

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760185

研究課題名(和文)次世代型自律無人航空機設計論の構築に関する研究

研究課題名(英文)Research for construction of design theory of the next generation autonomous unmanned aerial vehicles

研究代表者

鈴木 智 (SUZUKI, Satoshi)

信州大学・繊維学部・助教

研究者番号：90571274

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自律無人航空機の新たな設計理論の構築に必要な知見を得るために、3つの研究を行った。1つ目が小型シングルロータ型無人ヘリコプタの自律制御、2つ目が同軸二重反転式ヘリコプタの運動解析と最適設計、3つ目が交差反転式4発ロータヘリコプタの運動解析である。種類の異なる小型ヘリコプタの自律制御、運動解析、最適設計を通して、機体の飛行安定性に大きく影響する機械パラメータの知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, three kinds of research were carried out in order to acquire fundamental knowledge required for construction of a new design theory of an autonomous unmanned aerial vehicle. In the 1st, the autonomous control of a small single rotor type unmanned helicopter was carried out. The 2nd is the motional analysis and an optimal design of a coaxial rotor type helicopter. The 3rd is the motional analyses of an intermeshing type quad rotor helicopter. Through these researches, it was able to acquire the fundamental knowledge of the mechanical parameters of the helicopter which influences the flight stability.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械力学・制御

キーワード：無人航空機 自律制御 最適設計 モデル予測制御 粒子群最適化

1. 研究開始当初の背景

近年、小型無人航空機技術が飛躍的な進化を遂げている。小型無人航空機は人が搭乗することなく飛行可能であり、且つ小型であるため安全性と利便性に優れており、多様な状況下で有人航空機の代替として利用されることが期待されている。そして現在、運用時のオペレータの負担軽減や効率化を目的として、小型無人航空機の自律制御に関する研究が多く行われている。申請者も小型無人航空機の自律制御に関する研究を数年に渡り行ってきており、それらの研究を行う中で、「現在の小型無人航空機の形状や構造等は自律制御を行う上で最適なものになっているのであろうか」という疑問を持った。現在の無人航空機は、多少の修正や改良はあるものの基本的に有人航空機をベースに設計・開発されている。有人航空機の設計は航空機力学と人間工学に基づいている。しかし無人機の場合は人の操縦ではなく自律制御によって飛行するため、これまでの人間工学に代わって制御工学の観点から機体を設計すべきと言える。以上の経緯から、有人航空機の機体設計論とは異なる考え方に基づく自律無人航空機に特化した機体設計論を構築するという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究は、自律無人航空機の機体設計に関する新しい方法論の確立を目的とする。近年、様々な分野において無人航空機が活躍しており、世界中でその自律制御に関する研究が行われている。しかし、機体設計に関してはいまだに有人航空機の設計論に基づいており、どのような無人機を設計すれば自律制御が行いやすいのかという議論まではなされていないのが現状である。本研究では、制御理論的観点から、自律無人航空機に特化した機体設計論の構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、各種無人ヘリコプタの数式モデルの導出と解析を行い、これにより安定性といった制御論的特性と機体各部の諸元の関係を求める。また、得られた数式モデルを用いて無人ヘリコプタの制御系設計を行い、自律化する。飛行試験によって制御性能の評価を行い、機体特性に関する知見と統合することで、対象機体の自律制御のしやすさを決定付ける要素を明らかにする。具体的には、シングルロータ型ヘリコプタ、同軸二重反転式ヘリコプタ、そして、交差反転式4発ロータヘリコプタの3機の無人ヘリコプタで共通する要素を見つけ、自律無人航空機設計論構築の基礎的な知見を得る。

4. 研究成果

- (1) 小型シングルロータ型ヘリコプタの自律制御

本研究の開始時点において既に自律制御がなされていた小型シングルロータ型ヘリコプタに関して、より高度な自律制御の実現を目指した研究を実施した。具体的には、障害物や他の機体との衝突回避を考慮した誘導制御系を非線形モデル予測制御 (Nonlinear Model Predictive Control: NMPC) によって実現した。衝突回避問題をシステムの制約条件として NMPC に導入することで衝突回避を実現しつつ、任意の地点にヘリコプタを誘導する制御系を構築した。構築した誘導制御系の検証を行うため、ロータ径 30cm 程度の小型ヘリコプタを制御対象として、図 1 に示す屋内実験システムを構築し、制御実験を行った。実験結果を図 2 に示す。図の中央部、ヘリコプタの飛行経路上に障害物が配置されており、本来であればヘリコプタは障害物に衝突する(破線)。しかしながら MPC を用いることでヘリコプタが障害物を避けて飛行し、衝突を回避することができた(実線)。

また、構築した NMPC を複数機の小型ヘリコプタの衝突回避へと拡張した。複数のヘリコプタが会合した際に無駄のない軌道で衝突回避を行うため、各機体間の相対位置ベクトルに関する制約を新たに NMPC に導入した。4 機のヘリコプタの会合のシミュレーション結果を図 3 に示す。各ヘリコプタが衝突を回避しつつ目標地点に収束していることがわかる。

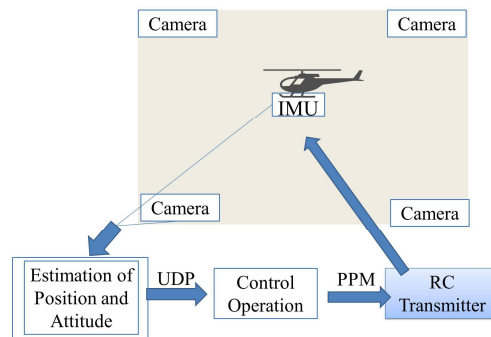


図 1 実験システム

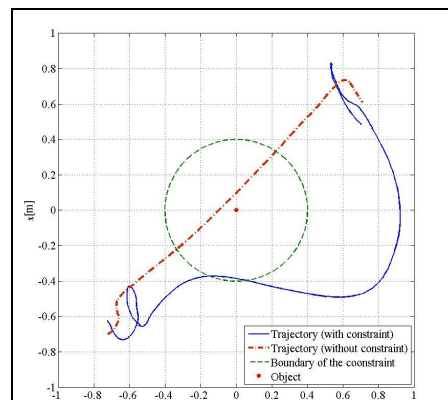


図 2 制御実験結果

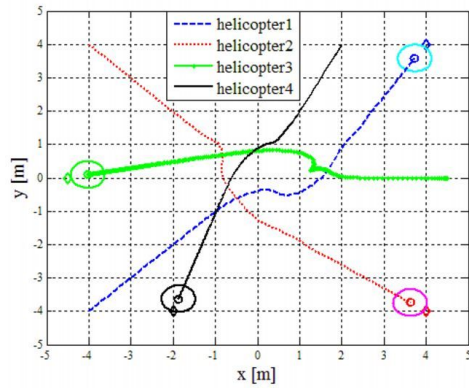


図3 複数ヘリコプタの衝突回避

(2) 同軸二重反転式ヘリコプタの運動解析と最適設計

図4に示す固定ピッチ同軸二重反転式ヘリコプタを対象として、運動解析と機体パラメータの最適設計に関する研究を実施した。

はじめに、当該ヘリコプタの運動を精密に再現する数学モデルをマルチボディダイナミクスとロータ空気力学の知見を利用して導出した。当該ヘリコプタを図5に示すように複数の剛体から構成されるシステムであるとしてモデル化し、マルチボディダイナミクスの一手法である速度変換法を用いて運動方程式を導出した。その際、ヘリコプタに加わる外力項に関しては同軸二重反転ロータの空気力学解析(図6)を用いて求めた。導出した数学モデルをコンピュータ上でシミュレーションできる環境を数値解析ソフトウェアである MATLAB を用いて構築し、構築したシミュレーション環境を用いた基礎的な運動解析を行った。



図4 固定ピッチ同軸二重反転式ヘリコプタ

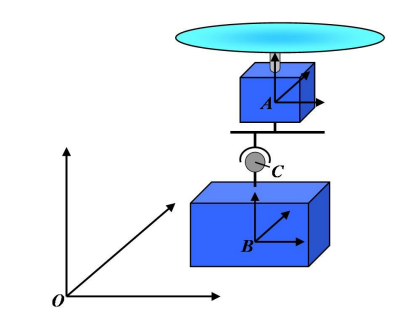


図5 ヘリコプタモデル

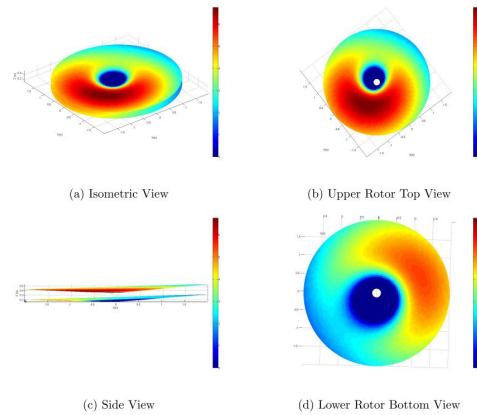


図6 同軸二重反転ロータの空気力学解析

この運動解析の結果、ロータブレードの剛性がヘリコプタの飛行安定性や巡航速度に対して大きな影響を持つという知見を得ることができた。

続いて、導出した数学モデルと多点数値解析手法である粒子群最適化法(Particle Swarm Optimization: PSO)を組み合わせることによって、所望の性能を実現するために必要な機体パラメータを自動的に決定する最適設計手法を提案し、シミュレーション環境を構築した。構築した環境を用いた例題として、当該ヘリコプタの巡航速度を最大化する機構パラメータの最適化に関するシミュレーションを行い、提案した最適設計手法の有効性を確認した。この最適設計手法は今後の自律無人航空機設計論の構築において中心となる技術である。

(3) 交差反転式4発ロータヘリコプタの運動解析

タンデムロータ型ヘリコプタと交差反転式ヘリコプタの特徴を併せ持つ新たなコンセプトの無人ヘリコプタである交差反転式4発ロータヘリコプタ(図7)の飛行特性を明らかにするために、当該ヘリコプタの運動解析を実施した。

固定ピッチ同軸二重反転式ヘリコプタ同様に、ヘリコプタを複数の剛体から構成されるシステムであるとしてモデル化し、運動方程式の導出を行った。図8に当該ヘリコプタのモデルを示す。



図7 交差反転式4発ロータヘリコプタ



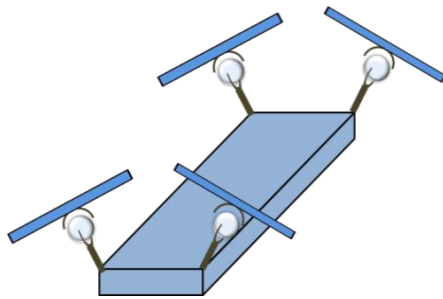


図 8 交差反転式 4 発ロータヘリコプタモデル



図 9 飛行実験風景

速度変換法を用いてヘリコプタの運動方程式を導出し、各ロータのフラッピング運動を考慮した数学モデルを得た。また、導出した数学モデルのパラメータ同定を行うための飛行データ収集実験を行った(図 9)。

導出した数学モデルを用いたシミュレーション環境を構築し、基礎的な運動解析を実施した結果、ロータのフラッピング運動が機体の安定性に対して大きく影響することがわかった。この結果として、各ロータの径や取り付け位置、取り付け角度等を最適化することで新たな無人ヘリコプタの設計を行うことができると考えている。

以上の 3 つの研究で得られた結果より、最適化をキーワードとしたより高い自律性能を有する無人航空機の設計方法を今後確立していく予定である。

#### 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)

Satoshi Suzuki, Yohei Fujisawa, Mikio Nakamura, Kojiro Iizuka and Takashi Kawamura, “Motion Analysis of Intermeshing Quadrotor Helicopter,” in Journal of Unmanned System Technology, 査読有, 2014. (in press)

Takahiro Ishii, Satoshi Suzuki, Gennai Yanagisawa, Kazuki Tomita and Yasutoshi Yokoyama, “Multi-body Dynamics Modeling of Fixed-Pitch Coaxial Rotor

Helicopter,” in Journal of Unmanned System Technology, 査読有, Vol. 1, No. 1.  
Satoshi Suzuki, Takahiro Ishii, Nobuya Okada, Kojiro Iizuka and Takashi Kawamura, “Autonomous Navigation, Guidance and Control of Small Electric Helicopter,” in International Journal of Advanced Robotic Systems, 査読有, Vol.10.

#### 〔学会発表〕(計 12 件)

Yoshihiko Aida, Satoshi Suzuki, Yohei Fujisawa, Kojiro Iizuka, Takashi Kawamura and Yuichi Ikeda, “Collision-Free Guidance Control for Multiple Small Helicopters,” in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation 2014, PaperID: WeC03.5, Hong Kong, China (May31-June7, 2014)

龍野 雅裕, Sigh Puneet, 鈴木 智, 柳澤源内, 横山 保俊: 固定ピッチ同軸二重反転式ヘリコプタの最適設計, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス講演会 2014, 平成 26 年 5 月 27 日

相田 佳彦, 藤澤 陽平, 鈴木 智, 飯塚浩二郎, 河村 隆, 池田裕一: 通信制約下での衝突回避を考慮した複数 UAV の誘導制御, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス講演会 2014, 平成 26 年 5 月 27 日

Yohei Fjisawa, Satoshi Suzuki, Mikio Nakamura, Kojiro Iizuka and Takashi Kawamura, “Motion Analysis of Intermeshing Quadrotor Helicopter,” in Proceedings of International Conference on Intelligent Unmanned Systems 2013, PaperID: ICIUS-2013-234, Jaipur, Rajasthan, India (September25-27, 2013)

藤澤 陽平, 鈴木 智, 中村 幹男, 飯塚浩二郎, 河村 隆: 交差反転式 4 発ロータヘリコプタのモデリング, 第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム, 平成 25 年 8 月 29 日

藤澤 陽平, 鈴木 智, 中村幹男, 石井 崇大, 岡田 伸也, 飯塚 浩二郎, 河村 隆: 交差二重反転式 4 発ロータヘリコプタの運動解析, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス講演会 2013, 平成 25 年 5 月 23 日

石井 崇大, 鈴木 智, 河村 隆, 岡田 伸也, 藤澤 陽平: 衝突回避を考慮した小型無人ヘリコプタの誘導制御, 第 13 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, 平成 24 年 12 月 20 日

Satoshi Suzuki, “Automatic Take-off and Landing Control for Small Unmanned Helicopter,” in Proceedings of International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications

2012, PaperNo: 67, Gwangju, Korea  
(December 16-18, 2012)

Satoshi Suzuki, Takahiro Ishii, Gennai Yanagisawa, Kazuki Tomita and Yasutoshi Yokoyama, "Novel Mechanical Design Method for Fixed-pitch Co-axial Rotor Unmanned Helicopter," in Proceedings of International Conference on Intelligent Unmanned Systems 2012, PaperID: s-s-2208/1, SIM University, Singapore (October 22-24, 2012)

Satoshi Suzuki, Takahiro Ishii, Gennai Yanagisawa, Kazuki Tomita and Yasutoshi Yokoyama, "Modeling and Motion Analysis of Fixed-pitch Co-axial Rotor Unmanned Helicopter," in Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2012, PaperID: WedBT8.2, Vilamoura, Algarve, Portugal (October 7-12, 2012)

石井 崇大, 鈴木 智, 柳澤 源内, 富田 一輝, 横山 保俊:ロータフリップング運動を考慮した同軸二重反転式ヘリコプタのモデリング, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2012, 平成 24 年 9 月 25 日

石井 崇大, 鈴木 智, 柳澤 源内, 富田 一輝, 横山 保俊:同軸二重反転式無人ヘリコプタの運動モデルの導出と運動解析, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス講演会 2012, 平成 24 年 5 月 29 日

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

鈴木 智 (SUZUKI, Satoshi)

信州大学・繊維学部・助教

研究者番号 : 90571274