

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)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	持田 峻佑	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	三平 満司	教授	石崎 孝幸	准教授
	審査員	塚越 秀行	教授		
		山北 昌毅	准教授		
	畑中 健志	准教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「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」と題し、全7章から構成されている。

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 が空中での静止 (ホバリング) を維持する能力である、ホバリング可能性を解析する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ている。現在主流のマルチロータ型 UAV は劣駆動性やロータ故障に対する脆弱性が欠点であり、それらを克服する新しい構造の開発に伴い、新構造のホバリング可能性を解析する必要があると主張している。

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っている。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際に、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 (ロータ配置・反トルク係数・ロータ傾斜角) を定義している。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、その局所可制御性によって、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している。

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を提案している。まず、第2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導出している。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している。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する手法を提案している。

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を提案している。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) を提案している。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している。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している。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種類の構造を提案している。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ッ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ている。

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っている。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している。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可操作度 (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している。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している。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ることを確認している。

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している。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した後、二つの実験例を示している。一つ目は機体重心を中心からずらしたヘキサロータがある特定の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ことを検証する実験であり、二つ目は 2Y ヘキサロータが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ことを検証する実験である。これらにより、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している。

第7章「結論」では、本論文の貢献についてまとめ、今後の研究課題について述べている。

以上を要するに、本論文は傾斜ロータを持つ構造を含めたマルチロータ型 UAV について、ホバリング可能性を幾何学的に解析する手法を提案することでホバリング可能性・ロータ故障に対するロバスト性の定量的指標の提案、新構造の提案、運動性能とロータ故障に対するロバスト性の双方を考慮した構造最適化手法を提案し、それらを実験により検証するもので、工学上・工業上の貢献が大きい。よって、博士（工学）の学位論文として十分価値のあるものとして認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」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。