低速航行及び停船時の操船制御装置に関する研究—Ⅱ.

—一軸一舵(シリング舵)とバウスラストによる操船—

五十嵐和之*・織田博行*・櫛田直規**

山下春海**・中津義正***・古藤泰美**・武良弘二****

Study on the Advanced Maneuver Control System in Dead Slow Speed or under Stopping Condition—Ⅱ.

—Maneuvering a Ship Equipped with Bow Thruster, Cpp and Schilling Rudder—

Kazuyuki IGARASHI, Hiroyuki ODA, Naoki KUSHIDA, Harumi YAMASHITA, Yoshimasa NAKATSU, Yasumi KOTOH and Kohji MURA

Abstract

The main theme of this study is to certificate the function which is requested to a maneuvering controller operated at dead slow speed in berthing or oceanographic observation and also to establish a controllable design method to actualize the function. In the former paper as concerns this theme, the authors have proposed an improved maneuvering controller considering its function and maneuverability.

In this paper, the authors examined the maneuverability of maneuver control system with which we located a ship equipped with bow thruster, Cpp and Schilling rudder. Further the authors propose an actual controllable design which has been consisted of actuator system. And the results of actual experiments on ship are shown concerning with characteristic maneuverability which include crabbing in the effect of this system.

1. まえがき

港内操船、離着岸及び海洋観測時の操船は、いずれも低速時の操船という点で共通しており、スラスト、プロペラ、舵など複数のアクチュエータを頻繁に操作する必要がある。このような操船を行うために、バウスラスト、スターンスラストは非常に有効であるが、内航船、練習船、調査船などでは比較的多くの場合バウスラストは装備されているが、運航目的や船体形状などの面からスターンスラストを装備している船舶は少ない。スターンスラストを装備した船舶と同じように船体の横移動を実現するための船尾での横方向の推力は、プロペラ一軸とフラップ舵、シリング舵、ベックツイン舵など特殊舵と組み合わせて操作することによって得ることができる。また、プロペラを二軸装備した船舶の場合は、通常舵を二枚装備することにより、船尾での横方向推力を発生させることができる。このように、プロペラと舵を組み合わせて使用することにより、若干の操船上の制約はあるものの、低速時の種々の操船が可能となる。第

* 正会員 ㈱三井造船昭島研究所(〒196 東京都昭島市つつじが丘1-1-50)

** 正会員 大島商船高等専門学校(〒742-21 山口県大島郡大字小松1091番地の1)

*** 非会員 大島商船高等専門学校(〒742-21 山口県大島郡大字小松1091番地の1)

**** 非会員 三井造船㈱玉野事業所(〒706 岡山県玉野市玉3-1-1)

1 報では、本研究の目的である新しい操船機能及び操作性について提案するとともに、バウスラスタ、スターンラスタ、Cpp、舵を装備した船舶を対象とした推力配分重み係数行列を用いた制御系の設計手法について述べてきた。

第2報では、バウスラスタ、プロペラ、シリング舵を装備した船舶を対象とし、はじめに新しい操船機能を実現するための制御系設計手法として、推力配分重み係数行列及びシリング舵の独特な制御方法について述べる。次に、シリング舵を有効に使用するために舵特性に関する考察を行う。そして、システム操船装置の操船機能、性能確認及び制御ゲインの調整用に関連した操船シミュレータによるシミュレーション結果、さらに実船による方位保持機能、観測操船機能(船速、相対風向保持)などに関する実験結果についても示す。

2. バウスラスタ、Cpp、シリング舵を対象とした制御系の構成

2.1 設計方針

バウスラスタ、Cpp、シリング舵を操作して、船体運動をコントロールする場合は、各アクチュエータの操作量と船体運動には相互干渉が存在する⁽¹⁾。例えば、Cpp とシリング舵の操作は前後左右速度及び回頭角速度に影響し、このような操作量の組み合わせが低速時の操船を困難なものとしている。

本報で取り扱うシステム操船装置は、図1に示すように、操作盤面上のジョイスティックとレート設定ダイヤルの操作で、操船者の意図する船体運動を容易に実現できる装置である⁽²⁾。方位保持や船速保持といった機能では、方位角、船速をフィードバックして自動制御を行い、前後左右の移動については操船者が船体運動を見ながらジョイスティックを操作する。このように、操船者は各アクチュエータを複雑に操作することなく、ジョイスティックとレート設定ダイヤルの操作でダイレクトに所定の船体運動を実現することができる。

2.2 制御力推定ルーチン

ジョイスティックの操作や方位角のフィードバック制御量から、所定の船体運動を実現するために必要な前後制御力、左右制御力及び回頭制御力を推定するのが推力推定ルーチンである。

$$\begin{aligned} A_d &= f_1(u^*) \\ T_r &= f_2(v^*) \\ R_o &= f_3(r^*) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 A_d 、 T_r 及び R_o はそれぞれ前後制御力、左右制御力、回頭制御力であり、 u^* 、 v^* 、 r^* は前後、左右方向の速度及び回頭角速度の設定値である。また、 f_1 、 f_2 、 f_3 は運動の指令値を制御力に変換する関数であり、各制御モードによってその構成が変化する。例えば、船首方位角を保持しながら並進運動を行う方位保持モードを考える。

方位保持モードでは、ジョイスティック傾倒角の前後成分が前後制御力 A_d 、左右成分が左右制御力 T_r 、そして船首方位角に対するフィードバック制御量が回頭制御力 R_o となる。次に、前後方向の速度と相対風向を保持する観測操船モードでは、速度に対するフィードバック制御量が A_d 、相対風向に対するフィードバック制御量が R_o で左右方向の速度は制御対象としていないために T_r は0となる。この様に、制御モードに応じた必要制御力を推定し、これらの制御力が後述する推力配分ルーチンで翼角などの指令値に変換され、各アクチュエータへ出力される。

2.3 推力配分ルーチン

制御力推定ルーチンで推定された前後制御力、左右制御力及び回頭制御力を各アクチュエータに対する指令値に変換するのが推力配分ルーチンである。バウスラスタ、Cpp、シリング舵に対する指令値を F_B 、 F_C 、 F_R とすると、各指令値は次のように推力配分重み係数行列と各制御力の積で表現することができる。

図1 操船状況図

$$\begin{bmatrix} F_B \\ F_C \\ F_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_d \\ T_r \\ R_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 式では前後制御力 A_d だけが、バウスラストに対する指令値 F_B に関係せず、その他の各制御力はアクチュエータの操作量である指令値に関係する。ここで、前述した通り操作量と船体運動には相互干渉があり、(2) 式の重み係数のままでは所定の運動を実現することは不可能である。そこで、船体運動に応じて制御力と指令値の関係を単純化することで相互干渉を取り除くこととする。次に、船体運動に応じて重み係数を変え、所定の動作を実現する方法について述べる。

表 1 に示すように船体運動に応じて制御対象とするアクチュエータを限定し、必要制御力と指令値の関係を単純化する。たとえば、前後進運動の場合を考えると、左右制御力は 0 であるため前後制御力、回頭制御力の 2 つをアクチュエータに配分する。つまり、ジョイスティックが中立の時は停船状態であり C_{13} 以外の重み係数は 0 とし、バウスラストだけで船首方位角の制御を行い、他のアクチュエータは制御対象としない。前進状態の時は C_{21} 、 C_{33} 以外の重み係数は 0 として、C_{pp} で前後制御力、シリング舵で方位角に対するフィードバック制御を行う。前進時にバウスラストを多用しないのは、バウスラストの推力が前進速度影響により減少して、方位角保持にとってあまり有効ではないためである。また、後進時には C_{13} 、 C_{21} 以外の係数を 0 として C_{pp} で前後制御力、バウスラストで船首方位角の制御を行い、シリング舵は中立とする。

次に、並進運動時の場合を考える。この場合前後、左右制御力及び回頭制御力をバウスラスト、C_{pp}、シリング舵に配分する。まず、前後、左右制御力については、舵角が船尾での推力方向を決定するため、図 2 に示すように舵角はジョイスティックの傾倒方向の象限ごとに一定舵角とし、左右制御力はバウスラストと C_{pp}、前後制御力は C_{pp} を制御対象として指令値が出力される。回頭制御力は C_{33} の係数を 0 としバウスラストと C_{pp} で方位角の制御を行う。ここで、バウスラストと C_{pp} で方位角を制御する事により左右運動への影響が考えられるが、 R_o に寄与する C_{13} と C_{23} は符号が異なるため F_B と F_C の差は変わるが和は変わらないため、方位角の制御は左右運動に影響しない。また、ジョイスティックによる左右移動の切り返し時は、舵を +70 度から -70 度まで 140 度転舵するために約 25 秒要する。この間は左右制御力は 0 とし、バウスラストのみで船首方位角の制御を行っている。

このように、所定の船体運動を実現するための必要制御力を船体運動に応じて、各アクチュエータに効率良く配分するのが、推力配分重み係数行列の特徴である。

3. シリング舵を用いた操縦シミュレーション

3.1 シリング舵による操船機能

シリング舵を対象としたシステム操船装置の機能を検討するにあたって、プロペラ後流中におけるシリング舵の特性について検討した。シリング舵の特性としては、ストールが発生する角度が大きく、ストール後も著しく直圧力係数が低下しない事が知

表 1 船体運動に応じた制御対象

運動状態	バウスラスト	C _{pp}	シリング舵
停船	○	×	×
前進	×	○	○
後進	○	○	×
並進	○	○	○

○：操作する、×：操作しない

図 2 ジョイスティックの傾倒方向による舵パターン

られている⁽³⁾。図 3 は、三井造船昭島研究所の回流水槽で行われたシリリング舵の試験結果をもとに推定したもので、プロペラスラストに対する横力、前後力(プロペラスラストと舵抵抗の和)を舵角ベースにプロットした図である。この図から舵角が大きくなるにつれ前後力が減少し、舵角 70 度でほぼ前後力がキャンセルされ、横力も約 30%と大きな値を示していることがわかる。これにより、プロペラとシリリング舵を組み合わせる用いることにより、船尾での横方向推力が得られスターンスタスタと同じような役割を十分果たしうることがわかる。ここで、舵角は 70 度で制限されるため、横力を発生しながら後進方向の推力を発生させることは出来ない、斜め後方への移動は不可能である。そのため、システム操船装置ではジョイスティックを斜め後方に傾けた場合はジョイスティックの前後成分だけを制御対象として左右成分は無視している。

3.2 シミュレーションによる検討

システム操船装置の制御機能、制御則の検証及び制御定数のチューニングを行うために、図 4 に示すようにシミュレータとシステム操船装置を実船と同様の信号形式で接続してシミュレーションを行った。シミュレーションには鳥野らが提案している低速時流体力モデルをベースにした操縦運動モデル⁽⁴⁾、及び先のシリリング舵の特性を用いた。次に、変針と横移動の場合のシミュレーション結果を示す。図 5 は、方位保持しながらジョイスティックを右横に傾けた時の航跡を 20 秒毎にプロットしたものである。この図から推力配分重み係数行列を用いた制御手法により、シリリング舵を装備した船舶において、船首方位角を保持しながら横移動運動が実現できる事がわかる。図 6 は、設定方位角を右 20 度変針した時の方位角の時系列で、若干のオーバーシュートはあるが、約 50 秒で設定値に収束している様子がわかる。この様なシミュレーションを行うことによって、事前に制御定数などによる船体運動への影響を調べることができる。これによって、制御定数などの初期値を決定することができ、実船搭載時の調整が簡単化できる。

図 3 シリリング舵の横推力 / 前進推力の関係

図 4 シミュレーションのブロック図

図 5 シミュレーション結果の航跡図
(右横移動)

4. システム操船装置の開発

バウスラスト、Cpp、シリング舵を装備した大島商船高等専門学校練習船「大島丸」搭載用として開発したので、その操船機能などについて報告する。表2に「大島丸」の主要目を示す。写真1に「大島丸」に装備されたシリング舵及び船尾の写真を示す。「大島丸」の主な運航目的は、学生の航海訓練等の教育訓練であるが、その他にも、近海の海洋観測や地底探査等幅広い分野にわたっている。このうち海洋観測や地底探査調査は低速航行や停船時に行う事が多く、操船者は状況を逐次判断しながら、各アクチュエータを操作し所定の方位角や航路を保持しなければならない。このような操船は多くの場合長時間にわたるため、操船者にとって大きな負担となっている。システム操船装置を用いることによって、このような観測操船時などの負担を軽減すること、及び離着岸時の操船を迅速化することが期待できる。

ここで、本船向けのシステム操船装置について示す。システム操船装置は制御演算を行う制御演算部と操作部で構成され、操作部は図7に示すように、ジョイスティック、レート設定ダイヤル等で構成されている。また、このシステム操船装置には幾つかの操船モードがあり、表3に示すようにジョイスティックのレバーとレート設定ダイヤルの操作状況によって自動的に操船モードが変更されていく機能を備えている⁶⁾。代表的な操船モードの機能について述べる。

(1) 方位保持モード

船首方位角を保持しながら、ジョイスティックによる移動を行うモードである。ジョイスティックの傾倒方向が船体の移動方向、傾倒角が移動速度となり、船首方位角の設定は船首方位角設定ダイヤルで行うことができる。

(2) 観測操船モード

船首方位角を保持しながら、前後方向の船速をほぼ0ノットに保持し、さらに相対風向保持が選択されると、選択された時点の相対風向を一定に保つように船首方位角を保持するモードである。なお、船速信号は電磁ログあるいはドップラーログの選択ができる。

(3) 手動モード

ジョイスティックによる移動及びレート設定ダイ

図6 シミュレーション結果の時系列(右20度変針)

表2 「大島丸」の船体主要目

船 体	垂線間長	38.0 (m)
	船 幅	7.6 (m)
	喫 水	2.87 (m)
	排 水 量	445.0 (ton)
	回 転 数	350 (rpm)
プ ロ ペ ラ	形 式	C _{PP} (4翼)
	直 径	2.0 (m)
シ リ ン グ 舵	形 式	モノバック (底部ピストン)
	舵 面 積	3.30 (m ²)
	舵 角	通常航行 50 (deg)max. 低速航行 70 (deg)max.
バウスラスト	形 式	電動 (50KW)
	推 力	約1 (ton)

写真1 シリング舵とCpp

図7 操作部盤面配置図

表3 制御モード

		ジョイスティック	
		中 立	不 中 立
レートダイヤル	中 立	方位保持モード 観測操船モード*	方位保持モード
	不中立	その場回頭モード	手動モード

*観測操船モード押しボタンによる

ヤルによる旋回を組み合わせた自在な操船を行うことができる。ジョイスティック操作で船体の移動、レート設定ダイヤルの操作で回頭運動を行う。また、レート設定ダイヤルを操作した後、中立に戻した時点で自動的に方位保持モードとなり、その時の方位角が設定方位角となる。

5. システム操船装置による実船試験

システム操船装置を用いた「大島丸」による実船試験結果について述べる。搭載されたシステム操船装置の操作部を写真2に示す。

(1) 方位保持モード(変針)

図8は、方位保持モードでジョイス

写真2 システム操船装置の操作部

図8 実船試験結果の時系列(右20度変針)

ティックを中立にした状態で方位保持を行った後に、設定方位角を 84 度から 104 度まで右 20 度変針させた時の船首方位角と設定方位角の時系列である。この図から、方位角はほとんどオーバーシュートせずに設定方位角に収束している様子がわかる。この結果は図 6 に示すシミュレーションによる 20 度変針時の応答と良く一致しており、シミュレーションによる制御ゲインなどの調整が効率良く行われたことを示唆している。なお、ジョイスティックが中立状態の場合は Cpp、シリング舵は制御せず、バウスラストのみで方位角を制御している。

(2) 方位保持モード(横移動)

図 9、図 10 は方位保持モードで、ジョイスティック操作による右横移動、左横移動を行った時の船首方位角と電磁ログの時系列である。この図から船首方位角は、ほぼ一定に保持され、前後速度は 0 ノット付近で一定であることがわかる。このことから、シリング舵がプロペラによる前後力を、ほぼキャンセルしている事がうかがえる。図 11、12 はこの時の一部について船体運動を 20 秒毎にプロットした航跡図である。この時、潮流は約 310 度方向から 0.5~0.7 ノット程度あったため、左右で移動速度に違いがあるものの、船首方位角を保持しながら横方向に移動している様子がこの図からわかる。横移動速度は、右横移動時は約 1.2 ノット、左横移動時は約 0.2 ノットであった。なお、航跡は大島商船高等専門学校のディファレンシャル GPS を用い、潮流修正等を行っていない。外乱条件等は若干異なるが、シリング舵を用いての横移動についても、図 5 のシミュレーション結果は、良くその傾向を示しており、シリング舵の舵特性推定、推力配分重み係数行列を用いる制御系設計手法の妥当性を確認することができた。

(3) 観測操船モード

図 13 は、観測操船モードで相対風向保持及び前後対水速度保持を行った時の船首方位角、相対風向、

図 9 実船試験結果の時系列(右横移動)

図 10 実船試験結果の時系列(左横移動)

図 11 実船試験結果の航跡図(右横移動)

前後対水速度の時系列である。この図では、590 秒付近で観測操船モードに入り、その時の相対風向が設定相対風向となり、その相対風向を一定に保つように船首方位角が風向の変化とともに変化している事がわかる。また、この時の前後方向の対水速度はほぼ 0 ノットに保たれている。なお、相対風向を保持するにあたっては、風速の下限の設定及び風向、風速の平滑化処理を行い、無意味に船首方位角が変化することを避けている。

6. まとめ

バウスラスト、Cpp、シリング舵を装備した船舶で並進運動などを実現するために必要な制御力の推定方法、制御力を各アクチュエータに効率良く配分する推力配分重み係数行列について示した。

次に、シリング舵による操船性能についての検討を行い、制約はあるもののシリング舵でプロペラによる前後力をほぼキャンセルすることができ、かつ十分な横推力を発生できる事を確認した。

また、シリング舵の特性と、低速時の操縦運動数学モデルを用いたシミュレータとシステム操船装置を結合したシミュレーションを行うことによって、制御定数の事前検討、操船機能、操船性能の確認などを行った。

さらに、システム操船装置を用いた実船試験において、方位保持モードで十分な保針性能が得られる事、ジョイスティック操作で船首方位角を保持しながら横移動する事さらに、観測操船モードで相対風

図 12 実船試験結果の航跡図(左横移動)

図 13 実船試験結果の時系列(観測操船モード)

向及び、前後対水速度を一定に保持することを確認した。

システム操船装置を用いた実船試験における実験結果とシミュレーションによる検討結果とは、比較的良く一致しており、このことから、シミュレーション技術はもちろん、本制御装置における設計手法が種々のアクチュエータ構成に対して汎用的に適用でき、かつ有効な手法であると考ええる。

今後、本制御手法を二軸二舵、一軸二舵を装備した船舶などへ適用を図るとともに、観測操船モードから低速時におけるポイント通過型航路保持モードへと機能を拡張する事、さらに DGPS を用いた船舶の誘導制御などについても検討していく予定である。

最後に実船試験においてご協力を頂いた、大島商船高等専門学校「大島丸」末広 操、三浦 薫、武智 義輝、杉原良典、嶋原健次、高峯 満の各氏に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 遠藤 真・小林弘明：“ジョイスティックコントローラ装備船の離着岸能力—I.—ジョイスティックコントローラの構成—”，日本航海学会論文集，第 89 号，1993.
- (2) 織田博行・五十嵐和之・烏野慶一・松島寛治：“低速航行及び停船時の操船制御装置に関する研究—I.—拡張型ジョイスティック操船装置の機能と操作—”，日本航海学会論文集，第 91 号，1994.
- (3) Thomas P. Mackey, V. P. Bingham, H. O. G. Hederstrom：“APPLICATION EXPERIENCES WITH HIGH MANEUVERABILITY RUDDERS”，9TH SCSS, 1990.
- (4) 烏野慶一・松野次郎・伊藤智行・五十嵐和之：“低速時における主船体操縦性流体力の新しい数学モデルについて(第二報)—旋回時の場合—”，関西造船協会誌，第 217 号，1992.
- (5) K. Karasuno, K. Matsushima, H. Oda, K. Igarashi：“Advanced Portable Automatic Control System Under Simple Operation”，10th SCSS, 1993.

質 疑 応 答

山田考三郎(日立造船)：シリング舵の性能曲線では最大舵角でほぼ前進推力は 0、横推力 30%程度とのことであるが、実船試験の横移動にはバウスラストが使用されている。バウスラストを使用しないでシリング舵のみである程度の横移動は可能か？

五十嵐和之：シリング舵だけで船首方位角を保持したままの横移動は困難ですが、船首方位角を保持しないで、現在位置から横方向に移動する手法があるかと思います。つまり、前進推力をほぼキャンセルするシリング舵の特性を用い、シリング舵で 90 度その場回頭し、前進した後、逆に 90 度その場回頭するといった操船パターンで横方向に移動する事は可能かと思います。