

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03947

研究課題名(和文)スタビライザ効果の理解に基づくスタビレス無人ヘリコプタと飛行制御系の開発

研究課題名(英文) Development of Stabilizer-less Unmanned Helicopter and Flight Control System Based on Understanding of Stabilizer's Effect

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) 11,200,000円

研究成果の概要(和文)：推力の大幅な向上，効率・運動性の向上を目的として，スタビライザを有さない機体にする＝スタビレス化に関する研究開発を行った．このために，ロータブレード，スタビライザのフラップ角運動を含んだ水平運動運動モデルを構築し，スタビライザの役割を力学的に明らかにした．また，スタビレス機特有の運動であるカップリング応答には誘起速度の非一様分布が大きな影響をもつことを明らかにした．ロータブレードフラップ角の制御を含んだ逆ダイナミクス変換法により飛行制御系を構築する方法を提案した．数値シミュレーションや飛行実験により，スタビライザを搭載した機体と比較して，安定性，操縦容易性，運動性いずれも超越することができた．

研究成果の概要(英文)：For the purpose of improving the thrust, maneuverability and mobility, research to develop stabilizer-less (stabi-less) unmanned helicopters were carried out. We constructed a horizontal motion model including the flap angular motion of the rotor blade and the stabilizer, and clarified the role of the stabilizer in flight dynamics. It was revealed that the non-uniform distribution of the induced velocity has a large influence on the coupling response. We proposed a method of constructing flight control system by dynamic inversion method including control of rotor blade flap angle. By numerical simulation and flight experiments, we were able to transcend both stability, maneuverability and motility compared with the aircraft equipped with stabilizers. As the results, stabi-less unmanned helicopters became much more stable, operable and motile compared to unmanned helicopters with stabilizers.

研究分野：システム制御工学

キーワード：無人ヘリコプタ スタビライザ フラッピング運動モデル 飛行制御

### 1. 研究開始当初の背景

日本は産業用無人ヘリコプタについて先進的な技術をもち、農業用だけでなく福島原発周辺の観測活動など広く活用されてきている。しかし、2014年10月に発生した御嶽山噴火の際には、自律型無人ヘリコプタだけでなく無人ヘリコプタは用いられなかった。これは、標高1000mを超える高地では、産業用無人ヘリコプタを基に開発した自律型無人ヘリコプタは出力不足のため飛行できないためである。このため、山岳地帯を飛行可能な無人ヘリコプタの開発に関する要望が高まっている。

無人ヘリコプタのロータシステムにはスタビライザと呼ばれる小さな翼がつけられ、機体運動の安定性の向上が図られている。しかし、スタビライザによる重量だけでなく抵抗も増加し、飛行に大きなパワーが必要となっていた、また、スタビライザが存在するロータシステムでは、ロータブレード枚数を増加させることができず、ロータ推力の大幅な向上は困難であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、山岳地帯を飛行可能な自律型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拡大のために不可欠な推力の大幅な向上、また、効率や運動性の向上を目的として、スタビライザを有さない機体にする＝スタビレス化に関する研究・開発を行う。このために、(1)ロータブレードのフラッピングと機体運動モデルの構築に関する研究によりスタビライザの物理的・機械的効果を理解に基づき、(2)ダイナミクス空間航法システムによるロータフラッピング運動の推定、(3)スタビライザを超越する知的ロバスト適応飛行制御の実現に関して研究を行う。

### 3. 研究の方法

(1)ロータブレードのフラッピングと機体運動モデルの構築

産業用無人ヘリコプタにはベル・ヒラー方式のスタビライザが採用され、スタビライザブレードのフラップ角は、操作サイクリック入力とあるレバー比率で機械的にミキシングされ、ロータブレードへと伝わる。この特性を利用することにより、スタビライザの力学的特性と効果について明らかにする。まず、機体は準ホバリング中であると仮定し、ロータブレード、スタビライザの挙動と機体姿勢変動の相互作用を含んだ運動方程式を導出する。スタビライザ付の従来機による飛行実験を行い、導出したモデルの検証する。その際、レバー比率の変更などにより、スタビライザ効果の検証を行う。また、スタビライザのないロータシステムとロータフラッピング運動の可視化および測定用治具の試作を行い、安全のために機体を地上に固定し、導出したロータブレード、スタビライザブレードのフラッピング運動モデルの検証実験を行う。

(2)ダイナミクス空間航法システムによる

ロータフラッピング運動の推定

サブテーマ(1)において構築する運動方程式と操作入力、慣性計測値、GPS観測速度を複合化することにより、機体姿勢・速度だけでなく、ロータフラップ角の推定も行う航法システムを構築する。その力学モデルは高次かつ非線形性を有するため、非線形推定機構を適用する。

(3)スタビライザを超越する知的ロバスト適応飛行制御の実現

スタビライザでは不可能であった外乱抑制と操作性向上と両立できる制御系を構築し、公称状態にある機体に対して、制御系を設計することにより、スタビライザを超越する制御系を実装できることを明らかにする。しかし、推力増により、運用中の総重量変動幅は自重の2.5倍に達し、さらに飛行高度が広がることから、スタビレス化した無人ヘリコプタの動作環境の変動は極めて大きくなる。このため、ロバスト制御系の適用を図る。

### 4. 研究成果



図：試作したスタビレス無人ヘリコプタ

(1)「ロータブレードのフラッピングと機体運動モデルの構築」では、ブレード翼素理論に基づいて、ロータフラップ角運動を含んだ機体運動方程式を導出した。また、スタビライザのフラップ角の運動方程式も導出した。この際、従来研究と同様にロータブレードにおける誘起速度分布を一様と仮定して、運動方程式を導出した。ベル・ヒラー式スタビライザ付きの機体を用いて、飛行実験を実施し、飛行データと導出モデルとの比較を実施したところ、飛行実験に現れているカップリング応答をモデルは再現できないが、その他は良好な結果が得られた。さらに、試作したスタビレス機を用いて、パルス操舵を加える飛行実験を行った結果、極めて大きく時定数の早いカップリング応答が存在し、誘起速度分布を一様と仮定するモデルではそのカップリング応答を説明できないことを明らかにした。そこで誘起速度分布についての検討を進め、スタビレス機の挙動には誘起速度の非一様分布が大きな影響をもつことを明らかにした。また、導出した運動方程式の低次元化にはフラッピング運動の高周波成分を無視あるいは特異摂動法が有効であることを示した。さらに、風の影響を組み込んだ機体運動モデルを構築した。これにより、不規則風や定在風など様々な環境条件を考慮した飛行シミュレーションが可能となっただけでなく、スタビレス機の飛行制御系の設計基盤としても活用できる。高速度カメラを用い

てロータフラップ角およびスタビライザフラップ角の変化と機体姿勢角運動の時間遅れを観察し、モデルとの比較を行った。

(2)「ダイナミクスベース航法システムによるロータフラッピング運動の推定」では、低次元化したモデルに基づいて、無風時におけるブレードフラップ角の推定機構を構築したが、ジャイロなど機体に搭載しているセンサのサンプリングレートからは十分な精度を得られないことが明らかになった。そこで、レーザ変位計を応用することにより、ロータフラップ角を直接計測し、それをもとに機体状態の推定を行うシステムの試作し、飛行実験により検証を行った。さらに、ロータブレードフラップ角は機体の角加速度に比例するに着目し、角加速度推定についても検討し、複数の加速度計からなる角加速度推定機構を試作し、飛行実験により検証を行った。

(3)「スタビライザを超越する知的ロバスト適応飛行制御の実現」では、ロータブレードフラップ角の制御を含んだ逆ダイナミクス変換法により飛行制御系を構築する方法を提案した。しかし、元の運動モデルを元に設計した場合は理論的には動作するが、高階微分が必要であることおよびフラップ角目標値フィルタの応答速度が過大になることから、実機では動作しなかったため、サブテーマ(1)にて構築した低次元化モデルに提案法を適用して飛行制御系を構築した。その飛行制御系を用いて飛行実験を行ったところ、適切に機能するだけでなく、スタビライザを搭載した機体と比較して、安定性、操縦容易性、運動性いずれも超越することができることを明らかにした。これに対して、従来法のようにフラップ角の運動を準静的と仮定し、制御系を構築すると、フラップ角の共振が引き起こされ、制御結果が悪化することを明らかにした。さらに、ペイロードの変化にも着目した。提案手法により構築した制御系は、ペイロード変化にそれに対して、制御性能の劣化が小さく、ロバストな結果を与えることができることを、モデルに基づく解析だけでなく、飛行実験結果により実証した。

#### 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 3 件)

1. H. Nakanishi and H. Hashimoto: AR-Marker/IMU Hybrid Navigation System for Tether-Powered UAV, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 29, No. 1, pp. 76-85, 2018, doi:10.20965/jrm.2018.p0076
2. 佐藤彰, 中西弘明, 大川宏久: 低速度領域におけるスタビレス産業用無人ヘリコプタの運動特性, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 64, No. 4, pp. 236-243, 2016,

doi:10.2322/jjsass.64.236

3. 佐藤彰, 中西弘明, 大川宏久: 産業用無人ヘリコプタの動特性へのスタビライザの効果, 日本航空宇宙学会論文集, 第63巻, 2号, pp. 68-77, 2015, doi:2322/jjsass.63.68

[学会発表] (計 16 件)

1. 中西弘明: 自律型無人ヘリコプタの開発とその応用に関する研究, 航空機産業会セミナー「長野県の航空機産業と各分野の最新研究事例」, 2018
2. 中西弘明, 佐藤彰: 逆ダイナミクス法によるスタビレス無人ヘリコプタの速度制御, 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, IC6-11, pp. 853-858, 2017
3. 中西弘明, 庵智幸, 黒江康明, 金田さやか: あるクラスのサイバーフィジカルシステムのサンプリング周期感度解析法, 第60回自動制御連合講演会, SuC3-2, 2017
4. 佐藤彰, 中西弘明: 産業用無人ヘリコプタの低速飛行におけるスタビライザ効果, 第54回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋季大会, B04, 2017
5. 原田浩行, 中西弘明, 堀口由貴男, 榎木哲夫: ロータ空力特性における壁面効果, 第61回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 355-3, 2017
6. 中西弘明, 庵智幸, 黒江康明, 金田さやか: あるクラスのサイバーフィジカルシステムの感度解析とパラメータ最適化への応用, 第44回知能システムシンポジウム予稿集, B1-2, 2017
7. 黒江康明, 中西弘明, 金田さやか: あるクラスのサイバーフィジカルシステムの感度解析法, 第4回制御部門マルチシンポジウム予稿集, 2F1-3, 2017
8. 中西弘明: ヘリコプタ型飛行ロボットとマルチロータ型飛行ロボットシステム制御情報学会・計測自動制御学会主催 チュートリアル講座 2016 「飛行ロボット ~空の産業革命を支える技術~」, 2016  
無人ヘリコプタの自律飛行制御技術とその応用,
9. 中西弘明: 農業食料工学会 IT・メカトロニクス部会主催 「UAV やドローンを活用した次世代農業技術」, 2016
10. 中西弘明, 佐藤彰: スタビレス無人ヘリコプタの運動方程式とその低次元化, 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 2016 講演論文集, IH3-4, pp. 696-699, 2016
11. 中西弘明, 橋本寛之: テザー型 UAV のための AR マーカを用いた航法システム, 1P1-09a5, ロボティクスメカトロニクス講

演会 2016 講演論文集, 2016

12. 中西弘明, 佐藤彰: スタビレス無人ヘリコプタの開発, 計測自動制御学会 SI 部門学術講演会 2015 講演論文集, 1J2-3, 2015

13. 中西弘明, 橋本寛之: AR マーカーと IMU を用いた屋内用小型 UAV のナビゲーションシステム, 計測自動制御学会システム情報部門学術講演会 2015 講演論文集, pp. 197-200, 2015

14. 金田さやか, 中西弘明: Quadrotor Helicopter における地面効果の実験的評価, ロボティクスメカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2A1-F04, 2015

15. 中西弘明, 橋本寛之: 電動 UAV のテザー給電に関する検討, ロボティクスメカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2A2-G05, 2015

16. 佐藤彰, 中西弘明: 産業用無人ヘリコプタの利用技術, 日本航空宇宙学会第 46 期年会講演会, A01, 2015

[図書] (計 2 件)

1. 中西弘明: ロボット制御学, 3.4.2 ジャイロ, 加速度計, IMU, 3.5.5 GNSS 分担, 近代科学社, 2017

2. 中西弘明: 制御の事典: 編集委員代表(野波, 水野), 8.4 章無人航空機のための誘導制御のためのナビゲーション分担, 朝倉書店, 2015

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中西 弘明 (NAKANISHI HIROAKI)

京都大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 50283635

### (2) 研究分担者

( )

なし

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

なし

研究者番号:

### (4) 研究協力者

( )

なし