

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420435

研究課題名(和文) 実用追従制御法に基づいた外乱とノイズに強い飛行船の最適制御系の設計と屋外飛行実験

研究課題名(英文) Design of optimal control systems of an airship with robustness against disturbance and noise based on practical tracking control method and outdoor flight experiments

研究代表者

山田 学 (Yamada, Manabu)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40242903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、実用的な飛行船の自動航行制御システムを開発することである。本研究では、非線形かつ非ホロノミックな飛行船に対する実用追従制御手法に基づいた新しい最適制御系の設計法を開発した。提案する制御法は、追従偏差に許容誤差を導入する新しいアイデアにより、非ホロノミック・非線形な制御対象を厳密に線形化できるため、過渡応答や外乱抑制の最適化やコントローラ設計の単純化を達成した。飛行実験やシミュレーションにより成果の有用性を実証した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop practical automatic control systems for a underactuated airship, which is described by a set of nonlinear equations. One of our main results is to present new optimal control systems for the airship based on practical tracking control method. By introducing an allowable tracking error to the airship system, the tracking control problem of the nonlinear system can be reduced to that of a simple linear system. This approach makes the well-known linear control theory applicable in the control design. Therefore, optimal tracking controllers for the airship system are proposed with robustness against disturbance and noise. Some flight simulations and experiments have been performed and the effectiveness of the proposed control systems has been demonstrated.

研究分野：制御工学

キーワード：制御理論 最適制御 飛行船 4元数

1. 研究開始当初の背景

近年、情報通信やリモートセンシング（環境や交通流の監視）などの観点から飛行船が注目されている。それは飛行船が他の航空機に比べて、安全性が高く、長期飛行や空中静止が可能であるというユニークな利点を有しているからである。特にヘリコプターに比べて、安価で墜落や騒音・振動の心配はなく、人工衛星に比べても、安価で回収・修理が容易等の特徴を持っている。このような特徴を利用して、最近ではレスキュー・空撮・交通流監視・環境観測など、様々なプロジェクトに応用されつつあり、その代表的なプロジェクトの一つが、「成層圏プラットフォーム構想」である。これは文部科学省と総務省の共同プロジェクト（ミレニアムプロジェクト）として、飛行船を人工衛星に代わる通信・放送の中継基地等に利用する大型プロジェクトである。本学でも本研究代表者が2011年3月まで所属した極微デバイス機能システム研究センターでは、光・電子デバイス技術や制御技術の研究成果を応用し、無人で安全に長期飛行でき、かつ軽量・小型で扱いやすい実用的な“ソーラー飛行船システム”の開発プロジェクトをセンターの主要プロジェクトとして位置づけ研究を進めている。以上の状況を背景に、本研究では、そのプロジェクトの一つとして実用的な飛行船の自動航行制御システムの開発および実機に基づいた飛行シミュレーションおよび実験による制御性能の実証を研究するものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は実用的な飛行船の自動航行制御システムを開発し、無人飛行船を用いた飛行実験により有効性を実証することである。飛行船の制御を考える上での主な問題点はつぎの3点である。

・風外乱と非線形性の影響：

飛行船は風外乱の影響を受けやすく、比較的弱い風であっても、風を船体の斜めから受けることにより、任意の希望の地点への移動や静止が困難になりやすい。また、風は時間とともに変動し、正確な測定も困難である。さらに風により飛行船が受ける抗力は、風と飛行船の相対速度の非線形関数であるとともに飛行船の姿勢にも依存する。また、風により飛行船が受ける抵抗係数などの空力特性を正確に測定することは困難であり、不確かさや時間変動をもつ。他にコリオリ力など、飛行船の運動方程式は強い非線形性をもつ。

・非ホロノミック拘束：

飛行船の位置と姿勢を制御するための主な推進装置は、一般的に左右のプロペラと舵のみであるため、制御入力に対する制御量の自由度が少なく、例えば直進と回転はできるが、横方向には入力を加えることができないという非ホロノミック拘束（劣駆動）

と呼ばれる制約をもつ。そのため、車の車庫入れと同じように前進・後進の最適な切替えしなど、巧みな制御が必要とされる。

・ペイロードの制約：

飛行船はヘリウムガスの浮力で浮いているため、搭載できる装置（電源システムやアクチュエータなど）が大きく制限される。そのため、効率的で無駄のない最適な制御方式が必要である。

これまで、飛行船の自律飛行制御に関する研究の報告は数少ない。また従来研究では、コントローラに不連続な切替え器を用いることで不安定化や振動を起こしやすいことや、特異点が存在し大域的安定性が保証されていないこと、実用上重要なロバスト安定性および未知風外乱の抑制がほとんど考慮されていないこと、風により飛行船が受ける粘性抵抗係数などの空力特性の正確な情報が事前に必要で、その値に誤差があると不安定化を起こしやすいこと、コントローラの設計が複雑などの問題点が指摘されている。

そこで、平成22～24年度において、科学研究費補助金の援助の下、本研究代表者は3次元空間において、つぎの制御性能を保證するコントローラを開発した。

・飛行船の物理パラメータに不確かさがあったとしても、制御系の指数安定性を保證するロバスト安定化コントローラ。

・風速・風向が一定の風外乱を受けても、任意の希望の地点にすばやく移動し静止できる外乱抑制コントローラ。

開発した制御法を実用化するためには、つぎの観点から、上記の成果を発展させることが必要である。

(A) ハイゲインフィードバックの回避：

上記の提案法は、フィードバック補償器に指数関数を含むため、時間とともにハイゲインとなりセンサーノイズに弱い。

(B) 時間変化する未知風外乱への対策：

上記の提案法は、定常風を扱い、風外乱が時間変化する場合を考慮していない。

(C) 4元数表現の導入：

上記の提案法は、姿勢角にオイラー角を用いているため、特異点が発生し運動が制限されてしまう。運動範囲を広げるため、4元数表現に基づいた制御法が必要である。

これらの高度な要求を解決する鍵となる制御法が「実用追従制御法」であり、追従誤差を零でなく、任意に与えられた値以下に保證することを目的とする、本研究代表者により提案された新しい制御法である。本研究代表者は、この手法により制御対象の非線形性・非ホロノミック性を緩和できることに着

目し、すでに車両型ロボットなどの簡単な非線形系に応用し、ハイゲインフィードバックを回避でき、さらに非線形系の制御問題をある簡単な線形系の制御問題に帰着させ、目標値追従を達成する低ゲインフィードバック補償器の設計に成功した。

以上の背景の下、本研究の目的は、この実用追従制御法を3次元空間での飛行船に拡張し、飛行船の非線形系制御問題を簡単な線形系の制御問題に帰着させ、実用追従制御法のもつ非線形性・非ホロノミック性の緩和という利点を利用して、これまで未解決の上記(A)~(C)の問題点を解決し、最適追従制御問題や外乱に対する感度最小化問題などを解くことである。具体的な研究目標は、つぎの5点である。

- ・飛行船の実用追従制御系の設計：
問題点(A)の解決のため、実用追従制御法を3次元空間での飛行船に拡張し、補償器を低ゲイン化し、ノイズ感度を低減する実用追従制御系を設計する。
- ・過渡応答と制御入力最適化：
実用追従制御法を応用し、飛行船の非線形最適制御問題を、ある線形系の標準的最適化問題に帰着させ解き、過渡応答や制御入力を最適化する。
- ・4元数に基づいた制御系の設計：
問題点(C)の解決のため、姿勢角に4元数表現を導入し、運動範囲を広げ、大域的な目標値追従と外乱抑制を同時に達成する補償器を設計する。
- ・未知風外乱適応制御系の設計：
問題点(B)の解決のため、ヘリコプター用に本応募者が提案した手法を改良し、飛行船が受ける未知の風外乱をオンライン推定・最適抑制し、飛行船の揺れを小さく抑えながら、定点滞空や目標軌跡追従を達成する実用追従制御系を設計する。風外乱が時間変化する場合の揺れの最悪値解析や対策も提案する。
- ・屋外用自動制御装置の製作：
現有実験飛行船に改良を加え、上記の性能をもつ新しい屋外飛行用の自動制御システムを製作し、有用性を検証する。

3. 研究の方法

本研究目的を達成するため、制御系設計研究のための「理論課題」と飛行船実験研究のための「実機課題」を平行して実施した。平成25年度に「理論課題」として「実用追従制御系の設計」と「過渡応答と制御入力の最適化」を、「実機課題」として飛行船の改良とデータ解析を行った。平成26年度は「理論課題」として「4元数に基づいた制御系の設計」と「未知風外乱適応制御系の設計」を行い、「実機課題」として飛行船の飛行実験を行った。平成27年度は、「理論課題」と「実機課題」の研究結果をまとめ、総合的に検証した。本研究の方法の特徴は、「理論課題」と「実機課題」を同時に実施し、「理論課題」

の各ステップで屋内飛行検証を行い、理論と実機を相互に見直しフィードバックしながら研究を着実に進めた点である。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

本研究期間(平成25~27年度)での具体的な研究成果は以下のとおりである。

飛行船の改良・データ解析：

まず、実験用飛行船について、アクチュエータやセンサの種類・数量・配置などを再検討し、高い運動性と風などの外乱に強いシステムの設計を行った。図1と2に示すように本システムは高出力の電動プロペラを4~6基搭載し、その配置を工夫することで風に対抗できる高い推進力を有し、さらにサーボモータによりプロペラの角度を自由に制御できるため、安定な発着陸や高度などの制御も容易にすばやく実現できるという特徴をもつ。その後、実験機に必要なパラメータ(飛行船や翼の空力係数など)の同定を飛行実験などにより求め、同時に、飛行船の運動データの取得と図3のようにコンピュータシミュレーションによる解析を行った。

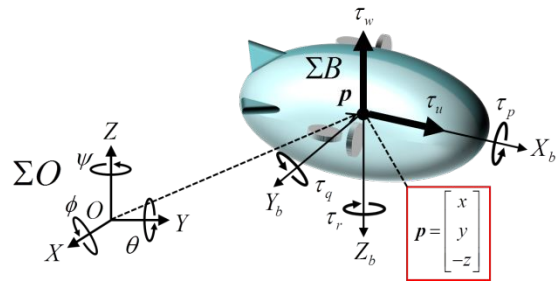


図1 小型飛行船の座標系

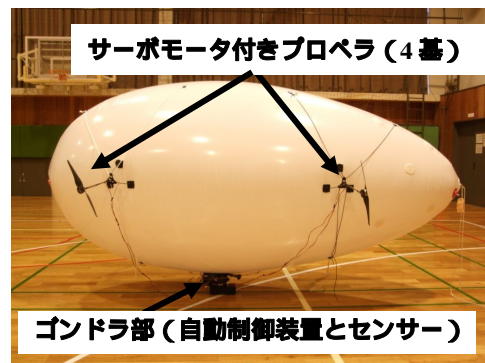


図2 小型飛行船の実験機(全長4m)



図3 製作した飛行シミュレータ



図4 飛行実験の様子(連続写真)

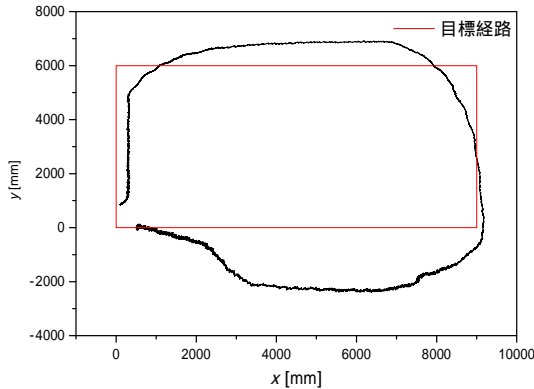


図5 飛行実験の一例(目標値追従制御)

また、図4と図5のように実機による飛行実験を実施し、有用性を検証した。

飛行船の実用追従制御系の設計と過渡応答・制御入力最適化:

実用追従制御法の適用可能なクラスを拡張した。これまで実用追従制御法は、制御対象として車両型移動ロボットに限定され、運動も2次元平面内に限定されていたが、本研究では、この制御法を3次元空間で運動する飛行体に拡張した。その結果、飛行船などの飛行体に対して、3次元空間での目標値追従を達成できるフィードバック補償器の設計法を開発した。入力変換などを工夫することで、飛行船の非線形最適化問題を、ある線形系の標準的な最適化問題に帰着させ、過渡応答などの最適化し、設計法も簡単化できた。さらに、目標軌跡の曲率に合わせて、最適な許容誤差を自動調整できる手法も開発し、過渡応答や制御入力などを緩和した。以上の成果は、図6~8のように、同定実験により得られた小型飛行船の物理パラメータに基づいた数値シミュレーションや実験により、有用性を実証した。

4元数に基づいた制御系の設計

姿勢角に4元数表現を導入し、運動可能な範囲を広げ、追従可能な3次元目標軌跡のクラスを拡張した。4元数に基づいた飛行体の非線形制御問題を、入力変換などを工夫することで、ある線形系の標準的な安定化制御問題に帰着させ、設計法を容易にした。以上の

成果は、同定実験により得られた小型飛行船の物理パラメータに基づいた数値シミュレーションや実験により、有用性を実証した。

未知風外乱適応制御系の設計:

飛行船の動きなどのデータを用いて、風力などの外乱を推定する実用的な外乱オブザーバや、その推定値を用いてオンラインで制御器を自動調整することで、風外乱の状況下でも目標軌跡にすばやく追従できる新しい未知風外乱適応型の追従補償器を導出した。以上の成果は、図9~10のように同定実験により得られた小型飛行船の物理パラメータに基づいた数値シミュレーションや実験により、有用性を実証した。

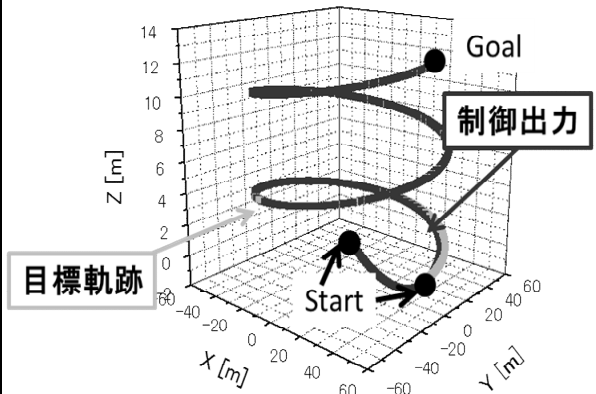


図6 目標値と飛行制御出力

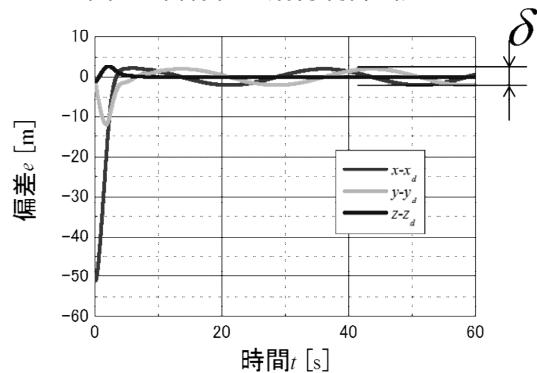


図7 追従偏差応答(実用追従制御法により、追従誤差は、任意に与えられた値以下に保証されることを示す)

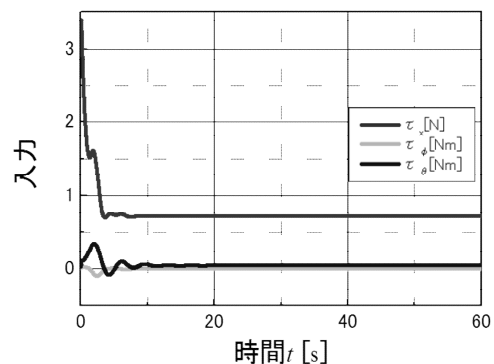


図8 制御入力応答(実用追従制御法により、制御入力が最適化されることを示す)

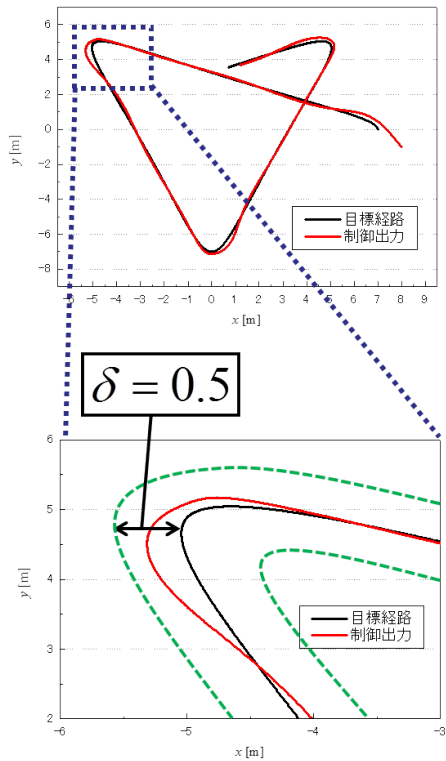


図9 目標値と飛行制御出力（実用追従制御法により、追従困難な目標軌跡でも任意に与えられた値の範囲内で追従できることを示す）

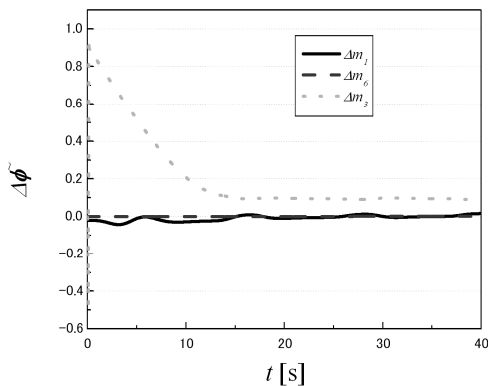


図10 適応制御によるパラメータ推定誤差（適応実用追従制御により、物理パラメータが不確かな場合でも、オンラインでパラメータを推定しながら、図9のように追従偏差を与えられた値の範囲内に保証できることを示す）

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

飛行船はコリオリ力などの非線形項をもつ非線形システムであり、その状態方程式は船と同形である。また、飛行船は船と同様、プロペラと舵が船体運動の制御手段であり、非ホロノミックな拘束をもつ劣駆動機械系の一つである。従来法のハイゲイン化の主な原因は、非ホロノミック制約をもつ制御対象に対して追従偏差を零にするという厳しい要求にある。本研究の主な学術的特色（オリ

ジナリティ）は、追従誤差を零ではなく、任意に与えられた値以下に保証する「実用追従制御法」という新しい制御法を飛行船に初めて応用し、ハイゲイン化の問題点を解決する手法を開発したことである。さらに独創的な点は、実用追従制御法のもつ非線形性・非ホロノミック性の緩和という特徴を利用して、これまで未解決の最適制御問題や未知外乱抑制問題などを解いたことである。

その結果、主に以下の成果を得た。1) 実用追従制御法の導入により、従来法の問題点のハイゲインフィードバックを回避でき、補償器を低ゲインで実現でき、ノイズに強い。2) 過渡応答や入力を最適化し、効率的な動きが実現できる。3) 4元数の導入により、オイラー角の特異点問題が解決され、大域的な目標値追従と外乱抑制を達成できる。4) 外乱の推定速度と抑制速度を任意に指定できるため、風外乱が時間変化する場合でも素早く抑制し、外乱に強い。以上のように、本研究は、これまで未解決であった実用上重要な制御問題に数多く解決したことであり、独創性および有用性が高い。その成果は、飛行船分野の発展に大きく寄与するだけでなく、車両型ロボットなど、様々な劣駆動非ホロノミック系の運動制御にも応用されており、劣駆動系全般の制御技術の発展にも大きく貢献できるインパクトの高い成果である。

(3) 今後の展望

近年、飛行制御の分野では、風座標系という新しい定式化が注目されている。この利点は、定常的な風速・風向が観測可能な条件下で、風の定常成分を座標系内に取り込み、これを外乱として扱わずに制御できることである。その結果、従来手法よりも風の影響を小さく抑えることができ、飛行船に与える目標速度や経路を適切に設定することで、強風時に図11のような飛行経路での自律飛行が可能となる。このような自律飛行を実現することで、強風時にも風下側への安定した低速移動が可能となる。さらに、目標経路からの横偏差の大きさに応じて風座標系内で経路再生成を行うことで、飛行船が突風や横風を受けて目標経路を逸脱した場合にも滑らかかつ迅速に経路復帰可能な実用的な方法である。今後はこの風座標系のような新しい定式化を応用し、より実用的な実用追従制御法の開発が必要と思われる。

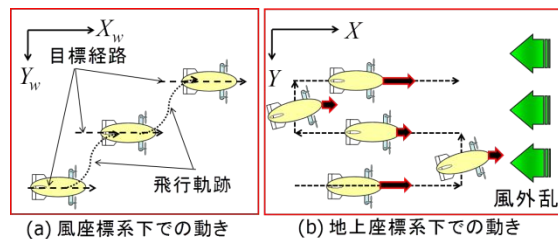


図11 強風時に有用な飛行船の経路追従制御法

5. 主な発表論文等(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

M.Yamada, 他4名(第5番目), All-Round Two Wheeled Quadrotor Helicopters with Protect-Frames for Air-Land-Sea Vehicle – Controller Design and Automatic Charging Device -, *Advanced Robotics*, Vol.29, No.1, 査読有, 2015, pp.69-87

M.Yamada, 他2名(第3番目), Adaptive Tracking Control of Quad-Rotor Helicopter in Quaternion Based on Input-Output Linearization with Online Estimation of Inertia Moment, *International Journal of Advanced Mechatronics Systems*. Vol.6, No.5, 査読有, 2015, pp.237-246

M.Yamada, 他2名(第3番目), Tracking Control of Quad-rotor Helicopters Suspended a Power Supply Cable with On-line Estimation of Disturbances”, *Proceedings of IEEE International Conference on Advance Mechatronics Systems*, 査読有, 2015, pp.423-428

山田学, 他2名(第3番目), 入出力線形化に基づくクアッドロータヘリコプタの適応 H_{∞} 追従制御, 計測自動制御学会論文集, 50巻11号, 査読有, 2014, pp.784-791

山田学, 他2名(第2番目), バックステップング法に基づく4ロータ小型ヘリコプタの適応追従制御, 計測自動制御学会論文集, 50巻2号, 査読有, 2014, pp.177-184

M.Yamada, 他2名(第3番目), Adaptive Position Control of Quad-Rotor Helicopter in Quaternion Based on Input-Output Linearization”, *Proceedings of IEEE International Conference on Advance Mechatronics Systems*, 査読有, 2014, pp.243-248

M.Yamada, 他2名(第3番目), Exponential Stabilization of Quad-Rotor Helicopter Based On Exact Linearization and Disturbance Rejection With On-Line Estimation of Disturbance, *Proceedings of SICE Annual Congerence*, 査読有, 2014, pp.1180-1185

M.Yamada, 他1名(第2番目), Sampled-Data Control of Four-Rotor Mini Helicopter With On-Line Estimation of Translational Velocities, *Proceedings of SICE Annual Congerence*, 査読有, 2014, pp.1186-1191

[学会発表](計4件)

山田学, 他3名(第4番目), 地上走行時における2輪型4ロータヘリコプタの適応実用追従制御, 第2回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム講演会

論文集, 査読なし, 2015, No.751-2

山田学, 他3名(第4番目), 二次元平面上における2輪型4ロータヘリコプタの任意の許容誤差をもった追従制御, 第2回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム講演会論文集, 査読なし, 2015, No.PS-3

山田学, 他1名(第2番目), 飛行船の適応実用追従制御, 第57回自動制御連合講演会講演論文集, 査読なし, 2014, pp.1213-1217

山田学, 他5名(第3番目), 目標経路を考慮した2輪車両型移動ロボットの適応実用追従制御, 第57回自動制御連合講演会講演論文集, 査読なし, 2014, pp.1209-1212

[図書](計1件)

山田学 (第1番目), 飛躍するドローン - マルチ回転翼型無人飛行機の開発と期待される応用研究 - (第3章「安定化・位置制御・外乱抑制」執筆), ニッケイ印刷出版, 査読有, 2016, pp.71-92

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 陸上または水上を走行可能なプロテクトフレーム付き飛行体のバッテリーおよびその充電交換装置

発明者: 山田学

権利者: 名古屋工業大学

種類: 特許

番号: 特願2014-106695

出願年月日: 2014年5月23日

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

[その他]

・ホームページ:

<http://mcontrol.web.nitech.ac.jp/yamam/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田学(YAMADA MANABU)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 40242903

(2)研究分担者 なし。

(3)連携研究者

水野直樹(MIZUNO NAOKI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 30135404

山田貴孝(YAMADA TAKAYOSHI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号: 00273318