

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04344

研究課題名（和文）卓越した飛行能力を有する小型無人航空機の設計論構築に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Design Theory for Small UAVs with Outstanding Flight Capability

研究代表者

鈴木 智（Suzuki, Satoshi）

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90571274

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、飛行生物のように安定して飛行可能な卓越した小型無人航空機の設計・制御方法を提案した。提案する非平面マルチロータヘリコプタの機体最適設計手法とロバスト制御系設計手法を用いてハチドリ飛行を模したPeg-in-holeタスクを実現するエアリアルマニピュレータシステムを構築し、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象としたエアリアルマニピュレーションタスクは、ロボット分野の著名な国際学会における現在のホットトピックであり、本研究はそれらの研究に先駆けて行われており、価値が高い。また、次世代の小型無人航空機の社会的ニーズとして高所作業があり、本研究ではそれらのニーズに十分に答えうる可能性も秘めている。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a design and control method for an outstanding small unmanned aerial vehicle that can fly stably like a living organism. An aerial manipulator system that realizes a peg-in-hole task mimicking hummingbird flight was constructed using the proposed optimal airframe design method and robust control system design method for a non-planar multi-rotor helicopter, and its effectiveness was demonstrated.

研究分野：ロボティクス

キーワード：小型無人航空機

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マルチロータ型小型無人航空機の利用が様々な産業分野に拡大し、多様な環境で用いられている。しかしながら、従来の小型無人航空機は強外乱下や構造物付近において、安定飛行ができないという問題を抱えている。一方、ハチドリのように昆虫や鳥といった生物は、強外乱下はもちろん周囲環境と接触してさえ安定飛行を行うことが可能である。また、従来のマルチロータ機のほとんどは、ロータが平面配置された同一の機体構造を持つが、この機体構造が飛行にとって最適であるかはわかっていない。近年では任意方向に推力とトルクを生成可能な非平面マルチロータ機が研究されているが、これらについても統一的な機体設計法は存在していない。

本研究における学術的「問い」は、「小型無人航空機と生物飛行の本質的な違いは何か?」ということである。翼によって発生する揚力や推力の大きさと方向を制御するという意味では、回転翼も羽ばたき翼も本質的には同一である。ゆえに、推力の任意制御を可能とする機械構造及び制御方法にこそ生物飛行の本質があるのではないかと考える。一方、マルチロータ型小型無人航空機は自動制御なしでは飛行できない航空機であり、環境やニーズに合わせた制御しやすい機体設計方法があつてしかるべきであるが、制御論的知見に基づく機体設計論は確立していない。

2. 研究の目的

以上を背景として本研究では、卓越した運動能力を有するマルチロータ型小型無人航空機の設計方法およびその飛行制御方法を確立することを目的とする。

機械力学・制御論的観点から生物飛行の本質に迫る研究は例がなく、本研究で最も独自性が強い部分である。また、マルチロータ機の場合、制御系の性能が機体性能に直結するにもかかわらず、制御系設計を行う段階で既に機体構造が決定されていることが多く、制御をしやすい機体構造であるのかという疑問に答える術は存在しない。本研究はこの疑問に対して解の1つを与える意味で従来研究にはない独自性を持つ。

3. 研究の方法

本研究は、Force Capacity 及び Torque Capacity を指標とした非平面マルチロータヘリコプタの最適設計方法の確立と、当該マルチロータヘリコプタを用いたエアリアルマニピュレーションタスクに向けた制御系の構築という2段階の計画で実行した。

(1) Force/Torque Capacity を指標とした非平面マルチロータヘリコプタの最適設計

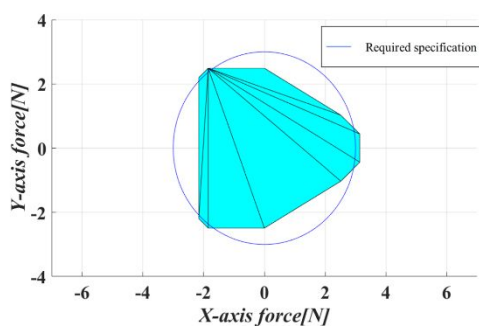
Force/Torque Capacity とは、パラレルロボットの設計指標の一つである。ロボットが出力可能な外力やトルクを体積評価することで要求仕様を満たす構造設計を行うことが可能である。本研究では、非平面マルチロータヘリコプタにこれらの評価指標を適用し、指標を最大化するロータ配置を決定する設計アルゴリズムを構築した。最適化手法として粒子群最適化法を適用した。環境に接触しても不安定化しないことを目指し、環境に接触する任意軸方向の外力またはトルクに特化した設計を実施した。

(2) エアリアルマニピュレーションタスクに向けた制御系の構築

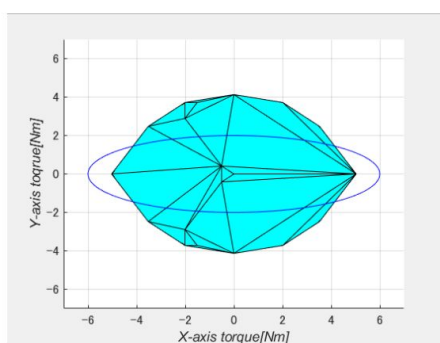
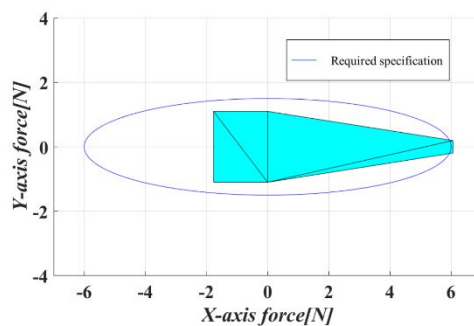
生物のように環境に接触するアプリケーションとしてエアリアルマニピュレーションタスクを想定し、制御系の構築を行った。具体的なタスクとしてハチドリの飛行を想定して、Peg-in-hole を選択した。(1)で設計した非平面マルチロータヘリコプタに、Peg-in-hole 用の1軸マニピュレータを実装したシステムに対して、ロバスト制御系の設計を実施した。

4. 研究成果

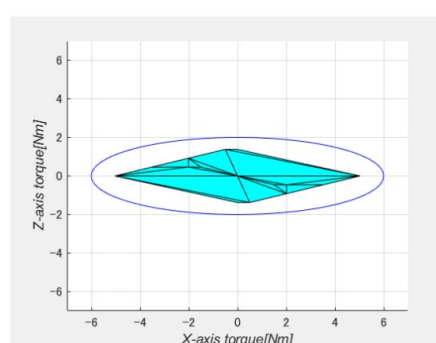
(1) 非平面マルチロータ機を対象として機体最適設計方法の構築と評価を実施した。はじめに、マルチボディダイナミクス手法の1つである微分代数型運動方程式を利用して機体の数式モデルを導出した。つづいて、導出した数式モデルからロータ配置、ロータ取付角度等の機構パラメータを抽出し、機体モデルを用いた数値シミュレーションによって当該ロータ姿勢で出力可能な推力を計算した。得られた推力の大きさ及び方向に対して Force Capacity/Torque Capacity を導入し、機体任意軸方向に所望の推力を生成可能な最適なロータ姿勢を粒子群最適化法(Particle Swarm Optimization: PSO) によって決定するという最適設計手法を構築した。構築した設計手法の有効性を検証するため、得られた最適なロータ姿勢によって生成可能な推力凸包を計算し、それが設計仕様を満たしていることを確認した。図1に Force Capacity および Torque Capacity を指標として最適設計を行った機体が出力可能な外力凸包およびトルク凸包を示す。図中の青い実線が設計仕様を表す曲線であり、ポリゴンで表されるのが外力およびトルク凸包である。図より、設計仕様に従い任意軸に特化した外力およびトルクを生成可能なマルチロータヘリコプタを設計可能であることがわかる。



(a) Force Capacity



(a) X-Y plane



(b) X-Z plane

(b) Torque Capacity

図1 Force Capacity および Torque Capacity を用いた最適設計

(2) 実機製作を行い, 飛行検証に用いる非平面マルチロータヘリコプタのシステム構築を行った. 6 発ロータの機体フレームに対して各ロータの非平面配置を実現するための専用治具を製作し, 任意のロータ姿勢で機体フレームに取り付けることを可能とした. 小型マイコンと CPLD を組み合わせた制御ボードをプリント基板で製作し, IMU, テレメトリ用の無線モジュール, RC 受信機と組み合わせた制御装置を開発した. RC 信号の読み取りとモータ制御用のパルス生成コードを CPLD に実装し, 各種センサの取り込み及び機体制御プログラムを小型マイコンに実装した. 最終的に IMU の角速度データを用いた角速度制御系を設計, 実装することで安定した手動操縦飛行が行えることを確認した. また, 製作機体のアプリケーションとして, 当該機体を用いたエアリアルマニピュレーションタスクを選択し, システム開発及び検証を実施した. 具体的なタスクとして, 壁面に設けられた穴にペグを挿入する Peg-in-hole タスクを選定した. 当該タスクを遂行するために必要となる各軸の外力及びトルク仕様を求め, 昨年度開発した最適設計方法によって無人航空機の最適なロータ配置を決定した. 一方, Peg-in-hole に用いる 1 自由度マニピュレータを設計・製作つづいて, 実機体を用いた検証のために光学式モーションキャプチャを用いた実験システムを構築した. モーションキャプチャシステムにより計測した機体位置および速度をテレメトリにより機体側制御装置に送信し, 当該データを用いて自律飛行が可能となるシステムを実現した. 一方, 機体及びマニピュレータの CAD モデルを基に動力学シミュレーション環境を構築し, Peg-in-hole タスクの数値シミュレーション検証を実施した. 図 2 に構築したシミュレーション環境およびシミュレーション結果を示す. この検証により, 本研究で提案した最適設計手法を用いて設計したマルチロータヘリコプタのと, ロバスト制御系によってハチドリのように Peg-in-hole タスクを安全に実現できることが示された.

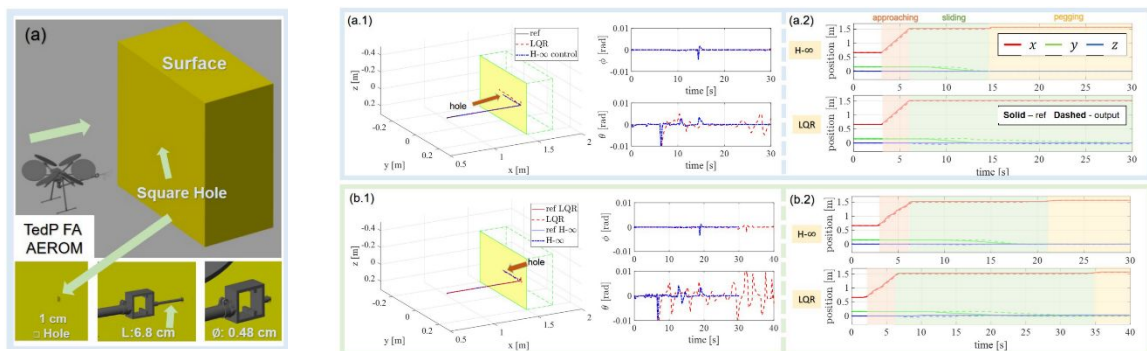


図 2 Peg-in-hole タスクの検証

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松井 馨, 湯川 航太, 鈴木 智
2. 発表標題 Torque capacity を用いた非平面マルチロータヘリコプタの最適設計
3. 学会等名 Movic2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井 馨
2. 発表標題 Force capacityを用いた非平面マルチロータヘリコプタの構造最適化に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------