

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 17 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420432

研究課題名(和文) 出入港など船舶低速航行時の予測制御法による操舵性改善

研究課題名(英文) Improvement of steering performance by predictive control method on low-speed navigation

研究代表者

土井 正好(Doi, Masayoshi)

広島工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10442477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では予測制御法の1つである一般化最小分散制御を適用し、低速時に応答性の良い操舵制御系を設計した。また、強風下の入出港や狭水道航行では風や潮流の影響を受けることから、これら外乱がある状況においても安定な操舵性を実現する制御系の開発にも努めた。なお、制御系開発は実船舶の運動を航海実験により同定し、同定モデルに基づいてPC上で制御系を設計した。

研究成果の概要(英文)：In this study, generalized minimum variance control, which is one of the predictive control methods, was applied and a steering control system with good responsiveness at low speed was designed. In addition, since we accept the influence of wind and tidal current in strong wind entry and narrow water service navigation, we also tried to develop a braking system that realizes stable steering even in the presence of disturbance. The development of the control system identifies the movement of the actual ship by voyage experiment and designs the control system on the PC based on this model.

研究分野：制御工学

キーワード：予測制御 同定 船舶操舵 一般化最小分散制御 ゲインスケジューリング サーボ系 時変系

## 1. 研究開始当初の背景

船体運動は慣性が大きいため舵効きの応答性が鈍い。よって操舵角を設定しても直ちには旋回角速度が現われない。そのため、操船者は船体運動の特性をイメージしながら針路変更前から操舵しなければならない。特に着岸操船では、船舶は低速航行のため舵効きがさらに鈍くなる。しかしながら、着岸操船では指定した棧橋に船舶を誘導するために頻繁な操舵力を与える必要がある。また強風時には風が操舵性に影響する。このため、特徴的な船体運動を操るには熟練した技能を必要とする。以前において、尾道港に入港しようとする船舶が指定された棧橋にうまく付けられない事例がみられた。この時、操船者はその時点の船速に応じた操舵旋回性を判断して操舵角を決定するものの、潮流影響時航行では無潮流時とは異なる操舵応答性が現れる。この原因は、潮流を受けることによって対水船速が対地船速とは異なるためである。

なお、船舶の操舵性は対水船速に基づく。ただし、対水船速計は低速時において不正確であるため、操船者は対地船速計に頼って操舵性を判断するしかない。なお、横方向からの潮流影響によっても操舵性は変化する。しかしながら、船舶は海峡において潮流向きに並行して航行することが多く、また狭水道内の港も潮流向きに並行して棧橋が敷設されていることから、本研究では潮流に追われる状態と対向する状態の操舵性に着目して考察した。

## 2. 研究の目的

船舶は入出港において低速で航行し、方向転換のため頻繁に操舵する。しかしながら、低速航行時の操舵は旋回応答にむだ時間を含み、旋回角速度の増加も鈍い。そこで、本研究では予測制御法の1つである一般化最小分散制御を適用し、低速時に応答性の良い操舵制御系を設計した。また、強風下の入出

港や狭水道航行では風や潮流の影響を受けることから、これら外乱がある状況においても安定な操舵性を実現する制御系の開発にも努めた。なお、制御系開発は実船舶の運動を航海実験により同定し、同定モデルに基づいてPC上で制御系を設計した。

## 3. 研究の方法

操舵実験から得られる時系列データを用いて、船舶の操舵入力に対する旋回角速度応答性について解析した。実験は弓削商船高専練習船「弓削丸(総トン数240トン)」を使用した。弓削丸には船体運動解析に必要な操舵角及び旋回角速度のデータを毎秒計測できる装置を備えている。実験では、まず船舶を一定船速で航走させながら右操舵角 $11^{\circ}$ 、 $21^{\circ}$ 、 $32^{\circ}$ についてステップ状に入力し、旋回角速度の時系列応答を計測した。ただし、航海実験では操舵角設定に誤差を生じて、正確に $10^{\circ}$ 刻みの操舵ではなく、 $11^{\circ}$ 、 $21^{\circ}$ 、 $32^{\circ}$ の操舵入力が与えられている。本実験は、船速3 knot、4 knot、5 knot、6 knot、7 knotについて各々の操舵応答性を計測した。操舵入力はマニュアルでステップ状に入力し、一定の旋回角速度に到達するまで継続した。

計測データは、船速(初期状態)、操舵角(入力)、回頭角速度(出力)、風向風速(外乱)、潮流の流向流速(外乱)、波高(外乱)の時系列データを収集した。操舵性の運動モデルはARXモデルにより表した。モデル同定のための実験は、無風時において一定船速の下で右舵及び左舵に各々設定した時の旋回角速度を計測した。次に中風時(10m/sec以上の風)において向風、左舷及び右舷からの風を受けた各々について左右の操舵角 $11^{\circ}$ ~ $32^{\circ}$ の旋回角速度応答を計測した。また、潮流を受けた状態での操舵性についても同様のモデル同定を行った。

続いて、本研究ではむだ時間システムに対して有効な予測制御法の1つである一般化最小分散制御を操舵系に適用した。取得した船

体運動モデリング情報をPC上のMATLABソフトウェアに入力し、操舵シミュレーションを設計した。MATLABでシミュレーション設計するに当たって、モデルベースデザイン (MBD) 仕様のMATLABソフトウェアを利用した。これによって実船舶操舵実験に近いシミュレーション環境が整備される。MATLAB上で設計制御系を適用し、提案制御法による操舵性改善を検証した。ただし、一般化最小分散制御を組み込んだ操舵制御系を船舶に適用する場合において、全自動とした操舵装置は実用上受け入れられない。そこで、一般化最小分散制御法による操舵制御装置の有効性を実証するため、航海情報から一般化最小分散制御プログラムにより最適な制御入力を計算し、PC上で表示した。操船者はPC表示の操舵角に従って操舵する実験を行った。これにより、全自動と比較して操船者が指示舵角を認識し、マニュアル操舵するまでに若干の遅れを生じるが航海安全性を満足し実用的である。

#### 4. 研究成果

従来において、旋回のための操船は操舵角を単純にステップ状に設定していた。しかしながら、これでは操舵角に応じた旋回角速度が得られるまでに時間を要する。また、強風時には旋回角速度が変動する。本研究ではサーボ型一般化最小分散制御を操舵系に適用し、一般化最小分散制御が有する目標値追従性によって速やかに所望の旋回角速度が得られた。また、強風によって引き起こされた旋回角速度の変動も抑えられた。さらに、風影響による操舵効果の増減を一般化最小分散制御において調整することによって、より一定の旋回角速度保持を達成した。

一方、操舵入力に対する旋回角速度応答の関係をARXモデルとして表現し、船体運動の実測値からモデル同定を行った。実船舶による実験結果から、多様な操舵入力に対する旋回角速度応答は時変系であることを指摘した。

これより、時変系である操舵系に一般化最小分散制御を適用するために、時変構造としたサーボ型一般化最小分散制御を設計した。時変構造の一般化最小分散制御の設計では、時変多項式積の演算方法を明らかにした。本研究では新たに外乱抑制性を付加した時変一般化最小分散制御を設計した。目標値追従性及び外乱抑制性付加のために設定したフィルターによって現れる時変多項式積について、その時刻シフトの演算方法を明らかにした。離着岸操船では低速航行のために舵が効きにくく、岸壁衝突や他船舶接触などの事故が多発している。さらには、突風によって想定した操舵効果が得られない場合がある。本研究で提案するサーボ型時変一般化最小分散制御は、突発的な強風時においても安定した操舵応答性が期待できる。図1および図2は船舶が3ノットで航行し、前方から風を受けた状態で周回運動を行った時の旋回角速度の変化を示す。図1は右操舵20°を保持した場合、図2は一般化最小分散制御を適用した場合である。図1の結果では風を受ける方向によって旋回角速度が増減するが、提案する一般化最小分散制御を適用すると風を受けても旋回角速度変化は抑えられる。

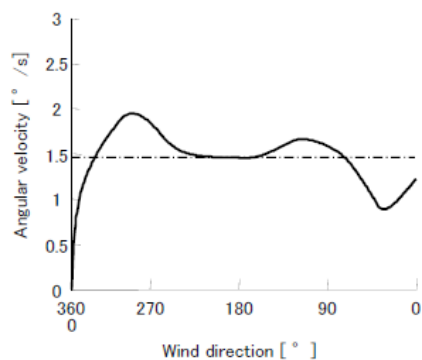


図1. 周回運動における旋回角速度変化 (ノーマル操舵)

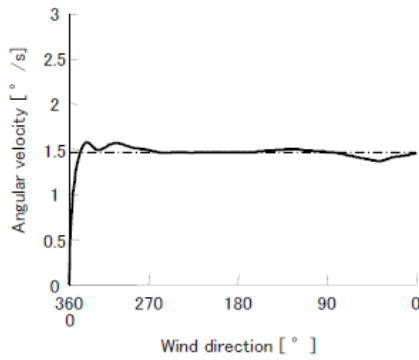


図2. 周回運動における旋回角速度変化(一般化最小分散制御適用)

さらに、本研究で提案する潮流速調整サーボ型一般化最小分散制御は「自動制御」ではなく「アシスト制御法」である。すなわち、所望の旋回角速度は操船者が決定し、潮流を受けても「無潮流時の操舵性を保持する」ことを目的とする。潮流影響を受けても操舵性を保持することは、操舵による「思いがけない船舶運動」を避けることに繋がり、着岸操船における衝突事故を防止する。本研究の提案は、船舶の航行速度に合わせて操舵モデルおよび制御則をゲインスケジューリングした制御法を提案した。本研究で実験した弓削丸以外の船舶においても、船速に応じた操舵応答性(時系列旋回角速度)の情報を取得すれば同様に制御適用効果が得られる。図3に潮流影響を抑制したゲインスケジューリング型一般化最小分散制御の操舵制御系ブロック図を示す。

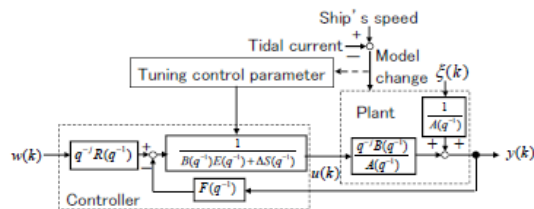


図3. 潮流影響を抑制した操舵制御系

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

土井正好、強風時において船舶の旋回性

を一定に保持する操舵制御系の設計(風影響を調整したサーボ型一般化最小分散制御)、日本機械学会論文集、査読有、81巻、2015、14-00506 1 - 13

土井正好、永本和寿、森泰親、時変系において外乱抑制性を付加した一般化最小分散制御(突風を受ける船舶操舵系への適用)、電気学会電子・情報・システム部門誌、査読有、134巻、2014、1167 - 1174

〔学会発表〕(計1件)

土井正好、永本和寿、潮流影響を調整した船舶操舵サーボ制御系の設計、機械学会 Dynamics & Design Conference 2015、査読無、2015年8月26日、0S7-1-3 432、弘前大学(青森県弘前市)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

土井 正好 (DOI, Masayoshi)

広島工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10442477