

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13903

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23512

研究課題名（和文）受動車輪付きドローンの壁面接触を考慮した制御系の構築と実験検証

研究課題名（英文）Control of Two-Wheeled Multirotors Interacting with Walls and Experimental Verifications

研究代表者

仲野 聡史（Nakano, Satoshi）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：30847893

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、壁面接触を考慮した車輪付きドローンの制御構造を提案するため、まず制御における制約を考慮した移動体・ドローンの制御に取り組んだ。本結果は、国内学術論文誌に採択された。また、視覚フィードバック制御および力制御を応用した車輪付きドローンの制御構造をそれぞれ提案し、より実用的な制御構造への拡張を達成した。本研究課題を通して、シミュレーションおよび実機実験により提案制御手法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、これまで制御手法が確立されていなかった車輪付きドローンの制御構造の提案を行い成果を挙げたため、学術的意義の高い研究であると言える。また、視覚情報を利用するなど、実用的な問題設定を考えている点も高い価値を持つ研究成果であると言える。また、車輪付きドローンの制御手法が確立されることにより、従来人間が行い高コストであったインフラ点検の効率化が期待できるため、社会的意義も大きいと断言できる。

研究成果の概要（英文）：This project first tackled constrained control for mobile robots to build two-wheeled multirotor control systems interacting with walls. The result was published in a domestic journal. Moreover, visual feedback control and force control were applied to extend the proposed method for practical use.

Throughout this project, simulations and experiments were carried out to show the effectiveness of the proposed method.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 ドローン 拘束システム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

機構的簡便さにも関わらず物流・保守点検といった多様な用途が考えられ、ドローンの研究・開発は広く展開されている。しかし、ドローンは風外乱に非常に敏感であり、特に壁面付近ではドローン自らが引き起こした風が壁に跳ね返りドローンの動特性に大きな影響を及ぼす。そのため、ドローンによる狭小領域の検査・壁面観測はその大きなニーズにも関わらず非常に困難な課題として考えられている。



図1：車輪付きドローン

この問題点を克服するため、通常のドローンに二つの受動車輪を取り付けた、車輪付きドローン(図1)の開発が進められている。車輪が横滑りしないという性質を利用し、「壁に車輪を押し付ける」という極めて簡単な操作により壁面付近での動作安定性が劇的に向上することが実験・経験的に得られている。よって、老朽化が進むビル・橋梁といったインフラ点検において車輪付きドローン応用の期待が高まっているが、この車輪付きドローンの制御系設計について確立された手法は存在しなかった。

2. 研究の目的

車輪付きドローンを手動で操作する場合、(1)ドローンを思い通りの位置に動かす(2)ドローンを安定させるために壁面に接触させるという二つの目標を同時にこなす必要があり、高い熟練度が必要であることが経験的にわかっている。この問題を克服するため、ドローンを壁面に接触させながら移動させるための自動制御則を提案する。また、実機実験により提案制御手法の有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、上記の研究目的を達成するために、主につぎの3つの課題に取り組んだ。

(1) 制約を考慮した移動体およびドローンの制御

本研究では、ドローンを壁面に接触させ、壁面に沿ってドローンを移動させることを目的としている。そのため、壁面に接触している状況を制御における制約と捉え、制約を考慮した制御手法を移動体やドローンに拡張・適用することに取り組んだ。

(2) 視覚フィードバックを用いた車輪付きドローンの制御

通常ドローンを制御する際、制御に必要な位置や速度といった情報をどのように取得するかが課題となる。本研究では、ドローンが壁面上を走行する状況を想定しているため、壁面に対する相対的なドローンの運動を検出することが最も重要となる。そのため、代表的な相対センサである、視覚カメラから得られる視覚情報を用いて車輪付きドローンを壁面走行させる制御則の構築に取り組んだ。

(3) 力制御を用いた車輪付きドローンの制御

本研究では、ドローンが車輪を介して壁面に接触することで壁面付近での動作安定性を確保している。一方で、不必要に強く車輪を押し付けることは、機体の破損等を引き起こすことが考えられる。そのため、力制御を応用し、適切な接触力を保ち車輪付きドローンを制御する制御則の構築に取り組んだ。

4. 研究成果

【課題(1)：制約を考慮した移動体およびドローンの制御】

リファレンスガバナと呼ばれる拘束を考慮しながら制御を行うための代表的な手法を応用し、数値計算コストが従来手法と比較し大きく低い手法を提案した。ドローンの制御において、ドローンに搭載可能なペイロードやコストの観点から、高い計算能力を持つ制御ボードを搭載することは現実的ではなく、ドローンでの実用面に即した手法を提案した。また、特殊ユークリッド空間：SE(3)と呼ばれる、移動体の位置・姿勢を数学的に特異点なく表現可能な空間上での拘束を考慮した制御を提案した。本研究成果は、学術論文誌に採択された。

また、制御バリア関数と呼ばれる、障害物や侵入禁止領域から離れる斥力を発生させるための

関数を新たに応用しドローンが壁面に衝突しないための制御理論を構築した。この手法は、制御リアプノフ関数と呼ばれる関数を併用しており、通常は設計が容易ではない制御リアプノフ関数をバックステッピング法によって導き出す手法を提案した。本結果は、国内学会発表において優秀発表賞を獲得し、対外的に高い評価を得た。

【課題(2)：視覚フィードバックを用いた車輪付きドローンの制御】

本研究では、車輪付きドローンをインフラ点検に応用することを目指している。ビルの壁面検査を考えた際、多くの場合ビルの壁面はタイルで覆われており、表面に格子状の模様が確認できる。カメラ画像から画像処理によりタイルの格子状模様を認識することは比較的容易であり、ドローンに取り付けられたカメラで格子状模様を認識した際に得られる情報(視覚情報)を用いた車輪付きドローンの制御構造を提案した。

本研究では、ドローンの運動と画像情報の時間変化の関係性を利用する Image Based Visual Servo (IBVS) という手法を用いた。従来 IBVS は、カメラで認識するための情報が点である場合を考察していたが、本研究では格子状模様(線)を利用しさらにドローンが壁面上を運動している場合に拡張した。また、数値シミュレーションを通して提案手法の有効性を検証した。本研究結果について、国内学会にて発表を行った。

【課題(3)：力制御を用いた車輪付きドローンの制御】

ロボット制御において、力覚センサから取得される値をフィードバックし制御を行う手法が一般的に知られているが、この手法を用いてドローンを制御している例は極めて少ない。車輪付きドローンを用いるにあたり、車輪を接触させる力は車輪付きドローンの制御性能に大きく影響を与えるため、力フィードバック制御を行うことで接触力の適切な制御を行い制御性能の向上を達成した。また、力フィードバック制御を適用した場合、壁面周辺でのドローン制御性能は向上する一方、壁面から離れた場合の制御性能が劣化することが確認された。そのため、従来制御手法と力フィードバック制御を適切に切り替え、両制御手法の長所を併せ持つ制御則の提案を行った。本研究結果は国内学会において発表を行った。

また、壁面の形状の不確かさ(タイルによる溝等)による影響を、機械学習の一種であるガウス過程回帰を用いたアプローチで低減する手法を提案し、国内学会で発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

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を用いた三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

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 福田朱梨, 高木航平, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 バックステッピング法とCLF-CBF-QPに基づいたクアドロータの壁面衝突回避制御
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤良介, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 タイル壁面目地の特徴線抽出を利用した車輪付きマルチコプタの視覚フィードバック壁面走行制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤正隆, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 壁面接触のための二輪型マルチコプタの切り替え制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮脇裕亮, 水谷透, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 ガウス過程回帰を用いた車輪付きマルチコプタの形状が不確かな壁面上での走行制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤慶一, 出島俊陽, 仲野聡史, 大羽達志, 山田学
2. 発表標題 2輪型マルチコプタを用いた橋梁の支承部点検のための自動制御システム
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川口祥平, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 2輪型マルチコプタを用いた橋梁点検システムと天井面走行への応用
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木航平, 福田朱梨, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 天井裏点検を目的としたマルチコプタの開発
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田建斗, 丹羽一貴, 山田学, 仲野聡史
2. 発表標題 壁面打音検査を目的とした2輪型マルチコプタの開発
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019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		
ベルギー	Universite Libre de Bruxelles		