

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Joint Optimization of Structure and Control for Fully Actuated UAVs Based on Value Function Minimization
著者(和文)	田所祐一
Author(English)	Yuichi Tadokoro
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11423号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:三平 満司,藤田 政之,井村 順一,山北 昌毅,早川 朋久
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11423号, Conferred date:2020/3/26, 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	田所 祐一	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	三平 満司	教授	早川 朋久	准教授
	審査員	藤田 政之	教授		
		井村 順一	教授		
山北 昌毅		准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は, "Joint Optimization of Structure and Control for Fully Actuated UAVs Based on Value Function Minimization" と題し, 英文 6 章から構成されている。

第 1 章 Introduction では, 論文の背景として, 制御システムの種々の性能は制御則のみではなくプラントの設計によっても影響を受けることを述べている。そのようなシステムの一例として全駆動マルチロータ UAV を取り上げ, その有用性とタスクに応じたアクチュエータ配置設計の必要性を主張している。この目標の達成のために, 本論文では最適制御問題の解である価値関数の最小化をプラントパラメータを設計することで実現すると述べている。

第 2 章 Preliminaries では, UAV の動力学の基礎となる剛体運動を導入している。さらに, 3 次元空間内の位置・姿勢の集合を表わす特殊ユークリッド群 SE(3) のパラメータ化と数学的な公式の紹介を行っている。つぎに, 非線形最適制御の基礎として, Hamilton-Jacobi-Bellman 方程式とモデル予測制御に基づく 2 つの解法について述べている。最後に, 本論文の主題である構造・制御の同時最適化の問題設定の定式化を行っている。

第 3 章 Fully Actuated Hexarotor UAV では, 3 次元空間内のすべての方向・軸まわりに力・トルクを出力できる全駆動性を有する飛行ロボットである, 全駆動ヘキサロータ UAV の力学モデルを扱っている。導出したモデルを利用して, 剛体に加わる力とロータの性質から, 非平面状にロータが配置された構造を, 重心に加わる力・トルクの変化なしに平面構造に変換できることを示している。この変換によって, 力・トルクに関する議論においては平面構造のみを考えるだけで十分となることを示している。つぎに, 全駆動性の指標としてヘキサロータに対する動的可操作性を定義し, ロータの配置・傾き角の変化に対する解析を行っている。この解析によって導かれる, 不変性・並進回転成分の分離という 2 つの性質から, 動的可操作性が機体そのものの全駆動性を表わす指標として適していることを示している。最後に, 全駆動ヘキサロータを用いた実験システムの概要について述べ, 予備実験によって製作した機体の全駆動性を確認している。

第 4 章 Analytic Optimization Method では, 第 2 章で述べた問題設定に基づいて, 解析的に構造・制御の同時最適化を行う手法を提案し, 第 3 章で述べた全駆動ヘキサロータに対してこれを適用している。主結果を示す前に, 一般の線形システムに対する LQ 最適制御の解に基づいたプラントパラメータの最適化を考えることで, 解析的手法の必要性, 有用性と限界について述べている。つぎに, SE(3) 上の PD 制御に基づく SE(3) 上の 2 次システムに対する一最適制御手法を提案している。この最適制御手法について, 目的関数の最小値を与える価値関数とそれに対応する最適制御入力が解析的に与えられるという特徴を示している。さらに, 求められた価値関数をすべての初期値に対して最小化することを考え, この方針に基づく全駆動ヘキサロータの最適設計が, 動的可操作性最大化に相当することを示している。最後に, 数値例とシミュレーションにより提案制御則と設計の有用性を確認している。

第 5 章 Numerical Optimization Method では, より一般のシステムや目的関数への適用を目指して, 構造・制御の同時最適化の数値解法を提案している。まず, 剛体運動の数値的な最適制御手法を考えるため, SE(3) 上のシステムの種々の離散化手法について比較・検討を行っている。本論文では, SE(3) の Cayley map に基づく幾何学的積分器を利用し, 剛体運動の厳密な離散化手法を提案している。この離散化手法に対して, 状態の長時間の時間発展や目的関数の勾配を少ない計算量で求められるという性質を示し, 最適制御問題の高速解法に応用している。つぎに, 低コストな組み込みコンピュータ上でのシミュレーションを通して, 提案する最適制御手法が実機上で実時間動作可能であることを実証している。さらに, この高速な剛体運動の最適制御手法を利用して, 価値関数最小化に基づくプラントパラメータの数値的最適化手法を提案している。この手法では, 指定した初期値集合に対して目的関数の平均値を最小化することで, 最適なパラメータを求めている。この手法を利用して, 3 つの異なる制御タスクに対する全駆動ヘキサロータの設計の数値例を示している。最後に, 実機実験により提案する実時間最適制御手法とパラメータ最適化手法の有用性を検証している。

第 6 章 Conclusion では, 本論文の貢献についてまとめ, 今後の課題・展望についてまとめている。

以上を要するに, 本論文は全駆動 UAV に適用可能な解析的・数値的最適制御手法と, その最適制御のコストに

基づいてプラントパラメータを最適に設計する方法を提案している。本論文では、SE(3)上の2次システムの最適制御問題について、従来示されていなかった解析的な特殊解を示しているほか、計算コストを改善した実用的な非線形モデル予測制御器を提案し、実験でその有用性を示している。また、これらの最適制御則と同時に最適設計を行う方法についても述べており、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。