

# アジマススラストの推力配分の性能評価に関する研究

学生員 上田 泰秀\* 正員 木村 元\*\*

A study of performance evaluation on thruster allocation methods for azimuth thrusters  
by Yasuhide Ueda, *Student Member* Hajime Kimura, *Member*

**Key Words:** DPS (Dynamic Positioning System), control allocation, azimuth thruster

## 1. 緒言

自動船位保持船は複数のアジマススラストを用いた自動船位保持システム(dynamic positioning system:DPS)を用いた定点保持が行われる。スラストの対故障性を考慮して多くの場合複数のアジマススラストの自由度が、運動の自由度を上回ることが多く、冗長性のある問題となるので何らかの適切な基準が必要である。これは推力配分(control allocation)問題と呼ばれている。従来スラストエネルギー最小化を目的として、Lagrange 未定乗数法による解析的な手法が多くの場合で用いられている。しかし、波、潮流、風などの外乱要因が小さく、スラストの向きをなるべく一定に維持したほうが良い場合であっても、アジマススラスト首振角の不必要な頻繁な首振りが生じ、稼働部の短命化と定点保持性能劣化を招くという問題がある。

これに対し、五百木<sup>1)</sup>らはアジマススラスト首振角度に制約を設け、実時間に厳密に実装でき、首振りを減らす方法を提案した。しかしながら角度制約の中では頻繁に首振りを行うことが観察されており、推力指令に対する速応性に問題があることが観察されていた。Fossen<sup>2)</sup>らは首振角を観測しながらスラストと首振りを抑えるオンライン最適化方法を定式化しているが、評価関数は非線形な問題<sup>3)</sup>となり、実時間計算できるには至っていないようである。筆者<sup>4)</sup>らはスラストの首振りを考慮し、頻繁な首振りを抑えるオフライン最適化の静的な推力配分法定式化を提案し、浮体の応答を考えていない数値実験上首振りを抑え、制御性能が向上する結果を得ている。本研究では簡単なモデルを製作し、実験を行い浮体の応答も考慮したうえで推力配分法を比較、検証する。

## 2. 推力配分法について

本稿では、Fig.1に示すように surge(x), sway(y), yaw( $\psi$ )の船体運動を考え、船体に働く x 軸方向の力 X, y 軸方向の力 Y, 回頭モーメント N という指令値が与えられる場合の推力配分を考え、アジマススラストの数は 3 個とした。

また、推力配分法については推力最小化を目的とする方法をスラスト最小化法 (method.1), 五百木<sup>1)</sup>らの行っ

た首振角に制約を課したスラスト最小化法を首振角制約付きスラスト最小化法 (method.2), 筆者<sup>4)</sup>らのスラストと首振角度を最小化する方法を、首振角+推力最小化法 (method.3) と呼ぶことにする。これらの方法はどれも制御力の範囲を

$$\underline{X} \leq X \leq \overline{X}, \underline{Y} \leq Y \leq \overline{Y}, \underline{N} \leq N \leq \overline{N}$$

と仮定しメッシュ分割しておき、オフライン計算し、それを 3 次元補間するという方法でこれら 3 つの方法の比較を行った。

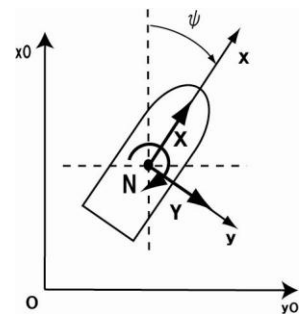


Fig.1 Ship Fixed Coordinate System and Forces

## 3. ハードウェア・システムの構成

### 3.1 システム構成

本研究で用いたシステムの概要は Fig.2 に示す。カメラでの船体位置計測については阿部<sup>5)</sup>宮本<sup>6)</sup>らの方法を用いた。推力配分に制御指令を伝える DPS の制御について、本稿では推力配分法を評価するため制御性能を厳しく達成するには及ばない。そこで簡単のため surge, sway, yaw の各運動に対する PID 制御を用いる。制御対象を観察しながら定点保持のための PID ゲイン調整を行い、どの推力配分法にも同じ PID 制御を用いている。

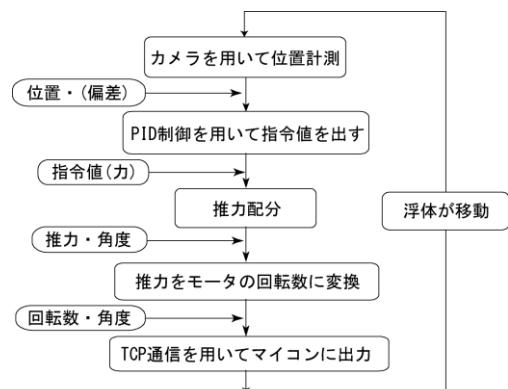


Fig.2 System's Outline Chart

\* 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

\*\* 九州大学大学院工学府海洋システム工学部門

原稿受付 (学会にて記入します)

秋季講演会において講演 (学会にて記入します)

©日本船舶海洋工学会

### 3.2 ハードウェア構成

本システムは 360 度の首振りを行うアジマススラスト 3 基とそのインペラ駆動用モータ 3 基及びアジマススラストの首振りモータ 3 基を制御するための H8 マイコンと、DPS コントローラ及び、推力配分コントローラとして機能する PC、浮体の位置を計測するためのカメラを搭載した PC から構成され、それらがネットワークで接続されている。ハードウェア全体の構成を Fig.3 に示す。

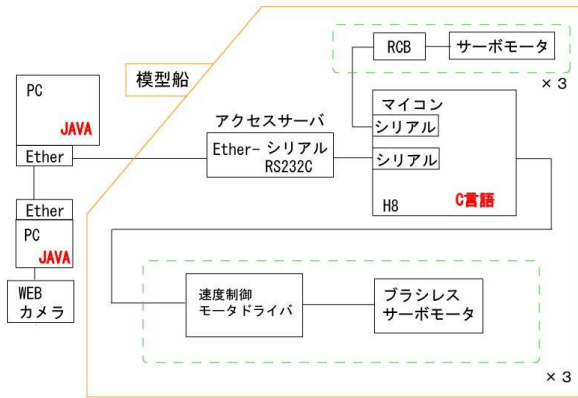


Fig.3 Hardware System

## 4. 模型実験による性能評価

### 4.1 実験条件

実験模型(Fig.4)について主要目は Table 1 のようになっており、1/50 のクレーン台船を想定し制作した。各スラスト配置は Table2, Fig.5 に準じており、スラストを  $T_i$  とする。首振り可動域がある推力配分法での可動域中心を  $\alpha_i$  とし、スラスト初期位置も示している。また Fig.6 に示しているように  $\alpha_i$  からの角度を首振り角度  $\theta_i$  とする。

Table1 Principal particulars of the Model Ship

全長 (Loa)	1.00 m
型幅 (B)	0.40 m
型深さ (D)	0.08 m
喫水 (d)	0.022m

Table2 Thrusters' configuration.

	$x_i$ [m]	$y_i$ [m]	$\alpha_i$ [deg]
thruster.1	0.450	0.000	0
thruster.2	-0.350	0.130	120
thruster.3	-0.350	-0.130	240

本実験は Fig.7 に示す小型水槽 (全長 3m, 幅 1.2m, 水深 0.4m) を使用し、波浪、潮流などの外乱は取り入れず、平水中実験のみを行った。

水槽実験で模型を前進、右への移動後、左回頭させ、最後に原点に戻すという移動指令を与えた。それぞれの推力配分法の指令値と応答を Fig.8, Fig.9, Fig.10 に示す。浮体応答が振動しているのは PID 制御の制御性能が甘いこと、模型のモータの最低出力が大きいため ON/OFF 制御に近いものとなっていることが原因として考えられる。スラスト  $T$  と首振り角度  $\theta$  は Fig.11, Fig.12, Fig.13 に示す。

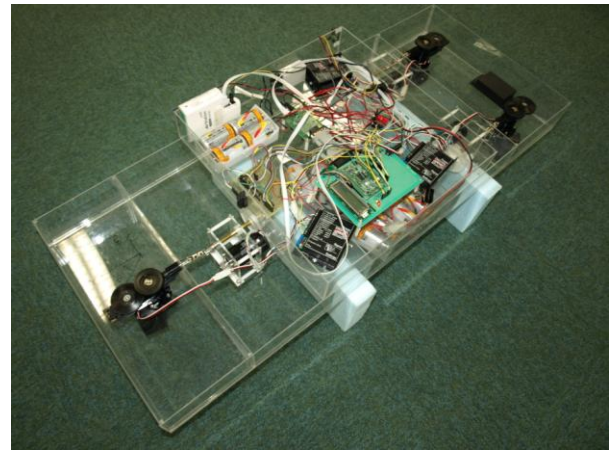


Fig.4 Model Ship

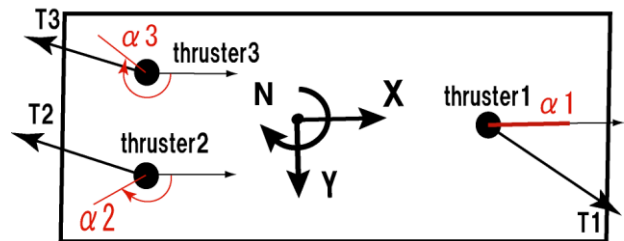


Fig.5 Location Model Ship Image

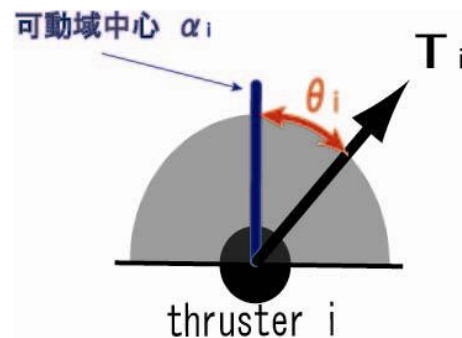


Fig.6 Constraint of a Thruster's Angle and Center Angle Image

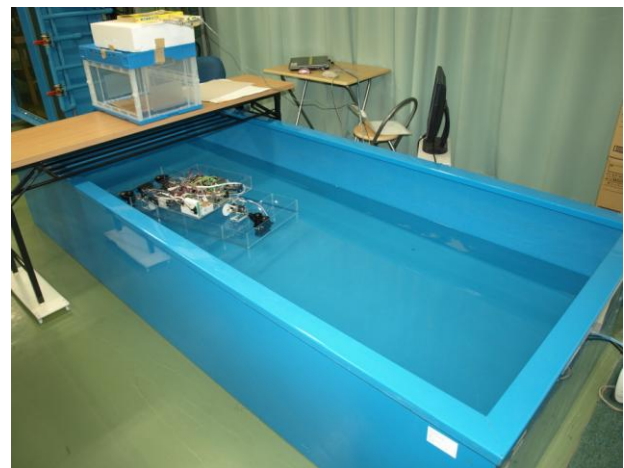


Fig.7 Tank Test of Control Allocation

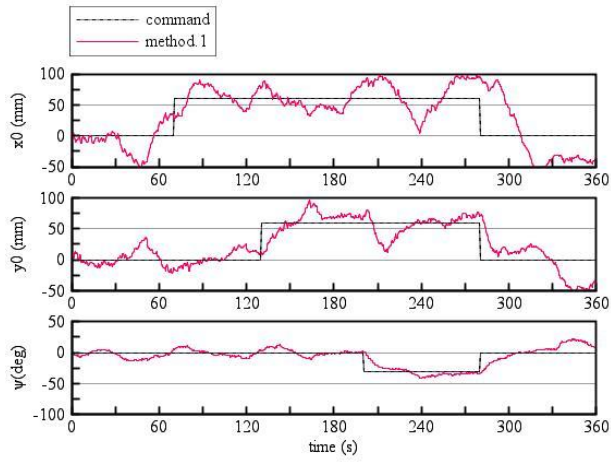


Fig.8 Time Series Graph of Ship Response (method.1)

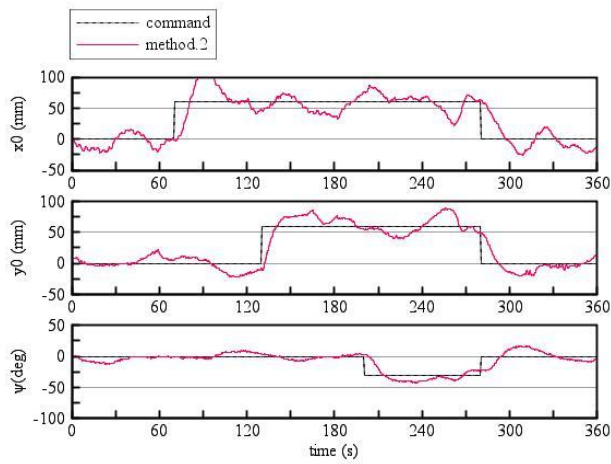


Fig.9 Time Series Graph of Ship Response (method.2)

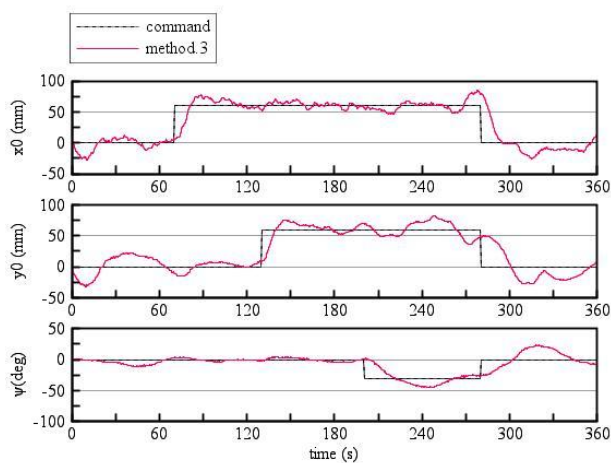


Fig.10 Time Series Graph of Ship Response (method.3)

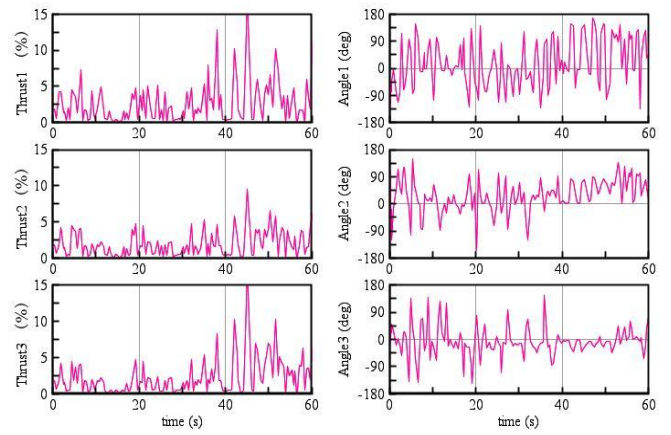


Fig.11 Thrusts and Thrusters' Angles (method.1)

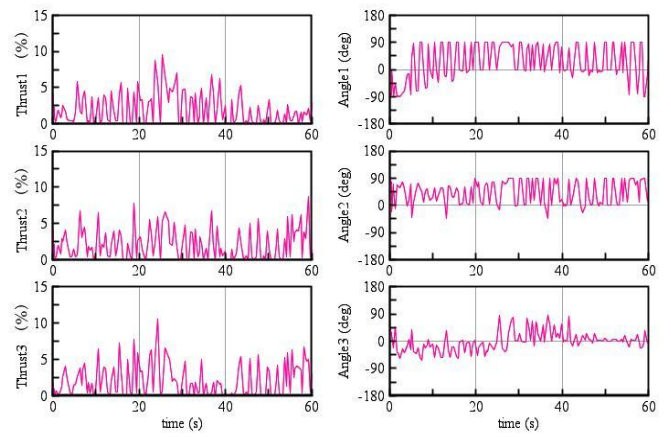


Fig.12 Thrusts and Thrusters' Angles (method.2)

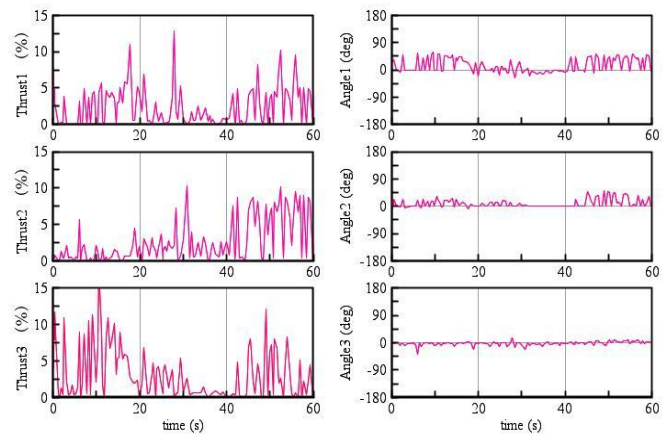


Fig.13 Thrusts and Thrusters' Angles (method.3)

実験データから制御性能、スラスト量、首振量を以下の指標で比較した。

$$J_1 = \int_0^{t_0} \left( (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (\psi - \psi_c)^2 \right) dt \quad (1)$$

$$J_2 = \int_0^{t_0} \sum_{i=1}^3 \|T_i\| dt \quad (2)$$

$$J_3 = \int_0^{t_0} \sum_{i=1}^3 \left\| \frac{d\theta_i}{dt} \right\| dt \quad (3)$$

ここで  $t_0$  は実験のデータ記録終了時刻を示している。 $J_1$  は、それぞれの目標値と応答値の誤差で、制御性能を示している。 $J_2$  はスラスト量、 $J_3$  は首振量を示しており、これらは小さいほうが望ましい。

#### 4.2 実験結果

各評価指標におけるスラスト最小化法(method.1)の性能を1とした場合の首振角制約付きスラスト最小化法(method.2)、およびスラスト+首振角最小化法(method.3)の性能を table3 に示す。1 より小さいことが改善を示している。

Table3 Evaluation of the performance

	method.2	method.3
$J_1$	0.48	0.35
$J_2$	0.95	0.99
$J_3$	0.85	0.08

Fig.8, Fig.9, Fig10 において method.1 に比べ、method.2 と method.3 は  $J_1$  の制御性能が向上していることが分かる。これはスラスト角度に制約等を課すことで可動範囲が狭くなり、速応性が増すためだと考えられる。 $J_2$  で比較すると method.1 が最もスラストが小さい方法のはずだが、無駄な首振りによって制御性能が下がり要求制御力が大きくなってしまったため、逆にエネルギー消費の増大を招いていると考えられる。method.2 と method.3 を比較すると前者のほうが  $J_2$  のスラスト量が小さい。これは首振角に制約を付けたことで無駄な首振りが減り、さらに首振角制約範囲内で最も小さなスラストで推力配分をしているためと考えられる。

Fig.11, Fig.12, Fig13 において method.3 以外は常に角度が変化し続けているのに対し、method.3 は首振りをしない時間がある。これは要求される力がどのような大きさでもベクトルの向きさえ同じ指令値である場合、method.1 と method.2 はそれぞれ同じ角度になるのに対し、method.3 は指令値が小さい場合、角度が初期位置から動かないためである。このことから大幅に首振量が減少していると考えられる。

#### 5. 結言

本研究では推力配分法を比較検討できるシステムを構築し、模型実験で推力配分法の評価を行った。

平水中などの弱外乱下においてスラスト+首振角最小化法(method.3)が制御性能向上、首振量を抑える利点があるといえる。本実験では平水中の場合を扱ったが、潮流などの外乱がある場合、要求される力の正負の切り替わりがあまりないと思われるのでスラスト最小化法(method.1)がエネルギー消費の面で有効であると思われるが、今後検証する必要がある。そして実験模型がより一般的な船型での実験を行う必要がある。また定点保持システム全体を考察するために推力配分の上位制御系である DPS についても性能向上する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 五百木陵行, 梶原宏之: 区分的線形補間による首振角制限付きアジマススラストの最適推力配分法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第6号, 2007, pp.183-190
- 2) A.Johnsen, T.I.Fossen, and Steven P.Berge: Constrained Nonlinear control Allocation With Singularity Avoidance Using Sequential Quadratic Programming, IEEE Trans.on control sys.tec.vol.12, No.1, 2004, pp.211-216
- 3) A.Bemporad, M.Morari, V.Dua, E.N.Pistikopoulos: The explicit linear quadratic regulator for constrained systems, Automatica, Vol38, 2002, pp.3-20.
- 4) 上田泰秀, 中島聡子: 即応性を考慮したアジマススラストの推力配分問題に関する研究, 九州大学工学部 地球環境工学科船舶海洋システム工学コース卒業論文, 2008
- 5) 阿部達彦: アジマススラストを持つ浮体の運動制御に関する研究 九州大学工学部 地球環境工学科船舶海洋システム工学コース卒業論文, 2009
- 6) 宮本達也: WEB カメラによる画像認識と配管工事システムへの可能性に関する考察, 九州大学工学部 地球環境工学科船舶海洋システム工学コース卒業論文, 2009