞれ示している。これらの図から、特に、横揺れに関しては操舵直後の初期内方傾斜から定常外方傾斜に至る過渡現象をよく再現できていることがわかる。同数学モデルにおいて、波浪などの外力の影響は、簡単のために、舵力の項に有色雑音を付加することによって考慮した。単純な比例 - 微分制御による保針操船の結果を図 4 に示す。この図は、左段が船体重心位置の軌跡であり、右段が上から船首方位、横揺れ及び舵角をそれぞれ示している。これらの図から、重心位置の軌跡に関しては振動しつつ左舷側に移動しており、船首方位および横揺れともにその振動振幅が大きいことわかる。これは、優秀な船長や航海士はこのような状況に陥らないように船首方位を変更したり、減速したりするような状況である。一方、図 5 は提案した統計的モデル予測制御による保針操船の結果である。図の配置は図 4 と同一である。これらの図から、提案した方法による結果は、上手く保針出来ており、かつ、船首方位および横揺れの振動の振幅を大幅に低減できていることがわかる。この結果の信頼性を検証するために、有色雑音を生成する際の乱数の種を変更した検証も行った。その結果を表 1 に示す。表中の case2 ~ case5 が追加で実施した数値実験の結果である。表には平均値と標準偏差をまとめた。船首方位 (Yaw) および横揺れ (Roll) とともに、いずれの場合も、平均値および標準偏差が同程度であり、かつ、とても小さいことがわかる。したがって、提案する方法は、保針性能および舵による減揺性能が大きい極めて良いと考えられる。

なお、別途、実船による検証実験も実施したが、当日の海象状態が非常に良好であり船体動揺がない状況であった。したがって、今後も継続して実船による検証実験を行い、実船における有効性を検証する必要がある。

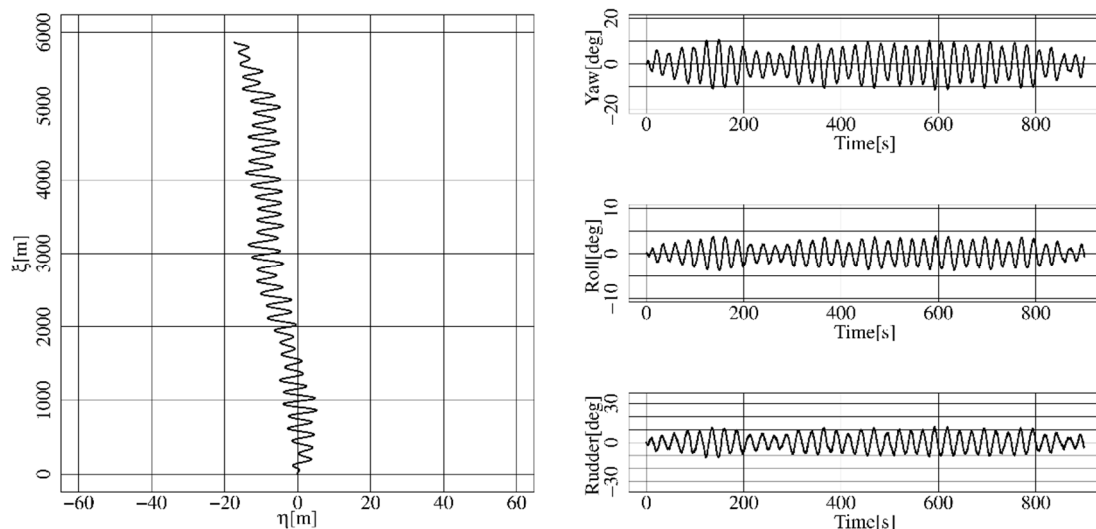


図 4 比例 - 微分制御による保針操船の結果

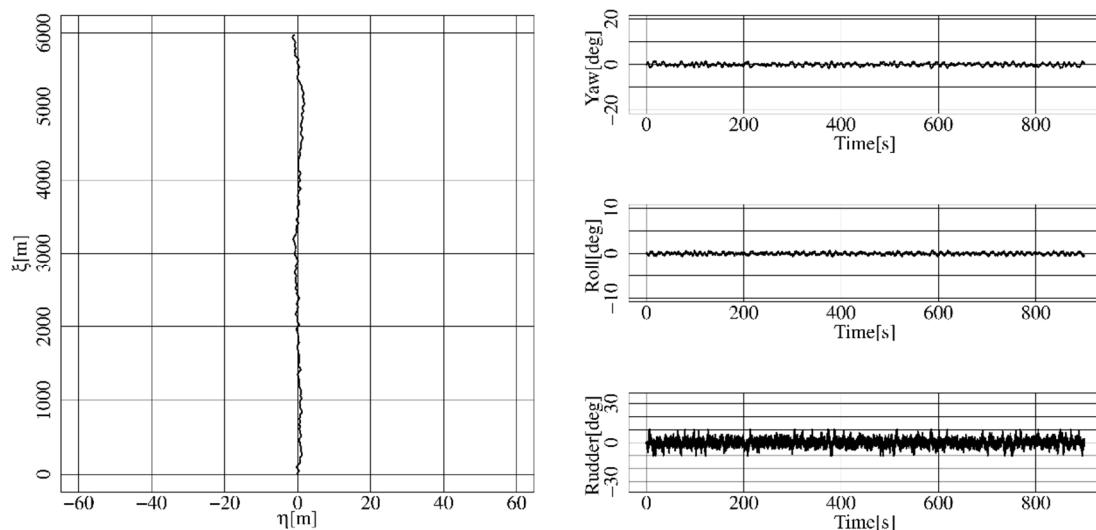


図 5 提案した統計的モデル予測制御による保針操船の結果

表 1 信頼性の検証

	Yaw(deg)		Roll(deg)	
	Mean	SD	Mean	SD
case 1	-7.27×10^{-3}	0.649	-6.02×10^{-4}	0.255
case 2	-8.51×10^{-3}	0.636	8.87×10^{-4}	0.247
case 3	-3.36×10^{-2}	0.673	-1.31×10^{-3}	0.256
case 4	-2.71×10^{-2}	0.652	-3.54×10^{-4}	0.248
case 5	-1.28×10^{-2}	0.653	-1.22×10^{-3}	0.255

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 寺田大介、安川宏紀、芳村康男、松田真司	4. 巻 30
2. 論文標題 操縦運動中の横揺れ応答モデル	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会論文集	6. 最初と最後の頁 49、57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.30.49	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 Daisuke Terada, Masashi Matsuda	4. 巻 52
2. 論文標題 Inverse Estimation of a Current by Using Ship Motions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 122, 127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.294	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9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、松田真司
2. 発表標題 応答モデルによる舵減揺型オートパイロット
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 Daisuke Terada, Hirotsada Hashimoto, Akihiko Matsuda, Naoya Umeda
2. 発表標題 Direct estimation of natural roll frequency using onboard data based on a Bayesian modeling procedure
3. 学会等名 13th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺田大介
2. 発表標題 横揺れの操縦応答モデルについて
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会第10回推進・運動性能研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺田大介
2. 発表標題 横揺れの操縦応答モデルについて(その2)
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会第11回推進・運動性能研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺田大介
2. 発表標題 非線形横揺れの時系列モデルに関する一考察
3. 学会等名 日本航海学会第139回講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺田大介、安川宏紀、芳村康男、松田真司
2. 発表標題 横揺れの操縦応答モデルについて(その3)
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会第12回推進・運動性能研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Terada, Ryosuke Amano, Toru Katayama
2. 発表標題 A motion estimation method of high speed craft in irregular sea by using onboard monitoring motion time series data for motion control
3. 学会等名 Proccedings of 16th International Ship Stability Workshop (ISSW2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 寺田大介、高橋竜三、三好潤、溝口弘泰
2. 発表標題 平水中における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 2017年

1. 発表者名 寺田大介、松田真司
2. 発表標題 舵減揺のための時系列モデルについて
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2018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	松田 真司 (Matsuda Masashi) (20601834)	海上保安大学校(国際海洋政策研究センター)・国際海洋政策研究センター・教授 (85406)	