

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14762

研究課題名（和文）駆動車輪付きドローンを用いた協調モニタリング制御系の構築と実験検証

研究課題名（英文）Cooperative Monitoring Using Drones with Driven Wheels 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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、駆動車輪付きドローンを用いた協調モニタリング制御系の実現に向けて、(1)制約を考慮した移動体およびドローンの制御、(2)飛行・車輪走行を切り替える車輪付きドローンの制御、(3)制約を考慮したドローンの協調制御の3つの課題に主に取り組んだ。(1)に関して、計画通り複数の理論的な結果が得られた。本結果は学術論文誌へ採択され、国内学会においても受賞した。(2)に関して、主に制御リアプノフ関数・制御バリア関数に基づく研究成果が得られた。(3)に関して、理論的な結果を提案し、実験により有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、これまで確立されていなかった車輪付きドローンの飛行・車輪走行を切り替える制御理論を提案したため、学術的に高い意義を持つ研究であると言える。また、複数の課題において実験を行い、実用面にも着目した研究であると言える。本研究成果により、社会的に重要な課題である環境モニタリングの効率化が期待できるため、大きな社会的意義を持つ研究内容であると言える。

研究成果の概要（英文）：This project tackled three main issues concerning cooperative monitoring control systems that utilize drones with driven wheels. These issues are as follows: (1) constrained control of mobile robots and drones, (2) switching control of two-wheeled drones between flight and wheeled driving, and (3) cooperative control of drones considering constraints. For issue (1), several theoretical results were obtained as planned. For issue (2), control Lyapunov functions and control barrier functions-based results were obtained. For issue (3), theoretical results were proposed, and their effectiveness was validated through experiments.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 ドローン 協調制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 昨今の頻発する台風・地震災害に対して、効率よくモニタリングを行い災害時の影響を正確に把握することは重要な課題として注目されている。このモニタリングを効率よく行うために、移動ロボットに観測センサを取り付け、協調してモニタリングを行うモバイルセンサ協調モニタリング手法の確立が求められている。協調動作を行うロボットとして多様な選択肢が考えられるが、本研究ではその機動特性の高さからドローンを用いるモニタリング制御に着目する。

(2) ドローンはその機動的簡便さによる制作の容易さにも関わらず高い機動特性を有し、積極的に研究・開発が行われている制御対象である。さらに、近年は非常に安価にドローンを購入することも可能であり、複数台のロボットを用いる協調モニタリングにドローンを用いることはコスト面から考えても非常に効果的である。一方で、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ことが知られている。

(3) 地上を車輪で移動するロボットも、その動作の安定性から未だに継続して研究・開発が行われている。特に、重量物の運搬等では地上を車輪で運動するロボットを用いていることがほとんどである。また、ロータ推力によるドローンの飛行は、車輪による地上の走行と比較しエネルギー効率の観点では劣り、長時間の持続的な動作を考慮したい場合は車輪による走行が優位である。市販のドローンは、飛行時間が10分ほどのものがほとんどであり、目的によってはこの飛行時間が問題となることが考えられる。

(4) 通常のドローンに二つの駆動車輪を取り付けた車輪付きドローンは、通常のドローンに備わっている飛行機能に加えて、車輪による移動の特徴である安定な動作を兼ね備えている。さらに、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・経験的に確認されている。また、ロータ推力で壁面に車輪を押し付けながら、車輪の駆動力で壁面を走行することも可能となる。しかしながら、飛行・車輪走行を状況によってどのように切り替えるかという点を考慮した制御手法は現在まで確立されていない。

2. 研究の目的

(1) 現在までの車輪付きドローンは、常に壁面接触を行いながら飛行する制御に重点を置いており、状況に応じて飛行・車輪による走行を選択する自律制御則を提案する研究は報告されていない。多くの研究は人間による操縦を行うにとどまっている。一方で、背景で述べた協調制御を考えた際、協調するロボット台数の増加に伴い、人間による操縦の難易度が飛躍的に増大する。

(2) 本研究課題では、人間による操縦では実現困難な、車輪付きドローンを用いた協調モニタリング制御系の構築を目的とする。また、本研究課題の実用性を強調するため、車輪付きドローンを実際に製作し実機実験にも取り組む。

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
- (2) 飛行・車輪走行を切り替える車輪付きドローンの制御
- (3) 制約を考慮したドローンの協調制御

なお、研究開始当初はすべての研究課題に対して実機実験を行うことを計画していたが、コロナ禍の影響により課題(1)の実機実験の実施を見送った。

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、目標値を補正することで拘束を考慮しながら制御を行う手法を応用し、制約を考慮した移動体の姿勢制御手法を提案した。本手法は、特殊直交群： $S0(3)$ と呼ばれる、数学的に特異点のない移動体の姿勢の表現形式に基づく手法となっている点が特徴として挙げられる。本研究成果は、制御分野で権威のある国際学術論文誌に採択され、対外的

に高い評価を獲得している。

また、制御リアプノフ関数(Control Lyapunov Function: CLF)および制御バリア関数(Control Barrier Function: CBF)を応用し、ドローンが壁面に衝突することを回避する制御理論を提案した。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)：飛行・車輪走行を切り替える車輪付きドローンの制御】

研究計画立案当初は、車輪付きドローンの飛行と車輪走行を切り替える制御手法として、モデル予測制御(MPC)の導入を検討していた。しかしながら、課題(1)で導入したCLF・CBFに基づく手法では収束性に関する条件がソフト制約として扱われる点に着目し、CLF・CBFに基づき飛行と車輪走行を切り替える車輪付きドローンの制御理論の構築に方針を転換した。

具体的には、CLFに基づきドローンの移動・地面への接触のための条件を記述し、CBFに基づきドローンが障害物回避動作を行うための条件を記述している。CBFに基づく制約条件の方がCLFに基づく制約条件より優先度が高いため、障害物が存在する場合は障害物の回避動作を行う一方、障害物が存在しない場合は地面への接触動作を行う制御が実現可能となる。実機実験によりこの提案制御手法の有効性を検証しており、国内学会において発表を予定している。

さらに、ロボット制御においてしばしば用いられる、力制御手法の知見を車輪付きドローンの壁面接触制御に応用することを検討した。力制御を適用した場合、壁面接触時のドローンの安定性は向上するが、壁面から離れている場合の移動制御性能は劣化していることが確認できた。そのため、力制御則と従来のドローンの制御則を切り替えながら、両制御手法の長所を両立させる制御則の提案を行った。本研究結果について国内学会において発表を行った。

また、Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control(IDA-PBC)と呼ばれる手法に基づくドローンの飛行制御則に対して、外乱の抑制性能を定量的に評価した。車輪付きドローンが飛行モードから壁面に接触する際の衝撃力を外乱と扱うことにより、提案した外乱抑制性能に基づく飛行・車輪走行の切り替え制御を構築することが今後の展望として期待される。本結果は、国内学会発表において優秀発表賞を受賞し、対外的に高い評価を得た。

【課題(3)：制約を考慮したドローンの協調制御】

課題(1)で導入したリファレンスガバナを分散協調制御理論に拡張し、従来型のドローンへの適用を検討した。ここでは、すべてのドローンが位置に関する制約条件を満たすように制御理論を構築し、シミュレーションにより提案制御則の有効性を確認した。また、複数台のドローンによる実機実験を実施するための環境を構築し、提案制御則の有効性を実機実験により検証した。

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 Satoshi Nakano, Tam. W. Nguyen, Emanuele Garone, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei	4. 巻 155
2. 論文標題 Explicit reference governor on $S^0(3)$ for torque and pointing constraint management	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 111103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.automatica.2023.111103	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11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐藤正隆, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 受動性に基づく車輪付きマルチコプタの位置追従制御の外乱抑制性能評価
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田名網一輝, 田中瀬李, 佐藤正隆, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 IDA-PBCに基づく車輪付きドローンの押しつけ力を考慮した地面走行制御と実験検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島豪介, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 入出力線形化に基づくSE(3)上での車輪付きドローンの壁面走行制御と実験検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河村創太郎, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 制御バリア関数とヨー角非干渉化に基づくテザードローンの障害物回避制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田凌晟, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 CLF-CBF-QPによる車輪付きドローンの飛行と走行を組み合わせた障害物回避制御と実験検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Nakano, Yuya Hada, Manabu Yamada
2. 発表標題 Linearization-based position tracking control of two-wheeled multicopters moving on a wall
3. 学会等名 13th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 波田侑也, 仲野聡史, 山田学
2. 発表標題 SE(3)上での車輪付きマルチコプタの壁面走行位置制御
3. 学会等名 第9回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

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

〔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		