

論文の内容の要旨

論文題目 環境接触適応のための姿勢定位可能な
マルチロータ飛行ロボットの構成法に関する研究

氏 名 川崎 宏治

本研究は、マルチロータ飛行ロボットが環境状況に応じて目的地へ移動する際に移動時の姿勢を保持しつつ移動し、環境との接触に対しても適応できるシステムの構成法を明らかにすることを目的とした研究である。近年、急速に産業化が加速しているドローンは4つのロータを備えたクワッドロータ飛行ロボットが多いが、この飛行ロボットは、機体を進行方向へ傾けることで移動するため、水平を保ちながら移動することは困難な機体となっている。移動中に機体の姿勢を保ちながら目的地へ移動するにはロータ軸の向きを傾けるなどの仕組みが必要となる。

本論文は、空中での姿勢を保持した移動、さらに、飛行中に外界と物理的接触が起こりうる狭隘な環境などでの移動において姿勢を環境に倣いながら移動可能とすることで様々な環境に適応して移動する飛行ロボットの構成法を論じ、マルチロータ飛行ロボットの制御システムの共通モデル化、開発したロボットについての具体的な機構構成、制御システムの設計、実装、姿勢定位、環境倣い制御実験を各章に分けて示し、本研究から明らかとなる知見をまとめ、本研究の意義を示そうとしているものである。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的について述べ、マルチロータ飛行ロボットの新しい機構への開発プロセスの中で学んだ環境接触適応のための姿勢定位可能なマルチロータ飛行ロボットの構成法について本論文の方針を述べた。

第2章「マルチロータ飛行ロボットの環境接触適応と姿勢定位のための構成要素と統合法」では、本論文で目標とするマルチロータ飛行ロボットにおける環境接触適応に対する姿勢定位の必要性と、その構成要素と機構及び制御の統合法について述べた。

マルチロータ飛行ロボットにおける環境接触適応とは特殊な環境での多様性を備えた移動ロボットを実現することであり、そのためには環境の対象形状に合わせてロボット側がその姿勢や形を変化させて接触することや姿勢を調節するための姿勢定位が必要である。この姿勢定位を実現するためには、一般的なマルチロータのように同一方向に配置されたロータ推力で姿勢を傾けるのではなく、マルチ方向への推力を合成することができる多次元推力制御機構を搭載する必要があると考え、「可変ピッチ機構」や「デュアルチルトロータ機構」などの「多次元推力制御機構」と、「位置定位」と「姿勢定位」を両立可能な「姿勢制御コントローラ」の必要性について述べた。

第3章「マルチロータによる多次元推力制御機構の構成法」では、初めに、基盤となる多次元推力制御機構を実現するために必要な制御システムとして機体の「姿勢制御コントローラ」の実現について述べ、次に、位置定位制御で実現できる環境適応について実証ベースによる機体の機構構成検討について述べ、最後に、これらを組み合わせた姿勢定位可能な機構構成の実現について述べ、マルチロータ飛行ロボットの環境接触適応という目的に対して最適な多次元推力制御機構と実現すべき運動機能を決定した。

多次元推力制御可能な姿勢コントローラのハードウェア設計については、IMU機能として加速度3軸、角速度3軸、地磁気3軸、気圧高度センサ1軸、合計10軸分のセンサフュージョンにて姿勢角度推定を実現した。また、車載通信規格のCANに対応、ロボットシステムの中核ソフトウェアであるROS (Robot Operating System) への対応、そして、多次元推力制御のためのモータ及びサーボアクチュエータ制御を実現した。制御システム構成については、姿勢制御や定位制御に関する姿勢推定のフローを示し、PID制御による姿勢制御について述べた。プラットフォーム化については、マルチロータ飛行ロボットの制御に対する共通の指示値として、「機体のモデルパラメータ」、「目標姿勢角度」、「現在位置座標」、「目標座標」、を入力することで多次元推力制御による姿勢定位及び位置定位が実現できるように中間層である姿勢制御コントローラと上位層のアプリケーションとを統合した。

位置定位のためのマルチロータ制御機構の構成アプローチについて、様々な環境適応に対し、機能目的別に機体を実機開発し、実証試験を行い、それぞれの機構によるメリ

ット・デメリットを明確にし、機構構成の効果を実証ベースで確認することで、目的を達成可能な新しい機構、構成、制御方式を模索し、その知見について述べた。また、位置定位における環境知覚として非接触でのセンシングをベースに自己位置推定を行う実施例について述べた。

姿勢定位のためのマルチロータ制御機構の構成アプローチについて、姿勢定位を実現するためには、多次元方向に推力を発生可能な機構をマルチロータに搭載する必要がある、「可変ピッチ機構」と「デュアルチルトロータ」による姿勢定位可能な機構構成について述べた。

最後に、環境との物理的接触による環境知覚として、環境壁面に自身の体を押し付けることで相手の形に倣い、姿勢を柔軟に変えることで壁面に倣って移動することや、自身の姿勢を3自由度で可変することで狭隘隙間を通過し、凹凸環境の地形に対しても垂直での離着陸ができるなどといった運動機能の実現を目指した。そのために「姿勢フリー」と「姿勢ロック」の2つの機能を実現した。この機能を利用し環境との接触により自身の姿勢を対象物に対して倣わせることで、飛行ロボットによる高い環境接触適応性の実現について述べた。

第4章「独立可変ピッチ4機マルチロータ構造による環境接触姿勢定位と環境接触適応移動制御」では、地上及び水上環境に接しての立位及び転がり移動可能なリング型飛行ロボットMUWAの実現について述べた。

MUWAは可変ピッチロータによる多次元推力機構を搭載したリング型のクワッドコプターであり、陸海空を含むマルチフィールド適応型の飛行ロボットである。目指したものは、地上3自由度、空中4自由度の運動機能を備え、飛行以外に地上や水上での移動が可能な飛行ロボットである。飛行モード及びモノホイールモードの切り替えによる3自由度空間での新規な運動と計測機能の有効性を実測にて示し、「狭いところへ入り込める環境接触適応」として災害現場などの地上及び水上での縦隙間などの通過への応用可能性が極めて高いことを実証した。

第5章「デュアルロータ2機統合構造による空中任意チルト姿勢定位と環境接触適応移動制御」では、任意のチルト姿勢を保持し移動制御可能な飛行ロボットの實現について述べた。

目指したものは、空中5自由度の運動機能を備え、姿勢を維持しつつ移動し情報収集を行う新しい制御機構により動作する飛行ロボットである。チルト角度を連続的に無限回転可能でかつ任意のチルト角度を維持した状態での飛行機能を目指し、相反回転のデュアルロータチルト機構による多次元推力制御機構を搭載し、任意チルト角度姿勢での飛行が可能なロボットを実現した。これによりロボット自身を映り込ませない全天球撮影や、環境と接することによる適応的な姿勢変化飛行を実現した。本システムにより、

曲面を含む複雑な形状壁面に対して倣い運動による調査計測への有効性を実測にて示し、「全周なぞり行動が可能な環境接触適応」としてトンネルなどの曲壁面のインフラ点検への応用可能性が極めて高いことを実証した。

第6章「デュアルロータ3機統合構造による空中任意姿勢定位と環境接触適応全方向並進運動」では、任意姿勢の空中定位と並進移動を可能とする飛行ロボットの実現について述べた。

目指したものは、空中6自由度の運動機能を備え、任意姿勢を保持しつつ移動し撮影及び計測などの情報収集を行う新しい制御機構により動作する飛行ロボットである。相反回転のデュアルダクテッドファンを1組としたモジュールのスラスト軸角度を可変可能とした可変スラスタモジュールを同心円上に3均等に配置した新機構を考案し、飛行ロボット自身がジンバルの機能を有する姿勢保持飛行が可能な新しい制御機構を実現した。この機構により一般的な飛行ロボットによるカメラ撮影に必要なジンバルを不要とし、小型でシンプルな構造でカメラなどのセンシングデバイスと機体一体での任意姿勢による空中定位と並進運動を実現し、「空中全方位の隙間をすり抜ける環境接触適応」として橋梁の裏側などの狭い空間でのインフラ点検への応用可能性が極めて高いことを実証した。

第7章「結論」では、本研究を総括し、結論と今後の展望について述べた。目指してきたマルチロータ飛行ロボットにおける環境接触適応として、隙間空間を通り抜けるだけでなく、そこで姿勢定位できることが求められており、多次元推力制御機構を考え、その組み合わせにより地上でのノンホロノミック姿勢定位、空中でのノンホロノミック姿勢定位、ホロノミック姿勢定位を可能とするマルチロータ飛行ロボットを実現し、建屋の隙間をすり抜け、トンネル壁面なぞり撮影、橋梁背面の狭隘環境への侵入などの実現を行い、応用可能性が極めて高いことを実証した。

研究成果として、可変ピッチ機構をマルチロータ飛行ロボットに取り入れたことで、従来の飛行ロボットでは実現できなかった地上との接触による立位転がりといった新規な動作を可能にし、デュアルチルトロータ機構により高自由度での空中姿勢定位を実現したことは、飛行ロボットの環境接触への可能性を大きく広げたと言える。飛行ロボットの活用には無限の可能性があるが、そのベースとなる新しい姿勢定位機能を実現できる飛行ロボットの機構構成及び制御技術を開発した。

本研究では、多次元推力制御機構を用いることで姿勢定位し、環境に接することができるマルチロータ飛行ロボットの実現と実機評価による有効性の実証によって、次世代の飛行ロボット分野における重要な知見を示したと考えている。