

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：57403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06952

研究課題名(和文) マルチコプターに主翼を付加した垂直離着陸機の開発

研究課題名(英文) Development of Variable Pitch Wing Attached Multicopter as Vertical Take-off and landing aircraft

研究代表者

葉山 清輝 (Kiyoteru, Hayama)

熊本高等専門学校・拠点化プロジェクト系地域協働プロジェクトグループ・教授

研究者番号：00238148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：マルチコプターは垂直離着陸が可能で空中での自由度が高いが消費電力が大きく飛行時間の制約がある。一方、固定翼機は離着陸に滑走路が必要であり、空中での静止はできないが長時間飛行できる。本研究では、両者の利点を組み合わせ、主翼を持ったマルチコプターを開発した。機体の傾いても主翼を最適な迎角になるよう自動調整することで前進時に揚力を発生し低消費電力での飛行が可能となった。機体の安定性や低消費電力の機体構成を調べ、可搬性が高く離着陸時の風の影響が少ないカイト翼を付加した機体やティルトローター機なども製作し比較検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無人航空機(ドローン)は空撮目的から測量・点検に用いられるようになり、今後は物流でも重要な働きを持つようになっていく。従来型のマルチコプターを利用した物流の実証試験が行われており、今後は省電力長距離飛行が可能な機体が望まれる。本研究の成果はマルチコプターの利便性と固定翼機の省電力性能を併せ持つ中距離輸送用の無人航空機の選択肢を提案できたと考えている。

研究成果の概要(英文)：Multicopters can take off and land vertically and can hover in the air, but their power consumption is large and their flight time is limited. On the other hand, though the fixed-wing aircraft has an advantage of wide range of flight area, it cannot hover in the air and takes a runway field to take-off and landing. In this study, new concept VTOL based on variable pitch wing attached multicopter is developed. Continuous transition from multicopter to similar to fixed-wing aircraft can be done with adjusting suitable angle of attack of the wing of multicopter. The stability and low power consumption of the fuselage were investigated. A kite wing attached multicopter which are more portable and less affected by wind during takeoff and landing, and a tilt-rotor aircraft were also built and compared.

研究分野：マイクロコンピュータ工学

キーワード：垂直離着陸機 主翼付きマルチコプター カイト翼 ティルトローター ドローン

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マルチコプターは垂直離着陸が可能で空中での自由度が高いが消費電力が大きく飛行時間の制約がある。一方、固定翼機は離着陸に滑走路が必要であり、空中での静止はできないが長時間飛行できる。固定翼機と回転翼機の特徴を併せ持つ機体としてはティルトローター方式の垂直離着陸機 (Vertical Take-Off Landing Aircraft: 以下 VTOL) である V-22(オスプレイ)が有名であり、高速で航続距離が長い利点がある。一方、テールシッター方式の垂直離着陸機については、XFY-1 などの有人機の開発が以前行われていたが実用性は乏しかった。

近年、無人航空機が注目され様々な多方面での利用が模索されている中で、様々な機体のティルトローター方式やテールシッター方式の垂直離着陸機が提案されている。我々も固定翼機の優位性に着目し、小型の自律飛行機や、テールシッター方式で安定に離着陸できるトライコプターをもとにした垂直離着陸機の開発などを行ってきた。しかし、テールシッター方式は機体に横風を受けるために離着陸の条件が厳しく、安定な飛行の遷移を行うためには機体の空力中心や重心の設計の条件が厳しいことが分かっている。機体を水平に保ったまま垂直浮上し飛行姿勢が大きく変わらない機体を実用的だと考えられる。2015 年に動画公開された Amazon の宅配用 VTOL は水平姿勢のまま離陸し後方に取り付けられたプロペラで推進する冗長な機体となっている。同年にエアロセンス(株)が開発した VTOL は機体の重心近くに二重反転のティルトローターを持つため荷物の運搬は難しく、近年の同社の物流実用化実験ではクワッドコプターが利用されているようである。

2. 研究の目的

本研究では、飛行姿勢を大きく変えずに垂直飛行から水平飛行に滑らかに遷移でき、本研究では従来に無い形状で実用的な機体を開発することを目的とし、以下の述べる二種類の機体を検討した。1つはマルチコプターに主翼を付加して揚力を利用し飛行時間を延ばす機体で、もう一つは二重反転のティルトローターを機首に取付け、飛行遷移時の重心の設計を容易にすると同時に荷物を積載可能にする機体である。

(1) 可変ピッチ翼付きマルチコプター型 VTOL

通常のマルチコプターは前進時に前方のローターの出力を下げ後方のローターの出力を上げて前傾する。主翼を機体に固定すると前傾とともに主翼の迎角も負となり、前進時に有効な揚力が得られない。そこでピッチを可変できる主翼を設置し、前進時の機体の前傾に合わせて主翼を水平に保つ機構により前傾姿勢とは無関係に一定の迎角を持つよう主翼を制御するマルチコプターを考案した。小型試作機にこの機構を持つ主翼を搭載し飛行試験を行った結果、省電力飛行を行うことができた。本研究では、更に実用化を目指した検証と機体開発を行った。

(2) ティルトローターによる VTOL

機種部分に二重反転のティルトローターを持ち、両翼端(または翼内に埋込み)に姿勢制御のローターを持つ全翼機の VTOL を考案している。重心は風圧中心より前方に置き、二重反転ローターの推力を大きく取って機体を支えて水平にホバリングする。機首の二重反転ローターを前方に傾けていくと、前方への推力を得て前進し主翼が揚力を得られる。機体はマルチコプターから固定翼機に滑らかに遷移することができ、中間状態でも十分な安定性を持つと考えられる。

3. 研究の方法

提案する 2 種類の VTOL の研究の方法について平成 29 年年度の計画をそれぞれ述べる。

(1) 可変ピッチ翼付きマルチコプター型 VTOL は実験・検証のために既に試作している。この試作機を用い、機体の安定性、飛行性能、消費電力、翼型、機体構造等について検討を行う。

更に、実証試験のための機体を再設計して、カメラ等を搭載し、広域の空撮と市販のソフトウェア (Agisoft PhotoScan など、<http://www.agisoft.com/>) を使った 3 次元可視化の評価を行う。

(2) 二重反転ティルトローターによる VTOL についてはその前段階として類似の機体を試作しているため、本研究において機体の実用化に向けての検討と、機体検証から目標とする二重反転ティルトローターによる VTOL への拡張と試作を行う。機首を二重反転に置き換え、後縁にエレボンを付加して提案する機体構造を実現する。また、機体構造に適合するようにコントローラのファームウェアの改造し、姿勢制御を行う。

平成 30 年度以降は、2 種類の機体の検証結果を比較検討し、その結果より、実用的な機体の設計と開発を行う。機体構造や翼型の設計を行い実用化試験に耐えるものを製作する。開発した機体により、実際にカメラによる広域の空撮等を実施し、従来のマルチコプターによるものとの利便性の比較を行う。得られた研究成果は国内外の関連学会で発表するとともに、様々な応用を模索し実践する。

4. 研究成果

まず可変ピッチ翼付きマルチコプターの機体の安定性と消費電力について検討を行った。

図 1 はトライコプターに可変ピッチ翼を取り付けた場合と外した場合について、のホバリング時に左右移動と停止を繰り返しながら機体のロールとピッチ軸の挙動を調べたものである。実験は風の影響をなくするために体育館内で行っている。主翼がある状態では主翼を外した状態に比べロール軸・ピッチ軸ともに値が小さく、姿勢の変化が緩やかである。また左右に移動し停止したあとに逆方向に傾いていることが読み取れるが、これは主翼が空気抵抗を受けてすぐに

停止できず、逆方向への操作が必要となっているためである。一方主翼を外した状態では主翼の重量が無く軽量であるため、操縦が敏感に反映され小刻みな変化が多く不安定である。

電圧・電流の変化を図2に示す。これより電力を計算すると、主翼がある状態では平均121W、主翼を外した状態では平均96Wとなった。ホバリング時は主翼を外した状態のほうが低電力で飛行し、主翼の重量が負荷になっていると考えられる。

次に、前進飛行を行ったときの挙動である。体育館内での飛行なので緩やかな左旋回を行っている。同様にロール軸とピッチ軸の挙動について、図3に示す。主翼がある状態では値が徐々に変化しており、これより対気速度の増加に連れて揚力を得ることができ、なだらかな姿勢変化を行っていることがわかる。一方主翼を外した状態では比較的大きな値を維持しており、小刻みな変化が多い。急激な変化と旋回姿勢を維持するための細かな操縦が必要となる。電圧・電流の挙動を図4に示す。電力を計算し、主翼がある状態では平均103.9W、主翼を外した状態では平均97.3Wで飛行した。以上より、主翼を取り付けることでホバリング時の安定性は劣るものの、水平飛行時には主翼を有することによる飛行の安定と省電力効果が確認できた。

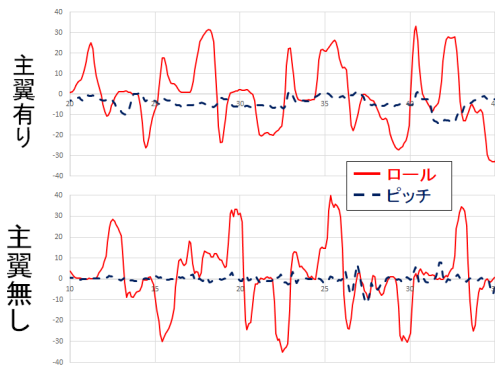


図1 ホバリング時(左右移動)の挙動

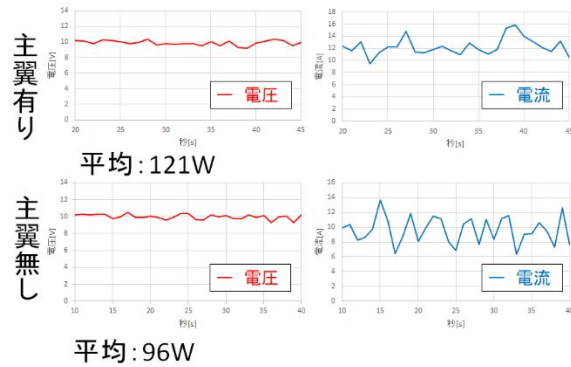


図2 ホバリング時の電圧・電流の変化

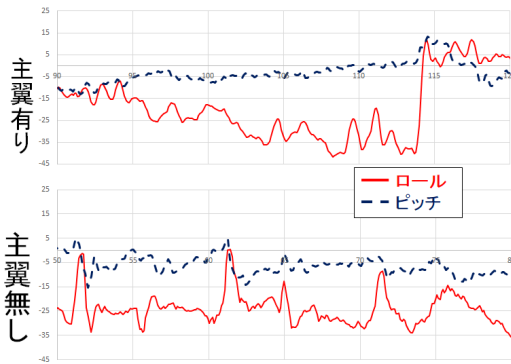


図3 前進(左旋回)飛行時の各軸の挙動

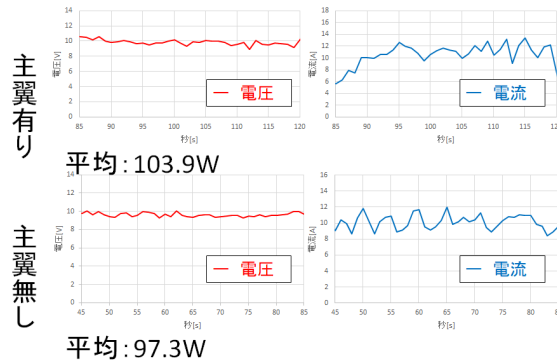


図4 前進飛行時の電圧・電流の挙動

機体の飛行性能を向上させるために主翼にフラップを追加し、旋回飛行と前進飛行を繰り返す飛行試験を行った。また操縦者がどの程度スロットルを上げていたかのデータも解析し、フラップによる効果の検証を行った。まず、フラップを使用せず飛行を行い、エルロンの効果を検証したものを図5に示す。エルロンの追加により姿勢の速やかな変化が可能となり、ローターの回転数が少ないときでも姿勢制御がより正確にでき、旋回性能が向上したといえる。次にフラップ併用して飛行を行ったときの結果を図6に示す。フラップを使用することにより揚力が大きくなり低速でも安定な飛行ができているが、抗力が増えるために電力消費は増加した。

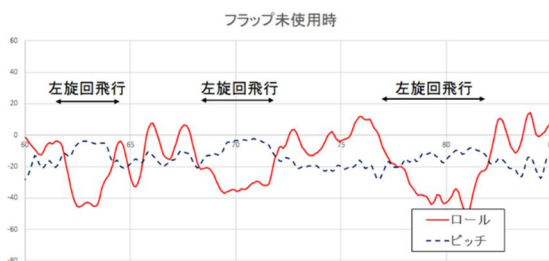


図5 フラップ未使用時の挙動

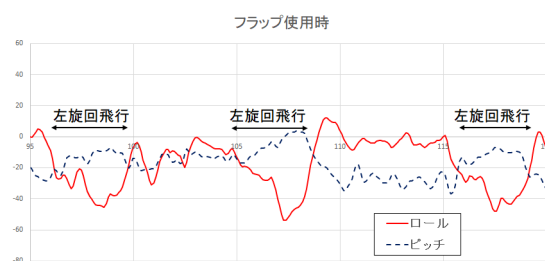


図6 フラップ使用時の挙動

主翼の付加による機体の挙動の変化と省電力性能が確かめられたのでより実用的なスケールアップした機体の開発を行った。図7は翼幅1.4mで総重量は1.8kgの翼付きトライコプターで最大ペイロードは推定3.6kg、飛行時間は推定25分間である。ある。図8は翼幅1.6mで総重量は3.8kgのヘキサコプターで最大ペイロードは推定5.8kg、飛行時間は推定15分間である。

これらの機体製作後、実証試験として飛行し空撮に利用するなど性能を評価中である。ただし、Y6ヘキサコプターは旋回性能が十分でないことが分かり試験飛行を取りやめている。



図7 トライコプター型



図8 ヘキサコプター型

研究を進めるうちに主翼を有するためマルチコプターと較べて風の影響があることが分かった。特に風が強い場合は、風に正対して離着陸を行なうなどの対策が必要であった。そこで、可変取付角の主翼を有するマルチコプターの省電力・長距離飛行の利点を持ち、飛行の自由度を上げ、可搬性も良い機体として、柔軟性のあるカイトを主翼として（以下、カイト翼）付加したマルチコプターを本研究から派生して考案し、開発を試みた。図9に機体の概念図を示す。低電力化のため必要最小限度の3つのローターによる逆三角形のトライコプターをもとに、ローターと干渉の少ない三角形のカイト翼としている。カイト翼は柔軟な材質のセールを左右に広がったリーディングロッドと中央のセンターロッドに固定したもので、後縁は風を受けて湾曲する。垂直上昇・下降時にはカイト翼を閉じ、ロッドの傾きは小さく、セールは弛み大きい状態となる。一方、カイト翼を開いた場合は、ロッドの傾きは大きく、セールは張った状態になる。カイト翼を開閉した場合を比較すると、ロッドの角度変化に較べてセール上面の角度変化の方が大きくなる。実効的なカイト翼の取付角の変化を大きくできることは、固定翼にはない特徴である。

試作した機体の飛行試験を行った。図10のように機体は垂直浮上後、機体も主翼も水平を保ってその場で安定したホバリングができた。ホバリング時にセールがばたつくことはなくローターの気流の影響はほとんどなかった。機体を前傾させて水平飛行に遷移した際の写真を図12に示す。機体は前傾しているが、カイト翼はほぼ水平を保って飛行していることがわかる。機体の対気速度が増加するとカイト翼は揚力を発生させ機体の浮上を助けるために機体が浮き上がる。一定高度で飛行するためにはスロットルを絞らなければならない、その結果、省電力で飛行できることがわかった。

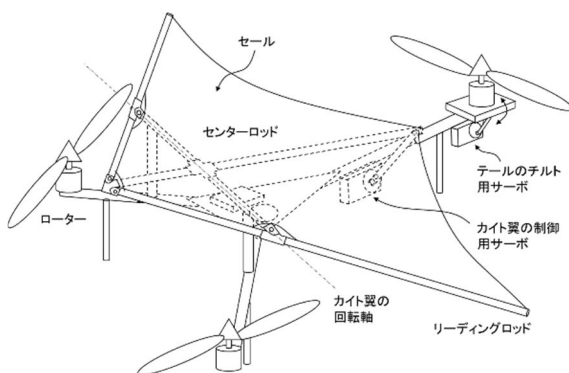


図9 カイト翼付きマルチコプターの概念図



図10 水平飛行時

二重反転ティルトローター機の開発に当たり、既存のマルチコプターの構成を調べるうちにY4型のクワッドコプターと類似していることが分かった。そこで市販のフライトコントローラを使用し、Y4クワッドコプターのファームウェアを用いて前後を逆に設定し、プロペラのサイ

ズを前後非対称としてパラメータを調整することで姿勢制御を実現した。

図13と図14に試作した機体とその試験飛行中の写真をそれぞれ示す。前方の二重反転ローターを垂直上方に向けて機体は離陸し、ローターを前方に傾けることにより水平飛行に遷移できることが分かったが、飛行遷移途中で機首上げの傾向があり、機体の重心や推力の制御が非常に難しかった。



図13 試作した二重反転ティルトローター機



図14 機体の試験飛行

ティルトローター機について機首上げ傾向の理由はホバリングに必要な推力が固定翼機の水平飛行時の推力に比べて過大であるためで、また固定翼は迎角に対して揚力の増加が急で更に機首上げを起こすことからローターの推力だけで姿勢制御を行うのではなく、機体構造の工夫も必要だと考えた。一連の研究からフレキシブルなカイト翼を持つマルチコプターにより安定な水平飛行ができること、カイト翼が迎角に対する揚力変化が小さいことから、図16に示すカイト翼を持つティルトローター機を考案した。前方2ローターをサーボモーターによって90度ティルトさせ前方への推力を得て水平飛行に遷移することができる。機体の重心とカイト翼の空力中心が一致するように設計した。機体は垂直浮上後、水平に姿勢を保ってその場にホバリングできた。前方2ローターをティルトさせていくと機体は前進し、水平飛行に遷移した。ホバリング時は93Wの電力を要するのに対し、ローターのティルト後は64Wの電力で飛行できた。

前方2ローターのティルトの様子を図17に示す。ラダー操作によりヨー軸で機体が回転する場合は、図17(a)のように左右ローターは逆方向にティルトする。前進する際には、図17(b)のように両方のローターが前方にティルトする。



図16 カイト翼を持つティルトローター機

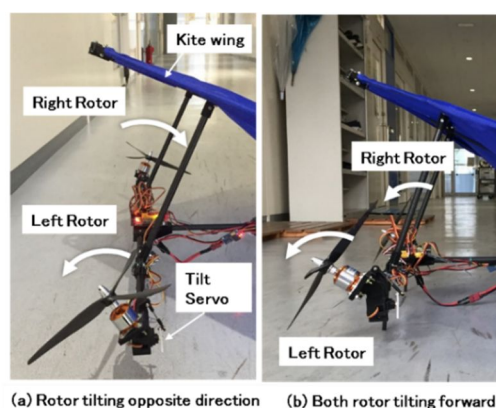


図17 ローターのティルトの様子

以上述べた翼付きのマルチコプター及びティルトローターによる従来に無い形の機体については得られた成果を国内外の学会にて論文および報告を行い、また各種展示会での出展などにより広く成果を公開している。またここにあげた以外にも関連した研究も始めている。今後も研究を継続して、空の産業革命とも言われる無人航空機の研究開発の一端を担っていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kiyoteru Hayama, Hiroki Irie	4. 巻 10
2. 論文標題 Trial Production of Kite Wing Attached Multicopter for Power Saving and Long Flight	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ICIC Express Letters, Part B: Applications	6. 最初と最後の頁 405-412
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24507/icicelb.10.05.405	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 該当する

1. 著者名 Kiyoteru Hayama, Takaaki Ishibashi and Hiroki Irie	4. 巻 Vol. 9, Issue 3,
2. 論文標題 Trial Production of Vertical Take-Off and Landing Aircraft Based on Y4 Quadcopter with Tilt Coaxial Rotors and Fixed Delta Wing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ICIC Express Lewtters	6. 最初と最後の頁 pp.171-176
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10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kiyoteru Hayama, Hiroki Irie
2. 発表標題 Trial Production of Kite Wing Attached Multicopter for Power Saving and Long Flight
3. 学会等名 13th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松野拓海, 田平 健, 葉山清輝, 入江博樹
2. 発表標題 省電力飛行を目的とした翼付きドローンの動的挙動の考察
3. 学会等名 第26回電子情報通信学会九州支部学生会講演会論文集, 2018年9月, B-20
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田平 健, 松野拓海, 葉山清輝, 入江博樹
2. 発表標題 省電力飛行を目的としたカイト翼付きティルト型トライコプターの開発
3. 学会等名 第26回電子情報通信学会九州支部学生会講演会論文集, 2018年9月, B-22
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 葉山清輝, 入江博樹
2. 発表標題 全方向ケーブルカムの試作
3. 学会等名 平成30年度(第71回)電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, 2018年9月, 03-2a-02
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 入江博樹, 緒方大樹, 葉山清輝
2. 発表標題 SfM/MVS による樹木位置および幹周の推定
3. 学会等名 平成30年度(第71回)電気・第23回GPS/GNSSシンポジウム2018, 2018年10月30-11月1日, 0S2-5
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 葉山清輝, 工藤友裕, 入江博樹
2. 発表標題 高空風力発電に用いる可変カイト翼付きマルチコプターの検討
3. 学会等名 第40回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, 2018年12月4-5日.
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 葉山清輝, 入江博樹
2. 発表標題 カイト翼によるティルトローター型垂直離着陸機の試作
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2018年12月13-15日
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiyoteru Hayama, Takaaki Ishibashi, Hiroki Irie
2. 発表標題 Trial Production of Vertical Take-Off and Landing Aircraft Based on Y4 Quadcopter with Tilt Coaxial Rotors and Fixed Delta Wing
3. 学会等名 12th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kiyoteru Hayama, Hirofumi Ohtsuka and Hiroki Irie
2. 発表標題 Trial Production of Variable Pitch Wing Attached Multicopter for Power Saving and Long Flight
3. 学会等名 Proc. of The 5th IEEE/IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2017 (ICISIP 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 葉山清輝, 宇佐 啓, 本田 涼, 入江博樹
2. 発表標題 カイト翼を有するマルチコプターの試作
3. 学会等名 第55回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 全方向ケーブルカム	発明者 葉山清輝, 入江博樹	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、148915	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 可変翼カイト	発明者 葉山清輝, 入江博樹	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、郵送申請のため未確認	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 垂直離着陸機	発明者 葉山清輝, 入江博樹	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2017 - 168957	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>熊本高専・葉山研究室のホームページ https://cpu4edu.net/ 熊本高等専門学校 教員紹介 - 葉山清輝 http://www.kumamoto-nct.ac.jp/gyouseki/1000037.html 自作飛行体いろいろ (youtubeプレイリスト) https://www.youtube.com/playlist?list=PLf2CE858d8UUpaxSzMD8luKJiHSHSGD6k</p>
--

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
研究分担者	入江 博樹 (Irie Hiroki) (70249887)	熊本高等専門学校・拠点化プロジェクト系グローバルリーダーシップ育成グループ・教授 (57403)	