

報 技 工 重 炎

Homura Heavy Industries
Technical Review

Vol.3

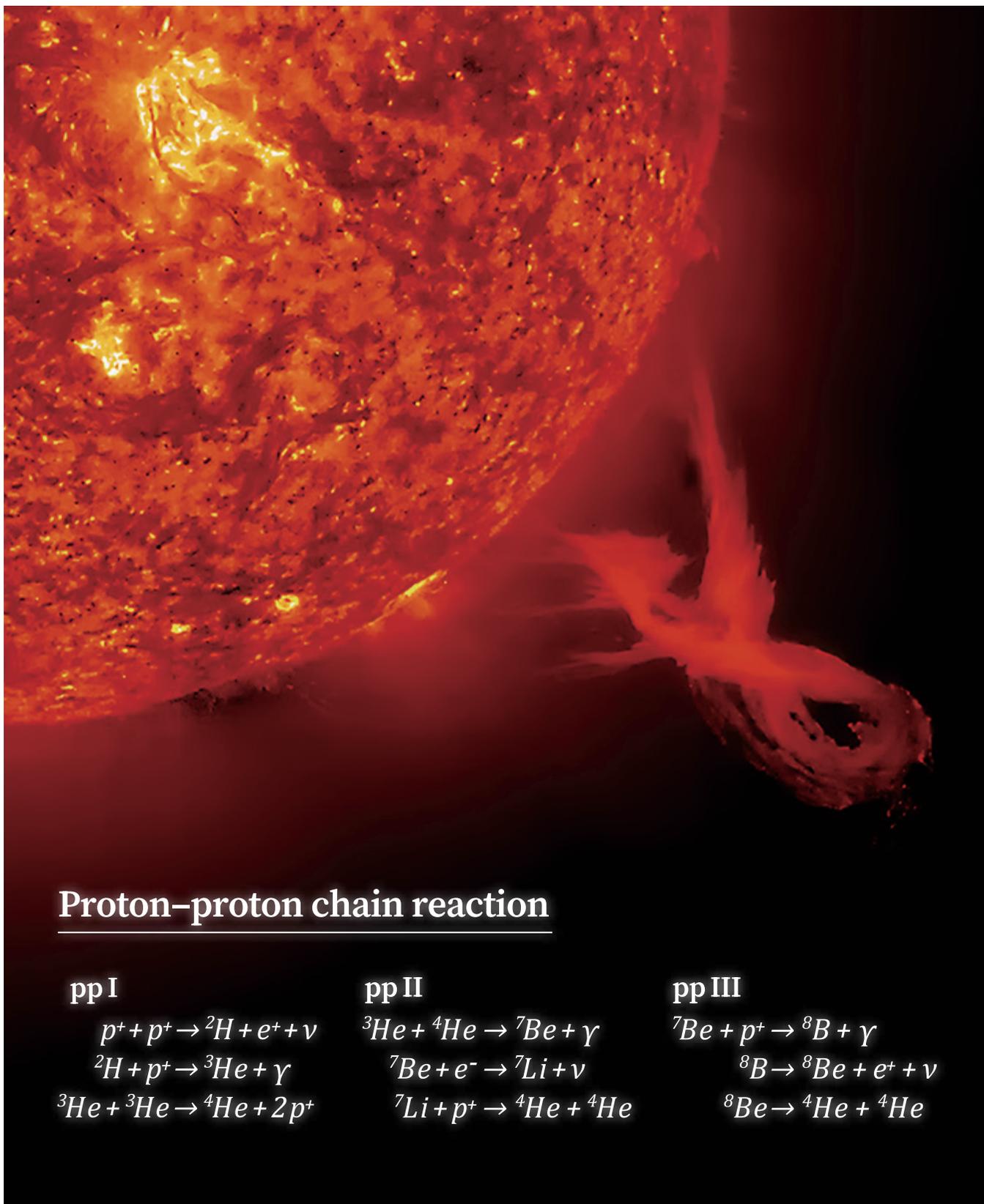
2019

Feature

多軸の舵舵における
運動制御最適化に関する研究

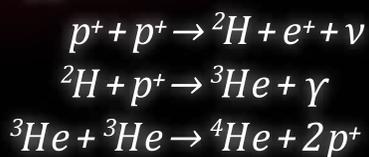
生物を対象とした電気刺激の
生成アルゴリズムに関する研究

水中生物群の
誘導アルゴリズムに関する研究

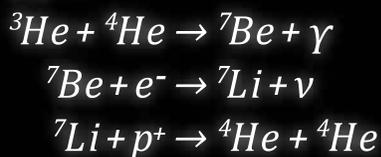


Proton-proton chain reaction

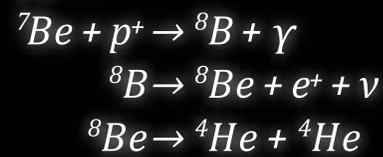
pp I



pp II



pp III



炎重工技報

Homura Heavy Industries
Technical Review

Vol.3

2019

「炎重工技報 Vol.3」発行の挨拶

代表取締役 古澤 洋将

平素は格別のご高配を賜り、厚く御礼を申し上げます。本技術機関誌「炎重工技報 Vol.3 2019」の発行にあたり、挨拶を申し上げます。当社は2016年2月に設立し、現在は創立3周年を迎え、4期目の事業年度に入りました。経済産業省が主催するJ-Startup（企業価値又は時価総額が10億ドル以上となる、未上場ベンチャー企業等を支援するプログラム）に選定されたことは、ひとえに皆様のご指導・ご支援の賜物であると感じております。

さて、21世紀に入ってから20年近い歳月が経過し、高度な情報化社会に到達した今、日本をはじめとした先進諸国では、再び社会の二層化が進んでいるように見えます。2013年にフランス人の経済学者トマ・ピケティは、21世紀の資本という著書の中で、資本収益率が経済成長率を上回っている状態が続き、現代は世襲制資本主義へ回帰していることを述べています。過去の日本史を振り返っても、合戦に勝って江戸幕府を開いた武士より、太平の世で富を増やし続けた豪商の方が資本を蓄積していました。

また、地球規模で経済が発達した現代では、労働集約的な第一次産業から脱却することで高度経済成長を見込める地域は少なくなりました。技術が高度に発達したことにより、産業革命やIT革命のような新たな高度経済成長は難しくなり、代わりに気候変動のような自然現象が経済成長を阻害する要因として登場してきています。現代の我々が直面している社会の二層化を解消するのは、トマ・ピケティが指摘するように年々難しくなっていると言えます。

このような背景のもと、改めて資本主義の定義を確認すると、1776年にイギリス人の哲学者アダム・スミスによって国富論が著され、資本（Stock）とは「財貨や労働による生産物」と示されました。しかし、この生産物が生まれる源は、すべからく太陽から降り注ぐエネルギーのおかげと言えます。例えば、地球よりもわずかに太陽から遠い火星は、赤く覆われた死の大地になっています。この太陽エネルギーという視点を経済学に持ち込めば、過去数十億年にわたる太陽エネルギーの蓄積の産物である油田を保有する国家が莫大なオイルマネーを手にし、太陽エネルギーが広大に降り注ぐ大地（農地）を手に入れている国家は、大量の穀物や家畜を生産して世界中へ輸出する構図が見えてきます。

また、地球の地表面積は3割ほどしかなく、残り7割は海洋が占めています。膨大な太陽エネルギーの7割は海面に届いていることになり、これからは排他的経済水域（EEZ：Exclusive Economic Zone）の開発が重要になってくると思います。いわば、1968年にアメリカ人の思想家リチャード・バックミンスター・フラーが著した「宇宙船地球号」の考え方が、これからの社会ではより一層重要になってくるのではないのでしょうか。

当社では、自然環境、とりわけ水産業を対象にしたシステムを開発することで、新しい事業の創造に取り組んでいます。炎重工技報 Vol.3 2019 は、船舶ロボット、生体群制御の信号生成及び誘導のアルゴリズムについて、それぞれご紹介いたします。ぜひ御高覧頂き、忌憚のないご意見をお寄せ頂ければ幸甚の至りに存じます。より一層の御支援・御鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。挨拶といたします。

目次

巻頭言

- P2** 「炎重工技報 Vol.3」発行の挨拶

技術報告

- P4** 多軸0舵船における
運動制御最適化に関する研究
- P12** 生物を対象とした電気刺激の
生成アルゴリズムに関する研究
- P16** 水中生物群の
誘導アルゴリズムに関する研究

その他

- P22** 執筆者紹介
- P23** 会社概要

多軸 0 舵船における 運動制御最適化の紹介

阿部 翔太 *1 松岡 知洋 *1

USV yaw control optimization via multi-axis and zero-steer.

Shota Abe*1, Tomohiro Matsuoka*1

Abstract - We introduce an unmanned water surface vehicle (USV) with multiple propeller-axis and no rudder blades. Maneuverability, especially turning ability, of two-axis USV is discussed. We also discussing that three- or four-axis USV's possibly have better maneuverability than two-axis ones due to greater degrees of freedom of movement.

Keywords:USV, Robot, Ship control, multi axis motor control

1. はじめに

我が国は、四方を海に囲まれた海洋国家であり、排他的経済水域（EEZ：Exclusive Economic Zone）は広大で、国土の10倍以上もある[1]。我が国の周辺水域における主要な水産資源は、漁獲可能量制度（TAC：Total Allowable Catch）に基づき、マイワシ、マアジ、マサバ、ゴマサバ等を含む50魚種84系群に分類されている[2]。これら水産資源のうち、資源調査の終わった48魚種79系群の中で40系群（マサバ、スケトウダラ、ホッケ、トラフグ等）が低位水準であった（図1）[3]。このような漁獲量の低迷により、漁業経営は年々不安定さを増してきている[4]。

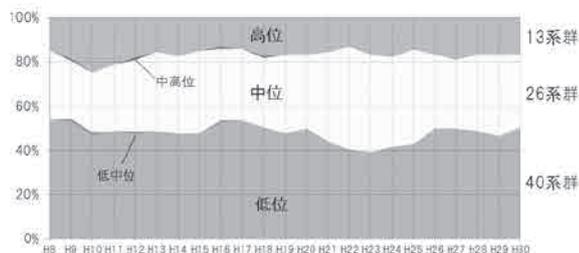


図1 水産庁平成30年度
我が国周辺水域の水産資源評価より引用

一方で、2017年度の漁船における死傷災害の発生率は、12.4%と非常に高い値を示した。漁船における海難事故は、1967年以降減少を続けているが、2005年からその減少割合に鈍化が見られる[5]。これらの海難事故を分析すると、衝突または乗揚において、海難事故の50%以上が発生し、特に衝突の事故原因は、約87%が見張り不十分であった[6]。

さらに、我が国の漁業就業者も高齢化してきており、65歳以上の割合は約38%、55歳以上を含めると約60%である[7]。このような海難事故は、単独操船と操船の作業も多い漁業の特徴と考えられ、高齢化によって海難事故の増加が懸念されている[8]。

我が国の漁業就業者の高齢化と若年層の就業者数が減り続けている中で[9]、水産業における省人化を図ることは重要なテーマである。また、漁業経営を効率化するためには、設備投資を最小化することも必要である[10]。

著者らは、前述のような課題を解決するため、低価格かつ汎用的に使用できる船舶ロボットの開発を行っている。本稿で紹介する船舶ロボットは、推進器を2つ備えたミニボートに分類される小型な船舶である。低価格を実現するため、舵を用いず、船体に固定された2つの推進器を独立して制御することで、旋回するためのモーメントを発生させる手法を採用している。

本稿では、このような舵を持たない2軸0舵船の運動制御の最適化について、制御シミュレーション及び実証試験を行った。さらに自由度が高く、並進運動と回転運動を同時に可能な3軸及び4軸の推進器を備えた場合の制御についても、検討を行った。

将来は、船舶ロボットによる内水面（養殖池）での自動給餌、海上での漁業支援、及び自動警備等の実現を目指していく。



図2 船舶ロボットの外観

*1: 炎重工株式会社 研究開発部

*1: R&D Division, Homura Heavy industries Corporation

2. 船舶ロボットの概要

2.1 基本構造 及び 主要諸元

船体は、FRP を用いた可搬性の高い分割式のミニボートに分類される製品を採用している。

また、主な装備として、制御ユニット（ECU）、遠隔操作用レシーバ、バッテリー、発電機、燃料タンク、船外機、全周灯、及び警笛を備えている。

バッテリー及び発電機によるシリーズ・ハイブリッドを構成することで、長時間動作が可能である。

表 1 主要諸元表

船種	和船
全長	2460 [mm]
全幅	1130 [mm]
全高	400 [mm]
重量	40 [kg] (船体のみ)
船外機出力	500 [W] ×2
最高速度	4 [knot], 7.4 [km/h]
動作時間	80 [h]

2.2 配置

船舶ロボットの基本的な配置を図 3 に示す。舵を持たず、2つの船外機の出力差を用いることで、船体の旋回を行う。

分割式の船体のうち、船首にはバッテリー、燃料タンク、及び発電機などの動力源となるシステムを配置し、船尾部には、制御ユニット及び船外機を配置した。このとき、船体の重心は船体の中央からやや後方（船尾側）となり、船首はやや持ち上がった状態（船尾トリム）となる。

α : トリム角

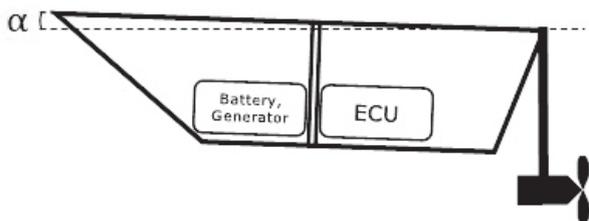


図 2 船舶ロボットの装備品の配置

これは、船首が下がった場合、船体にスプレーがかかりやすくなるだけでなく、スクリューが水面に露出しやすくなり、速度が出なくなるためである。

また、船尾に取り付けられた船外機は、前後（進行）方向に対して、スクリューが平行となるように配置した場合に推力が最大となる。しかし、船舶ロボットでは旋回性能を高めるため、左右のスクリューが船体中央を向くような V 字型に配置している。設置角（以下、本項では船外機角と述べる）による旋回性能の比較については、3 章で詳述する。

2.3 停泊手法

底質や艇によって様々なアンカー（錨）が存在するが、小型船舶向けの主要な錨を表 2 に記す。

表 2 アンカー比較 [11]

ダンフォース・アンカー	ヨット、プレジャーボート 砂泥、軟土質
マッシュルーム・アンカー	小型ボート、ゴムボート 砂地
シー・アンカー	艇の全長により異なる 海面付近で使用



図 4 マッシュルーム・アンカー

水上に浮かぶ船舶は、一般的に図 4 などの錨を用いて停泊するが、根掛かりなどにより錨が回収できなくなる場合がある。無人運用される船舶で、このような事故が発生すると、錨を回収できなくなってしまう。

こういった事故を回避する方法として、MINNKOTA 社の SPOT LOCK [12] やトヨタマリンの TVAS (Toyota Virtual Anchor System) [13] などの仮想錨がある。これは、GPS の緯度経度を基に、物理的な錨を用いずに、自律移動によって、自船位置を保持するシステムである。

本稿で紹介した船舶ロボットにも同様の機能が備えられ、錨を用いることなく、自船位置を保持することが可能である。

2.4 推進器

一般的に、互いに独立した 2 軸の推進器を持つ船舶は、スクリューを左右対称に配置し、進路変更のための舵を備えている [14]。例えば、スクリューの各軸に対してそれぞれに舵を持つ 2 軸 2 舵船や、船尾中央に舵を持つ 2 軸 1 舵船などがある [15]。本研究における船舶ロボットは、舵を用いることなく、船外機を独立して制御することで旋回するためのモーメントを発生させている。

船舶ロボットで使われている船外機は、一般に市販されている汎用品を用いている。このため、船外機本体及び保守部品は、入手性が良く安価である。また、高出力船外機への変更や、船外機の増設にも対応できる拡張性を備えている。

ただし、推進器の合計出力が 1.5[kW] 以上、または船体の全長が 3[m] 以上になる場合は、小型船舶操縦士及び船舶検査等が必要である [16]。

2.5 船外機の取付角 α' 及び高さ h

効率的に推進力を得るための重要な事項として、船外機（スクリュー）の取り付け高さがある（図5）。船外機の取り付け位置が高すぎる場合、荒れた水面では、スクリューが水面から露出しやすくなる。このとき、水抵抗が急激になくなり、スクリューが異常回転する恐れがある。船外機の取り付け位置が低すぎる場合、水抵抗が増大し、推進効率が悪化する。浅水域や岩礁などを通行する際には、水底にスクリューが接触する恐れがある。

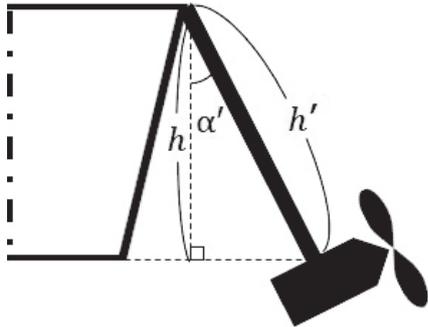


図5 取付角および高さ

h : 船外機取付高さ
 h' : 乾舷からのシャフト長さ
 α' : 取付角。 h からみた船外機の取付角
 $h = h' \cos(\alpha')$ が成り立つ。

表2 船外機取付高さの選択法 [17]

高め (h : 小)	浅瀬の走行
	穏やかな水面にてトップスピードを重視
低め (h : 大)	概要など荒れやすい水面での走行
	水面上槽に異物や浮草が多い場所での走行

船外機の標準的な取り付け位置の指標として、スクリュー・シャフトを船底に平行にした状態で船外機のキャビテーションプレートが船底と同じ高さ、または船底よりやや低めになる高さとしてされている [17]

今回の実験では、シャフト角を平水時における船体前後方向に対して垂直とし ($\alpha' = 0.0$)、上記の指標に従い、スクリュー高さを船底と同じ高さに設定した。

3. 2軸0舵船における運動制御最適化

3.1 概要

図6に、上から見た船体の外形、運動最適化について検討するために必要なパラメタ、及び船体に固定した座標系を示す。 z 軸は、紙面に垂直で、その方向は紙面の表側から裏側へ向かう方向とする。 z 軸まわりの回転方向は、時計回り方向を正とする。下記に、図6で用いられている記号を示す。

- O : 船体に固定された座標系の原点
船体の重心と一致するものとする
- x, y : それぞれ船体に固定された座標系の x 軸、及び y 軸
- a : 船体の重心から船外機までの y 軸方向の距離
- b : 船体の重心から船外機までの x 軸方向の距離
- θ : 船体の重心からスクリューを見たときの、 x 軸からの角度
- δ : 船外機角。 x 軸からみた船外機の取り付け角
- F_1, F_2 : 船外機、または船外機の発生する出力
- N : 船外機の出力による、重心に関する z 軸回りの力のモーメント、またはその大きさ

ここで、図6の記号を用いて、船外機の生み出す推力について述べる。船外機 F_1, F_2 に対して、 δ は船外機角を示すと、前後方向の力 F_x 、左右方向の力 F_y 、重心周りのモーメント N は、下式 (1) で表すことができる。

(1)

$$F_x = (F_1 + F_2) \cos \delta$$

$$F_y = (F_1 - F_2) \sin \delta$$

$$N = -\sqrt{a^2 + b^2} \sin(\theta + \delta) F_1 + \sqrt{a^2 + b^2} \sin(\theta + \delta) F_2$$

$$= -(F_1 - F_2) \sqrt{a^2 + b^2} \sin(\theta + \delta)$$

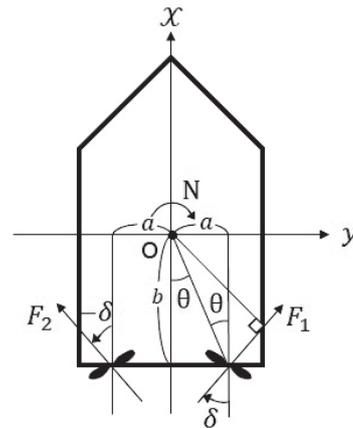


図6 二軸制御船

3.2 二軸制御船の船外機角別旋回シミュレーション

船外機角の違いによる旋回性能を調べるため、シミュレーションを行った。左右の船外機による推力の x, y 方向の成分 (F_x, F_y)、及び力のモーメント N の大きさは、式 (1) で表される。そのほか、付加質量 M_x, M_y 、付加慣性モーメント J_z によって生じる項 [18]、及び船の速度によって決まる抵抗力 R_x, R_y を加える必要がある。さらに、図6の座標系は、船体に固定した系であるため、船体の回転運動のために生じる項を付け加える必要がある [19]。以上を元に、シミュレーションは、式 (2) の運動方程式に基づいて行った。

今回はシミュレーション結果の正確さよりも、船外機角の変化による旋回性能の変化を観察することを優先した。そのため、運動方程式は必要最低限に単純化し、出来るだけ少ない項のみを含めるようにした。質量、重心、及び

慣性モーメント等は、船の装備その他の条件によって大きく変化するため、正確に求めることはせず、単純化のために船体を直方体で近似した。船体に働く流体力についても、必要以上に精密化することは避け、 V_x, V_y, ω に対する抵抗力のみを用いた。

$$\begin{aligned} (M+M_x)\frac{dv_x}{dt}+(M+M_y)v_y\omega &= (F_1+F_2)\cos\delta+R_x(v_x) \quad (2) \\ (M+M_y)\frac{dv_y}{dt}-(M+M_x)v_x\omega &= (F_1-F_2)\sin\delta+R_y(v_y) \\ (I_z+J_z)\frac{d\omega}{dt} &= -(F_1-F_2)\sqrt{a^2+b^2}\sin(\theta+\delta)R_\omega(\omega) \end{aligned}$$

式(2)で用いている記号の意味は、式(1)に加えて次の通りである。

- M : 質量
- I_z : 重心に関する z 軸回りの慣性モーメント
- v_x, v_y : x, y 方向の速度
- ω : z 軸周りの角速度
- M_x, M_y : x, y 方向の付加質量
- J_z : 付加慣性モーメント
- R_x, R_y : x, y 方向の速度によって決まる抵抗力
- R_ω : 角速度によって決まる抵抗力

M は 100[kg] とした。

$a = 0.3$ [m], $b = 1.0$ [m] とし、これらを元に

$\theta = \arctan(0.3/1.0)$ ラジアン

とした。また、

$$(M+M_y)v_y\omega - (M+M_x)v_x\omega$$

は、船体に固定した座標系を用いたため、生じた項である [19]。

船体に固定した系から静止系への座標変換は、次の微分方程式に基づいて行った。 X_0, Y_0 はそれぞれ静止系での座標である。

$$\begin{aligned} \frac{dX_0}{dt} &= v_x \cos(\Omega) - v_y \sin(\Omega) \quad (3) \\ \frac{dY_0}{dt} &= v_x \sin(\Omega) + v_y \cos(\Omega) \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \omega \end{aligned}$$

各パラメータの値を決めるために、船体を密度が一般的な直方体で近似し、大きさは 2.50[m]×1.17[m]×0.40[m] とした。また、喫水は 0.2[m] とした。この近似では、船体の重心はちょうど直方体の中心にある。また、

$$I_z = \frac{2.50^2 + 1.20^2}{12} \times M$$

となる。 M_x, M_y については文献 [20] の図 5 などを参考に

$$\begin{aligned} M_x &= 0.2M \\ M_y &= 1.0M \end{aligned}$$

とした。また、 J_z については、文献 [21] の図 12 を参考に

$$J_z = 1.0I_z$$

とした。抵抗力 $R_x(v_x)$ は、次のように定めた。まず、抵抗力の大きさは v_x^2 に比例し、方向は v_x と逆向きであるとした。式で表すと次のようになる。

$$R_x(v_x) = -D_x v_x |v_x|$$

比例定数 D_x は、次の式を用いて決定した。

$0.5 \times (\text{水の密度}) \times (\text{x 方向の船の水中部分の投影面積})$
水の密度は 1.0×10^3 [kg/m³] とし計算し、

$$D_x = 0.5 \times 1.0 \times 10^3 \times 0.2 \times 1.17$$

とした。 $R_y(v_y)$ も同様にして

$$R_y(v_y) = -0.5 \times 1.0 \times 10^3 \times 0.2 \times 2.50 \times v_y |v_y|$$

とした。

$R_\omega(\omega)$ は、次のようにして定めた (図 7)。船体が z 軸の周りに角速度 ω で回転しているとき、船体を横から見て、重心から前方に r [m] だけ離れた幅 dr [m] の船体の細片の瞬間速度は $r\omega$ [m/s] である。この細片が受ける抵抗力を、 $R_x(v_x)$ と同じように考えて、

$$-0.5 \times 1.0 \times 10^3 \times (0.2 \times dr) \times r\omega |r\omega|$$

とする。重心から後方に r [m] だけ離れた幅 dr [m] の細片が同じ大きさの逆向きの抵抗を受けることを考慮し、 $R_\omega(\omega)$ の $r|r\omega|$ にかかる係数を次の式で求めた。

$$\begin{aligned} 2 \times 0.5 \times 1.0 \times 10^3 \times 0.2 \times \int_0^{2.50/2} r^2 dr \quad (4) \\ = \frac{2.0 \times 10^2}{3} \left(\frac{2.50}{2} \right)^3 \end{aligned}$$

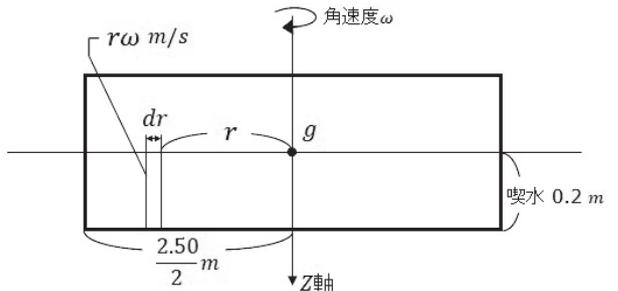


図 7 $R_\omega(\omega)$

微分方程式 (1)(2) の数値積分は、古典的ルンゲ=クッタ法 (RK4) を用いて行った。また、速度・角速度・静止系での位置の初期値はすべて 0.0 とした。

スクリュー F1, F2 について、今回のシミュレーションでは、出力 0.0 または最大出力のどちらかの値のみをとるものとした。スクリュー F1, F2 とともに最大出力の大きさは等しいとし、その値は、船外機角が 0.0 度のときに、両方のスクリューを最大出力にして直進したときに約 7[km/s] の速力が出るように定めた。

最大出力を変えて、何回かシミュレーションを行ったところ、 $F1 = F2 = 2.30 \times 10^2$ で図 8 の結果が得られた。以後、F1, F2 の最大出力にはこの値を用いる。また、最大出力の状態を ON、出力 0.0 の状態を OFF と呼ぶ。

また、図 8 によれば、船外機角が 0.0 度の時に直進速度が最大であった。また、船外機角が大きくなるほど、直進速度が小さくなっている。これは、船外機角が 0.0 度でなければ、スクリューの推力の一部が船の横方向に向かう成分となり、各スクリューのから発生する横方向の成分が打ち消しあってエネルギーの損失となるためである。

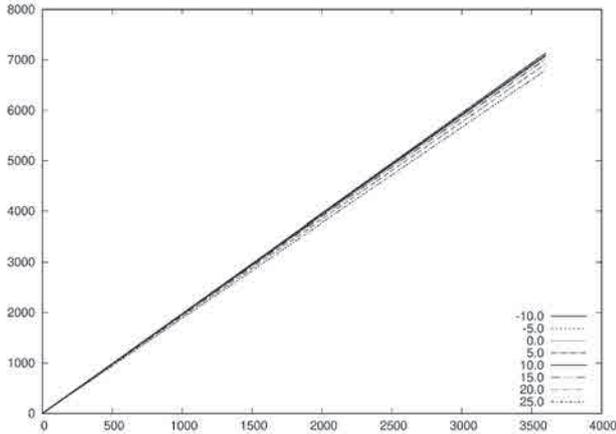


図 8 船外機角に対する 1 時間あたりの移動距離

横軸：時間 [s]

縦軸：船の位置（静止系での X_0 座標）、単位は [m]

凡例の数字は船外機角。F1, F2 をともに最大出力にして 3600 秒間直進した。

図 9 は、船外機角を変えて、F1 を OFF し F2 のみ ON として 10 秒間走行させた結果である。（この図の横軸に対する縦軸の向きは、船体に固定した座標系の x 軸と y 軸の関係とは逆になっている。そのため、この図では、本来のシミュレーション結果を横軸を対称軸として折り返したものとなっている。これ以降のシミュレーション結果の図でも同様である。）

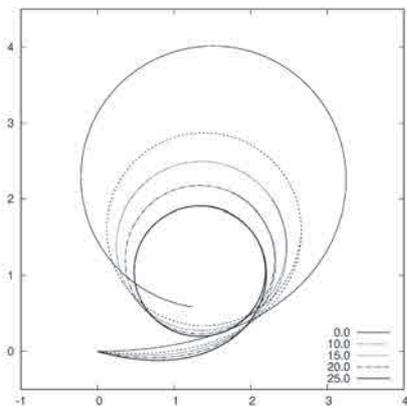


図 9 船外機角に対する旋回軌跡図

横軸：静止系での位置 (X_0)、単位は [m]

縦軸：静止系での位置 (Y_0)、単位は [m]

凡例の数字は船外機角。

旋回半径は、船外機角 0.0 度のときに最大で、船外機角が大きくなるとともに旋回半径が小さくなっている。

また、船外機角が 0.0 よりも大きいとき、スタート直後、しばらくは船体が本来向かうはずの方向とは逆の方向に進んでいる。これは、船外機角が 0.0 度ではない時には、スクリーンの推力から船の横方向に向かう成分が発生するためである。舵の操作で進路を変える船のキックとは異なる現象である。

今回用いたパラメタでは、船外機角が $-\arctan(0.3/1.0)$ ラジアン（約 -16.7 度）の時にはスクリー出力の作用線上に船の重心が乗る。そのため、力のモーメントが 0 となり、船は旋回せずに推力 F2 の方向に直進することが予想される。図 10 は、船外機角 $-\arctan(0.3/1.0)$ ラジアンの前後の軌道をプロットしたものである。F2 のみ ON とし、30 秒間走行させた。

予想通り、船外機角が約 $-\arctan(0.3/1.0)$ ラジアンのときに、船は旋回せず直進している。船外機角が $-\arctan(0.3/1.0)$ ラジアンよりも大きいときと、小さいときとでは、船の旋回方向が逆になっている。これは、船外機角 $-\arctan(0.3/1.0)$ ラジアンの前後で、スクリー推力の作用線に対する船の重心の位置関係が変化し、スクリーによる力のモーメントが逆向きになるためである。

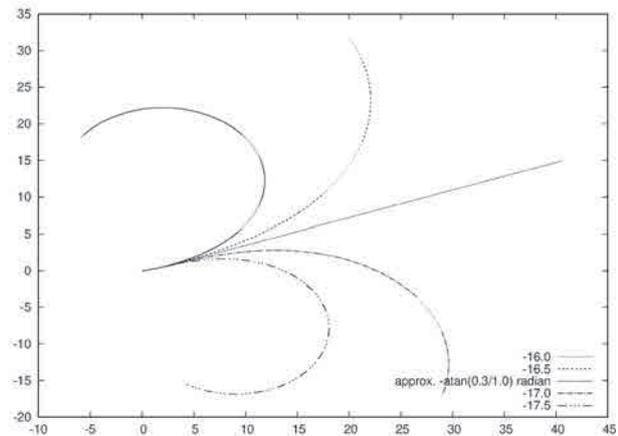


図 10 船外機角に対する旋回軌跡図 2

横軸：静止系での位置 (X_0)、単位は [m]

縦軸：静止系での位置 (Y_0)、単位は [m]

凡例の数字は船外機角。

図 11 は、F1, F2 とともに ON とするが、 $F1 = -F2$ 、つまり左右のスクリーを逆回転させて行ったシミュレーション結果である。いわば、2 軸制御船の超信地旋回である。走行時間は 20 秒とした。船外機角 0.0 度時にはその場での回転となり、軌跡は一点のみとなるので、この図には入っていない。船外機角が 0.0 度以外の時は、戦車などの超信地旋回とは異なり、一点での旋回とはならなかった。さらに、図 9 の結果とは異なり、船外機角が正の時に、船外機角が大きいほど、旋回半径が大きくなっている。

これは次のような理由によると考えられる。両方のスクリーの向きを同じにした場合には、横方向の力の成分は互いに打ち消しあう。ところが、スクリーを逆回転させた場合には、横方向の成分は足し合わされて増幅される。そのため横方向への移動が生じる。船外機角が正の時には、角度が大きいほど横方向の力の成分も大きくなるので、旋回半径も大きくなる。船外機角が負の場合には、逆に、船外機角が小さいほど横方向の力が大きくなり、旋回半径も大きくなる。

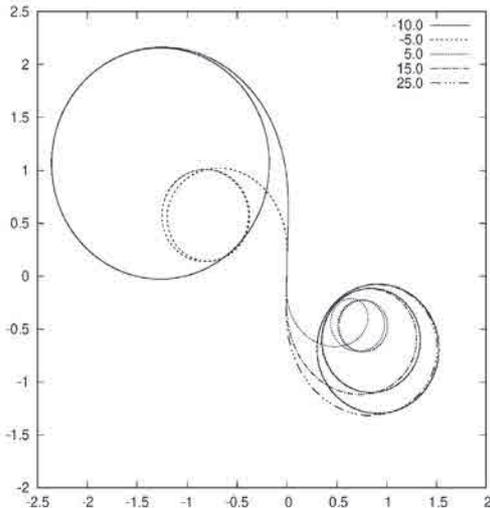


図 11 船外機角に対する旋回軌跡図 3

横軸：静止系での位置 (X₀)、単位は [m]
 縦軸：静止系での位置 (Y₀)、単位は [m]
 凡例の数字は船外機角。

3.3 旋回の試験

シミュレーション結果に基づき、10[deg]、及び 20[deg] の 2 つの船外機角を設定して実証試験を行った。GPS が取得した緯度経度の記録から得られた軌跡を図 12 に、当日の気象条件を表 3 に示す。

試験を行った結果、20[deg] は、10[deg] よりも旋回半径が小さくなることが確認できた。

シミュレーションは大幅な単純化を用いて行ったが、シミュレーションで得られていた旋回半径は、実験で得られた旋回半径に近いものだった。実験で得られた軌跡は、シミュレーションで得られた結果のように整った形状ではないが、シミュレーションでは考慮しなかった潮流や風の影響と考えられる。

表 3 試験環境

天候	曇り
気温	28.1 [°C]
風速	3 ~ 4 [m/s]
水面状況	僅かに白波が立つ

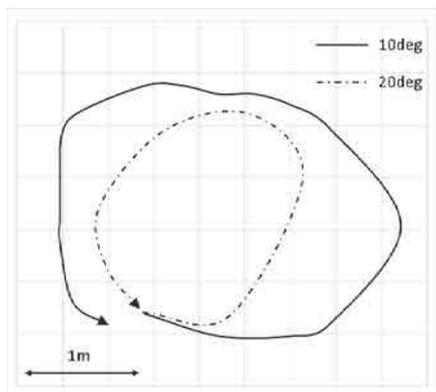


図 12 旋回軌跡図比較

4. 多軸制御

4.1 概要

一般に、平面上の運動の自由度は、並進運動 2、及び回転運動 1 の計 3 である。これまで述べてきた 2 軸制御では、自由度が 2 であるため、並進運動と回転運動を独立に制御することはできない。制御の自由度を増やして、並進運動と回転運動を独立に制御できるようにすれば、2 軸制御では上手く出来なかった超信地旋回も 3 軸以上なら実現可能である。そこで、制御軸を増やした場合の制御について検討する。

以下、座標系は、船体の重心を原点とし、船体に固定した系を用いる。z 軸の正の向きを紙面の手前側から裏側に向かう向きとする。したがって、回転の正の方向は紙面上では時計回りとなる。

4.2 三軸制御

制御軸を独立な三軸にすれば、推進装置の性能が許す限り、どのような平面運動でも可能となる。ただし、平面運動の自由度と制御の自由度が等しいので、冗長性はない。目標とする力と力のモーメントが決まれば、それらを実現するために必要な各スクリューの出力はただ一通りに決まってしまう。

ここでは、図 13 のように、正三角形の船体の各頂点にスクリューを備えた船について検討する。自由度 3 を実現するためには、必ずしもこのように、正三角形の頂点に来るようにスクリューを配置する必要はないが、以下の計算が簡単になるように、対称性の高い配置を用いることにする。

スクリューの軸の方向は、頂点と三角形の重心を結ぶ直線に垂直な方向に固定し、図のように時計回り方向を正とする。スクリューと三角形の重心との距離を r とおく。スクリューには図のように番号を割り振るものとする。また、スクリュー $k(0,1,2)$ の正の方向を向く単位ベクトルを E_k とする。成分で書くと、それぞれ

$$\vec{E}_0 = {}^t(-\sin 60^\circ, -\cos 60^\circ) = {}^t(-\sqrt{3}/2, -1/2) \quad (5)$$

$$\vec{E}_1 = {}^t(0, 1)$$

$$\vec{E}_2 = {}^t(\sin 60^\circ, -\cos 60^\circ) = {}^t(\sqrt{3}/2, -1/2)$$

である (*1)。正三角形の船体には奇異な印象があるが、それに近い形状の船はすでに実用化されている [22][23]。ここで、目標とする力 F 及び力のモーメント N を下式とする (*1)。

$$\vec{F} = {}^t(F_x, F_y) \quad (6)$$

$$\vec{N} = {}^t(0, 0, n) \quad (7)$$

各スクリューからの出力の合力とモーメントの和が、それぞれ \vec{F} 、及び \vec{N} に等しくなるように、各スクリューに割り振るべき出力を求める。前述のように、この割り当て方はただ一通りに決まる。

*1: E_k 、 F 等は、本来は三次元ベクトルであるが、平面的な運動のみを考えているので z 成分を無視し、二次元ベクトルのように扱っている。

各スクリーューからの出力の大きさを F_k とすれば ($F_k < 0$ はスクリーューの逆回転)、合力は

$$\vec{F} = F_0 \vec{E}_0 + F_1 \vec{E}_1 + F_2 \vec{E}_2 \quad (8)$$

モーメントの和に関しては

$$\vec{n} = r(F_0 + F_1 + F_2) \quad (9)$$

となる。

$$\vec{E}_1 = -(\vec{E}_0 + \vec{E}_2) \quad (10)$$

であることを用いて式 (6) を変形すれば

$$\vec{F} = (F_0 + F_1) \vec{E}_0 + (F_2 - F_1) \vec{E}_2 \quad (11)$$

$$\vec{E}_0 \cdot \vec{F} = (F_0 - F_1) \vec{E}_0 \cdot \vec{E}_0 + (F_2 - F_1) \vec{E}_0 \cdot \vec{E}_2 \quad (12)$$

$$= (F_0 - F_1) - (F_2 - F_1) / 2$$

$$= F_0 - F_1 / 2 - F_2 / 2$$

が得られる。同様にして

$$\vec{E}_2 \cdot \vec{F} = -F_0 / 2 - F_1 / 2 + F_2 \quad (13)$$

が得られる。一方、成分表示 (2)(3) を用いて計算すれば

$$\vec{E}_0 \cdot \vec{F} = \frac{-\sqrt{3}}{2} F_x - \frac{1}{2} F_y \quad (14)$$

$$E_2 \cdot F = \frac{\sqrt{3}}{2} F_x - \frac{1}{2} F_y$$

となる。式 (5) と (9) ~ (11) により、 F_k ($k=0,1,2$) は、次の連立方程式を満たす。

$$\begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} F_x - \frac{1}{2} F_y \\ \frac{\sqrt{3}}{2} F_x - \frac{1}{2} F_y \end{pmatrix} \quad (15)$$

この連立方程式を解くと、

$$\begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} n/r \\ n/r \\ n/r \end{pmatrix} + \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -\sqrt{3} F_x - F_y \\ 2 F_y \\ \sqrt{3} F_x - F_y \end{pmatrix} \quad (16)$$

となり、各スクリーューに割り当てるべき出力が求められる。

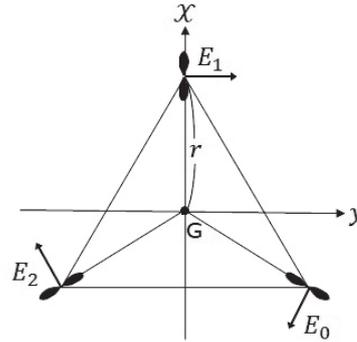
なお、モーメントのない並進力のみを得たい場合は、式 (9) で $n=0$ とする必要がある。式 (12) の最初の 2 式を満たすように適当に F_k ($k=0,1,2$) を定めるのみでは、モーメントも発生してしまう可能性がある。同様に、モーメントのみを得たい場合にも、式 (13) で $F_x = F_y = 0$ とする必要がある。式の数からわかるように、各スクリーューに割り当てるべき出力のうち、 F に対応する成分

$$\frac{1}{3} \begin{pmatrix} -\sqrt{3} F_x - F_y \\ 2 F_y \\ \sqrt{3} F_x - F_y \end{pmatrix} \quad (17)$$

及び N に対応する成分

$$\frac{1}{3} \begin{pmatrix} n/r \\ n/r \\ n/r \end{pmatrix} \quad (18)$$

を別々に求めてから合成することは可能である。



4.3 四軸制御

3 軸制御では、船体の加工や、スクリーューへの出力割り当ての計算などが複雑になることが考えられる。また、目標出力と、各スクリーューに割り当てる出力が、一対一に対応していて冗長性が無い。そこで、もう一つ制御軸を増やした 4 軸制御についても検討する。四軸制御船の自動制御は文献 [24][25] で詳しく調べられているが、ここでは、それらの文献では詳しく述べられてはいない、各スクリーューの出力と合成出力との関係について検討した。ここでも、3 軸のときと同じく、対称性を高くして計算を単純にするため、船体を正方形とし、正方形の各頂点にスクリーューを配置する。図 14 のように、正方形の頂点と正方形の重心との距離を r とする。各スクリーューは、重心と頂点を結ぶ直線に垂直な方向を向いているとし、時計回りを正の方向とする。スクリーューにはそれぞれ図のように番号を割り当て、各スクリーューの正の向きを単位ベクトルをそれぞれ E_k ($k=0 \sim 3$) とおく。

2 軸のときと同じく、目標とする力とモーメントを

$$\vec{F} = {}^t(F_x, F_y) \quad (19)$$

$$\vec{N} = {}^t(0, 0, n)$$

とする。4 軸の場合、この目標出力を達成できるような各スクリーューへの出力割り当ては無数にあり得る。

まず、

$$\vec{F} = {}^t(F_x, F_y) \quad (20)$$

$$\vec{N} = {}^t(0, 0, 0)$$

となるような出力割り当てをどれか一組求める。それを F_{1k} ($k=0 \sim 3$) とすると、

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -F_x \\ F_y \\ F_x \\ -F_y \end{pmatrix} \quad (21)$$

が与えられた条件をみたく。

次に、

$$\vec{F} = {}^t(0, 0) \quad (22)$$

$$\vec{N} = {}^t(0, 0, n)$$

となるような出力の割り当てを一組求める。それを Fr_k ($k=0 \sim 3$) とすると、

$$\vec{F}_l = \begin{pmatrix} Fr_0 \\ Fr_1 \\ Fr_2 \\ Fr_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} n/r \\ n/r \\ n/r \\ n/r \end{pmatrix} \quad (23)$$

が条件を満たしている。
ここで、 \vec{F}_l と \vec{F}_r の合成

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_l + \vec{F}_r \quad (24)$$

が、目標とする出力を与えるような、各スクリューへの出力割り当ての一つである。

次に、同じ目標出力を与えるような、各スクリューへの別の出力割り当てを求める。 F_e を任意の実数とし、

$$\vec{F}_e = \begin{pmatrix} F_e \\ -F_e \\ F_e \\ -F_e \end{pmatrix} \quad (25)$$

とおく(各成分の符号に注意)。上で求めた (F_0) を用いて、

$$\vec{F} = \vec{F}_0 + \vec{F}_e \quad (26)$$

が \vec{F}_0 と同じ出力を与える。四軸の場合には、冗長な自由度が 1 なので、 F_e が全ての実数を動くとき、 F_{0k} と同じ出力を与える全ての出力割り当てが得られる。

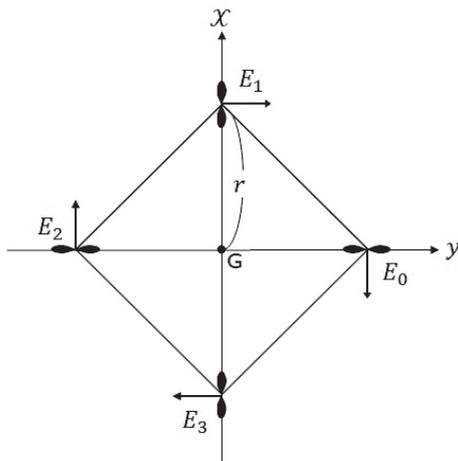


図 14 四軸制御船

3. おわりに

本稿では、低価格かつ汎用的に使用できる船舶ロボットを実現するため、舵を持たない 2 軸 0 操舵船の制御シミュレーション及び実証試験を行った。この結果、スクリューを船体中央に向ける角度(船外機角)として、20[deg]を採用するに至った。また、推進器を 3 軸及び 4 軸へ発展させた運動制御について検討した。

今後は、強風や波浪などを考慮した制御の研究を進め、船舶ロボットによる水上作業の実現を目指していく。

参考文献

- [1] 総務省統計局：第 67 回日本統計年鑑；(2018)
- [2] 農林水産省：海洋生物資源の保存及び管理に関する基本計画；(2019).
- [3] 水産庁：平成 30 年度 我が国周辺水域の水産資源評価の公表について；(2018).
- [4] 水産庁：平成 30 年度水産白書；pp.105,(2019).
- [5] 国土交通省：海事レポート 2017；pp.181,(2017).
- [6] 海上保安庁：平成 30 年海難の現状と対策 ;pp.43,(2019).
- [7] 農林水産省：漁業就業動向調査 / 確報 平成 29 年漁業就業動向調査報告書；(2018).
- [8] 日本海難防止協会：漁船の操業安全と海難防止；pp.15,(2016).
- [9] 農林水産省：平成 29 年漁業就業動向調査；(2018).
- [10] ニッセイ基礎研究所：日本の漁業 成長への道筋 -70 年ぶりの漁業法大改正を受けて；(2019).
- [11] ネオネットマリン：「アンカーの種類」；<https://www.neonet-marine.com/oyakudati/keisen.html>
- [12] MINN KOTA：「SPOT-LOCK」；<http://www.okada-corp.com/products/?p=6226>
- [13] トヨタマリン：「トヨタ自動車、「PONAM-35」に操船支援システム「トヨタバーチャルアンカーシステム」を搭載」；http://www2.toyota.co.jp/jp/news/13/03/nt13_0305.pdf
- [14] 日本船用機関整備協会：3 級船用機関整備士指導書(平成 13 年度)；(2001).
- [15] 芳村康男, et.al: 左右同一回転数で航行する 2 軸 2 舵船の操縦運動の簡易推定；(2016).
- [16] 国土交通省：小型船舶操縦免許の制度；https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_mn10_000006.html
- [17] アクアワールドダイイチ：船外機の正しい取り付け位置調整；http://www.aquaworld-d1.com/index/outboardmotor/setting_manual/a.html
- [18] 安川宏紀, 芳村康男：船体運動 操縦性能編；成山堂書店，pp.10-13,(2012).
- [19] 安川宏紀, 芳村康男：船体運動 操縦性能編；成山堂書店，pp.4-6,(2012).
- [20] 鳥野慶一, et.al: 箱型浮体構造物の付加質量チャート；関西造船協会誌, 第 229 号, pp.79-85,(1998).
- [21] 元良誠三：船体運動に対する付加質量及び付加慣性モーメントについて—其の 1. 旋回に対する付加慣性モーメント—；造船協会論文集, 1959 巻, 105 号, pp.83-92,(1959).
- [22] 船舶・海洋事業本部長崎船海技術部：第五世代ラムフォーム(Ramform) 型物理探査船 “Titan Class” の建造；三菱重工技報, Vol.50, No.2, pp.24-26,(2013).
- [23] 中大士：3 次元物理探査船 “RAMFORM TITAN”；日本船舶海洋工学会誌, 第 52 号, pp. 32-34,(2014).
- [24] W. Wang, et al: “Design, Modeling, and nonlinear model predictive tracking control of a novel autonomous surface vehicle”；IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.1-5,(2018).
- [25] D. Nad, et al: Navigation, guidance and control of an overactuated marine surface vehicle; Annual Reviews in Control, vol.40, pp.172-181,(2015).

生物を対象とした電気刺激の 生成アルゴリズムに関する研究

古澤 洋将 *1

Efforts towards Research of Arbitrary Waveform Generator for Electric Fish-Cluster Control

Yosuke Furusawa*1

Abstract - Focusing on bio-electro signals, we effort towards research of Arbitrary Waveform Generator for electric Fish-Cluster Control. We developed matrix input or output by frequency modulator gain based on Frequency Modulation Synthesis (FM-Synthesis).

Keywords: FM-Synthesis, fish-cluster control

購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。



購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。



購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。



購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。

.....
Feature

3

.....

水中生物群の 誘導アルゴリズムに関する研究

古澤 洋将 *1

Efforts towards Research of wide area navigation by Electric Fish-Cluster Control

Yosuke Furusawa*1

Abstract - Focusing on bio-electro signals, we effort towards research of wide area navigation technology and system that guides of targeting area.

Keywords: navigation, fish-cluster control

購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。



購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。



購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。



購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。



購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。



購入者限定

本ページはご購入後の本誌にてお楽しみください。

執筆者紹介

古澤洋将（ふるさわ ようすけ）

岩手県滝沢村出身、1982年生。大型・大特・牽引自動車運転免許、1級小型船舶操縦士、危険物乙種全種取扱者、第四級アマチュア無線技士などの資格を保有。筑波大学大学院システム情報工学研究科を修了し、CYBERDYNE 株式会社に入社。ロボットスーツHAL福祉用及び医療用の電装系設計に従事。各種認証取得、製品上市を経験する。東日本大震災を機に退職・帰郷し、炎重工株式会社を設立。

松岡知洋（まつおか ともひろ）

静岡県静岡市出身。弘前大学理学部数学科及び東北大学大学院情報科学研究科前期課程を修了、後期課程中退。大学では実解析学、大学院ではパレート分布（フラクタル分布）の統計解析の研究に従事。その後、組込系及び3DCGのプログラマ、数理生物学の研究等に従事。2018年、炎重工株式会社に入社。

阿部翔太（あべ しょうた）

岩手県滝沢村出身、1983年生。3DCG学科を卒業し、アロシステム株式会社（現ユニットコム株式会社）に入社。店長職として個人・法人が扱う機器の修理及び販売に従事。2016年、炎重工株式会社に入社。



会社概要

会社名：炎重工株式会社 (Homura Heavy Industries Corporation.)

代表取締役：古澤 洋将 (Yosuke FURUSAWA)

本社所在地：〒020-0633 岩手県滝沢市穴口 408-10

T E L：019-618-3408

F A X：019-618-3408

M a i l：info@hmrc.co.jp

W e b：https://www.hmrc.co.jp/

資本金：4,900万円 (資本準備金を含む)

取引銀行：三菱 UFJ 銀行 本店
岩手銀行 滝沢支店
盛岡信用金庫 本店

設立：2016年2月25日

事業内容：(1) 製品の企画・開発・生産・販売・保守・賃貸・受託・
輸出入・コンサルティング業
(2) 労働者派遣事業法に基づく一般労働者派遣事業、
特定労働者派遣事業
(3) 書籍、記事等の執筆・出版・印刷業
(4) 上記に付帯し、または関連する一切の業務

沿革

2013年01月 屋外ロボットの開発開始
2016年02月 炎重工株式会社を設立
2017年01月 生体群制御付き水槽 アクトリウムを発売
2017年03月 資本金を3,400万円に増資 (資本準備金を含む)
2017年07月 炎重工技報を創刊
2017年10月 船舶ロボットを公開
2018年07月 滝沢研究所を開設
2018年11月 総務省 平成30年度ICTイノベーション創出
チャレンジプログラム (I-Challenge!) に採択
2019年02月 資本金を4,900万円に増資 (資本準備金を含む)
2019年06月 経済産業省 J-Startup に認定

表紙について

表紙の数式は、1920年にイギリス人の天体物理学者サー・アーサー・スタンレー・エディントンが、太陽などの恒星は陽子-陽子連鎖反応(Proton-proton chain reaction)を行ってエネルギーを生成していることを発表したものです。恒星の内部では、このような水素の核融合反応が連鎖的に発生しており、光り輝いた星として宇宙に存在しています。

この反応を単純化すると陽子4個からヘリウム4原子核1個を作る反応となり、ヘリウム4の質量は陽子4個よりも0.7%程度小さく、減少した質量分がニュートリノと γ 線となって放出されています。このうち γ 線が陽子や電子などの物質と作用して熱エネルギーや光エネルギーへ変換され、地球へと届いています。

最初の核融合反応で消費される水素が減少してくると、さらに原子量の大きな元素へと反応は進みますが、その過程で生成される炭素が生命体の体を形作り、私たちは炭素を利用してエネルギー代謝を行っています。私たちを構成している炭素は、太陽系が発生する前の恒星が核融合反応で生成したものと考えられ、人類と核融合は切っても切れない縁で結ばれていると言えるでしょう。

地球に私たちが存在し、日々享受している全てのエネルギーは地球が形成されてから現在に至るまで太陽が核融合によって生成したエネルギーがもとになっています。人類が制御できるエネルギーは太陽エネルギーと比較するとまだごく僅かなものですが、弛まぬ研究によって将来は太陽エネルギーを超える制御技術を手にすることができるでしょう。

本号では、私たち人類の営みを支えている太陽と、太陽が得ているエネルギー反応である核融合反応を表現しつつ、表紙のデザインといたしました。

炎重工技報

Homura Heavy Industries
Technical Review

Vol.3

2019

2019年09月17日 初版第1刷発行

発行人：古澤洋将

発行所：炎重工株式会社

〒020-0633 岩手県滝沢市穴口408-10

TEL:019-618-3408

FAX:019-618-3408

Mail:info@hmrc.co.jp

https://www.hmrc.co.jp/

デザイン：後藤瑞季（株式会社ホップス）

印刷・製本：川嶋印刷株式会社

- ◆定価は表紙に表示してあります。
- ◆乱丁本・落丁本はお取り替えいたします。



定価： **4,860円** (税込)

炎重工株式会社
Homura Heavy Industries Corporation.
<https://www.hmrc.co.jp/>