

## 論文の内容の要旨

論文題目 多自由度系マルチロータ飛行ロボットの一般化構成理論  
と行動生成法の研究

氏 名 趙 漢居

本論文は多リンク構造を有するマルチロータ飛行ロボットによる、高次な飛行動作の実現を目的とする。そのために、重心運動と関節運動の二つの側面を持つ一般化モデルを多自由度系マルチロータ飛行ロボットという定義し、機体モデル設計、飛行制御並びに自律プラットフォーム構築を基本要素とする一般化構成理論を提案する。さらに、重心運動と関節運動を統合した行動生成法を用いることで、変形による狭隘空間での潜り動作といった従来の剛体型飛行ロボットでは実現できない高次動作を可能とする。本研究は、マルチロータ飛行ロボットの動作次元の拡張を目指すもので、人型ロボットといったより一般的な多リンク構造を有するロボットの構成理論との融合を見据えたものである。

第1章「序論」では、本研究では多リンク構造を有する飛行ロボットという新しい機体構成に着目し、従来の剛体型を拡張した多リンク系というより広義な枠組みでマルチロータ飛行ロボットを取り扱い、このように一般化されたものを多自由度系マルチロータ飛行ロボットと新しく定義した。また、関節にはアクチュエータがある前提で、重力と釣りあがる空中定位状態の重要性と機体の重心運動の役割について論じ、機体の推力ベクトル空間から重心運動空間への線形写像と機体形状(関節角度ベクトル)との関係を明らかにした。さらに、この関係を用いて重心運動に関する機体の駆動性について言及した。最後に、空中物体把持運搬や狭隘環境での変形飛行といった多自由度運動空間における高次な動作の実現を本研究の目的とし、そのためには機体構成理論と動作生成法の2段階に分けて取り組むことについて述べた。

第2章「多自由度系マルチロータ飛行ロボットの一般化設計手法」では、まず推力発生に関する流体力学の基本特性と推力機構の分類について述べた。次に、空中定位させる推力ベクトルの解候補の中で、エネルギー最小かつ安定余裕最大の解を最適なものとみなし、最適定位推力(Optimal Hovering Force, 以下OHFという)と名付けた。さらに、機体形状(関節角度ベクトル)によって変化する機体の推力ベクトル空間と重心運動空間の写像関係を用いて、OHFに関する一般化された最適問題を定式化した。この最適問題

を用いて、推力入力に関するアクチュエータの冗長性と飛行安定性の向上との関係性を明らかにした。また、目標機体モデルの取りうるすべての姿勢と形状におけるOHFの最大値(最悪値)を求めることによって、機体の推力機構(e.g. ロータ)の特性を決めるという一般化設計手法を提案した。最後に、この一般化設計手法を用いて、本研究で構成する多自由度系飛行ロボットのモデル形態を2次元変形型と3次元変形型に分けることについて述べ、それぞれの特性を示し、さらにこれらの基本モデルを用いて制御理論(第3章)及びプラットフォーム構築法(第4章)を展開していくことを明らかにした。

第3章「多自由度系の一般化飛行制御理論」では、多リンク系モデルを時変の単一剛体とみなすという仮定のもとで、多自由度系の重心運動に関する一般化力学モデルを導き出した。次に、剛体モデルに対する既存の制御理論に対して、本研究では一般化力学モデルをもとに、第2章で論じた最適定位推力(OHF)を考慮した機体重心の高度及び回転運動(計4自由度)に関する最適制御を提案し、劣駆動である2次元変形型モデルを用いて制御入力である推力ベクトルに関する制御則の定式化を行った。さらに、機体モデルを冗長駆動系に拡張し、2自由度の推力偏向機構(ジンバル機構)に着目した。そこで、機体の任意姿勢における定位を実現するために可変重心座標を導入し、目標機体姿勢と各ジンバル機構の偏向角度との関係を冗長駆動系剛体モデルに基づいて明らかにした。最後に、ジンバル機構による推力の偏向が重心の回転運動と水平の並進運動(計5自由度)にも大きく関わることを示し、能動的な推力偏向によるこれら5軸の制御方法を設計し、3次元変形型モデルにおける統合的な制御システムを確立した。

第4章「多自由度系の一般化プラットフォームの構築法」では、多自由度系モデルの実機レベルに必要な一般化プラットフォームの構築法について取り組み、以下の3つの要素に分けて論じた:(a) 実環境における多自由度系モデルの状態推定;(b) 実機体内各層を繋げる通信系;(c) 実・仮想世界を区別しない制御系基盤システムの構築。まず、状態推定法は多リンク系モデルを対象に、ベースリンクと重心座標に分けて、姿勢、高度および水平運動のそれぞれの推定法を導き出した。次に、リンクを基本単位としたモジュール化に着目し、従来の通信手法と異なる多層構造を有する体内通信系を設計した。これにより、リンク数に依存しない一般化体内通信システムを実現した。さらに、実機運用で直面する安全性と研究開発の効率性を向上するために、実機環境を模倣した物理エンジンに基づく透過型シミュレーションシステムを構築し、制御システムの安全性・安定性の確認手段として非常に有効であることを証明した。

第5章「多自由度系モデルの機体実装と飛行動作の評価」では、多自由度系機体モデルの実装例を紹介し、任意機体姿勢での空中定位や変形飛行といった多自由度系モデルの基本飛行動作に関する評価実験を行った。まず、2次元変形型の多リンク系モデルに開

する汎用的なリンクモジュールを説明し、それによって構築された機体を用いた安定な2次元平面での変形飛行動作を実証した。また、リンク数の増加によって顕著になる機体構造変形問題についても考察を行った。次に、任意姿勢での定位を可能にする偏向機構の評価のため、シングルロータの2自由度偏向を可能にするジンバル機構によって構成される冗長系剛体モデルを実装し、水平以外の機体姿勢での定位飛行と外乱が存在するときの定位性能を評価した。一方、シングルロータによる目標姿勢変化時の水平運動に関する制御の追従性の低下が確認され、それを解決するためにはロータのジャイロモーメントが存在しないことを前提条件とした能動的な推力偏向制御を実施する必要があることについて議論した。最後に、ロータのジャイロモーメントを機構的に相殺できるデュアルロータジンバル機構を設計し、4リンクから構成される3次元変形型の機体モデルに搭載した。そして、能動的な推力偏向制御が加わったことによって、高い安定性を示す3次元変形を伴う定位飛行動作を実現した。

第6章「重心運動空間における行動生成法」では、第5章で実現した安定な定位飛行動作を発展させ、機体形状が不変であることによって定義できる多自由度運動空間の部分集合である重心運動空間のみで記述できる3次元空間での移動動作に着目した。まず、目標移動動作に関する高い追従性を実現するため、時系列の目標位置姿勢以外に目標速度を計画することを提案し、それらを2自由度制御の入力として第3章で述べた制御理論に組み込むことで実現する運動操作方法を示した。次に、重心運動の応用例として、目標移動物体の追従動作と未知環境での探索動作に取り組んだ。前者に関しては、屋外における大型移動物体の広範囲追従及びその移動物体への着地動作を実現した。一方後者に関しては、高さ方向に対して環境が相対的に一様性を示す森林環境を対象とし、2次元レーザセンサの断面検出によって実現する樹木の位置と直径情報を含んだ2次元マップの構築システムと計測探索動作を提案し、実環境での実証実験によりその有用性を確認した。

第7章「多自由度運動空間における高次動作の一般化行動生成法」では、第6章で実現した重心運動空間での行動生成法をさらに発展させ、多リンク系の関節運動を考慮した多自由度運動空間での動作生成法に着目した。まず、飛行安定性の保証を多自由度空間の探索問題における最も重要な条件と位置づけ、探索空間における個々の状態(機体の位置姿勢及び形状)下での最適定位推力(OHF)に基づく一般化評価方法を示した。次に、多自由度系空間での探索問題の応用例として、全身抱え込み動作による物体把持運搬と空中変形による狭隘空間での潜り動作の実現に取り組んだ。前者に関しては多自由度空間を低次元空間に投影することで、関節トルクと最適定位推力(OHF)を最小にする安定な把持形状を全探索で見つける手法を構築した。さらに、機体が目標位置姿勢と目標形状で物体に接触できる動作戦略として物体側面での転がり動作と側面に沿ったスライ

ド動作を提案し、物体形状が既知という仮定で、2次元変形型モデルを用いた断面一様物体の抱え込み把持運搬に成功した。一方、後者については時系列の探索問題であるため、個々の状態の最適性より経路全体の有効性に着目した。その際、最適定位推力(OHF)に基づく飛行安定性の基本評価に加え、3次元変形における飛行安定性をさらに高めるための状態評価項目(a. 推力機構の2次元配置; b. 推力装置同士の重なり度合い; c. リンク傾き角)を提案した。こうした統合的な状態評価法に基づき、離散的な有効経路をRRT\*というサンプリングベース手法で求め、さらにB-スプライン曲線を用いて経路時間の長さを調整でき、かつ速度成分が得られる滑な経路を取得した。最後に、関節角度ベクトルに関する時系列の目標指令を与えると同時に、重心運動操作に関しては第6章で提案した2自由度制御法を用いることで、変形前の機体の最大横幅と同サイズの縦穴を3次元変形によって潜り抜けることに成功し、さらに変形移動中の追従誤差が非常に低いことが確認できた。

第8章「結論」では、本研究の成果をまとめ、課題と展望について言及した。