

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04383

研究課題名(和文) 重力場における劣駆動システムの可制御性構造解析と制御

研究課題名(英文) Controllability Structure Analysis of Underactuated Systems under Gravity Field and its Control

研究代表者

三平 満司 (SAMPEI, Mitsuji)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00196338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、重力場が大きく影響する運動に対するシステムの可制御性や運動性能解析に基づく制御系設計を目指して、(1)可制御性構造解析に基づく最適なマルチロータ型航空機(ドローン)の開発と制御、(2)双線形システム表現に基づく新たな最適制御手法の提案と制御性能解析の2つの課題に主に取り組んだ。特に、課題(1)ではドローンの構造解析や構造設計、制御手法の構築で順調に成果を挙げ、国内外の学術雑誌や国際会議に多数採録・採択された。また、双方の課題に対して新たに実験機を多数製作し、実機実験により提案制御系や制御性能解析の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、我々の生活で避けられない重力場の影響に注目し、重力の影響を強く受けるドローンに代表されるモバイルロボットや一般の3次元剛体運動モデルに対して、新たな制御手法の構築や可制御性・運動性能解析に基づくシステムの構造解析を行った。特に、本研究結果によってこれまでに類を見ない構造のドローンの設計が可能となることや、重力の影響を抑制するのではなくあえて活用する考え方を提案されたことは、モバイルロボットがますます活躍する社会の実現を目指した研究の今後の発展に寄与すると考える。

研究成果の概要(英文)：The objective of this project is to develop new control techniques for underactuated systems under gravity field based on controllability and motion performance analysis. This project mainly tackled the following two topics: (1) structural optimization of a multirotor unmanned aerial vehicle and its control based on controllability analysis; and (2) development of new optimal control methods and performance analysis based on bilinear system representation. Especially, we achieved many novel results on topic (1), which were published in international/domestic journals and proceedings of international conferences. Moreover, we performed the effectiveness of our proposed methods/analysis by developing new experimental testbeds and providing experimental verification.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：制御工学 機械力学 劣駆動系

1. 研究開始当初の背景

ロボットの制御において、省エネルギーの観点ではアクチュエータは少ない方が望ましく、また小型や細身のロボットにおいてはその構造の制限から任意の運動自由度をもたせる、すなわち全駆動にすることは難しい。したがって、特異な可制御性構造をもつ劣駆動ロボットの制御問題に取り組む意義は大きい。一方で、劣駆動システムの制御に関する研究はこれまでに一定の成果を挙げたものの、その制御や解析の困難さからいまだ目覚ましい発展は遂げられていない。特に、2輪型車両ロボットを始めとしたこれまで代表的に考察されてきた劣駆動システムの制御では、重力場と運動の場が直交しているために重力場を考慮する必要がなかった。

他方、跳躍や歩行、飛行などの鉛直方向の運動を伴う制御問題においては、重力場の影響を陽に考慮しなければならない。しかし、従来研究では線形近似手法やフィードバック線形化手法といった重力場の影響を単純にキャンセルする手法が多く取られており、重力場を陽に考慮し、また活用する研究報告は国内外問わず少ない。以上の背景の下で、本研究課題では制御対象として特にマルチロータ型無人航空機(以下、ドローンと呼ぶ)に注目する。ドローンは、その機構の簡便さと運動性能の高さから現在最も活躍が期待されているモバイルロボットの一つである一方で、安定したホバリング飛行を実現するためには重力場を陽に考慮する必要がある。また、現在市場に並ぶドローンの構造のほとんどは、すべてのロータが正多角形の頂点上、かつ同一の向きに配置されるような限定的なものであり、このクラスの構造では水平方向に直接運動できないという劣駆動性が避けられない。

2. 研究の目的

本研究課題では、研究代表者らがこれまでに明らかにしてきた非駆動自由度をもつ劣駆動システムに対する制御理論を発展させる。特に、本研究は重力場が大きく影響する運動を対象とし、制御性能を表す有用な指標である可制御性構造に基づく解析、および重力場を活用した効率的な運動を実現する制御系設計を目的とする。さらに、各研究課題に対して実験機の製作および実験検証を行う。

3. 研究の方法

重力場における劣駆動システムの制御問題に対して、主に以下の2つに大別された課題に取り組んだ。

- (1) 可制御性構造解析に基づく最適なドローンの開発と制御
- (2) 双線形システム表現に基づく新たな最適制御手法の提案と性能解析

特に、課題(1)については本研究期間において順調に成果を挙げたため、この課題をさらに細分化し、

- (1)- ドローンの可制御性解析に基づくホバリング可能性解析
- (1)- ドローンの運動性能解析に基づく構造最適化
- (1)- 重力場を考慮した3次元剛体の最適制御

として取り組んだ。

4. 研究成果

【課題(1)- : ドローンの可制御性解析に基づくホバリング可能性解析】

同一平面上に同一の向きでロータが配置されるドローンに対して、最低限の要求である安定したホバリング飛行を達成するためのドローンの構造の幾何的な条件として、機体の重心位置が存在しなければならない領域を導出している(図1の凸多角形内部)。この領域はシステムの可制御性解析に基づいて与えられ、ロータの配置や種類に依存する。また、実際に製作した構造の重心位置がこの領域に含まれるための余裕を定量的に評価する新たな指標も新たに提案した。さらに、本解析手法は幾何的な条件に基づくことから対故障性解析へ応用することも容易であり、6つのロータから成るヘキサロータについて任意のロータが故障しても安定した飛行が保証できる新規の構造を提案し、実機による検証実験を行った。

また、同一の向きでロータが配置される構造に対するホバリング可能性解析手法を発展させ、ロータを傾斜させて配置するより広いクラスの構造に対するホバリング可能構造の数値解析手法を新たに提案した。この提案手法は数値解析に留まっているが、上記の幾何学的解析と同様にシステムの可制御性解析に基づき、また重心位置とロータの配置や種類との間の関係を与えている。

【課題(1)- : ドローンの運動性能解析に基づく構造最適化】

6つのロータを有するヘキサロータに注目し、水平方向にも直接運動可能な全駆動性を保証しつつ運動性能を最適化する構造最適化問題に取り組んだ。この最適化の指標として、重力場に抗する可搬重量を意識した最大並進加速度や移動性を考慮した動的可操作度を導入した。設計した構造を有する実機の製作や飛行実験も行い(図2)、さらに設計したある運動性能をもつ機体に対して重力場を活用したヘキサロータの切替位置・姿勢制御手法を新たに提案した。

また、課題(1)- で提案した可制御性解析に基づく耐故障性解析と本課題の動的可操作度に基づく構造最適化を統合した、一定の耐故障性を保証しつつ運動性能を最適化する構造設計手法を新たに提案した。

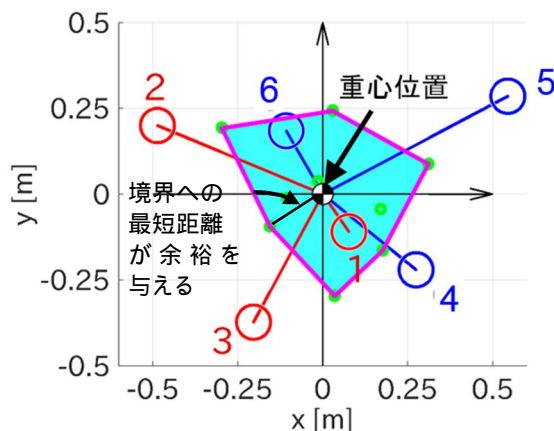


図1 ホバリング可能性解析の例(重心が凸多角形内に存在すれば安定飛行が可能)

【課題(1)- : 重力場を考慮した3次元剛体の最適制御】

ドローンの位置・姿勢制御への適用を踏まえ、3次元剛体の最適制御に関する課題についても成果を挙げた。ここでは、重力場を考慮した3次元剛体運動ダイナミクスに対して、位置・姿勢表現に新たに Cayley 写像やデュアルクォータニオンを導入することで、計算負荷の小さいオンライン最適位置・姿勢制御手法を提案した。さらに、課題(1)- で製作した全駆動性を有するドローンを用いた実機実験により、提案手法の有効性を確認した。



図2 製作したドローン

【課題(2): 双線形システム表現に基づく新たな最適制御手法の提案と性能解析】

重力の影響の活用例として、研究代表者らがこれまで研究してきたドローンによる倒立振り子安定化問題を再考察し、新たに実験検証を行った。この問題では、従来の線形近似手法を用いると重力の影響が単純にキャンセルされ、一方で新たに2次近似手法を適用すると重力の影響を陽に考慮した制御則が設計できることに着目している。得られた2次のシステムを双線形システムと呼ばれる形式で表現することで、この双線形システムの可制御性構造に着目した新たな最適制御手法を提案した。さらに、提案手法の有効性検証のために、ドローンが飛行可能な実験場を新たに構築し(図3)、検証実験を行った。ここで構築した実験場が、研究課題(1)の各検証実験でも用いられている。

【その他の研究成果】

上記の主要課題に加えて、関連研究としてドローンの学習型位置・姿勢制御やドローンネットワークの協調位置・姿勢制御問題に取り組んだ。まず、ドローンの完全なモデル化や空力干渉のモデル化が難しいことに着目し、これらをガウス過程回帰と呼ばれる機械学習手法に基づいて学習し、学習したモデルの不確かさに対してロバストな制御手法を新たに提案した。つぎに、複数のドローンから成るドローンネットワークに対する協調型位置・姿勢制御問題を考察し、ドローンモデルの劣駆動性を陽に考慮した制御手法を提案した。これらの研究についても、実機実験により提案手法の有効性を確認している。

また、ドローンの位置・姿勢制御への適用を踏まえ、3次元剛体の拘束付き制御問題にも取り組んだ。ここでは、Explicit Reference Governor と呼ばれる目標値整形機構を姿勢ダイナミクスを含む3次元剛体運動制御に拡張することで、入力制約および位置・姿勢拘束を考慮した新たな位置・姿勢制御手法を提案した。本提案手法については、数値シミュレーションによりその有用性を確認している。

以上の研究成果については、国内外の学術雑誌や国際会議に多数採録・採択され、その学術的意義が認められている。



図3: 構築した実験場

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuichi Tadokoro, Yuki Taya, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei	4. 巻 8
2. 論文標題 Real-time Model Predictive Control of Rigid Body Motion via Discretization Using the Cayley Map	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 17149-17159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.2966240	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 仲野聡史, Tam W. Nguyen, Emanuele Garone, 伊吹竜也, 三平満司	4. 巻 55
2. 論文標題 Explicit Reference Governorを用いた3次元空間における拘束を考慮した制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 762-771
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.55.762	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 田所祐一, 伊吹竜也, 三平満司	4. 巻 53
2. 論文標題 対称平面傾斜ロータ構造をもつヘキサロータ型全駆動UAVの動的可操作性解析と設計最適化	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 480-489
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.53.480	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 伊吹竜也, 木曾勝之, 安田真大, 三平満司	4. 巻 83
2. 論文標題 動的可操作性と最大並進加速度を考慮したヘキサロータの構造最適化	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.16-00206	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 安田真大, 伊吹竜也, 鈴木洋史, 三平満司	4. 巻 52
2. 論文標題 ヘキサロータの動的可操作性に基づく切替位置・姿勢制御	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 507-515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.52.507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計43件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Shunsuke Mochida, Remma Matsuda, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 Development and Design Optimization of 2Y Hexarotor with Robustness against Rotor Failure
3. 学会等名 21st World Congress of the International Federation of Automatic Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Remma Matsuda, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 A Hoverability Analysis Method for Multirotor UAVs with a Case Study on Fault Tolerance
3. 学会等名 57th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Tadokoro, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 Joint Optimization of Geometric Control and Structure of a Fully-actuated Hexrotor Based on an Analytic HJBE Solution
3. 学会等名 57th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Tadokoro, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 Classification and Structural Evaluation of Fully-actuated Hexrotor UAVs
3. 学会等名 2018 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Renma Matsuda, Yuichi Tadokoro, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 Experimental Verification of Inverse Optimal Control for Inverted Pendulum Stabilization on a Quadrotor
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京工業大学 工学院 システム制御系 三平研究室ホームページ
<http://www.sl.sc.e.titech.ac.jp>

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
研究分担者	中浦 茂樹 (NAKAURA Shigeki) (20323793)	佐世保工業高等専門学校・機械工学科・教授 (57301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	伊吹 竜也 (IBUKI Tatsuya) (30725023)	東京工業大学・工学院・助教 (12608)	