

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	マルチロータ型 UAV におけるホバリング可能性の幾何学的解析とロータ故障にロバストな構造設計
Title(English)	Geometric Hoverability Analysis and Robust-Structure Design against Rotor-Failure for Multirotor UAVs
著者(和文)	持田峻佑
Author(English)	Shunsuke Mochida
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12534号, 授与年月日:2023年9月22日, 学位の種別:課程博士, 審査員:三平 満司,塚越 秀行,山北 昌毅,畑中 健志,石崎 孝幸
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12534号, Conferred date:2023/9/22, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	システム制御 システム制御	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	持田 峻佑		審査員主査： Chief Examiner	三平 満司

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

<p>本論文では、ある構造のマルチロータ型無人航空機 (UAV) について、空中での静止 (ホバリング) を維持するための能力である、ホバリング可能性の有無を幾何学的に解析する手法を提案する。また、提案した幾何学的解析手法を応用し、新構造の提案や構造最適化に取り組む。本論文は全 7 章から構成され、各章の概要は以下の通りである。</p> <p>第 1 章「序論」では、はじめに本論文の研究背景として、マルチロータ型 UAV のホバリング可能性解析を行う意義や幾何学的解析に取り組む理由を、関連研究に触れながら述べる。また、本研究の貢献や本論文の構成について説明する。</p> <p>第 2 章「マルチロータ型 UAV のモデル」では、本論文で扱うマルチロータ型 UAV の数式モデルを導出し、ホバリング可能性の定義やロータ故障に対するロバスト性の定義を行う。剛体力学に基づき、マルチロータ型 UAV の動力学モデルを運動方程式によって記述する。このときに、機体重心に生じる一般化力がロータ推力の線形変換によって記述されることを示し、この線形変換を表す行列によってマルチロータ型 UAV の構造を定義する。導出した運動方程式に基づき、機体の位置・姿勢・速度・角速度を状態、ロータ推力を入力とした非線形状態方程式を導出し、その局所制御性によって、マルチロータ型 UAV のホバリング可能性およびロータ故障に対するロバスト性を定義する。</p> <p>第 3 章「ホバリング可能性の幾何学的解析法」では、ホバリング可能性の幾何学的解析手法の導出に取り組む。まず、第 3 章で定義されたホバリング可能性の条件が、構造を定義する行列のみに関する同値な条件で判定できることを示す。さらに、導出した行列のみに関する条件に対して、同値な範囲で変形を施すことで、凸包を用いた条件に変換する。この凸包はマルチロータ型 UAV の構造によって決まる凸多面体になっており、3 次元空間にこの凸多面体を描画することでホバリング可能性の幾何学的解析が可能となる。また、傾斜ロータを持たない平面構造に対して、ロータ配置によって決まる凸多角形 hoverable region と機体重心の位置を用いて、機体座標系上に直接描画可能な幾何学的手法でホバリング可能性を解析できることを示す。</p> <p>第 4 章「ロータ故障に対するロバスト性解析と新構造の提案」では、提案したホバリング可能性の幾何学的解析手法に基づき、ロータ故障に対するロバスト性の解析や新構造の提案を行う。ロータ故障に対するロバスト性の解析では、幾何学的解析に基づき、ロータ故障に対するロバスト性を定量的に評価するための評価指標 full robustness margin (FRM) を提案する。対称傾斜ヘキサロータの各ロータ傾斜角に対する FRM を数値的に解析し、ロータ傾斜角とロータ故障に対するロバスト性の関係について考察する。また、hoverable region の性質に基づき、どのロータ故障に対してもロバストであるような平面構造ペンタロータが存在しないことの幾何学的証明や平面構造ヘキサロータのロータ故障に対するロバスト性の解析例を示す。新構造の提案では、ホバリング可能性の幾何学的解析に用いる凸多面体や hoverable region の性質に着目することで 2 種類の構造を提案する。一つ目の構造はすべてのロータが時計まわりに回転するが、傾斜ロータによってホバリング可能となるクアドロータ構造である。二つ目の構造はどのロータ故障に対してもロバストであり、かつロータ同士が重なり合わないよう配置できる平面構造ヘキサロータであり、2Y ヘキサロータと名付ける。</p> <p>第 5 章「運動性能とロータ故障に対するロバスト性を考慮した構造最適化」では、構造がどのロータ故障に対してもロバストであることを保証した上で運動性能を最大化する構造最適化を行う。対称傾斜ヘキサロータのロータ傾斜角の設計問題に対して、運動性能の評価指標を最大化すべき評価関数として、FRM が所望の値以上になるという制約を加えた最適化問題を定式化する。運動性能の評価指標に全方向への加速のしやすさを表す動的操縦度 (DMM) を用いて最適化を行った場合の最適化結果を示すことで、構造がロータ故障に対してロバストである範囲で運動性能が最大化されていることを確認する。つぎに、平面構造マルチロータ型 UAV のロータ配置の設計問題に対しても、同様の最適化問題を定式化する。これについても、DMM を評価関数として、平面構造ヘキサロータに対してヒューリスティックな最適化手法を適用することで、2Y ヘキサロータに近い構造が最適解として得られていることを確認する。</p> <p>第 6 章「実機検証」では、hoverable region を用いたホバリング可能性の解析手法や提案した 2Y ヘキサロータの構造が実機においても有効であることを実験により検証する。まず、実機に実装された制御則やホバリング実験を行うための実験システムについて説明する。標準的なヘキサロータから機体重心がずらされたヘキサロータを用いて、一つのロータを止めても残りの 5 個のロータでホバリングできるかを検証する実験と、2Y ヘキサロータを製作し、どのロータ故障後も残りの 5 個のロータでホバリングできるかを検証する実験を行うことで、提案手法および提案構造が実機に対しても有効であることを確認する。</p> <p>第 7 章「結論」では、本論文の結論を述べ、今後の研究課題について論じる。</p>

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	システム制御 システム制御	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	持田 峻佑		審査員主査： Chief Examiner	三平 満司	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This dissertation presents a geometric method to investigate the ability of a multirotor unmanned aerial vehicle (UAV) to achieve static hovering, i.e., hoverability. This study also focuses on the analysis of hoverability even after one rotor-failure, i.e., rotor-failure robustness, finding novel structures and optimization of a structure to maximize maneuverability under ensuring rotor-failure robustness against any rotor failures, i.e., full robustness.

First, a geometric method for hoverability analysis is developed for a multirotor UAV with any number of rotors, arrangements of rotors, and tilt-angles. Hoverability is defined by local controllability of the nonlinear state equation of a multirotor UAV whose structure parameters are number, positions, tilt-angles, and counter-torque-constants of rotors. This definition leads to equivalent conditions using the polytope determined by the structure parameters. Then, the hoverability is analyzed by a simple geometric way such as by drawing the polytope.

Secondly, the geometric analysis is applied to rotor-failure robustness, designing novel structures, and optimizing structure design. The presented geometric method for hoverability analysis proposes a quantitative measure to evaluate rotor-failure robustness. The analysis examples for rotor-failure robustness are given by analyzing the relationship between rotor-failure robustness and the design parameters of hexarotor. The geometric method also provides the relationships between hoverability and structure parameters. The two types of novel structures are proposed by using the relationships so as to develop the structures with hoverable or full robustness. Regarding proposing the optimization scheme, the optimization problem to design the structure is formulated as the maximization of an evaluation function for maneuverability of the structure under the constraint of full robustness. The constraint is formulated by the proposed quantitative measure for full robustness. The optimal solutions show the structure with high manipulability ensuring full robustness by using the manipulability measure as the evaluation function.

Finally, experimental validations are performed to verify the effectiveness of the geometric analysis on actual platforms. The two types of hexarotor are developed and tested by hovering experiments with one rotor stopped to confirm their rotor-failure robustness.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).