

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13775

研究課題名（和文）ドローンネットワークの学習型位置・姿勢協調制御理論の構築と実験検証

研究課題名（英文）Learning-based Pose Coordination of Multirotor UAV Networks: Theory Development and Experimental Validation

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、複数のマルチロータ型UAVから成るドローンネットワークに対する機械学習機構を組み込んだ位置・姿勢協調制御理論の構築を目指して、主に(1)ドローンネットワークの分散型位置・姿勢協調制御、(2)ドローンの学習型位置・姿勢制御の2つの課題で成果を挙げた。特に、課題(1)では最適化ベースの分散型衝突回避手法を新たに複数提案し、国際学術雑誌・会議論文に多数採録された。課題(2)では、ドローンのモデル化が難しい要素や未知の作業環境をガウス過程回帰と呼ばれる一機械学習手法を用いて確率的に推定し、その推定結果に基づく新規の位置・姿勢制御手法を提案した。双方の課題に対して実機検証も行っている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モノやヒトのネットワーク化が目覚ましく進歩している現代においても、個々のモバイルロボットの自律分散的な制御によるロボット群の効率的な制御の実現には未だ課題が多く、一般的な技術として普及されていない。本研究はこの技術の根幹となるモバイルロボット群の分散型位置・姿勢協調制御問題に取り組み、さらに新たに機械学習機構を組み込んだ新規の制御手法を提案している。研究成果の学術的意義は多数の論文採録という形で既に認められている一方で、提案した分散型協調制御手法や機械学習機構の組み込み手法が、モバイルロボット群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期待する。

研究成果の概要（英文）：The objective of this project is to develop new pose coordination control theory incorporating a machine learning mechanism for multirotor UAV networks. Two topics were mainly tackled: (1) distributed pose coordination; and (2) learning-based pose control of multirotor UAVs. Especially, distributed optimization-based collision avoidance techniques were newly proposed in topic (1), which were published in international journals and conference proceedings. In topic (2), new pose control laws based on Gaussian processes were presented, where Gaussian processes estimated unknown dynamics of a multirotor UAV or unknown working environments. Experimental validation was also presented for both topics.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：制御工学 協調制御 機械学習 ドローンネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

すべてのモノとモノ、モノとヒトがネットワークで繋がれる超スマート社会の実現に向けた昨今の取り組みに先駆けて、制御分野ではここ 30 年ほど、多数のエージェントがネットワークで繋がれたマルチエージェントシステムの分散型協調制御問題に活発に取り組んでいる。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、位置・姿勢協調制御はモバイルセンサネットワークによる環境モニタリングや UAV ネットワークのフォーメーション制御、重量の大きい物資の機敏な運搬などへの応用が期待されている。この技術の社会での実現に向けて、安価で小型な通信機器やセンサ、計算機が既に存在している。一方で、高い運動性能と機械的簡便さから、クアッドロータに代表されるマルチロータ型 UAV (本研究でドローンと呼ぶ) が 3 次元空間上のエージェントを担う対象として大きく期待されている。

協調制御問題は、システムのモデルに基づく制御設計を行うため、一定の安定性・制御性能を保証できる。しかし、多数のエージェントを扱うことによる弊害として、非常に簡便なモデルを用いた理論結果がほとんどであり、多くの提案手法は実用化には程遠い。また、例えばドローンの細かい機械・電子的要素や空力干渉のような複雑なダイナミクスを直接扱うことは容易ではなく、ヒトによるシステム・環境のモデル化にも限界がある。この問題の解決策として、実データからその入出力関係の特徴付ける実用的な学習機構と従来のモデルに基づく協調制御手法との統合による、理論保証と実用性の双方を実現する新規の学習型協調制御手法の開発が期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、複数のマルチロータ型 UAV から成るドローンネットワークに対して、各ドローンが局所的な情報交換および作業環境の学習に基づいて分散的に制御を行うことで、ネットワーク全体として所望の位置・姿勢協調を実現することを目的とする。研究代表者らの先行研究で既に提案した位置・姿勢協調制御設計法では、非常に簡便なドローンモデルが用いられているため、実験検証の結果が良好ではなく実用性が高いとはいえない。実際のドローンは、各々の搭載されている内部コントローラやロータ間干渉等のモデル化されていないダイナミクス、および風やドローン間干渉による環境外乱の影響が無視できず、またそのモデル化には限界がある。そこで、本研究ではこれらの要素に対して実データからその入出力関係の特徴付ける学習機構を組み込んだ新規の協調制御手法を提案し、安定性・制御性能の向上を図る。さらに、学習型位置・姿勢協調制御手法の有効性を示すために、クアッドロータやヘキサロータを複数機用いた実験システムを新たに構築し、実機実験を行う。

## 3. 研究の方法

ドローンネットワークの学習型位置・姿勢協調制御問題に対して、主に以下の 3 つに大別された課題に取り組んだ。

- (1) ドローンネットワークに対する新規の分散型位置・姿勢協調制御手法の構築
- (2) 単一のドローンに対する新規の学習型位置・姿勢制御手法の構築
- (3) ドローンネットワークに対する分散学習型位置・姿勢協調制御手法の考案

## 4. 研究成果

### 【課題(1) ドローンネットワークに対する新規の分散型位置・姿勢協調制御手法の構築】

まず、ドローンネットワークの分散型フォーメーション制御問題を考察した。ここでは、微分幾何学における Differential Flatness という性質に着目したドローンのダイナミクスの厳密な部分線形化手法を導入した。これにより、従来の線形システムに対するフォーメーション制御手法の適用に加えて、ドローン間の相対位置・速度の状況から動的に衝突を回避できる新規の分散型衝突回避制御手法を新たに提案した。

つぎに、ここで用いた衝突回避のアイデアを一般の 3 次元剛体群に適用し、マルチエージェントシステムの基礎的な協調運動の一つである群れ制御問題を考察した。群れ運動が集合・整列・分離の 3 要素から成るとする知見を基に、集合・整列則は研究代表者らの従来研究の一つである分散型位置・姿勢同期制御則を適用し、本研究では特に分離則を実現する分散型衝突回避手法を新たに提案した。具体的には、制御バリア関数と呼ばれる拘束を表現するスカラ関数を導入し、衝突回避を保証するために剛体間の相対距離情報に基づく制御バリア関数を構成した。制御バリア関数の時間微分と各剛体の位置・姿勢ダイナミクスから衝突回避のための制御入力に関する条件式を導出し、これを最優先で満たすべき拘束式としつつ可能な限り位置・姿勢同期を達成することを目的とした最適化問題を解くことにより、集合・整列・分離則が実現される。この最

適化問題は個々の剛体に対して各々の近傍との相対情報のみを用いて定式化できるため、各剛体は完全に自律分散的に制御入力を決定できる。また、ここで定式化した最適化問題は単純な二次計画法で表現できるため実装も容易であり、実機実験による有効性検証も行った。

さらに、上記で用いたベクトル空間上の制御バリア関数から3次元の姿勢を表す3次元特殊直交群上の制御バリア関数に拡張し、球面上に拘束された剛体群に対して球面の弧長に基づく分散型衝突回避則を新たに提案した。現在、この提案手法の応用として安全性を考慮したドローンネットワークの協調貨物運搬制御問題の考察を検討している。また、2次元平面上の楕円形状を有する剛体群に対しても同様の最適化ベースの分散型衝突回避則を提案した。ほかにも研究代表者らの従来研究の発展として、各剛体のダイナミクスにある仮定を満たす外乱を考慮した、外乱の影響を抑制する新たな分散型位置・姿勢同期則の提案も行った。

以上の成果はいずれも理論的に収束性解析を行っており、シミュレーション・実機実験によりその有用性・有効性を検証している。

#### 【課題(2) 単一のドローンに対する新規の学習型位置・姿勢制御手法の構築】

まず、ドローンのダイナミクスに対して、モデル化が難しい要素をガウス過程回帰と呼ばれる一機械学習手法を用いて外乱として確率的に学習し、学習結果の分散情報をダイナミクスの不確かさとして捉え、この不確かさを抑制する学習型ロバスト位置・姿勢制御手法を新たに提案した。さらに、提案制御手法の有効性検証として、ドローンのモデル化誤差の抑制の検証を目的とした通常の飛行における軌道追従性能評価実験、および地面付近の飛行で特に地面からの空力干渉を強く受けることに着目したドローンの着地制御実験等を行い、いずれの実験でも良好な結果(位置・姿勢制御性能)を得ることができた。以上の内容は、研究代表者らが新たに考案した3次元位置・姿勢制御が容易な全駆動ドローンを対象としており、このドローンに対してオンライン計算に優れた逐次型3次元位置・姿勢最適制御手法も新たに提案した。

つぎに、単一のドローンに対してダイナミクスの未知パラメータ学習に基づく安全性を考慮した姿勢制御手法を新たに提案した。ここでは、ガウス過程回帰にParticle Swarm Optimizationと呼ばれる最適化手法を統合することで、確率的な意味で最適なパラメータ推定手法を提案した。同様に、ガウス過程回帰を用いて作業空間の安全性を学習する機構を新たに考案し、この学習機構をドローンのダイナミクスを陽に考慮した位置・姿勢制御則と統合することで、ドローンの未知の作業空間における安全性を保証した学習型位置・姿勢制御手法を新たに提案した。この提案手法に対しても実機実験により有効性を検証している。

#### 【課題(3) ドローンネットワークに対する分散学習型位置・姿勢協調制御手法の考案】

以上の課題(1)、(2)の成果も踏まえて、ドローンネットワークの分散学習型位置・姿勢協調制御問題として、ガウス過程回帰に基づく被覆制御手法を新たに提案した。被覆制御問題は、作業環境全体を効率良く被覆(センシング)するためにセンサを搭載したモバイルロボットを最適に分散配置することを目的としており、従来研究ではこの作業環境の重要度(環境値情報)を既知としたものがほとんどであった。これに対して、本研究では環境値情報を未知とし、ガウス過程回帰でこれを学習することを試みた。具体的には、不確かさの大きい領域に積極的に環境値情報を取得しにかかる探索制御メカニズムを組み込んだ、新たな分散学習型被覆制御手法を提案した。提案手法はシミュレーションにより有用性が示されているが、コロナ禍の影響もあって実験検証まで行えておらず、実機実験による有用性検証が課題として残されている。

#### 【その他の研究成果】

主目的であるドローンネットワークの学習型位置・姿勢協調制御理論の構築に向けて、協調制御理論と学習機構の融合の検討を行った。ここでは、主にガウスフィルタと呼ばれる研究代表者らが考案した統計情報から確率過程を推定する手法の適用可能性を考察した。対象は異なるが、プラグインハイブリッド自動車に対してガウスフィルタを活用した統計情報に基づく逐次型最適制御手法を新たに提案しており、本手法のドローンへの応用も期待している。また、本研究に関連するものとして、ドローンのロータ配置構造に対する耐故障性の解析、およびそれを応用した耐故障性を保証しつつ運動性能の向上を目的とした新たなドローンの構造設計手法も提案した。さらに、制御バリア関数とは異なり、Explicit Reference Governorと呼ばれる目標値補正機構に基づく新たな拘束付き位置・姿勢制御手法の提案や、実際の工学的応用を考慮したドローンネットワークの協調貨物運搬制御問題の考察も行った。

以上の研究成果について、制御分野の国内外の学術雑誌や国際会議に多数採録され、その学術的意義が認められている。他方、学習結果が確率的に得られるという制御理論との融合のし易さから、本研究のほとんどがガウス過程回帰を機械学習手法として採用している。したがって、上記のガウスフィルタを含めたほかの回帰手法やニューラルネットワークなど、ガウス過程回帰とは異なる機械学習手法を組み込んだ位置・姿勢協調制御手法の考案が今後の課題である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shunsuke Mochida, Remma Matsuda, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei	4. 巻 37
2. 論文標題 A Geometric Method of Hoverability Analysis for Multirotor UAVs With Upward-Oriented Rotors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Robotics	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） 10.1109/TR0.2021.3064101	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, Sean Wilson, Aaron D. Ames, Magnus Egerstedt	4. 巻 4
2. 論文標題 Distributed Collision-Free Motion Coordination on a Sphere: A Conic Control Barrier Function Approach (The contents of this paper were also selected by CDC 2020 Program Committee for presentation at the Conference)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 976-981
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LCSYS.2020.2997952	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 Tatsuya Ibuki, Sean Wilson, Junya Yamauchi, Masayuki Fujita, Magnus Egerstedt	4. 巻 5
2. 論文標題 Optimization-Based Distributed Flocking Control for Multiple Rigid Bodies (The contents of this paper were also selected by ICRA 2020 Program Committee for presentation at the Conference)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 1891-1898
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2020.2969950	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 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 山内淳矢, 土井護, 伊吹竜也, 畑中健志, 藤田政之	4. 巻 55
2. 論文標題 受動性に基づく3次元空間内での外乱を考慮した剛体運動同期制御	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 808-815
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.55.808	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22件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Mouhyemen Khan, Tatsuya Ibuki, Abhijit Chatterjee
2. 発表標題 Safety Uncertainty in Control Barrier Functions Using Gaussian Processes
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mahato Endo, Tatsuya Ibuki, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 Collision-free Formation Control for Quadrotor Networks Based on Distributed Quadratic Programs
3. 学会等名 2019 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Ibuki, Takeshi Hatanaka, Zhihua Qu
2. 発表標題 Discrete-time 3-D Attitude Synchronization Based on Passivity Shortage
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 Renma 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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 瀬戸道生, 伊吹竜也, 畑中健志	4. 発行年 2021年
2. 出版社 内田老鶴圃	5. 総ページ数 168
3. 書名 機械学習のための関数解析入門 -ヒルベルト空間とカーネル法-	

〔産業財産権〕

〔その他〕

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

## 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	California Institute of Technology	
ベルギー	Universite libre de Bruxelles		