

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01409

研究課題名(和文) ロータフラップ角制御による超ロバストなスタビレス無人ヘリコプタの実現

研究課題名(英文) Development of a robust stabilizer-less unmanned helicopter based on rotor flap angle control

研究代表者

中西 弘明 (Nakanishi, Hiroaki)

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号：50283635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,100,000円

研究成果の概要(和文)：スタビレス機の飛行実験を実施し、低速飛行時と高速飛行時ではその挙動が異なることを明らかにした。その説明のため、ロータ空力特性計測装置を構築し、誘起速度およびその分布のモデルを構築し、それに基づいてロータ空力特性の推定ができることを明らかにした。さらに、地面や天井などにロータが接近するに現れる壁面効果に提案法を適用し、地面効果および天井壁効果の新たなモデルを構築した。フラップ角制御において、インクリメンタル法を組み合わせることにより、空力パラメータの不確かさに対してロバスト性が高い飛行制御系を構築した。また、スタビライザを有する場合へ提案法を拡張し、様々な不確かさに対するロバスト性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで無人ヘリコプタだけでなく有人ヘリコプタに関しても、その飛行制御においてロータフラップ角制御は実施されていない。そのために内在するダイナミクスを陰的に活用し、適応的かつロバストな振る舞いの創出を目指した。これにより適応的振る舞いの創出に関して重要な知見が得られた。輸送技術だけでなく、災害対応技術として、無人ヘリコプタの利用をさらに拡大するには、そのペイロードの増加、および、高対気速度制御技術の確立が不可欠である。本研究の成果は、無人ヘリコプタをスタビレス化することにより大型化するだけでなく、安定な高速飛行の実現のための基盤となることができる。

研究成果の概要(英文)：Flight experiments were conducted on a stabilizer-less unmanned helicopter, and it was revealed that the behavior of the helicopter differs between low-speed and high-speed flight. To explain this behavior, we constructed a rotor aerodynamics measurement system, built a model of the induced velocity distribution, and showed that the rotor aerodynamics can be estimated based on this model. Furthermore, the proposed method was applied to wall effects that appear when the rotor approaches the ground or ceiling, and new models of those effects were constructed. By combining the incremental method with the rotor flap angle control, a flight control system with high robustness against the uncertainty of aerodynamic parameters was constructed. The proposed method was extended to helicopters with stabilizers, and the robustness against various uncertainties was confirmed.

研究分野：システム制御工学

キーワード：無人ヘリコプタ スタビレス化 フラップ角制御

## 1. 研究開始当初の背景

現在の産業用無人ヘリコプタにはスタビライザと呼ばれる機構がロータシステムに装備され、安定性の増大がはかられている。しかし、スタビライザが存在するために、大幅な推力増加ができない。山岳地帯を飛行可能な自律無人ヘリコプタの開発および無人ヘリコプタの利用範囲を拡大するため、推力の大幅な向上と、運動性が向上したスタビライザを有さない機体 = スタビレス無人ヘリコプタの必要性が高まっている。スタビレス化には、ペイロードの変化、環境の変化に脆弱となるという難点があった。

## 2. 研究の目的

無人ヘリコプタは、スタビレス化により、外乱応答速度が増大し、その飛行安定性が悪化する。また、不確かさに極めて脆弱となるという困難さをもつ。現時点の規制を満たすように機体開発を進めると、スタビレス無人ヘリコプタの総重量変動幅は自重と同程度に達する。推力増加により、さらに飛行高度域が広がることから、スタビレス無人ヘリコプタの動作環境の変動は極めて大きい。本研究ではスタビレス無人ヘリコプタの運動特性の要はロータブレードのフラップ角であることに着目し、脆弱性の根源であるロータブレードのフラッピングの制御に世界で初めて取り組み、環境など様々な変動に対して超ロバストなスタビレス無人ヘリコプタを実現することを目的とする。このために、サブテーマ(1)ロータブレードのフラップ角推定機構、(2)フラッピングダイナミクスの散逸性による陰的制御、(3) 適応フラッピング制御に基づく超ロバスト性の実現 について研究を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) ロータブレードのフラップ角推定機構

ロータフラップ角を推定するため、ヘリコプタの操作入力や機体に働く力など動力学を基にした航法システムを構築する必要がある。これまでの研究で、ロータブレードのフラッピング運動の線形モデルを構築したが、フラッピング運動のタイムスケールが短いため、その角速度まで微小ではなく、非線形効果を考慮する必要がある。改良モデルの構築のために、レーザ変位計によりロータブレードのフラッピング運動を計測する。フラッピング運動は対気速度に依存するが風の速度の正確な測定は不可能である上に、スタビレス無人ヘリコプタの動作環境の不確かさが大きい。このため、観測データとモデルの統合には、ロバストデータ同化が必要となる。その際、そのタイムスケールが機体 IMU のサンプリング時間間隔と同程度であり、マルチセンサによる高サンプリングレート化やマルチサンプリングレート化が不可欠である。このため、一般化 Tellegen の定理を用いることにより、評価関数の一次微分情報だけでなく、二次微分情報も得る方法を適用し、解決を図る。

### (2) フラッピングダイナミクスの散逸性による陰的制御

ロータブレードの粘弾性より、フラッピングダイナミクスには消散性を有している。この消散性を活用し、フラッピングを陽に制御せずに、陰的に操る方式を採用する。その際、制御入力の変化分を出力する Incremental 法や Time Delay 法により不確かなパラメータへの依存度の軽減や機体運動との干渉によるフラッピング運動の共振を回避する制御系を構築する。また、逆ダイナミクス法を併用することによって、内部ダイナミクスによりフラップ角目標値へ追従させるだけでなく、所望の特性を実現する飛行制御系を構築する。

### (3) 適応フラッピング制御に基づく超ロバスト性の実現

サブテーマ(1)で構築した推定機構により得られるフラップ角情報に基づいて、フラッピング制御を考えるが、変動領域が大きいことから、固定的な制御では十分な成果を得ることは難しいと予想される。そこで、フラップ角と機体の振る舞いの変化を知覚し、適応的に振る舞いやロバスト性を変更する適応制御系を追加・併用することにより、制御系設計時の想定との差に対して適応する機能を付加する。このために、オンライン同定とサブテーマ(1)で挙げた一般化 Tellegen の定理により導出したハイブリッドシステムの随伴系を用いて、予測モデルに基づく制御系のオンライン最適化を適応的・効率的に行う手法を開発する。

## 4. 研究成果

### (1) ロータブレードのフラップ角推定機構

ロータブレードのフラップ角推定機構では、レーザ変位計測によりロータブレードのフラッピング運動を計測するシステムを開発し、飛行実験によりその検証を行った。その結果、ヘリコプタの飛行中に、ロータブレードだけでなくスタビライザブレードのフラッピング運動の計測にも適用できることを示した。また、これまで移動速度が低速であるという仮定を緩和し、高速移動におけるロータブレードフラップ角の運動方程式を導出した。それに基づいて、ロータに作用する空気力のモデル化を行い、高速移動における操縦・制御に重要となるローリングおよびピッチングモーメント係数を求めた。さらに、ヘリコプタの動力学を基にした航法システムを構築のために、系を連続時間システムと離散時間システムが複合するハイブリッドシステムとしてモデル化し、一般化 Tellegen の定理を適用し、観測データとモデルの同化を行うために必要なシステムの感度を求める方法を導出した。さらに、計算速度・効率の大幅な向上を目的としてシステムの二次感度を効率よく求める方法も導出した。

### (2) フラッピングダイナミクスの散逸性による陰的制御

ロータブレードのフラップ角を陽に用いない飛行制御系を構築する方法を提案した。従来のようにロータブレードのフラップ角を考慮せずに設計した制御系では、フラップ角の共振が原因となって、飛行が不安定化することを明らかにした。さらに、提案法をスタビレス化した機体だけでなく、スタビライザを有する産業用無人ヘリコプタに対して適用できるよう拡張する方法を提案した。スタビライザを有する場合、スタビライザのロック数がロータブレードと比較して小さいことが原因となって、スタビライザのフラップ角共振が問題となりやすいが、スワッシュサーボのダイナミクスが入力を帯域制限することにより適切に制御可能であることを明らかにした。これら構築した飛行制御系の制御特性やロバスト性をフライトシミュレータにより確認した。また、すでに提案したロータブレードのフラップ角を陽に用いない飛行制御系を構築する方法を速度制御あるいは位置制御の構築に拡張した。さらに、減衰比が極めて小さく、直接入力を作作用できない従来の産業用無人ヘリコプタのスタビライザのフラッピング運動に着目した。スタビライザのフラッピング共振は従来から問題となっていたが、その現象を抑制できる制御系を提案法により構築できることを明らかにした。これにより、フラッピングダイナミクスの散逸性を調整することも提案法により可能であることを明らかにし

た．

### (3) 適応フラッピング制御に基づく超ロバスト性の実現

様々な制御系およびその設計パラメータにおける機体の姿勢運動に対する風外乱の影響の変化を調べた．その結果，機体重量の公称値が主たるパラメータとなっており，それを適応パラメータとすることにより，風外乱に対するロバスト性を変更できることを明らかにした．さらに，サブテーマ(2)フラッピングダイナミクスの散逸性による陰的制御に関する研究成果と融合させ，すでに提案したロータブレードのフラップ角を陽に用いない飛行制御系を構築する方法とインクリメンタル法を組み合わせることにより，空力パラメータの不確かさに対してロバスト性が高い飛行制御系を構築した．また，開ループオブザーバを併用することにより，スタビライザを有する機体の飛行制御系へ提案法を拡張し，様々な不確かさに対する耐性を確認した．



図：スタビレス無人ヘリコプタの実験機

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Nakanishi Hiroaki, Kanata Sayaka, Goto Ryota, Shimomura Takashi	4. 巻 27
2. 論文標題 Modeling and experimental validation for ceiling wall effect on aerodynamic characteristics of a rotor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 734 ~ 742
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-022-00798-z	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14件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 中西弘明, 後藤僚太, 金田 さやか
2. 発表標題 ロータ空力特性における天井壁効果の運動量理論に基づく解析
3. 学会等名 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 西本 佳樹, 中西 弘明, 榎木 哲夫
2. 発表標題 産業用無人ヘリコプタの姿勢制御におけるスタビライザの振動抑制
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryota Goto, Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata, Takashi Shimomura
2. 発表標題 Experimental Validation of the Ceiling Wall Effect Model Based on Momentum Theory
3. 学会等名 The 13th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Nakanishi
2. 発表標題 Ceiling Wall Effect on Aerodynamic Characteristics of Rotor
3. 学会等名 The Fifth International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 義川 諒一, 中西 弘明, 金田 さやか
2. 発表標題 ロータ空力特性に対する垂直壁効果と鏡像法に基づくそのモデル化
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunsuke Ito, Taishi Ado, Taishi Ado, Sayaka Kanata, Hiroaki Nakanishi and Takashi Shimomura
2. 発表標題 Analysis of Aerodynamic Characteristics near the Ground for a Quadrotor Helicopter
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中西弘明, 浅井飛鷹, 佐藤彰
2. 発表標題 フラップ角制御に基づく産業用無人ヘリコプタの姿勢制御
3. 学会等名 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 中西弘明, 佐藤彰
2. 発表標題 産業用無人ヘリコプタの姿勢制御におけるスタビライザのフラッピング共振の抑制
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅井飛鷹, 中西弘明, 堀口由貴男, 榎木哲夫
2. 発表標題 逆ダイナミクス法による産業用無人ヘリコプタの姿勢角制御系構築
3. 学会等名 平成30年度計測自動制御学会・システム制御情報学会若手研究発表会講演論文集, D2-4, pp. 227-231, 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中西弘明
2. 発表標題 フラップ角制御によるスタビレス産業用無人ヘリコプタの飛行制御系
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会2017講演論文集, 1C4-08, pp. 760-765, 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中西弘明, 佐藤彰
2. 発表標題 スタビレス産業用無人ヘリコプタの姿勢制御の風外乱特性
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2018講演論文集, 1A1-C07, 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中西弘明, 佐藤彰
2. 発表標題 スタビレス産業用無人ヘリコプタとその姿勢制御系の開発
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, 225-1, 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中西弘明
2. 発表標題 自律型無人航空機とその応用
3. 学会等名 大学生グローバルベンチャーコンテスト2019ss in 京都 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中西弘明
2. 発表標題 自律型無人航空機とその応用
3. 学会等名 フィールドロボティクスの最前線 - 産業に貢献するロボットの開発とその先端制御技術 - (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本ロボット学会	4. 発行年 2023年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 1086
3. 書名 ロボット工学ハンドブック (第3版) 3.2.1 飛行ロボットの制御, 4.5.2 回転翼 分担	

〔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
---------	---------