

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04113

研究課題名（和文）制御バリア関数に基づく安全性を考慮したモバイルロボティックネットワークの協調制御

研究課題名（英文）Safe Cooperative Control of Mobile Robotic Networks Based on Control Barrier Functions

研究代表者

伊吹 竜也（Ibuki, Tatsuya）

明治大学・理工学部・専任講師

研究者番号：30725023

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、2次元平面・3次元空間上の多数のモバイルロボットから成るモバイルロボティックネットワークに対して、分散型衝突回避問題の将来的な体系化を目指して、主に(1)円形・球体以外の形状のロボット群に対する分散型衝突回避制御問題、(2) $S^0(3)$ 上の制御バリア関数に基づく安全性を考慮した運動協調制御問題、(3)制御バリア関数に基づく学習型衝突回避制御問題の3つの課題に取り組み、成果を挙げた。各課題に対して、新規の制御則の提案や収束性・制御性能解析、シミュレーション検証、さらには実機による実験検証を行い、その学術的意義は多数の学術雑誌・会議論文に採録されることにより認められている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の成果および研究代表者の本研究課題に関連する先行研究の成果について、国内外で継続的に学術雑誌・会議論文に採録されることによりその学術的意義が認められている。本研究を引き続き継続、発展させ、将来的に様々な種類のモバイルロボット群に対する $SE(3)$ 上の衝突回避問題の体系化が実現できれば、Society 5.0や超スマートシティ等の次世代制御・ネットワーク技術の実現において、モバイルロボット群の安全な運用という観点で今後の発展に寄与すると期待する。

研究成果の概要（英文）：Aiming to systematically develop the synthesis of distributed collision avoidance in mobile robot networks composed of multiple mobile robots on 2D planes or in 3D spaces, this research project focused mainly on three issues: (i) distributed collision avoidance control for a group of mobile robots with shapes other than circles or spheres; (ii) safety-assurance motion coordination control based on control barrier functions on $S^0(3)$; and (iii) collision avoidance control using learning-based control barrier functions. For each of these problems, we proposed novel control laws, analyzed convergence or control performance, performed simulation verification, and also performed experimental verification with real hardware. The academic significance of these efforts has been recognized by numerous publications in academic journals and conference proceedings.

研究分野：制御工学

キーワード：モバイルロボティックネットワーク 協調制御 制御バリア関数

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

AI や IoT というワードが世間に認知されるようになり、近年ではさらに Society 5.0 や超スマートシティ等の次世代制御・ネットワーク技術の構築に産官学の多様な機関が活発に取り組んでいる。その根幹技術の1つとして、マルチエージェントシステムの分散型協調制御が注目されており、特に制御分野ではこれらの技術に先駆けてここ 2, 30 年精力的に研究が行われてきている。分散型協調制御の目的は、個々のエージェントが局所的に情報交換を行い、システム全体としてある共通の目的を達成することである。その中でも、2次元平面上のビークルや3次元空間上のマルチロータ型無人航空機(以降、ドローンと呼ぶ)等の多数のモバイルロボットから成るモバイルロボティックネットワークの運動協調制御は、環境モニタリングや編隊制御、高効率な物資運搬等、非常に多岐に渡る工学的応用が期待されている。

この分散型運動協調制御技術の社会での実現において、最優先事項は安全性の保証である。特に、モバイルロボティックネットワークのようにロボットが群として多数存在する場合は、個々のロボットの人や建造物等への障害物回避だけではなく、ロボット同士の衝突回避も考慮しなくてはならない(以降、どちらも衝突回避と呼ぶ)。この衝突回避においても、群として多数のロボットを運用する場合は各ロボットが局所的な情報を用いて自律分散的に回避行動をとることが望ましい。

2. 研究の目的

本研究では、2次元平面・3次元空間上の多数のモバイルロボットから成るモバイルロボティックネットワークに対して、安全性を保証した運動協調制御手法を構築することを目的とする。ここでいう安全性として、本研究では主に各ロボットやロボット間の衝突回避を考慮し、この保証に制御バリア関数と呼ばれる制約付き最適化問題と相性の良い関数を導入する。提案制御手法では、各ロボットが局所的な情報を用いて自律分散的に最適化問題を解くことで制御入力を決定し、ネットワーク全体として衝突回避を保証しつつ所望の運動協調を実現する。本研究では、特に従来研究では取り込まれていなかった(1)円形・球体以外の形状をもつモバイルロボット群の衝突回避問題、(2)ベクトル空間とは異なる空間として、3次元空間上の姿勢を表す $S^0(3)$ 上の制御バリア関数に基づく安全性を考慮した運動協調制御問題、および(3)機械学習機構を組み込んだ衝突回避問題に取り組む。また、各種提案制御手法に対して実機を用いた実験検証を行うことも本研究の特徴である。

3. 研究の方法

分散型衝突回避問題の将来的な体系化を目指して、本研究では主に以下の3つに大別される課題に並行して取り組んだ。

- (1) 円形・球体以外の形状をもつモバイルロボット群に対する分散型衝突回避手法の提案
- (2) $S^0(3)$ 上の制御バリア関数に基づく安全性を考慮した運動協調制御手法の提案
- (3) 制御バリア関数に基づく学習型安全保証制御手法の提案

さらに、各種提案制御手法に対して数値シミュレーションによる検証だけではなく可能な限り実機を用いた実験検証を行うことで、その有用性や妥当性を示した。

4. 研究成果

課題(1) 円形・球体以外の形状をもつモバイルロボット群に対する分散型衝突回避手法の提案

まず、楕円(体)形状を有するロボット群に対して、2種類の衝突回避制御手法を新たに提案した。特に、提案手法では、楕円(体)形状を扱う上では欠かせないロボットの姿勢を陽に考慮した新規の制御バリア関数を設計しており、そのうちの1つは当初期待していた制御バリア関数の幾何学的解釈が容易なものとなっている。さらに、各ロボットに対して近傍のロボットの数が変化する場合の安全保証の厳密な解析を行った。

また、制御バリア関数に基づく安全性を考慮した分散型協調制御問題に関連して、各ロボッ

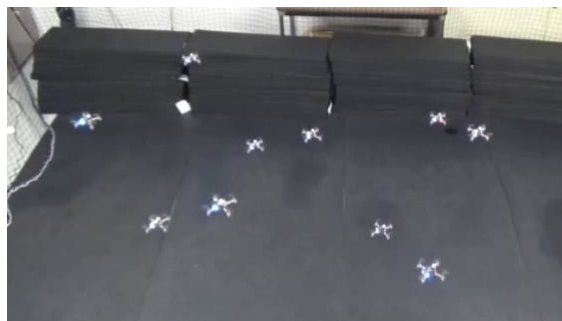


図1 ドローン群による群れ制御実験の様子

トが制御入力に外乱を含む場合の分散型衝突回避手法の提案を新たに行った。さらに、より一般的なシステムモデルを有するロボット群に対して、これまでの衝突回避の定義を包含する制御バリア関数に基づくより一般的な安全性の定義を与え、この可能な限り一般化した問題設定に対しても分散型安全保証制御手法の提案を行った。

以上の各種提案手法に対して、数値シミュレーション検証およびピークルやドローンを用いた実験検証を行った。特に、実験検証では多数の小型ドローンを用いた実験環境を新たに構築した(図1)。

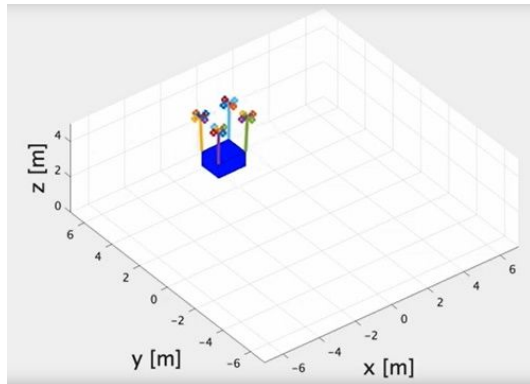


図2 協調貨物運搬制御シミュレーションの様子

課題(2) $S^0(3)$ 上の制御バリア関数に基づく安全性を考慮した運動協調制御手法の提案

まず、個々のドローンが無理な運動制御要求を受けた際に機体を大きく傾けることにより墜落の危険性が生じることを考慮し、過度な姿勢変動抑制手法を新たに提案した。この提案手法では、研究代表者が独自に考案した $S^0(3)$ 上の制御バリア関数が用いられている。

つぎに、単一または複数のドローンによる吊り荷型貨物運搬制御問題を考察した。ここでは、 $S^0(3)$ 上の制御バリア関数を用いて、ドローン自体の姿勢変動の抑制や、貨物の揺れの抑制、さらには複数のドローンによる協調運搬の場合のドローン間の衝突回避を実現する安全保証制御手法の提案を行った。

以上の各種提案手法に対して、数値シミュレーションによる検証(図2)や新たな実験環境の構築を行った。特に、単一のドローンの場合に対しては検証実験に成功した(図3)。

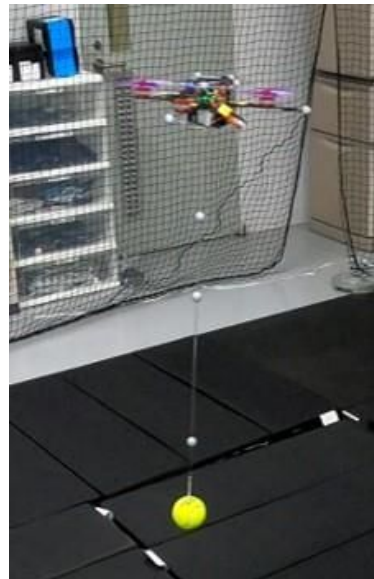


図3 貨物運搬制御実験の様子

課題(3) 制御バリア関数に基づく学習型安全保証制御手法の提案

まず、単体ではあるが一般の非線形システムに対して、機械学習の一手法であるガウス過程回帰による学習結果に基づいて安全性を保証する新たな制御バリア関数の設計手法を提案した。さらに、この学習型制御バリア関数のモバイルロボットの運動制御に関する応用例として、ドローンモデルを対象とし、飛行地点の観測データに基づく危険領域の飛行を回避する制御手法や障害物回避手法を提案し、実験検証を行った(図4)。

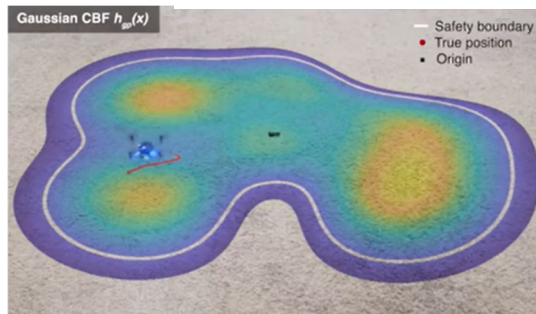


図4 学習型安全保証制御実験の様子

さらに、モバイルロボット群の学習型協調制御に関連して、研究代表者の先行研究を発展させ、ガウス過程回帰を用いたオンライン計算に優れた分散型環境学習に基づく被覆制御手法を新たに提案し、図1の実験環境を用いて実験検証に成功した。

その他の研究成果

以上の本研究課題の主な研究成果に加えて、安全性を考慮したドローンの機体設計手法や、ガウス過程回帰による未知外乱学習に基づくドローンの運動制御手法、ロボット群による機械学習に基づく分散型障害物形状学習手法、カメラによる視覚情報を用いた3次元剛体の(安全性を考慮した)運動制御手法、ハプティクスデバイスによる力フィードバック情報を用いたドローンの安全遠隔制御手法等を新規に提案し、各種手法に対して収束性・運動性能解析やシミュレーション・実験検証を行うなど、本研究課題に関連する研究成果を多数挙げた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 伊吹竜也, 山内淳矢, 畑中健志	4. 巻 59
2. 論文標題 Passivity Shortageに基づく離散時間3次元位置姿勢同期制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 505-516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.59.505	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/ieejc.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 -

1. 著者名 Tatsuya Ibuki, Hiroto Yoshioka, Mitsuji Sampei	4. 巻 15
2. 論文標題 Robust Pose Tracking Control for a Fully-actuated Hexarotor UAV Based on Gaussian Processes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 201-210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2022.2125242	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 Tatsuya Ibuki, Taichi Hirano, Riku Funada, Mitsuji Sampei	4. 巻 37
2. 論文標題 Optimization-based Distributed Safety Control with Applications to Collision Avoidance for Mobile Robotic Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 87-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2022.2119886	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 Mouhyemen Khan, Tatsuya Ibuki, Abhijit Chatterjee	4. 巻 10
2. 論文標題 Gaussian Control Barrier Functions: Non-parametric Paradigm to Safety	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 99823-99836
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3206372	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 該当する

[学会発表] 計20件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Tatsuya Ibuki
2. 発表標題 Learning-based Motion Control of Mobile Robots
3. 学会等名 6th International Conference on Image, Video and Signal Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tatsuya Ibuki
2. 発表標題 Design of Control Barrier Functions for Safety-assurance Control of Mobile Robots
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kai-Yuan Liu, Tatsuya Ibuki, Yen-Chen Liu
2. 発表標題 Safe Bilateral Teleoperation for an UAV Using Control Barrier Functions and Passivity
3. 学会等名 2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤圭祐, 伊吹竜也
2. 発表標題 クアドロータの吊り荷運搬における円錐型バリア関数に基づく横揺れ抑制制御
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koju Nishimoto, Riku Funada, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 Collision Avoidance for Elliptical Agents with Control Barrier Function Utilizing Supporting Lines
3. 学会等名 2022 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 機械学習のための関数解析入門 -カーネル法実践：学習から制御まで-	4. 発行年 2023年
2. 出版社 内田老鶴圃	5. 総ページ数 176
3. 書名 伊吹竜也, 山内淳矢, 畑中健志, 瀬戸道生	

〔産業財産権〕

〔その他〕

伊吹竜也 明治大学教員データベース https://gyoseki1.mind.meiji.ac.jp/mjuhp/KgApp?kyoinId=ymbigeoegy
--

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			
米国	Georgia Institute of Technology			
ベルギー	Universite Libre de Bruxelles			
台湾	National Cheng Kung University			