

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04541

研究課題名(和文)複数台のドローン・地上機複合システムに対する視覚フィードバック協調制御

研究課題名(英文) A Study on Visual Feedback Control for an Unmanned Aerial and Ground Compound Robot System

研究代表者

村尾 俊幸 (Toshiyuki, Murao)

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00447038

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、性能の高い地上機の複数台協調制御手法を目指し、トルク入力可能な地上機に対して、動特性を考慮した合意制御手法を提案した。また、地上移動ロボットやカメラを有するドローンに対して、実環境での適用において避ける事が難しい入力外乱や障害物回避を考慮できる最適制御手法を、入力状態制御バリア関数を用いることで提案している。さらに、上空でカメラ視野を適切に得られるように制御された、カメラを有するドローンから得られた画像情報に対して、深層学習を用いて道路を判別し、地上移動ロボットがその上を走行するような位置姿勢制御手法を実装した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では地上移動ロボットやカメラを有するドローンに対して、実環境での適用において避ける事が難しい入力外乱や障害物回避を考慮できる最適制御手法を提案している。これらは提案した障害物回避のための関数が、入力状態制御バリア関数となることを学術的に示したところに価値がある。また、上空でカメラ視野を適切に得られるように制御された、カメラを有するドローンから得られた画像情報に対して、深層学習を用いて道路を判別し、地上移動ロボットがその上を走行するような位置姿勢制御手法を実装した。大きく印刷したGoogle Mapの航空画像に対して実機実験を行っており、実環境への適用も期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we present a pose synchronization method for ground mobile robots. The torque input is designed based on the robot dynamics of an omni-directional mobile robot through the Newton-Euler equation.

Next, we present pose control methods via input-to-state safe control barrier functions. The control objective is that a mobile robot converges to the desired pose avoiding any obstacles under input disturbances. The proposed approach can be applied to pose control for the rigid body motion and the visual feedback system.

We also conduct experiments for visual feedback control of an omni-directional mobile robot through the image information from an aerial vehicle. In this approach, we design the control law for not only the ground mobile robot but also the aerial vehicle because of an acquisition of the appropriate camera field of view.

研究分野：ロボット制御

キーワード：協調制御 位置姿勢制御 視覚フィードバック制御 ドローン 複数台地上移動ロボット

1. 研究開始当初の背景

コンピュータ制御された無人航空機であるドローンに大きな注目が集まっており[i]、今後も様々な市場に活用用途が広がると予測されている。一方で、ドローンは上空から俯瞰して状況を把握できるという大きな利点があるものの、力が必要な作業や複雑な作業を行わせるには地上を走行する無人地上車両(以下、地上機)を用いる方が相応しい場合もある。結果として、ドローンと地上機を組み合わせることで、お互いのデメリットを解消できる可能性は大きい。

これらの背景のもと、カメラを有するドローンを介し上空から広域の状況を把握し、その情報をもとに地上機の目標軌道を作成し、その軌道に追従させるように地上機を制御する問題設定が最近提起され始めている[ii]。地上機から取得できる画像ではなく、上空からのカメラ画像を用いることは、状況のより正確な把握につながる。また、現在の自律型ドローンのほとんどがGPSに頼って飛行しているが[i]、カメラ情報のみにより制御を実現できる場合は、GPSの使用が難しい場所でも適用可能となる。ドローンと地上機を組み合わせることは、現在でも災害調査のための地上/空中複合型ロボットシステム[iii]などが議論されており、その応用範囲は広いと考えられる。

しかし、現状のドローン・地上機複合システムは、安定性や性能に理論的な保証を与えるという観点からは、発展途上にあると言わざるを得ない。まず、視覚フィードバック制御を考える際に重要となる、ドローンから得られる画像特徴量までを陽に考慮した制御理論的なアプローチが行われていない。また、ドローンおよび地上機の動特性が考慮されていないため、ドローンおよび地上機の性能を限界まで引き出す制御系設計が適用できていない。さらに、従来研究[ii]の問題設定では、地上を走行する移動ロボットは一台に限定されている。

2. 研究の目的

上記の学術的問いに対し、本研究では、複数台のドローンおよび地上機からなる複合システムに対して視覚フィードバック協調制御を提案することを主目的とし、Fig. 1 に示す状況設定を考える。複数台のドローンは協調して作業を行う複数台の地上機に対する目標値の生成およびそれらの位置姿勢を観測するために制御を行う。地上機に対する目標軌道は、ドローンから得られる画像を用いて生成する。さらに、制御バリア関数やロボットのダイナミクスを考慮した性能の高い地上機の複数台協調制御手法を提案する。これらに対して、安定性や性能に理論的な保証を与える。また、ドローンと地上機を用いた検証実験を通じて、実環境への適用を可能とする理論体系の構築を目指す。

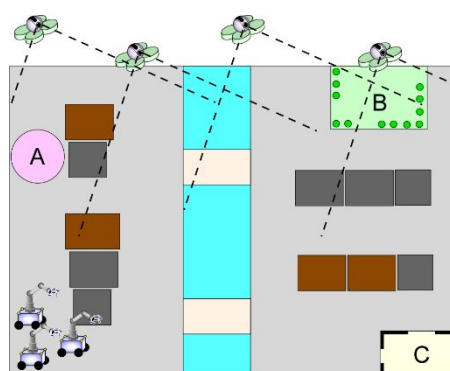


Fig. 1 状況設定

3. 研究の方法

本研究では次節に記す研究成果で議論する内容に対して、運動モデルを導出するために、数学的にモデリングすることから始める。つぎに制御目的を設定し、その制御目的を満足するような制御系設計を行う。運動モデルと制御入力から偏差システムを導出し、安定性解析を行う。提案する制御則の有効性を検証するために、計算用のソフトウェアである MATLAB/Simulink を用いてシミュレーション検証を行う。さらにドローンや地上を運動する全方向移動ロボットを用いて検証実験を行い、その結果により有効性の検証を実施する。

4. 研究成果

(1) 複数台の地上機に対する協調制御手法

性能の高い地上機の複数台協調制御手法を目指し、トルク入力可能な地上機に対して、動特性を考慮した合意制御手法を提案した。動特性を考慮した制御手法に対するシミュレーション結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、位置と姿勢に対する全ての値が収束しており、同期制御が達成されていることがわかる。なお、提案した制御手法は、位置だけでなく姿勢に対しても同期する制御手法となっている。位置同期だけの制御手法に比べると、ロボット群に対して姿勢に対しても同期させることができるために、たとえば環境モニタリングなど、姿勢の一致が重要となるシステムへも適用でき、応用先が広がると考えられる。さらに、提案したダイナミクスを考慮した位置姿勢同期手法に対して、Fig. 3 に示すオムニホイールを有する四輪の全方向移動ロボットを用いて検証実験を行った。全方向移動ロボットはトルク入力指令を与えられるものを製作し、4台の地上機に対して、位置姿勢同期が達成されることを確認した。

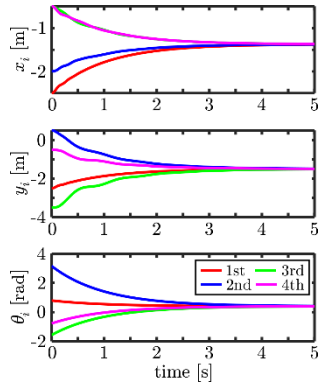


Fig. 2 位置姿勢制御同期の結果

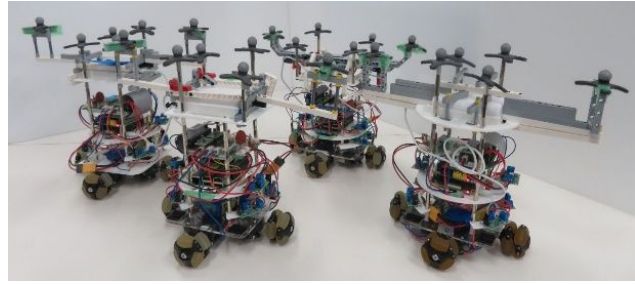


Fig. 3 オムニホイール型全方向移動ロボット

(2) 地上機に対する入力外乱と障害物回避を考慮した制御手法

実環境で建物などの障害物回避を考えた場合、モデル化されないダイナミクスや未知の入力外乱が、障害物回避を達成するうえでの不確かな要素となって現れてくる。そこで、障害物回避を考慮した地上機の位置姿勢制御に対して、入力状態安全制御バリア関数を用いた実時間最適化手法を提案した。具体的には、提案した関数が入力状態安全制御バリア関数となることを示し、入力外乱が存在する場合を想定したうえでの、制御リアプノフ関数も考慮した二次計画問題を定式化し、障害物を回避するという安全性と目標位置姿勢に収束するという安定性を同時に満たす制御手法を提案した。シミュレーション検証と実験検証の両方を通して、提案した制御手法の有用性を検証している。実験機に用いた地上移動ロボットを Fig. 4 に、また入力外乱が存在する状況における実験結果を Fig. 5 に示す。従来手法を適用した紫色で描かれた実験結果は、障害物に接触したために右上の目標地点まで到達できていないが、提案手法においてパラメータを変更している赤色と青色の実験結果は、二つの障害物に衝突せずに目標地点まで到達していることがわかる。

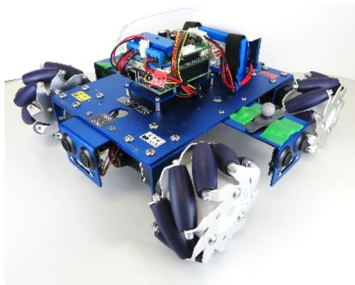


Fig. 4 メカナムホイール型全方向移動ロボット

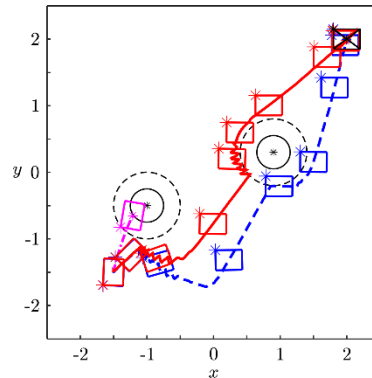


Fig. 5 地上機に対する実験結果

(3) ドローンに対する入力外乱と障害物回避を考慮した視覚フィードバック制御手法

障害物回避を考慮したドローンの視覚フィードバック制御に対して、入力状態安全制御バリア関数を用いた実時間最適化手法を提案した。障害物を楕円柱で表されるものとする事で、入力外乱が発生する状況でも、指定した建物の上空に対して飛行しないような問題設定を考えた。ドローンの制御としては、ドローンに搭載するカメラに対するピンホールカメラモデルを考慮し、他のセンサを用いずに視覚情報のみで実現できる制御手法を目指した。制御に用いるために提案する関数が入力状態安全制御バリア関数となることを示し、入力外乱が存在する場合を想定したうえでの、制御リアプノフ関数も考慮した二次計画問題を定式化し、楕円柱障害物を回避するという安全性と目標位置姿勢に収束するという安定性を同時に満たす視覚フィードバック制御手法を提案した。シミュレーション検証と実験検証の両方を通して、提案した制御手法の有用性を検証している。実験検証は Fig. 6 に示したカメラが搭載されたドローンに対して行った。Fig. 7 に実験結果を示す。従来手法を適用した紫色で描かれた実験結果は、楕円中で表している飛行禁止エリアの上空を通り抜けているが、パラメータを変更した赤色と青色の提案手法の実験結果は飛行禁止エリアを避けて目標地点まで到達していることがわかる。



Fig. 6 カメラ搭載ドローン

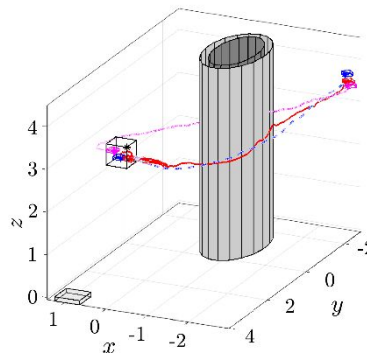


Fig. 7 視覚フィードバック制御の実験結果

(4) ドローンと地上機による視覚フィードバック制御

大きく印刷した Google Map の航空画像に対して，地上機が建物を避けつつ道路の上のみを走行するように，上空のドローンから得られた視覚情報より目標軌道を生成し，地上機に対する位置姿勢制御実験を実施した．具体的には，深層学習のセグメンテーションを用いることでドローンのカメラから得られた画像情報に対して経路を判定し，経路判定した結果から経路探索を行い地上機の目標軌道を生成した．また，その目標軌道に追従するように，安定性を保証した位置姿勢制御則を全方向移動ロボットに適用し，Fig. 8 の実験環境にて有用性を検証した．なお，この実験環境では，ドローンがある一点に留まっていたら，地上機が走行する道全体をカメラ視野内に入れることができない．したがって，適切なカメラ視野を取得するように，ドローンも一つの建物上空から二つ目の建物上空へ，視覚フィードバック制御を実装することで移動させている．

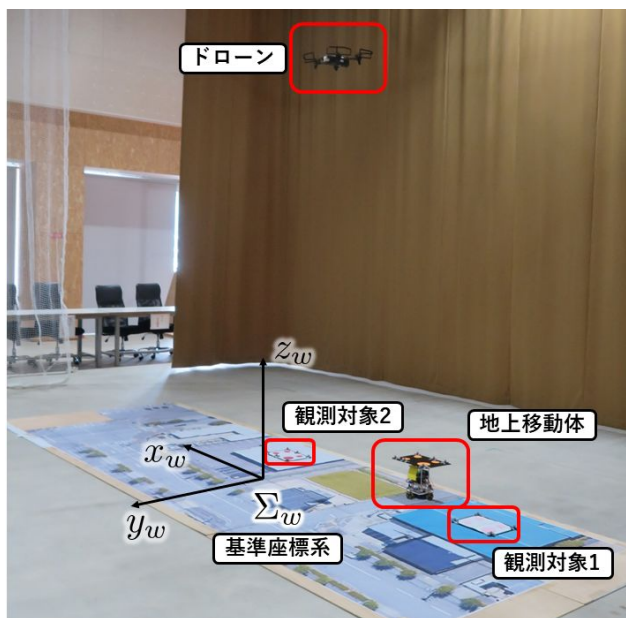


Fig. 8 ドローンと地上機による視覚フィードバック制御の実験環境

< 引用文献 >

- [i] 野波健蔵 [編著] ， ドローン産業応用のすべて 開発の基礎から活用の実際まで ， オーム社，2018.
- [ii] E. Cristofalo et al. , “ Localization of a Ground Robot by Aerial Robots for GPS-deprived Control with Temporal Logic Constraints ,” In: D. Kulic et al. (Eds), 2016 International Symposium on Experimental Robotics, Springer-Verlag, pp. 525-537, 2017.
- [iii] 谷村和彦ら ， 災害調査用地上/空中複合型ロボットシステム ， 日本ロボット学会誌，Vol. 34, No. 2, pp. 116-118, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 村尾俊幸, 小塩祐亮, 河合宏之, 山内淳矢, 畑中健志, 藤田政之	4. 巻 141
2. 論文標題 受動性に基づく人間 - 剛体ネットワークの動的協調制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 1165-1174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.141.1165	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 村尾俊幸, 鈴木志昇, 平田研二, 内田健康	4. 巻 57
2. 論文標題 選好を考慮したLQG電力需給ネットワークに対する動的予算均衡統合メカニズムの設計	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 358-366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.57.358	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 村尾俊幸, 松本浩輔, 河合宏之, 伊吹竜也, 藤田政之	4. 巻 143
2. 論文標題 入力状態安全性を考慮した制御バリア関数を用いた位置姿勢制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 67-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.143.67	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小塩祐亮, 村尾俊幸, 河合宏之
2. 発表標題 三輪型全方向移動ロボットに対する Slotine and Li の手法に基づく安定化制御
3. 学会等名 2020年度 電気・情報関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山西耕平, 村尾俊幸, 河合宏之
2. 発表標題 全方向移動ロボットに対するロバスト制御に関する研究
3. 学会等名 2021年度 電気・情報関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本浩輔, 村尾俊幸, 河合宏之
2. 発表標題 入力状態安全性を考慮した制御バリア関数による位置姿勢制御に関する研究
3. 学会等名 2021年度 電気・情報関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田海翔, 村尾俊幸, 河合宏之
2. 発表標題 入力状態安全制御バリア関数を用いた相対位置姿勢に対する最適化制御
3. 学会等名 SICE システム・情報部門 学術講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田海翔, 村尾俊幸, 河合宏之
2. 発表標題 線形計画法を用いた目標速度生成による位置姿勢制御に関する研究
3. 学会等名 2022年度 電気・情報関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉林大介, 村尾俊幸, 河合宏之, 鈴木亮一
2. 発表標題 三次元空間の移動体に対するロバスト制御に関する研究
3. 学会等名 2022年度 電気・情報関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2022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
研究分担者	平田 研二 (Hirata Kenji) (40314364)	富山大学・学術研究部工学系・教授 (13201)	

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
---------	---------