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—

織田 博行* ・五十嵐和之*

烏野 慶一** ・松島 寛治**

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

—Function and Operation of Advanced Joystick Control System—

Hiroyuki ODA, Kazuyuki IGARASHI,
Keiichi KARASUNO and Hiroharu MATSUSHIMA

Abstract

The ship handling by a human operator using a propeller, a rudder and side thrusters is so troublesome against complex operations of these devices and especially under the external disturbances at dead speed in berthing or ocean research. It will be a necessary expected theme to simplify the dead slow speed maneuvering especially for domestic freight ships which repeat entries into a port and departures from there and also for oceanographic training ships. Thus in this study, the authors propose their original maneuvering function and the maneuverability of the controller operated in dead slow speed.

In this first paper on such a theme, after estimating it, authors present an improved controller with better maneuvering function and maneuverability which is based upon conventional style of joystick controller. Further we will discuss a new method as a controllable design method using a weighting matrix on power distribution which have wide application among different type of ships. Lastly we show the results of full scale experiment at oceanographic observation operating above mentioned improved control system.

1. まえがき

港内操船や離着桟では低速での船体移動、旋回運動などが要求され、このためには舵のみではなく、スラスト、プロペラなど複数のアクチュエータを頻繁に操作しなければならない。しかもこのような操作は操船者の経験に基づいて操作していることが多い。このような操船を簡素化するために、軽量小型で比較的簡単な操作で操船できるジョイスティック操船装置が開発されてきた。一方、海洋観測や測量など洋上で作業を行う場合は、これらの作業と関係しながら船体運動を微妙に操船することが要求され、このような複雑かつ長時間にわたる操船は操船者の肉体的、精神的な負担を強いることになる。このような操船を自動化する装置としては、測位系、駆動系、制御系などを総合的に利用した自動定点保持装置(ダイナミックポジショニングシステム: DPS)が開発されてきた。今後は、入出港を頻繁に繰り返す内航船などにおいて、操船の迅速化、簡素化という観点からジョイスティック操船装置の普及が考えられる。また、本格的な自動定点保持装置を装備した海洋調査船以外の船舶でも、水産資源調査、環境調査などを実施

* 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 北海道大学水産学部(〒041 函館市港町 3-1-1)

する機会が多くなることが予想される。これらの離着桟、海洋観測時の操船は、いずれもスラスト、プロペラ、舵を頻繁に操作しながら低速で航行するという点では共通している。そこで、本研究では低速航行時の操船制御装置に関する操船機能及び操作方法などについて見直すとともに、これらの結果を踏まえた操船制御装置のあり方についても検討する。本研究でその実現を目指している操船制御装置の位置づけは、本格的な自動定点保持装置の機能の一部を、従来のジョイスティック操船装置に踏襲した拡張型ジョイスティック操船装置である。

第一報では、従来のジョイスティック操船装置の機能及び操作性を基本とした新しい操船機能及び操作方法について提案する。さらに、制御系の設計方法として、アクチュエータ構成の異なる船舶に対しても汎用性のある推力配分重み係数行列を用いる方法について述べる。そして、開発した装置による実際の観測作業を含む操船状況について示す。なお、拡張型ジョイスティック操船装置を操船に必要なシステムを制御するという意味からシステム操船装置と呼ぶ。

2. システム操船装置の設計思想

2.1 洋上における低速時の操船

システム操船装置の使用目的の一つである洋上での海洋観測、測量時などの操船状況を把握することによって、離着桟時の移動、旋回などの機能以外にどのような操船機能が有効であるかを確認する。海洋観測では潮流計、水温計、塩分濃度計さらにプランクトン採集器などの各種機器を長尺ワイヤーで海中に投入して何層もの深度で計測を行うため、計測機器との相対位置の保持あるいはケーブルの巻き込み防止などに留意しながら、舵、プロペラ、スラストなどを用いた長時間にわたる船体の姿勢制御を行うことが操船者に要求されている⁽¹⁾⁽²⁾。また、深度測定や海底地形調査などを行う場合は所定の測線上を低速で航行しながら、超音波を用いた計測機器による作業が行われることが多い。通常航行で自動操舵装置を使用する航路保持は実現されているが、このような測量時の操船装置としては電波測位装置やDGPSによる位置及び方位角を保持するために、複数のアクチュエータを自動制御しながらポイント通過型の航路保持を実現できる装置が有効である。さらに、プロペラやスラスト作動時の気泡による計測精度への影響を、極力少なくするような操船が要求されているのが現状である。システム操船装置の制御系設計にあたっては、操船機能以外にこれら作業内容を十分考慮する必要がある。

2.2 システム操船装置の操作性

従来、ジョイスティック操船装置は港内操船や離着桟時の移動、旋回運動を主な機能として開発され、必要とする操船機能を意図的にボタン操作を行うことにより選択される装置が多い。これに対して、システム操船装置の操作に関する基本的な考え方は、自動車のクラッチ操作におけるオートマチック機能と似た感覚で、ジョイスティックとダイヤル操作で移動、旋回などの操船機能が自動的に選択されることである⁽³⁾。例えば、図1に示すシステム操船装置の操作盤面で、ジョイスティックとレート設定ダイヤルがいずれも中立位置にある場合は、方位角と船速(0ノット)を保持するモード、ジョイスティックが中立でダイヤルを操作すると、その場で回頭するモード、ダイヤルが中立でジョイスティックを操作すると方位角を保持しながら並進するモード、ジョイスティックとレートダイヤルの両方を操作した場合は、回頭と並進運動を同時に実現する自在モードとなる。これがシステム操船装置の新しい操作方法で、操船者は操船モードをボタンなどで選択することなく、ジョイスティックとダイヤルを操作することによって、意図する船体運動を実現することが可能となる。さらに、機能や精度などの具体的な性能以外にジョイスティック、ダイヤルなどの配置を含む操作性についても、十分検討し操船者の感性に合

図1 システム操船装置の操作盤面例

うような装置を実現することが重要である。

2.3 特徴的な操船機能

システム操船装置の操船機能は移動及び旋回が基本的な機能であるが、海洋観測などで有効と考えられるいくつかの操船機能について述べる。図2に示すように観測機器との相対位置を保持するためには、方位角を保持しながら潮流や風浪を考慮して前後左右の速度成分を制御する方法が考えられる。これが速度(対水/対地)保持機能であり、対水速度保持の場合は、船体や機器類が潮流とともに移動し、対地速度保持の場合は、アクチュエータ能力によっては、簡易的な位置保持を行うことができる。アクチュエータ能力と外乱に応じて、常に船首方向から風を受けるように方位角を制御する場合や、ワイヤーの船体への巻き込み防止のために、風に対する船体の姿勢角をある一定角に保つことが重要な場合がある。これを実現するのが図3に示す対風姿勢保持機能である。自動定点保持装置による定点保持ではなく、ある設定範囲内に留まるような機能が図4に示す自動定点復帰機能である。この機能では、船体は目標位置を中心とするある範囲内(DPR 許容範囲)では方位保持を行い、アクチュエータ能力や外乱の関係で、その範囲から外れた場合は方位保持を解除して、一定距離(DPR 復帰開始半径)漂流した

対風姿勢保持

相対風向が常に一定となるように船首方位角を保持する。

図3 対風姿勢保持における操船イメージ

速度保持

設定された船首方位角を保持しながら、前後左右の対水速度をほぼ0ノットに保持する。

図2 速度保持における操船イメージ

自動定点復帰

本機能をONにしたときの位置をDPR点とし、その位置から一定距離以上船が離れた場合、自動的に船をDPR点付近に戻す。

図4 自動定点復帰における操船イメージ

後、船首を目標位置に向けて復帰し、DPR 許容範囲に入ると方位保持を再度開始する。また、バウスラスタと一軸一舵(通常舵)を装備した船舶では、横移動や斜め後方移動を直接行うことは不可能であるが、船速の積分あるいは GPS などで移動距離を推定して制御対象とすることによって、方位保持しながら図5に示すような疑似的な横移動や斜め後方移動を実現することも可能となる。

3. システム操船装置の制御系設計

3.1 制御系の設計方法

ジョイスティック操船装置の設計に関しては、非干渉制御則⁴⁾などいくつか提案されている。システム操船装置における制御方法は、所定の船体運動を実現するためにジョイスティックやダイヤルの操作量及び方位角、船速などに対するフィードバック制御量、風浪に対するフィードフォワード制御量から必要な前後制御力、左右制御力、回頭制御力を推定した後に、これらの制御力を対象船のアクチュエータ構成に応じて推力配分を行う方法である。必要制御力 Y は、操作量とフィードバック、フィードフォワード制御量で構成され、この必要制御力と推力配分重み係数 C から各アクチュエータに対する指令値 X が推定される。つまり、

必要制御力 = 操作量

+ フィードバック・フィードフォワード制御量

となり、各アクチュエータに対する指令値は、

$$X = C * Y \quad (1)$$

となる。ここで、制御対象となるアクチュエータが4基で構成されている場合、(1)式は次のようになる。

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

指令値 X はアクチュエータ構成により増減するが、必要制御力 Y は平面運動を制御する場合は、前後制御力、左右制御力、回頭制御力の3つである。そして、推力配分重み係数行列 C はアクチュエータ構成により、行数は増減するが列数は3列で固定である。また、推力配分重み係数行列の特徴は、各要素 C_{ij} が定数又は操作量などの関数で構成されていることである。なお、指令値及び推力配分重み係数行列は翼角などの有次元値、必要制御力は最大制御力で正規化した無次元値である。本制御系設計におけるポイントは、いかにして効果的な推力配分重み係数行列を構成するかである。

3.2 必要制御力と推力配分重み係数行列

船体を移動、旋回させるために必要な制御力は前後制御力、左右制御力及び回頭制御力で(2)式の $Y_1 \sim$

疑似的操船(横移動及び斜後移動)

バウスラスタ、プロペラ、通常舵を装備した船で疑似的な操船を行う。

図5 疑似的操船(並進運動)における操船イメージ

Y_3 がこれに相当するものである。ここで、前後制御力を A_d 、左右制御力を T_r 、回頭制御力を R_o として、方位角を保持しながら並進運動する場合を考える。ジョイスティックの傾倒方向が移動する方向、傾倒角が移動速度に関する操作量となり、そのために必要な前後制御力が A_d 、左右制御力が T_r 、そして方位角を保持するためのフィードバック制御量が回頭制御力 R_o となる。速度保持制御では前後左右速度及び方位角を保持するために、すべての制御量がフィードバック制御量で構成され、回頭制御では設定された方位角速度で回頭するために、回頭制御力のみフィードバック制御量となる。なお、この場合はスラスト作動時に発生する前後力を考慮して C_{pp} を一定値で制御している。このように、必要制御力の構成は制御モードによってその構成が変化する。表 1 に方位角、速度を保持する場合及びその場回頭する場合の前後制御力 A_d 、左右制御力 T_r 、回頭制御力 R_o の構成をまとめて示す。

所定の船体運動を実現するための必要制御力を、アクチュエータ構成や運転時の制約事項などを考慮して、各アクチュエータに効率よく推力配分を行うのが推力配分重み係数である。バウスラスタ、スターンスラスタ、 C_{pp} 、舵を装備した船舶の場合は前後制御力、左右制御力、回頭制御力における推力配分重み係数は表 2 のような構成となる。バウスラスタ、スターンスラスタ、 C_{pp} 、舵に対するそれぞれの指令値を F_B 、 F_S 、 F_P 、 F_R とすると、各指令値は (2) 式から次のように表現することができる。

$$\begin{aligned} F_B &= C_{11} \cdot A_d + C_{12} \cdot T_r + C_{13} \cdot R_o \\ F_S &= C_{21} \cdot A_d + C_{22} \cdot T_r + C_{23} \cdot R_o \\ F_P &= C_{31} \cdot A_d + C_{32} \cdot T_r + C_{33} \cdot R_o \\ F_R &= C_{41} \cdot A_d + C_{42} \cdot T_r + C_{43} \cdot R_o \end{aligned} \quad (3)$$

表 1 前後制御力、左右制御力、回頭制御力の構成

操船モード 制御力	方位保持	速度保持	回 頭
前 後 制 御 力	操 作 量 (ジョイスティック)	フィードバック制御量 (前後船速)	定 数 (C_{pp})
左 右 制 御 力	操 作 量 (ジョイスティック)	フィードバック制御量 (左右船速)	定 数 (スラスト)
回 頭 制 御 力	フィードバック制御量 (方位角)	フィードバック制御量 (方位角)	フィードバック制御量 (方位角速度)

表 2 推力配分重み係数行列の構成

操船モード 推力配分重み係数		方位保持制御	対水速度保持制御	回 頭 制 御
バ ウ スラスタ	C _{1 1}	α_1	β_1	γ_1
	C _{1 2}	Joy 傾倒方向の関数	Joy 傾倒方向の関数	γ_2
	C _{1 3}	α_2	β_2	回頭中心に依存
スターン スラスタ	C _{2 1}	α_3	β_3	γ_3
	C _{2 2}	Joy 傾倒方向の関数	Joy 傾倒方向の関数	γ_4
	C _{2 3}	α_4	β_4	回頭中心に依存
C _{pp}	C _{3 1}	Joy 傾倒方向の関数	Joy 傾倒方向の関数	回頭中心に依存
	C _{3 2}	α_5	β_5	γ_5
	C _{3 3}	α_6	β_6	γ_6
舵	C _{4 1}	α_7	β_7	γ_7
	C _{4 2}	α_8	β_8	γ_8
	C _{4 3}	Joy 傾倒角の関数	β_9	γ_9

ここで、方位保持制御の場合の推力配分重み係数について説明を加える。バウスラスタ、スターンスラスタ、舵は左右制御力及び回頭制御力、 C_{pp} は前後制御力に寄与すると考える。前後制御力 A_d に作用する推力配分重み係数の中で、 C_{pp} に作用する係数 C_{31} 以外の C_{11} 、 C_{21} 、 C_{41} はいずれも 0 となり、 C_{31} にはジョイスティックの傾倒方向によって、図 6 に示すような係数 (翼角) が設定される。左右制御力 T_r は、バウスラスタ、スターンスラスタに作用する係数 C_{12} 、 C_{22} 以外の C_{32} 、 C_{42} はいずれも 0 となり、 C_{12} 、 C_{22} にはジョイスティックの傾倒方向によって、図 6 に示すような係数 (翼角) が設定される。そして、回頭制御力 R_r に関しては C_{pp} に作用する係数 C_{33} は 0 となり、バウスラスタ、スターンスラスタに作用する係数 C_{13} 、 C_{23} は最大指令翼角が設定される。そして、舵に作用する係数 C_{43} は、ジョイスティックの傾倒方向が前進方向の場合のみジョイスティックの傾倒角つまり C_{pp} 翼角に応じて、スラスタと舵の使用条件が図 7 に示すような特性で設定され、それ以外の場合は 0 となる。

また、設計段階で推力配分重み係数や制御定数などを決定するためには、横移動やその場回頭など非線形な運動から、通常航行時の操縦運動までを一環して表現することのできる Cross-Flow モデル⁽⁵⁾⁽⁶⁾ を応用したシミュレータを用いた。

図 6 ジョイスティック傾倒方向による
推力配分重み係数の変化

図 7 ジョイスティック傾倒角による
推力配分重み係数の変化

4. システム操船装置による操船実験

システム操船装置を搭載した北海道大学水産学部所属「うしお丸」による実船実験の結果及び実際の海洋観測時における使用状況について示す。なお、本船は表 3 の主要目に示すようにバウスラスタ、スターンスラスタ、Cpp 及び舵を装備している。

4.1 システム操船装置の機能と操作

本装置は方位角、方位角速度及び前後左右速度をフィードバックして、バウスラスタ、スターンスラスタ、Cpp 及び舵を制御することによって、表 4 に示す各種の操船機能を実現している。本装置は図 8 に示す操作装置上のジョイスティック及びレート設定ダイヤルを操作することによって、表 4 の各制御機能が自動的に選択される。表 4 の船位保持機能では方位角設定ダイヤルで設定された方位角及び設定船速 (前後左右: 0 ノット固定) を保持するように、バウスラスタ、スターンスラスタ及び Cpp を制御し、方位保持機能では方位角設定ダイヤルで設定された方位角を保持しながら、ジョイスティックの前後方向成分で Cpp、左右方向成分でバウスラスタ、スターンスラスタを制御する。その場回頭機能では、回頭中

心及びレート設定ダイヤルで設定された方位角速度を保持するようにバウスラスタ、スターンスラスタ及び Cpp を制御する。そして、手動操作機能ではレート設定ダイヤルの操作による回頭運動とジョイスティック操作による並進運動を利用した自在操船を行うことができる。

図8 「うしお丸」搭載システム操船装置の操作盤面

4.2 実船による操船結果

システム操船装置を用いた「うしお丸」による操船結果の一例として、港内で実施した方位保持による右横移動時の10秒ごとの航跡、船首方位角及びバウスラスタ、スターンスラスタ、Cpp、舵指令の各時系列を図9に示す。この結果から、船体は方位保持しながら右横移動をほぼ実現していることがわかる。また、バウスラスタの作動状況に比べて、横方向の抵抗が大きい船尾配置のスターンスラスタは常に最大値で作動していることがわかる。さらに、バウスラスタ作動による前進方向の速度成分をキャンセルするために、僅かではあるがCppを後進に制御していることがわかる。

次に、観測機器を用いた実際の作業で船位保持（方位角及び前後左右方向速度を制御）を行った時のレーダ画像を図10に示す。この観測作業は、向い風約10(m/s)で、潮流約1.0(ノット)のもとで、種々の深度ごとの塩分濃度、温度などを計測するCTD機器をワイヤーで海中に投入したのち、船体とワイヤーの相対位置を保持するためにシステム操船装置の船位保持機能を用いて行われた。CTDは、Conductivity（電気伝導率）、Temperature（温度）、Depth（深度）の略である。このレーダ画像はその時の一部で、位置保持が約20分間にわたって行われた様子を示している。この間、約5分間隔で表示器から読み取った船首方位角及びGPSによる自船の位置（緯度、経度）は、開始5分後は船首方位角265.8度、北緯41度39.81分、東経140度58.15分、10分後は船首方位角270.6度、北緯41度39.81分、東経140

表3 北海道大学水産学部所属
「うしお丸」主要目

主要寸法等	長さ（全長）	33.13 m
	長さ（登録長）	28.00 m
	長さ（垂線間）	27.50 m
	幅（型）	6.50 m
	深さ（型）	3.00 m
	満載喫水（型）	2.69 m
	総トン数	128 t
	満載排水量	336.44 t
主機及び発電機	主機関	ヤンマーM220-UN 1,000PS×800rpm 1台
	推進器	可変ピッチプロペラ 1台
	軸発電機	100kVA 1台
	発電機	200kVA 1台
	バウスラスタ	1 t 1台
	スターンスラスタ	1 t 1台
減揺水槽	容量	18.97 m ³

表4 「うしお丸」搭載システム操船装置の
操船機能

		ジョイスティック	
		中立	不中立
ダイヤル (レート設定)	中立	船位保持	方位保持
	不中立	その場回頭	手動

Figure 1 is a line graph showing the change in angles (in degrees) of four joints over a 150-second period. The y-axis is labeled '(deg.)' and ranges from -20 to 20 in increments of 10. The x-axis is labeled '(sec.)' and ranges from 0 to 150 in increments of 50. A legend in the bottom right corner identifies the four data series:

- Shoulder angle (solid line): Starts at ~10°, rises to ~15° at 10s, drops to ~8° at 30s, rises to ~12° at 40s, drops to ~10° at 50s, rises to ~15° at 70s, drops to ~12° at 90s, rises to ~15° at 110s, drops to ~12° at 130s, and ends at ~10°.
- Cpp angle (dotted line): Constant at approximately 15°.
- N'2x329 angle (dashed line): Constant at approximately -1°.
- 329x329 angle (dash-dot line): Constant at approximately -2°.

6

30SEC

《エセ》

船位
N 41° 39' 84"

船首方向
268.8°

潮流速度
1.13.0°

潮流方向
1.15.0°

30MT

1.12.0°

30MT

30MT

407

431

498

1.21NM

マークからの
距離、方向

R 電

HOLD

NU/RH

NII-Electronic Library Service

新しい操船機能については、操船現場からの声を尊重して、機能の高度化だけではなく操作性についても十分考慮しながら、実現していく所存である。さらに、制御系の設計に関連して、必要制御力の推定方法、推定精度の向上及び各種データの情報処理など基礎的な課題についても研究を進めていきたいと考える。

最後に、海洋観測時の操船に関する貴重なご意見をいただいた「うしお丸」大越船長をはじめとする乗員の方々に厚く御礼申し上げます。また、本研究の実施にあたり低速時の操縦運動に関してご教示いただいた(株)三井造船昭島研究所高品純志博士、操船制御装置の全般にわたり貴重なご意見を頂いた三井造船(株)植木修次氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 織田博行・増田紀義・烏野慶一・大津皓平・蛇沼俊二：多次元自己回帰モデルを用いた低速航行時の保針制御系設計，計測自動制御学会，第14回システムシンポジウム，1988.
- (2) H. Oda, K. Masuda and K. Karasuno: A Portable Automatic Control System for Ocean Research Operation of a Ship with a Controllable Pitch Propeller, a Rudder and a Bow Thruster, 9th SCSS, USA, 1990.
- (3) K. Karasuno, H. Matsushima, H. Oda and K. Igarashi: Advanced Portable Control System under Simple Operation, 10th SCSS, CANADA, 1993.
- (4) 遠藤 真・小林弘明：ジョイスティック装備船の離着岸操船能力—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，平成5年.
- (5) 芳村康男：浅水域の操縦運動数学モデルの検討(第2報) —低速操船時，主船体に働く流体力—，関西造船協会誌，第210号，昭和63年.
- (6) 烏野慶一・松野二郎・伊東智行・五十嵐和之：低速時における主船体操縦流体力の新しい数学モデルについて(第2報)—旋回時の場合—，関西造船協会誌，第217号，平成4年.

質 疑 応 答

石田廣史(神戸商船大学)：ここ数年内の新造船による(旧観測船などを除いて)海洋観測時の操船では、ジョイスティックによる操船(Cpp、前後両スラスト、舵等、低速時は電気推進等の複合制御)は補助的なものではなく、主たる操船として行われています。このことから、本研究による新しい問題提起は何かを教えてください。

織田博行：ご指摘の通り海洋観測を主な業務とする船舶では、どのような操船機能を持つかは別にしても、ジョイスティックなど何等かの自動操船装置が装備されていると思われます。今後、内航船や練習船などで離着岸操船の迅速化、洋上作業時の操船の簡素化などの要求が操船現場から益々高まることが考えられます。本研究は次のような観点から実施しております。離着岸や洋上作業時に共通している低速航行時の操船方法のあり方について検討する事、そして期待される新しい操船機能及び操作性を備えた操船制御装置を提案する事です。さらに、これらの操船機能を実現する操船制御装置を設計するための、汎用的な制御系設計手法を確立する事です。