

複数のアクチュエータを有する船舶の操縦運動制御に関する研究

正員 正司 公一* 正員 長谷川 和彦**

A Study on the Maneuvering Motion Control for Ships with Multiple Actuators

by Kouichi Shouji, Member Kazuhiko Hasegawa, Member

Key Words: Multi-input multi-output system, Azimuth thruster, Pseudo-inverse matrix

1. 緒言

洋上風力発電の建設や海洋エネルギー資源の探索あるいは開発・支援など海洋作業のためのオフショア作業船の需要が高まっている。これらの船舶には、一般に位置保持性能や高度な操船性能が要求されるため、バウスラスタ、スターンスラスタや旋回式推進器を複数装備するなど、船体を自由自在に操るためのアクチュエータが多数装備されている。操船により制御される船体運動は、前後運動・左右運動・回頭運動の3自由度運動であるが、多数のアクチュエータを使ってこれらの3自由度の運動を制御する方法は無数に存在する。このように正則でない伝達マトリクスを有する制御系においては、何らかの評価関数を設定しその関数値を最適にすることで各アクチュエータへの制御力を配分するという、現代制御理論等による最適制御手法が数多く報告されている。しかし、評価関数の与え方や各種重みパラメータ等の与え方については、確立された方法は報告されていない。ロボット工学等では、このような正則でない問題について、疑似逆行列を使って、伝達マトリクスを正規化して解く方法が知られている。本報告では、2基の旋回式スラスタとバウスラスタを有する作業船について、要求される運動モードに対して必要な制御力を疑似逆行列を使って各アクチュエータに配分し、制御システムを見かけ上1入力1出力系化することで、古典制御理論や最短時間操船問題¹⁾の適用が可能であることを示す。

2. 推力配分の定式化

2.1 疑似逆行列

\mathbf{x} を n 次、 \mathbf{y} を m 次、 \mathbf{F} を $m \times n$ 次のマトリクスとし、 \mathbf{x} と \mathbf{y} の関係を次式で表す。

$$\mathbf{F}\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (1)$$

$m \neq n$ の場合 \mathbf{F}^{-1} は存在しないが、(2)式のような性質を持つ $n \times m$ のマトリクスを左側から掛けることにより、(3)式のように(1)式の解の一つを求めることが可能であ

る。

$$\mathbf{F}^R \mathbf{F} = \mathbf{I} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}^R \mathbf{F} \mathbf{x} = \mathbf{F}^R \mathbf{y} \quad \therefore \mathbf{x} = \mathbf{F}^R \mathbf{y} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{I} は $n \times n$ の単位マトリクスである。

(3)式において \mathbf{x} のノルムが最小になる \mathbf{F}^R がMoore-Penroseの疑似逆行列として知られており、(4)式で与えられる。

$$\mathbf{F}^R = \mathbf{F}^t (\mathbf{F} \mathbf{F}^t)^{-1} \quad (4)$$

ここで、 t は転置を示す。

2.2 疑似逆行列を使った推力配分

供試船として2基の旋回式スラスタとバウスラスタを有する作業船を考える。Fig. 1に座標系と記号の定義を示す。

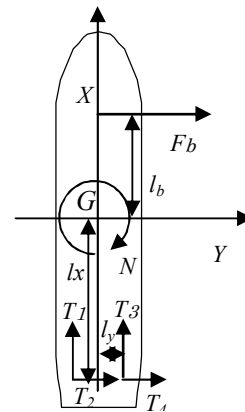


Fig.1 Coordinate system and definition of symbol.

図中の記号は、以下の諸量を示す。

- l_x : 旋回式スラスタの重心から船体長手方向の距離
- l_y : 旋回式スラスタの中心線から船体横方向の距離
- l_b : バウスラスタの重心から船体長手方向の距離
- X : 全スラスタの合力の前後方向成分
- Y : 全スラスタの合力の左右方向成分
- N : 全スラスタによる回頭モーメント
- F_b : バウスラスタの推力
- T_1 : 左舷旋回式スラスタの推力の前後方向成分
- T_2 : 左舷旋回式スラスタの推力の左右方向成分
- T_3 : 右舷旋回式スラスタの推力の前後方向成分
- T_4 : 右舷旋回式スラスタの推力の左右方向成分

* 株式会社 I H I

** 大阪大学大学院工学工学研究科

原稿受付 平成 24 年 4 月 6 日

春季講演会において講演 平成 24 年 5 月 17, 18 日

©日本船舶海洋工学会

スラストの合力はこれらの記号を用いて(5)式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ l_b & l_y & -l_x & -l_y & -l_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_b \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{pmatrix} \quad (5)$$

(5)式の中央のマトリクスが(1)式の \mathbf{F} に相当するので(4)式によって疑似逆行列を求め推力配分を求めると(6)式を得る。

$$\begin{pmatrix} F_b \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & f_{22} + l_b f_{32} & f_{23} + l_b f_{33} \\ 0.5 & l_y f_{32} & l_b f_{33} \\ 0 & f_{22} - l_x f_{32} & f_{23} - l_x f_{33} \\ 0.5 & -l_y f_{32} & -l_y f_{33} \\ 0 & f_{22} - l_x f_{32} & f_{23} - l_x f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ N \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、マトリクスの要素は以下である。

$$\begin{aligned} D &= 2(l_x + l_b)^2 + 6l_y^2 \\ f_{22} &= (l_b^2 + 2(l_x^2 + l_y^2))/D \\ f_{23} &= (2l_x - l_b)/D \\ f_{32} &= f_{23} \\ f_{33} &= 3/D \end{aligned} \quad (7)$$

(6)式により各旋回式スラストに推力が配分されると、旋回式スラストの動作が以下のように決まる。

$$\text{左舷推力} \quad T_L = \sqrt{T_1^2 + T_2^2} \quad (8)$$

$$\text{左舷首振り角} \quad \theta_L = \tan^{-1}(T_2/T_1) \quad (9)$$

$$\text{右舷推力} \quad T_R = \sqrt{T_3^2 + T_4^2} \quad (10)$$

$$\text{右舷首振り角} \quad \theta_R = \tan^{-1}(T_4/T_3) \quad (11)$$

3. 操縦運動制御計算例

3.1 古典制御理論による計算例

(6)式は、前後方向、左右方向、回頭方向の運動に必要な力を独立して得ることができることを示している。したがって、それぞれの運動方向の偏差に対してフィードバックをかけることで希望する運動をさせることができる。ここでは、例として停船状態から船首方位を保持しながら真横に動き出し一定速度で移動するという問題を考える。制御方法は、以下に示す比例積分(PI)制御により操縦運動制御に必要な制御力を求めた。

$$X = -k_{px}u \quad (12)$$

$$Y = k_{py}(v_c - v) + k_{ly} \int (v_c - v) dt \quad (13)$$

$$N = -k_{p\psi}\psi \quad (14)$$

ここで、 $k_{px}, k_{py}, k_{p\psi}$ は比例ゲイン、 k_{ly} は積分ゲイン、 u は、前後方向速度、 v 、 v_c は横方向速度と横方向速度の

目標値、 ϕ は船首方位を表す。供試船は、サブライボートとし Table 1 に主要目を示す。

Table 1 Principal particulars.

Length Between Perpendiculars	64.0m
Breadth	13.6m
Draft	4.5m
Displacement	3,246t
Block Coefficient	0.8095

1例として $v_c=0.2\text{m/s}$ とおいて、シミュレーションした結果を Fig.2 に示す。上が鳥瞰図、下が時系列である。ほぼ希望通り船首方位を保ったまま真横に移動することができている。なおここでは、(12)式から(14)式に示したPI制御で操縦運動を制御できることを示すのが目的なので、ゲインのチューニングを高レベルでは行っていないが、1入力1出力システムになっているので従来の古典制御理論の適用が可能である。

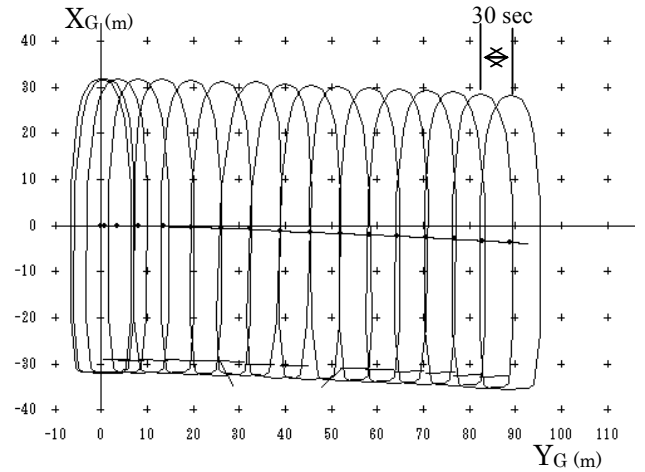


Fig.2 Example of maneuvering motion controlled by PI control.

3.2 最短時間操船問題の計算例

多入力多出力系に対して直接操船方法を求めようとする場合アクチュエータ操作の組み合わせが無数に存在するので、一意に解を得ることが困難である。しかし、本論文で示した方法によると多入力多出力系を見かけ上1入力1出力系化することができるので、最適解を得ることが可能になる。1入力1出力系に対する最適化問題を解く方法としては、非線形計画法を使って解く方法²⁾が示されている。ここでは、1例としてこの方法を使って「12kt でアプローチしてきた供試船を前方 500m、右方 100m の地点で反転して止める」という問題を解いた。Fig.3 に鳥瞰図、Fig.4, Fig.5 に運動状態を示す。供試船は、滑らかに回頭しながら反転し、目標の地点で停船してい

ることがわかる。

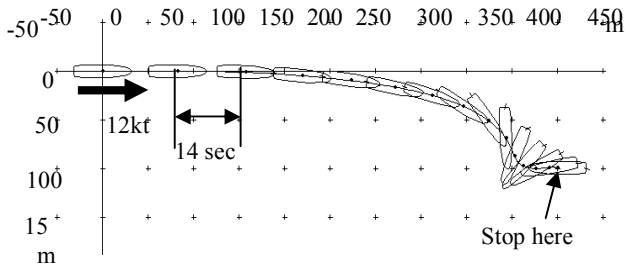


Fig.3 Trajectory of stopping motion in minimum time required.

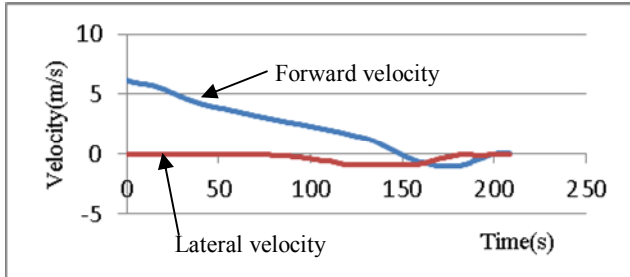


Fig.4 Time history of ship's velocity.

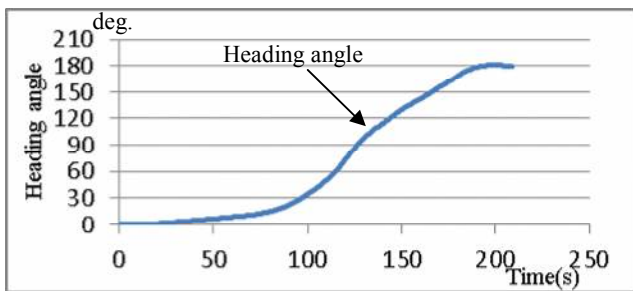


Fig.5 Time history of heading angle.

4. 結 言

疑似逆行列を使って2基の旋回式スラスタとパウスラスタを有する船の制御系を1入力1出力系に置き換えることができることを示した。本手法を用いることで、

1. 従来型の古典制御によるフィードバック制御により、操縦運動を制御できることを示した。
2. 最短時間操船問題を非線形計画法により解くことができた。

今後は最短時間以外の評価関数により種々の操船問題の最適化を図っていく。

参 考 文 献

- 1) 正司公一, 大津皓平: 最適制御理論による操船の最適化と自動化について (第1報), 日本造船学会論文集, 第172号, 1992, pp365-373.
- 2) 大津皓平: 非線形計画法による最短時間操船の数値解法, 日本造船学会論文集, 第196号, 2004, pp.99-104.