

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06247

研究課題名(和文) 無尾翼機にTrirotorを組み込んだVTOL機Hamming Wingの開発

研究課題名(英文) Development of Tailless wing VTOL Hamming Wing combined with multi-rotor

研究代表者

滝田 好宏 (Takita, Yoshihiro)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・電気情報学群
・教授

研究者番号：60546050

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：研究開始当初において重要であった無尾翼機は、レフレックス翼型、20度前後の後退角および重心後方の垂直翼によって、安定した飛行が可能であることという設計指針を得た。Trirotorを無尾翼機に内蔵するために、機体に穴をあけることは、揚力の低下と抗力の増加を招くために今後のVTOL機設計に使用しないことにした。Quad-tilt-rotorを無尾翼機に用いた場合、(1)機体の剛性がホバリング時な安定性に大きく影響すること、(2)水平飛行時ピッチングの安定性は翼とエレボン(エルロンとエルロン)の剛性に関わるために、機体構造の設計において高剛性化と軽量化を両立する必要があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はマルチロータと固定翼機の利点を兼ね備えたVTOL型UAVの機体設計を行い、飛行実験と風洞実験により提案機体の評価を行った。最終的なVTOL機は無尾翼機にチルト式クワッドロータを組み合わせることで離陸、転換飛行、水平飛行、転換飛行から着陸と一連の飛行を実現した。機体の剛性を高め飛行安定性を高めより実用的な段階となり、今後はカメラや測量機器を搭載することで、計測精度等の総合的な評価を行う必要がある。

研究成果の概要(英文)：Tailless wing for the VTOL is stabilized by the reflex airfoil, the around 20 degree sweep angle and vertical wings behind center of gravity. Tailless wing with big hale for propeller is leded the decreasing of lift and increasing of drag on the forward flight. So, the big hale is not appropriate for tailless wing for VTOL. The control stability of hovelling flight and level flight are affected by the flexibility of frame and rigidity of wing and elevens, respectively. Therefore the aircraft design is standing together with the high rigidity and the lightweight.

研究分野：ロボット工学

キーワード：VTOL機 無尾翼機 チルト式マルチロータ UAV 風洞実験 自律飛行 災害対応

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年東日本大震災、2013年大島土石流災害、2014年広島市土石流災害、2015年関東東北豪雨災害、箱根山や桜島の火山活動等の自然災害による被害が近年増えている。災害後の復旧には状況の把握を迅速に行うことが重要で、広範囲長距離の空撮が最も有効な情報となる。また、重要な地点では停止状態での撮影ができると、その有効性が高まる。そこで、マルチロータ型 UAV の利用が期待されている。マルチロータ機はプロペラがむき出しで、人に接近して飛行しなければならない場合に危険が伴い、自重と推進力をすべてプロペラの回転に依存するため、バッテリーの容量で飛行時間が決定される。他方、固定翼型 UAV は長距離飛行を得意とするが、離着陸するための空間が必要となり、そのような空間がない場合には離陸より着陸時の回収に大きな問題がある。

そこで、固定翼の長距離飛行とマルチロータ機の垂直離着陸性能を持ち合わせた VTOL 機が有効と考えられている。VTOL 機の研究として、チルトウィング型、テールシッタ型、チルトロータ型が研究されているが、実用に至っている形式は有人機のチルトロータ型である。これらの形式で評価すべき性能の項目は二点、屋外で突風があっても安定性を維持するホバリング性能と固定翼での飛行性能である。チルトウィング型とテールシッタ型はホバリング時に正面からの風に流されるため、回避するには風向監視と適切方向制御が求められる。他方、チルトロータ型は風に対して比較的強固であるが、垂直尾翼の横風対策が求められる。また、固定翼の飛行特性を最大限に引き出すには実機による風洞実験が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究ではホバリング時に突風を受けにくく、水平飛行性能と両立する機体の形状として無尾翼機に注目している。適切に設計された無尾翼機は抵抗が最低限に抑えられ、主翼のみで飛行安定性が確保されるため、UAV 化は容易である。無尾翼機でラジコン飛行機として市販されている 2m 翼長の X-79 (Zeta Science) は飛行安定性があり、APM や Pixhawk 等のオートパイロットを搭載した自動飛行の例がある。このように飛行している実機を参考にすることで、無尾翼型 VTOL 機の実現が可能と考える。

これまでに行ってきたマルチロータ型 UAV の研究において、Trirotor 型でホバリングの安定性が確保できるモータの配置を調べてきた。安定性を高めるには、ブラシレスコントローラ、モータおよびプロペラによって発生する推力の周波数特性に注目する必要があることを示した。Trirotor の研究においてプロペラの保護と安全性の確保のために、EPP (発泡ポリプロピレン) 製のカバーを取り付けた。このカバーの機能に揚力を発生する翼の機能を加えることを考えて、翼幅 0.9m に 8 インチプロペラの Trirotor 型 UAV の試作している。この機体を風速 10m/s において風洞実験を行った結果、迎角 7 度で飛行揚力が得られることが分かったが、安定した水平飛行を行うための無尾翼機の設計と、マルチロータにチルト機構を組み込んだ VTOL 機の開発へと進んできた。

本研究では、無尾翼機にチルト式マルチロータを組み込んだ VTOL 機の開発を目的として、試作、風洞実験、飛行実験を行って設計指針を示す。

3. 研究の方法

実用的な VTOL 性能をもった無尾翼型 UAV を開発するために、大きく三段階に分けて、無尾翼機に Trirotor を組み込むための形状設計・製作、風洞実験による確認および無線操縦による飛行実験による設計へのフィードバック、チルト機構内蔵のマルチロータの制御装置の開発と飛行実験、流体解析により無尾翼機の空気の流れの可視化と安定性の評価を行なう。

無尾翼機の翼型はスタイルフォーム（断熱材）や EPP から熱線で切り出して、翼長 1.82m として作成する。翼型は無尾翼機に使用されているレフレックス翼 NACA M6 または MH60 を用いて作成する。本機体の問題点を洗い出すために、風洞実験での特性の把握が欠かせないが、研究協力者の協力によって 3m×3m の吹き出しを持つ低速風洞を使用して空力特性を把握して、CFD に確認と翼回りの流れの可視化を行う。

機体は Trirotor 組み込み用、クワッドロータにチルト機構を組み込んだ Quad-tilt-rotor VTOL 機第 1 号機と 1kg ペイロードを考慮した第 2 号機を試作して飛行実験を行い、飛行特性を評価する。

これらの結果を基に、実用的なチルト式 VTOL 機的设计指針を得る。

4. 研究成果

本研究において試作した機体は Trirotor 組み込み用無尾翼機（図 1）、クワッドロータにチルト機構を組み込んだ Quad-tilt-rotor VTOL 機第 1 号機（図 2）と 1kg ペイロードを考慮した第 2 号機（図 3）である。図 1 の Trirotor を組み込むための穴付きで、無尾翼機として安定した飛行が得られるかを確かめるために、無線操縦によりマニュアルでの飛行を行った。無尾翼機はこの機体で 5 機目であり、それまでの失敗経験に基づき試作を行ったことで、ある程度の風があっても安定して飛行できることを確認した。しかし、機体にタフトを取り付けて風洞実験と飛行実験により観察すると、大きな穴によって気流の乱れがあり、長距離長時間飛行を目的とする場合には不利である。また、無尾翼機の安定性を確保するには、20 度程度の後退角と重心より後方に垂直翼を取り付けることで、安定した飛行ができることが分かった。



図 1 穴付き無尾翼の試作機

図 2 には機体に大きな穴を持つ機体では実用的な VTOL 機は実現できないと考えて、クワッドロータを機体の外に配置することにして、すべてのプロペラがホバリングと水平飛行において推力を利用できるように、すべてのモータがチルトする機構を試作して組み込んでいる。この機体では自動飛行制御装置 Pixhawk に制御プログラム PX4 を採用しているが、無尾翼機に Quadrotor にチルト機構のある制御モデルが用意されていなかった。そこで、プログラムの構造を解析して、ミキサファイルの本機体に合わせることで新しいモデルを作成して再コンパイルして用いた。飛行実験ではホバリングから転換して水平飛行へ、水平飛行からホバリングに転換して着陸する一連の動作が可能であることを確認した。この機体を 3m×3m の低速風洞において空気力学特性を測定した。また、CFD による解析



図 2 Quad-tilt-rotor VTOL 試作機第 1 号機

結果と実験結果の一致が見られたことから、風洞実験では得られにくい機体表面の流れの可視化が可能となった。そこで、気流には機体後方への流れだけではなく、後退角に沿った翼先端への流れがあり、高迎角の時に翼端失速に陥ることがあるが、その対策として垂直翼がバウンダリーフェンスのような役割をしていることが分かった。



図3 Quad-tilt-rotor VTOL 試作機第2号

図3に1kgペイロードで飛行時間30分を目指して試作したQuad-tilt-rotor VTOL機第2号機を示す。この機体で最終的には一連の飛行を実現しているが、構造的な剛性不足による飛行安定性の問題が発生した。3kgに機体を浮上させるための15インチプロペラとモータが大きな振動源となり、無尾翼機のねじれ剛性が小さいことでホバリング時の不安定現象が発生したため、補強することにより改善したが、空気抵抗が増す方向になった。また、水平飛行時には制御平面として用いるエレボンの剛性不足からピッチングの現象が発生している。どちらの問題も剛性不足の問題であることから、実用的な機体とする場合には構造設計に注意を払う必要があることが分かった。

なお、これらの結果からVTOL機は固定翼機に比べてマルチロータによる振動発生源が分散するため、高剛性化、軽量化および振動対策が必要となることがわかった。今後はこの知見を先端ロボティクス財団のロボティクスチャレンジに生かして、実用化をめざして行く。

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 2件）

1. 著者名 Y. Takita	4. 巻 30
2. 論文標題 Creating a 3D Cuboid Map Using Multi-Layer 3D LIDAR with a Swing Mechanism	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 523-531
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2018.p0523	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 Y. Takita	4. 巻 Vol.29, No.4
2. 論文標題 Generated Trajectory of Extended Lateral Guided Sensor Steering Mechanism for Steered Autonomous Vehicles in Real World Environments	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 660 - 667
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2017.p0660	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 該当する

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 滝田好宏，新行内優
2. 発表標題 揺動機構付3D-LIDARとRTK-GPSを用いた測量システムの研究
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第25期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滝田 好宏，蓑星 友浩，榎谷 賢士，田口 正人
2. 発表標題 無尾翼機にQuad tilt rotorを有するVTOL UAVの空気抵抗低減に関する研究
3. 学会等名 第56回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新行内 優, 滝田 好宏
2. 発表標題 3D-LIDARに揺動機構を用いた測量システムの開発
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 滝田 好宏, ファウジ ヌルプラント, 袁星 友浩, 新行内 優, 樫谷 賢士
2. 発表標題 Tailless Quad Tilt Rotor VTOL UAVの開発 第1報: 飛行実験
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 袁星 友浩, 滝田 好宏, 樫谷 賢士
2. 発表標題 Tailless Quad Tilt Rotor VTOL UAVの開発 第2報: 無尾翼機の風洞実験とCFDによる評価
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新行内 優, 滝田 好宏
2. 発表標題 揺動機構を用いた3D-LIDARによる地表面地図作成システムの開発 — 反射鏡による俯角の拡張 —
3. 学会等名 日本機械学会D&D2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 滝田 好宏, ファウジ ヌルブランド, 袁星 智浩, 新行内 優
2. 発表標題 転換機構を有するVTOL UAVの研究 - Tailless Quad Tiltの飛行実験 -
3. 学会等名 日本機械学会D&D2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 滝田好宏, 櫻谷 賢士
2. 発表標題 VTOL 型UAV の開発 - 無尾翼機の穴の有無による空 力特性 -
3. 学会等名 日本機械学会MOVIC2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 滝田好宏
2. 発表標題 操舵式自律移動ロボット車両の屋外におけるSSM 軌道 誘導特性
3. 学会等名 日本機械学会MOVIC2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 滝田好宏, 新行内優
2. 発表標題 3D-LIDAR に揺動機構を用いた測量システムの研究
3. 学会等名 第35 回日本ロボット学会講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 滝田好宏
2. 発表標題 ロボットドライバーの研究第3報水陸両用車ARGOの実験走行
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 滝田好宏, 蓑星友浩, 櫻谷賢士
2. 発表標題 VTOL 性能を有するUAV の研究
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 滝田好宏, 蓑星友浩, 櫻谷賢士, 田口正人
2. 発表標題 VTOL 型UAV のための無尾翼機の研究 風洞実験 による特性評価
3. 学会等名 第55回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 蓑星友浩, 滝田好宏, 櫻谷賢士
2. 発表標題 VTOL 性能を有するUAV の研究 第5報無尾翼機 のCFD 解析
3. 学会等名 第18回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 滝田好宏, 新行内優, 蓑星友浩
2. 発表標題 つくばチャレンジ2017 における自律移動ロボットAR Skipper の走行実験
3. 学会等名 第18 回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 滝田好宏, 新行内 優, 蓑星 友浩
2. 発表標題 つくばチャレンジ2017 における防衛大学校情報工学科 ロボット工学研究室チームSkipper の取り組み
3. 学会等名 つくばチャレンジ2017 シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 滝田好宏, 新行内優
2. 発表標題 3D-LIDAR と揺動機構による平坦度評価システムの 研究
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第24 期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 滝田 好宏
2. 発表標題 3D-LIDARに揺動機構をもちいた高精細環境情報取得とその応用
3. 学会等名 応用物理学会第63回光波センシング技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滝田 好宏, 菘星 知浩, 榎谷 賢士
2. 発表標題 無尾翼機にQuad Tilt Rotorを組み込んだVTOL型UAVの積載量を考慮した設計
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滝田 好宏, 菘星 知浩, 榎谷 賢士
2. 発表標題 無尾翼機にチルトロータを持つVTOL型UAVの水平飛行における抗力低減
3. 学会等名 日本機械学会D&D2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滝田 好宏, 榎谷 賢士
2. 発表標題 1kgペイロードを考慮したTailless Quad Tilt Rotor 機の飛行実験
3. 学会等名 日本機械学会第16回MoViC2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 滝田 好宏	4. 発行年 2019年
2. 出版社 CQ出版	5. 総ページ数 7
3. 書名 トランジスタ技術 2018年2月号「最短コース&最短時間 UAVドローン・トランスポータ」	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----