

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02114

研究課題名（和文）マルチコプタの飛行限界の解明と推力ベクトル可変機構を活用した不安定領域の自律回避

研究課題名（英文）Analysis of Flight Limitations of Multicopters and Autonomous Avoidance of Unstable Regions Using Thrust Vector Control

研究代表者

安孫子 聡子 (Abiko, Satoko)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：40560660

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,840,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、模擬上昇気流下での飛行状態観測や壁面近傍での推力変化のPIV解析やCFD解析を実施し、マルチコプタの環境変化による飛行状態への影響を明らかにした。特に、単一プロペラ推力のオンボード計測システムを開発し、事前検証時と実飛行時の推力係数の違いを明らかにし、同影響を考慮した飛行制御への足がかりとなるシステムの構築を行った。また、制御系の向上のために、推力ベクトル可変機構への適応PID制御の適応を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、上昇気流下や壁面近傍でのマルチコプタの推力変化に着目し、その影響を明らかにすることで、狭隘空間や極端な風環境条件下での飛行制御への発展を行う研究である。レベル4での飛行が可能となったドローンの社会浸透が進むにつれて、今後ドローンに求められる役割がそれにとって厳しい環境もありうる。その発展に寄与する研究である。

研究成果の概要（英文）：This study carried out the flight performance of the multicopters in the imitated updraft, and PIV analysis and CFD simulations for thrust change of multicopters near the wall. In the study, onboard thrust measurement mechanisms were developed, and the difference between the thrust coefficient in flight and that in a priori evaluation is clarified. Besides, adaptive PID control is applied to the multicopter with vector thrust mechanisms to improve control performance in such environmental conditions.

研究分野：ロボット工学

キーワード：マルチコプタ オンボード推力計測 気流解析 適応PID制御

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、マルチコプタはインフラ点検や災害地観測等、利用拡大が進んできていた。一方、マルチコプタは固定翼機やヘリコプタのような単発ロータの回転翼機に比べ、機敏な動作が可能であることが利点である一方、突風等の予期せぬ風環境への対応が求められる。そのため、プロペラ数の増強や降下速度の制限等の運用によって安全面を確保していた側面がある。

一方、マルチコプタの機動性の向上を目指した機構設計論そのものの研究は精力的に行われているが、ロボティクス分野の知識が先行しており、空気力学を考慮した極限状態での飛行性能を解明している例はあまり見当たらなかった。申請者らは、そのような中、推力ベクトル可変機構を有する UAV の開発と飛行制御を実施してきた。同機体を用いることで、様々な風環境下での飛行性能の向上が期待されると考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、飛行条件や環境による風の影響を考慮した飛行制御を構築することを目指す。そのために、まずは、マルチコプタに上昇気流や突風外乱が生じた場合の不安定な飛行条件を明らかにする。その後、より安全な飛行のために、推力ベクトル可変機構を活用したマルチコプタの自律飛行を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、はじめに、マルチコプタへの風の影響に関する検証を行う。そのために、気流可視化実験の検討、数値流体解析、オンボード推力計測機構の開発と評価を行う。気流の可視化においては、飛行時の気流の可視化を検討し、オンボード気流発生と観測を試みる。また、壁面近傍におけるマルチコプタへの気流の影響を可視化による PIV 解析および数値流体解析、および模擬飛行環境下での力計測により検証する。さらに、飛行時の推力変化を計測するために、オンボード推力計測機構を開発する。その性能評価として加速度データとの比較、事前の地上での推力係数と飛行時の推力係数を比較する。

これらの解析と並行して、推力ベクトル可変機構を有するマルチコプタの制御性能向上に向けて適応 PID 制御の導入を行う。推力ベクトル可変機構を有するマルチコプタは任意の一定の姿勢を維持しながら位置制御を行ったり、一定の位置を保持しながら任意の姿勢制御をおこなったりすることが可能となる。一方、適応 PID 制御は、外乱に対して PID 制御パラメータを適応的に変化させることで応答性を向上させることが可能である。ここでは、位置・姿勢独立制御が可能な推力ベクトル可変機構を有するマルチコプタに対して、適応 PID 制御を導入することで、任意姿勢における応答性向上を目指す。

4. 研究成果

(1) オンボード気流可視化装置の開発と上昇気流環境下での気流可視化

図 1 にオンボード気流可視化装置を搭載したマルチコプタの外観と可視化実験時の様子を示す。ここでは、スモークワイヤ法を用い、煙を発生させプロペラ先端部の渦現象を可視化することを試みた。特に、上昇気流時における可視化を試みた。上昇気流時におけるプロペラ先端の渦情報が目視では確認することができたため、飛行時のマルチコプタ周辺の気流の様子を観測することが可能となった。一方で、気流の画像解析手法である PIV 解析をすることが可能なまでの煙の密度を担保することができなかつたため、スモークワイヤでの煙発生方法を改良することで、より解析可能な機構に今後発展させていく。

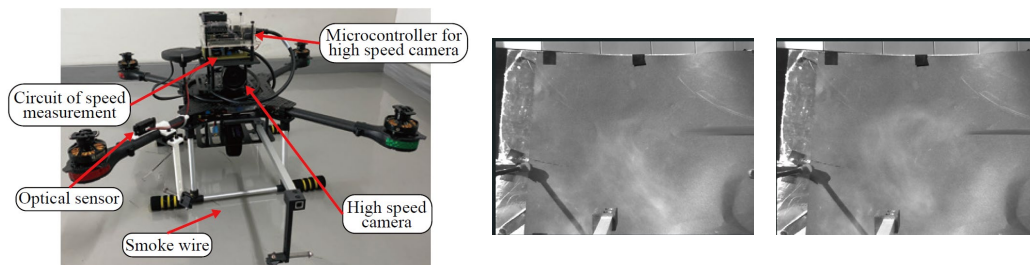


図 1 オンボード気流可視化機構と可視化実験

(2) 壁面近傍における気流の可視化、数値流体解析とマルチコプタへの影響

図 2, 3 に壁面近傍でのプロペラの回転によって生じる自己生成気流によるマルチコプタの影響の検証実験の様子を示す。ここでは、壁面との距離の違いによるプロペラ回転数一定の場合の推力変化やモーメント変化を計測した。6 軸力覚センサによる計測値によると壁面に近づくにつれ推力の低下、および壁面に対して機首下げ方向にモーメントが生じる現象が観測された。これら

の原因を気流の可視化と PIV 解析により壁面近傍では壁面近傍のプロペラへのニュウリュウソ幾度が大きくなることが確認された. 一方, プロペラ下方での気流速度変化は小さいため, この気流の流入速度の違いが推力に影響したと考えられる. 図 4 に示す数値流体解析により同様の条件を検証した結果, PIV 解析実験と同様に壁面近傍のプロペラへの流入速度が大きくなることが確認された. この影響は, 壁面近傍での圧力勾配の変化によるものであることが分かる.

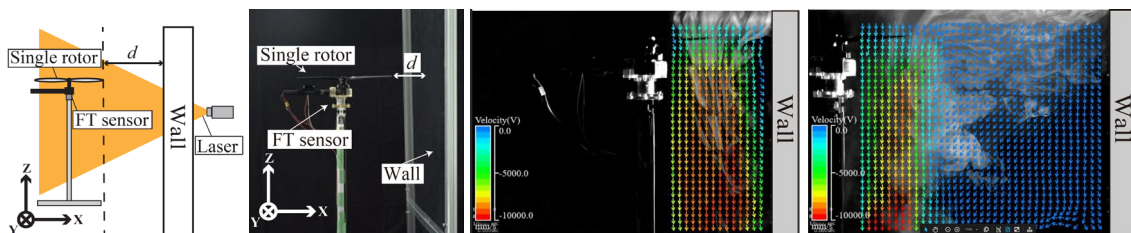


図 2 壁面近傍での気流の可視化と PIV 解析

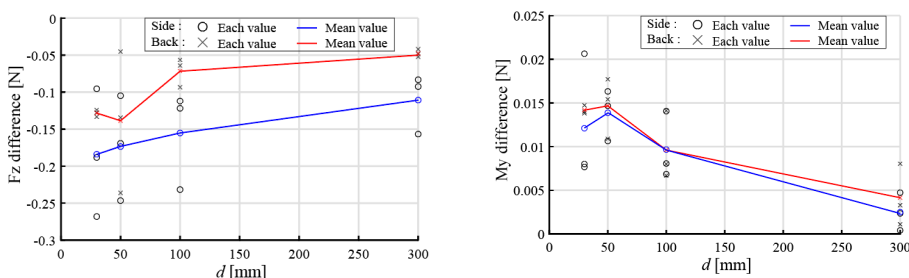


図 3 壁面近傍での気流による力変化

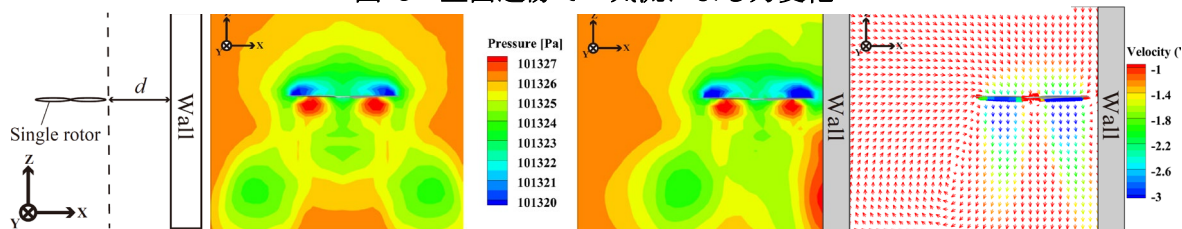


図 4 壁面近傍での気流の数値流体解析による圧力分布と気流速度

(3) オンボード推力計測機構と評価試験

図 5 にオンボード推力計測機構の構造を示す. ここでは, 並進可動部をモータ下部に設け, 可動部と固定部のあいだに感圧センサを設置することで, 感圧センサを挟み込む圧力差から推力を推定する機構を開発した. 地上でのキャリブレーションや基礎評価実験後, 飛行実験を行い, 実推力を計測することが可能であるシステムが開発できたことを示した. 今後, これらのセンサを搭載し, 実飛行時の予期せぬ急激な推力変化等の計測を行い, 飛行制御へ活用する.

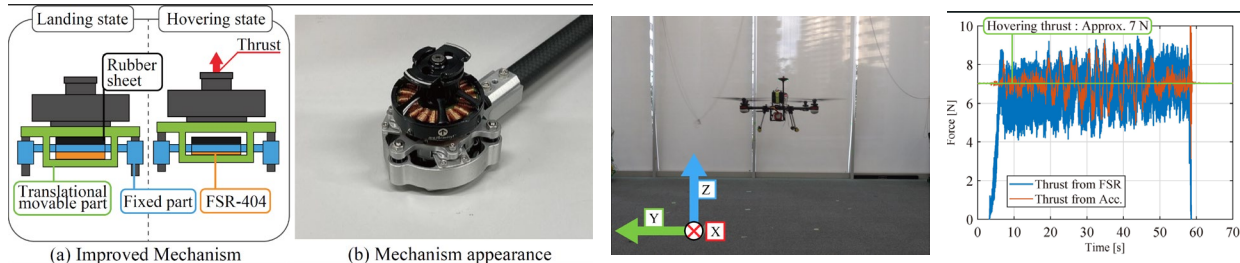


図 5 オンボード推力計測機構と評価試験

(4) 推力ベクトル可変機構を有する UAV の適応 PID 制御

本研究では, 外乱に適応的に対応可能な適応 PID 制御を推力ベクトル可変機構を有する UAV に導入した. 同 UAV は位置・姿勢の独立制御が可能な機体であるため, 位置・姿勢の PID 制御を基本とした制御則を導入している. そこで, 同制御パラメータを適応的に可変とすることで応答性の向上を図った.

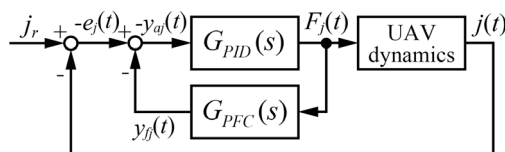


図 6 適応 PID 制御の枠組み

ここでは、位置制御に着目し、制御パラメータを可変とし、その応答性能を評価した。同アプローチは制御パラメータのチューニングへの応用も可能であり、開発時には制御パラメータのチューニングに適応PID制御を活用し、飛行時には突発的な外乱に対して応答するように適応PID制御を活用する枠組みとした。図6に適応PID制御の簡略した枠組みを示す。また、図7に飛行実験の様子、制御パラメータが変化している様子、および位置制御結果の一例を示す。適応PID制御を用いることで初期の錯誤的なチューニングパラメータのみを用いた際に比べ、応答性が向上する結果を得た。

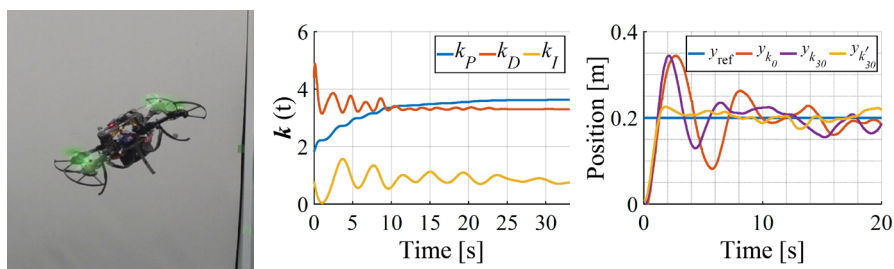


図7 推力ベクトル可変機構を有する UAV の適応 PID 制御による飛行実験

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 安孫子 聡子	4. 巻 3
2. 論文標題 ドローンの機構拡張とその飛行制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 293-296
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 無
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16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Satoko Abiko and Tomohiro Harada
2. 発表標題 Autonomous Flight of a Quad Tilt-Rotor UAV at Constant Altitude
3. 学会等名 23rd CISM IFToMM Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoyuki Magariyama and Satoko Abiko
2. 発表標題 Seamless 90-Degree Attitude Transition Flight of a Quad Tilt-rotor UAV under Full Position Control
3. 学会等名 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中涼, 安孫子聡子, 辻田哲平, 佐藤大祐
2. 発表標題 クアドチルトロータUAVの適応PID制御を活用した制御パラメータチューニング
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安孫子聡子, 國本瑛大, 辻田哲平, 佐藤大祐
2. 発表標題 プロペラ推力測定機構を有するマルチコプタUAVの推力係数の検証
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂爪 竣哉, 安孫子 聡子, 吉原 匠, 辻田 哲平, 山田 俊輔
2. 発表標題 壁面近傍におけるプロペラ周りの気流の数値流体力学解析
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 涼, 安孫子聡子, 辻田哲平
2. 発表標題 クアッドチルトロータ UAV の開発効率化のための RAD フレームワークの構築
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國本瑛大, 安孫子聡子, 吉原匠, 辻田哲平
2. 発表標題 マルチコプタのモータ独立制御のための推力測定機構の開発
3. 学会等名 第22回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉原匠, 安孫子聡子, 坂爪竣哉, 國本瑛大, 辻田哲平
2. 発表標題 壁面近傍におけるマルチコプタの安定飛行に向けた単一ロータ周りの気流の可視化
3. 学会等名 第22回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田素直, 安孫子聡子, 辻田哲平
2. 発表標題 マルチコプタのプロペラ周りの流れ場計測のためのオンボード気流可視化システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國本瑛大, 安孫子聡子
2. 発表標題 2軸チルト機構を有するクアッドロータUAVの任意姿勢における位置制御飛行
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂井 佑将, 安孫子 聡子
2. 発表標題 クアッドチルトロータUAVのシームレス90度姿勢繊維飛行の実飛行検証
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸田 泰三, 安孫子 聡子
2. 発表標題 2軸チルトメカニズムを有するクアッドロータUAVの開発と評価
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村松 拓実, 安孫子 聡子
2. 発表標題 壁面近傍における自己生成気流のマルチコプタUAVへの影響の実験的検証
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 曲山 智之, 安孫子 聡子
2. 発表標題 クアッドチルトロータUAVのLQIによる位置制御
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂井 祐将, 安孫子 聡子
2. 発表標題 クアッドチルトロータUAVのシームレス90度ロールアップホバリング制御
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸田 泰三, 安孫子 聡子
2. 発表標題 任意姿勢変化が可能な2軸の推力方向可変機構を有するUAVの飛行シミュレーション
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019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
研究 分 担 者	辻田 哲平 (Tsujiita Teppei) (40554473)	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)・システム工学群・准教 授 (82723)	

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
---------	---------