

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02376

研究課題名(和文) 航続距離を飛躍的に向上させるセーリング型四胴ロボット船の自動操船の研究

研究課題名(英文) Research on automatic maneuverability of quadmaran vessel for faster and efficient sailing to improve cruising distance

研究代表者

二瓶 泰範 (Nihei, Yasunori)

大阪公立大学・大学院工学研究科 准教授

研究者番号：00470055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,900,000円

研究成果の概要(和文)：全長2.5m程の小型の自動航行船に搭載するセールを提案し、セールを搭載した自動航行船のVPP(速度予測プログラム)を開発した。実機セールの大きさを決定し、実機スケールのセール及び上部デッキの製作を行い、可動機構を開発した。提案した翼形はフラップを可動させることで推進力となる揚力を増大させることがわかった。VPPにより、本セールを搭載したトリマランヨットの想定風速3.5m/s中における最大船速が0.88m/sであった。風上方向へ最速となるのは49.1deg方向へ航行する場合の0.43m/sであり、風下方向へ最速となるのは178deg方向へ航行する場合の0.81m/sであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水産養殖場の現場において自動で面的に水質を計測する小型の船が求められている。海面養殖場は広く、数km×数kmオーダーの場合もある。小型船が風エネルギーを有効利用することにより長距離移動が可能になる。帆走化の技術によりこれまでどこにもなかった養殖場で用いる環境に優しい次世代船の展開が出来るのではないかと考えた。水産資源は減少の一途をたどっており養殖漁業に大きな期待が寄せられる。環境に優しい水産業の支えとしてセーリング型ロボット船を自動水質調査船として普及させ、海面養殖漁業に貢献することが可能となる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a sail suitable for sailing aiming at the extension of the operation time of the quad-maran vessel. As a sail, this study proposed a telescopic sail based on the two-element wingsail, in which two symmetrical wings are arranged in a row. Through a wind load test, while it was clarified that increasing the flap angle increases the lift force, which is the propulsion force of the trimaran yacht, but does not increase the lateral force, and yaw moment that hinder sailing. In addition, by installing a sail with a wing area of 2m² on the trimaran, VPP indicated that the maximum ship speed is 0.88m/s under the assumed wind speed of 3.5m/s, and the maximum upwind speed component becomes 0.43m/s when sailing in the direction of 49.1degrees. The GM of the yacht was 1.79m. A simple test on water using the manufactured trimaran yacht confirmed that it could navigate in a tailwind at about 0.3m/s and in a direction of 90 degrees against the wind.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船舶海洋流体力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

養殖場が近年非常に大きな課題を抱えている。一つは、地球温暖化に伴う水温の上昇である。もう一つは、ゲリラ豪雨時の河川等からの真水の大量出水である。さらに一つは、夏場の貧酸素水塊の発生である。安定的な水産資源を提供可能であることから、今後発展を遂げるとわれていた養殖業は厳しい現実を突きつけられている。例えば、能登ガキとして有名な石川県七尾湾の養殖場ではカキの生育不良や斃死が報告される。

我々は既に養殖場の情報化という点に目を向け、これを可能とする全く新しい革新的ツール、四胴ロボット船を研究開発してきた。現在のモデルの全長は2.5m、最大船速1.5m/s、積載可能質量は80kgである。非常に珍しい船であり、以下に代表されるいくつかの優れた利点を有する。

- ・プロペラは各胴に取り付けられており、各胴は独立して回頭できる。これにより自由自在な操船が可能となる。
- ・X型配置とすることが出来、各胴にそれぞれ取り付けられたプロペラの推力配分を変えることで定点を保持することが出来る。また、風に流された際、これに対して船体が減衰効果を発揮し、ブレーキとして作用し、定点保持する事が容易になる。

四胴ロボット船は、従来船舶とは全く異なる自動船であり、既に養殖場において無数の水質計測点で自動航行、自動計測を行うことに成功してきた。現在、この四胴ロボット船は、様々な養殖場間の移動や、定置網におけるモニタリング、養殖場の自動給餌機への自動補給船としての活用が検討されている。このような場合、現行のリチウムイオン電池による電力推進システムだけでの運用には限界が生じる。

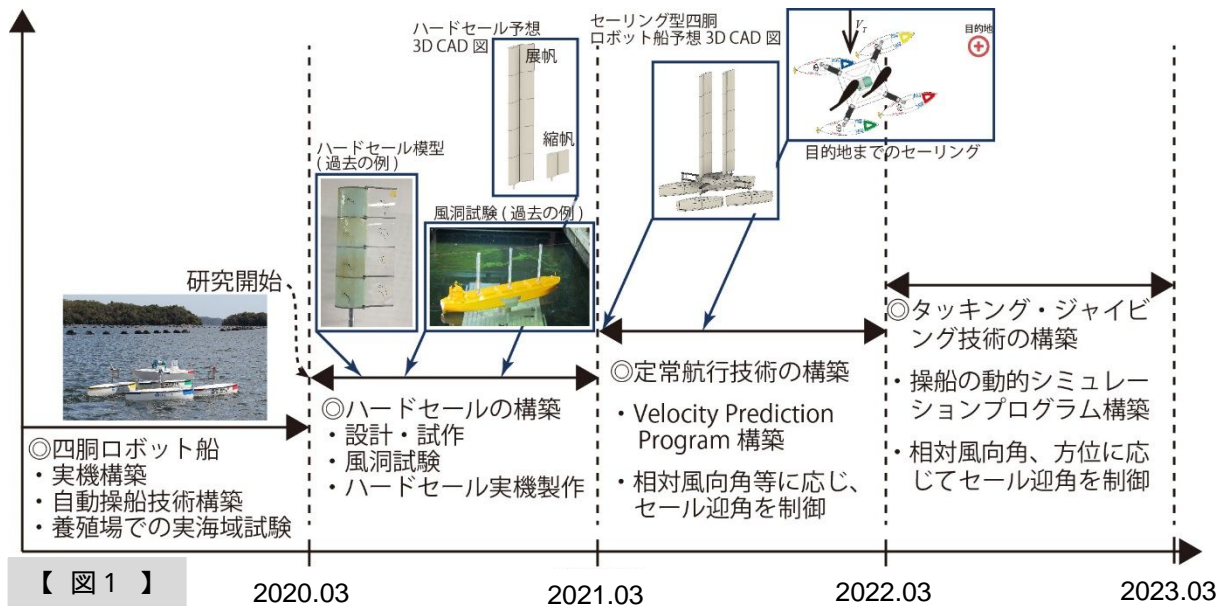
そこで、近年、Green vessel 技術として着目されるセーリング(帆走)技術の適用により、四胴ロボット船の航続距離を飛躍的にのばすことが出来るのではないかと考えた。特に、近年少しずつ利用が検討されつつあるハードセール(硬帆)の利用であれば、最も自動化において難しいと考えられるリーフ(縮帆)も容易となり自動船への適用が比較的容易ではないだろうか。しかし、その様なセールを具体的に設計し、この四胴ロボット船に搭載することは可能であろうか。また、それを自動制御し、様々な風向に対してセーリングすることは可能であろうか。これらのことについて、本申請研究では明らかにしていきたい。

2. 研究の目的

四胴ロボット船が従来の船舶とは全く異なる、自由自在な操船が可能である為、養殖場において自動航行し自動水質計測が行われている。今後も、漁業者の労働軽減や労働人口の減少の背景を受けて、養殖場といった場所で自動化、情報化、機械化のためにこのような自動航行船は普及されていくことが期待される。しかし、このような自動航行船は洋上において長時間の運用に及ぶことが想定される。よって、長距離の移動に関しては風のエネルギーを用いて出来る限り蓄電池に頼らない方法が求められる。以上のことから、本申請研究の目的を以下のように定める。

- ・四胴ロボット船に搭載可能なハードセールの機械的機構・要目を明らかにする。
- ・開発するハードセールの流体力学的性能を明らかにする。
- ・セーリング型四胴ロボット船のセーリング性能を明らかにする。
- ・セーリング型四胴ロボット船の自動操船技術を構築する。

3. 研究の方法



(a) ハードセール(硬帆)の構築

自動セーリングの一番の鍵がアクチュエータで稼働可能なハードセールの構築である。ヨットは一般的にソフトセール(軟帆)が使用される。しかし、自動セーリングとなるとソフトセールはセールや制御のためのシート(ロープ)の絡まり等が考えられる。よって本研究は、ハードセールを導入する。強風時にはセールを小さくする必要があり、微風時に大きな推進力を得るため、翼にはキャンバーが必要となる。ハードセールは()セール迎角可変、()キャンバー可変、()展帆、縮帆(リーフ)機構を備える仕様とする。

図 1 は研究計画である。初年度、実機の四胴ロボット船に搭載可能なハードセール技術を構築する。必要推進力を得るセール形状はフラップのある高揚力型が良いと考えられる。四胴船故に大きな GM があり、ヒール(横傾斜)に対する復原力も十分得られる試算を得ている。初年度は実機的设计を行い、多数セールが生み出す流体力干渉も考慮した流体力を明らかにするため 1/3 程度の相似模型による風洞試験を行う。また、上記()~()の仕様のセール実機を製作する。

(b)セーリング型四胴ロボット船の自動航行技術の構築

セーリングは主に 2 つの航行モードから成り立つ。 相対風向、相対風速に応じてセール迎角を変える準静的セーリング、 タッキング(上手回し)、 ジャイピング(下手回し)といった動的セーリングである。最初に の自動セーリング技術を構築する。決めた目的地に向かってセールの向き、従来船の舵に相当する四胴ロボット船の船体向きを制御してクローズホールド(風上に向かって)、 アビーム(風向に対して直角に)、 ランニング(風下方向に向かって)へ定常航行する技術である。

(c)セーリング型四胴ロボット船のタッキング、ジャイピング技術の構築

セーリングヨットは に加え、タッキングおよびジャイピングをすることによりあらゆる目的地へと向かうことができる。本研究ではタッキングおよびジャイピングについても制御構築を目指す。

4 . 研究成果

4 . 1 ヨットの基本設計

4 . 1 . 1 船体配置

ヨットはセールが受ける揚力で航行するという特徴から船首方向と推進力一致しないため斜航する。ゆえに四胴型船の帆走化は船体抵抗が大きくなり適していないと考えた。しかしながら、二胴や一胴にすると水質計測の際に定点保持ができるという四胴型自動航行船が持つ利点

を損ねてしまう。そこで本研究では三胴型とし、船体抵抗の低減と定点保持性能の保持の両立を試みた。船体及びその回頭装置は従来の四胴型自動航行船のものを使用した。

4.1.2 セールの要求条件とその概形

本研究では図2に示す対称翼を2枚並べた two-element wingsail を参考にした伸縮可能なセールを提案する。two-element wingsail は高速で走るフォイルヨットに採用されているようなセールであり、大きな揚力が得られるセール形状である。概形寸法を表1示す。具体的なセールの大きさは、四胴型自動航行船の実証試験が行われている石川県七尾湾での夏季平均風速 3.5m/s の下で四胴型自動航行船と近い速度(1m/s)で航行できるようなサイズを次節で示す VPP により算出し決定する。

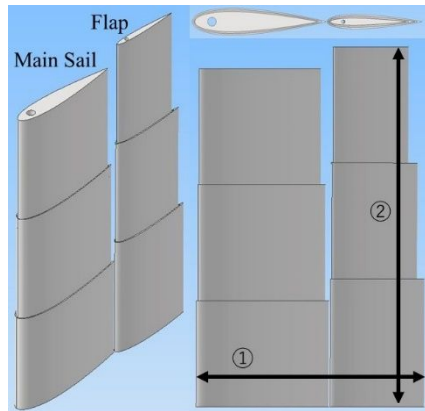


図2 Sail proposed in this study.

表1 Sail shape.

中段の Main Sail の形状	NACA0018
中段の Flap の形状	NACA0012
セールの縦横比	2 : 1
Main Sail と Flap の翼弦比	3 : 2
Main Sail とスロット幅の比	1 : 0.024

4.2 VPP

4.2.1 定常航行時の釣り合い方程式

ヨットが定常航行時に受けている力及び Yaw モーメントの関係から船体固定水平座標において定常航行時の釣り合い方程式は以下のように立式できる。

$$F_s + R_{t1} + R_{t23} + F_1 + F_2 = 0 \quad (1)$$

$$M_s + M_1 + M_2 + M_3 = 0 \quad (2)$$

ここで、 F_s 、 M_s はセールが受ける風荷重及びYaw モーメント、 R_{t1} 、 R_{t23} 、 M_1 、 M_2 、 M_3 は船体1、2、3が海水から受ける力及びモーメント、 F_1 は上部デッキが受ける風荷重、 F_2 は船体受ける風荷重である。この非線形方程式に任意の風向風速を代入し解くことで、ヨットのリーウェイ角 β 、船速 V 及び後方の二つの船体の舵角 δ を得ることができる。上部デッキが受ける風荷重 F_1 、船体受ける風荷重 F_2 は、既存実験で我々が得た四胴型自動航行船の風荷重の値を使用する。セール受ける風荷重 F_s 、Yaw モーメント M_s 、船体海水から受ける力 R_i 、船体海水から受けるYaw モーメント M_1 、 M_2 、 M_3 は未知であるので模型実験により求めた。

4.2.2 VPP

実験で得られた係数を式(1)、(2)に代入し、ヨットに流入する風の絶対風速 U_T 及び絶対風向 γ_T を適当に定めエクセルのソルバーを用いて解(V , β , δ)を計算した。この VPP を用いて想定風速 3.5m/s の下で 1.0m/s 程度の速度で航行でき、搭載した際に船が沈まない重量であるセールサイズを求めた結果、セール面積 $S=2.0m^2$ が最適であるとわかった。セール面積が $2.0m^2$ のトリマランヨットが、風速 2.0、3.5、5.5m/s の下での船速を図3に示す。想定風速である 3.5m/s での船速に着目すると、風上方向へ最速となるのは絶対風向に対して 49.1deg 方向へ航行するときで

あり、その速度は0.43m/sであった。また最大船速は絶対風向に対して114.7deg方向へ向かうときの0.88m/sであり、風下方向へ最速となるのは絶対風向に対して178deg方向へ向かうときの0.81m/sである。

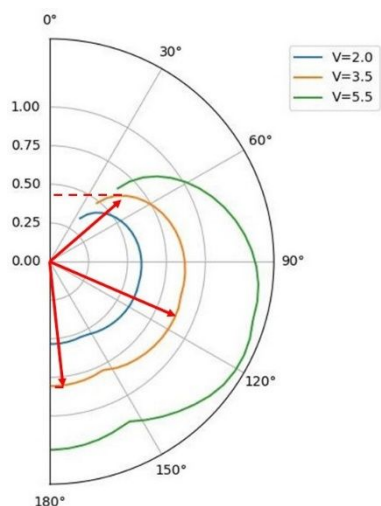


図3 Yacht velocity prediction program result.

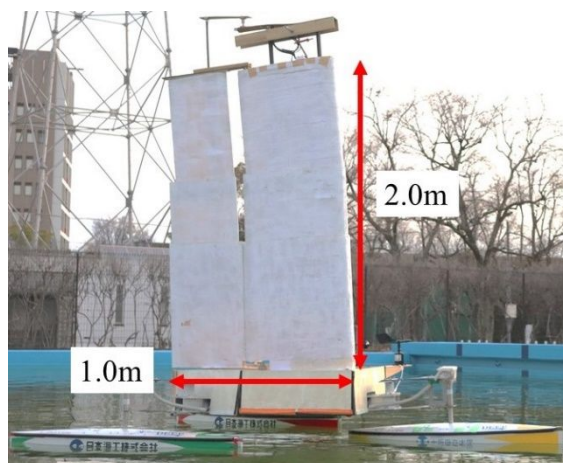


図4 Produced actual hard sale.

4.3 セールの設計と製作

VPPによってセールの大きさを高さ2.0m、翼弦長1mのセールを製作することが決まった。セール中段のメインセールとフラップの翼弦長の比は3:2であるので、それぞれの翼弦長は0.6mと0.4mとなる。これに合わせてテレスコープ式に伸縮できるように下段、上段の寸法を決めた。製作したセールを図4に示す。

4.4 検証実験

セールを固定し、後方の船体の舵角をコントローラーから操作して本研究で提案したセールで実際にセーリングできるかの検証を2ケース行った。1ケース目はセールを船体に対して90degで固定し、約-180deg方向から風を受けるものである。図5に航行開始から30sごとの軌跡を示す。約150sで50mを走りきったことから、本セールで0.3m/s程度の速度では航行できることがわかった。2ケース目はセールを船体に対して90deg方向から流入する風に対して迎角が20degになるよう固定し、90deg方向から風を受けるものである。図6に航行開始から30秒ごとの軌跡を示す。この結果から風が吹く方向だけでなく、任意の方向へ航行が可能であることが確認できた。



図5 Trimaran yacht in tailwind.



図6 Trimaran yacht in crosswind.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ji Mingyao, Srinivasamurthy Sharath, Nihei Yasunori	4. 巻 12
2. 論文標題 A Quasi-Static Motion Prediction Model of a Multi-Hull Navigation Vessel in Dynamic Positioning Mode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 8759 ~ 8759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12178759	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 中田聡史、神尾光一郎、増田憲和、二瓶泰範	4. 巻 78-2
2. 論文標題 先端的自動観測と粒子追跡モデルに基づいた養殖場における海水交換率の時間変動評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_745-I_750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kozono Rinto, Yutaro Tsurumi, Yasunori Nihei, and Ryosuke Saga	4. 巻 -
2. 論文標題 Information Management System for Small Automatic Navigation Robot Ships	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science, Springer	6. 最初と最後の頁 419428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-78361-7_32	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yutaro Tsurumi, Ryosuke Saga, Sharath Srinivasamurthy and Yasunori Nihei	4. 巻 -
2. 論文標題 An Improved Optimized Route Selection Method for a Maritime Navigation Vessel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science, Springer	6. 最初と最後の頁 468-481
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-78361-7_36	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中田聡史, 三品裕史, 神尾光一郎, 増田憲和, 二瓶泰範	4. 巻 77(2)
2. 論文標題 四胴型自動航行船を用いた火散布沼の養殖漁場における低塩分水モニタリング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_871-I_876
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 神尾光一郎, 鶴見悠太郎, 阪本啓志, 三品裕史, 増田憲和, 中田聡史, 二瓶泰範	4. 巻 77(2)
2. 論文標題 四胴型自動航行船を用いた浅海水域における水質観測システムの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_883-I_888
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 二瓶 泰範, 増田 憲和, 原 尚之	4. 巻 65
2. 論文標題 四胴型自動航行船の養殖場への展開	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 システム制御情報学会誌	6. 最初と最後の頁 13-20
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 二瓶 泰範, 鶴見 悠太郎, 増田 憲和, 原田 浩太郎, 奥野 充一, 原 尚之, 中田 聡史	4. 巻 76
2. 論文標題 四胴型自動航行船による高密度・高頻度な自動水質環境計測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1039 - I_1044
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 二瓶 泰範	4. 巻 7月
2. 論文標題 自動航行船「ロボセン」を利用した養殖場における水質計測の自動化・情報化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 月間養殖ビジネス	6. 最初と最後の頁 26-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryosuke Saga, Zhipeng Liang, Naoyuki Hara, Yasunori Nihei	4. 巻 506
2. 論文標題 Optimal Route Search Based on Multi-objective Genetic Algorithm for Maritime Navigation Vessels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 506-518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-50017-7_38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 二瓶泰範, 中田聡史, 原田浩太郎	4. 巻 84
2. 論文標題 ロボセンを活用した養殖場の高密度・高頻度水質計測の取り組み	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 水産海洋研究	6. 最初と最後の頁 212-213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mingyao Ji, Sharath Srinivasamurthy, Yasunori Nihei	4. 巻 -
2. 論文標題 Basic research on the influence of descent flow from small unmanned aerial vehicle(quadcopter) on a small floating body	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2020 39th international conference on ocean, offshore and arctic engineering(OMAE2020)	6. 最初と最後の頁 OMAE2020-18787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 谷口貴啓、田岡璃貴啓、田岡璃久、坪郷尚、二瓶泰範
2. 発表標題 波浪中における四胴型自動航行船のアーム部材に生じる荷重
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rinto Kozono, Yutaro Tsurumi, Yasunori Nihei, Ryosuke Saga
2. 発表標題 Route Finding for Autonomous Vessel Considering Abstacle Avoidance by Deep-Reinforcement Learning
3. 学会等名 The 28th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 二瓶 泰範, 鶴見 悠太郎, 増田 憲和, 原田 浩太郎, 奥野 充一, 原 尚之, 中田 聡史
2. 発表標題 四胴型自動航行船による高密度・高頻度な自動水質環境計測
3. 学会等名 土木学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mingyao Ji, Sharath Srinivasamurthy, Yasunori Nihei
2. 発表標題 Basic research on the influence of descent flow from small unmanned aerial vehicle(quadcopter) on a small floating body
3. 学会等名 39th international conference on ocean, offshore and arctic engineering(OMAE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryosuke Saga, Zhipeng Liang, Naoyuki Hara, Yasunori Nihei
2. 発表標題 Optimal Route Search Based on Multi-objective Genetic Algorithm for Maritime Navigation Vessels
3. 学会等名 International Conference on Human-Computer Interaction (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関