

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04104

研究課題名（和文）半自律型分散協調農場モニタリング制御システムの構築と検証

研究課題名（英文）Design and Demonstration of Semi-Autonomous Distributed Farm Monitoring Systems

研究代表者

畑中 健志（Hatanaka, Takeshi）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：10452012

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、農場モニタリング、特に農地や農作物の3次元モデル構築のための新たなドローンネットワークの分散協調制御法を提案し、理論、シミュレーション、ラボ実験、フィールド実験によってその効果を検証した。また、本協調制御に人間の介入を許容する半自律制御系を新規に提案し、操作データに基づく人間のモデル化やその特性解析を実施した。前者はイタリアCNR、後者はセビリア大学およびメリーランド大学との国際共同研究として実施し、複数の国際誌および国際会議にて発表済みである。本研究を通じて、適切な人間とドローン群の協調によって、3次元モデルの精度が大幅に向上することを明示することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空撮画像からの3次元モデル復元はコンピュータビジョンの分野で長く研究されてきたが、ここでは画像データは所与のものとして復元精度の向上が主題であった。これに対して、本研究課題はドローン群の適切な協調制御が復元精度と画像サンプリングの効率向上に大きく寄与することを示した。また、適切な人間の介入によってさらなる精度向上を実現する半自律制御を提案するとともに、3次元運動操作時の人間動特性に関する新たな知見を導出した。これらはいずれも高い学術的新規性を有する成果である。また、フィールド実験を通して提案システムの実現可能性を明示したことで、農作業の負荷軽減という社会課題の解決に寄与する可能性を明示した。

研究成果の概要（英文）：In this project, we proposed a novel distributed cooperative control method of drone networks for farm monitoring, especially for building 3D models of farmlands and crops, and verified its effectiveness through theory, simulation, laboratory experiments, and field experiments. We also proposed a novel semi-autonomous control system that allows human intervention in this cooperative control, and conducted human modeling and its characteristic analysis based on human operation data. The former was conducted as an international joint research project with the Italian CNR, and the latter with the University of Seville and the University of Maryland, and has been published in several international journals and international conferences. Through this research, we have succeeded in clearly demonstrating that appropriate human-drone swarm coordination can significantly improve accuracy of the 3D models.

研究分野：システム制御

キーワード：農場モニタリング ドローンネットワーク 半自律制御 分散協調制御

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国の農業人口の減少や高齢化が喫緊の社会的課題となっており、農作業の自動化による高齢従事者の負荷軽減と農業従事者の生産性向上が求められていた。農作業の自律化に向けた課題は、環境の不確かさや未整備な構造にあり、完全自律型のシステム構成には限界があり、環境に応じた柔軟な推論と意思決定能力を有する人間とロボットの適切な協調が肝要であることが指摘されていた。しかしながら、当時の学術研究は依然として古典的な master-slave 型の協調を想定しており、人間の特性を学習して適切に人間の操作をサポートすることを目指した研究は限定的であった。また、生産性の向上に向けては、複数ロボットの協調が望まれるが、人とロボット群の協調制御に関しては、我々の研究を含め、極めて少数の研究成果しか報告されていなかった。

2. 研究の目的

以上の背景を元に、本研究課題では、農場モニタリングを対象とし、

- 1) 安定な協調の実現を保證する半自律型分散協調制御アーキテクチャの設計
- 2) 人の特性学習と自律性決定機構の設計
- 3) 検証実験の実施

の3点を目的に据えた。課題1)では、人の負荷軽減を前提に、人は個々のドローンに対する指令を下すのではなく、抽象化された「群」に対して指令を下す構造を想定した。その際、ドローン群が分散協調制御によって一団で行動し、かつ人をループに含むシステムにおいて安定的な運用を理論的に保證するアーキテクチャを設計することとした。課題2)では、人間の操作データを元に人間の学習モデルを構築し、指令データから適切な自律性を自動決定する機構を設計することとした。また、課題3)では、本学の超スマート社会卓越教育院にて申請者を中心に構築したスマートロボティクス教育研究フィールド Robot Zoo Sky 上に構築したシステムを実装し、性能解析、人間の心理・物理的な負荷の解析など、多岐に及ぶ項目について検証することとした。

3. 研究の方法

まず、課題1)に対して、以下の方法を採用した。なお、課題1-4)～課題1-6)は当初の計画にはなかったが、研究を進める上で様々に国内外の研究者との共同研究が花開いた結果、実施可能となった内容である。

- 1-1) 人が複数ドローンを誘導する制御問題を新規に考案し、不確かな人間の存在下においても安定性を保證する制御構造を提案する。
- 1-2) 農場環境モニタリングと3Dモデル構築を効率化するマルチドローン協調制御問題を新規に考案し、その分散解法を制御理論に基づいて構築する。
- 1-3) つぎに、本制御法を Robot Zoo Sky 上に実装し、これが画像データから再構築した3Dモデルの質向上に資することを検証する。
- 1-4) イタリアの農学研究者との共同により、現地のリンゴ園を模したシミュレータを構築し、現実的な環境下における提案法の有効性を検証する。
- 1-5) 屋外における提案法の実現可能性を検証するため、東京都稲城市の葡萄園にてマルチドローンの協調制御実験を実施し、提案法の有効性を検証するとともに、作物の3Dモデルの品質向上に資することを検証する。
- 1-6) 本学に設置されたスマート農業教育研究フィールドにおいて提案法を実装し、広域の農場に対しても提案法が有効に機能することを検証する。
- 1-7) 1-1)で考案した人・ロボット群協調制御法と1-2)のマルチドローンの協調制御を融合し、新たな人・ロボット群協調制御法を提案する。

つぎに、課題2)については以下の方法を採用した。

- 2-1) 人とロボット群協調制御の安定性を保證する上でカギを握る受動性について解析するため、人間の操作データから動的モデルを構築する。
- 2-2) 人間モデルの受動性を解析し、受動性逸脱時にも安定性を保證する新たな人・ロボット群協調制御法を提案する。
- 2-3) 人間の受動性に応じて自律性を適切に決定する機構を設計する。

最後に、課題3)に関して、以下の方法を採用した。

- 3-1) 複数の被験者実験を実施し、ネットワーク構造やインターフェースの選定が制御性能に与える影響を解析する。
- 3-2) 上記の被験者実験を元に、ネットワーク構造やインターフェースの選定が人間の受動性に与える影響を解析する。
- 3-3) 各被験者に対して NASA TLX アンケートを実施し、インターフェースの選定が人間の操作負荷に与える影響を解析する。

4. 研究成果

課題 1-1) については、想定通り安定性を保証する制御構造を受動性の概念に基づいて提案し、人間が満たすべき条件を理論的に明らかにすることに成功した。

課題 1-2) については、撮影角度を考慮した 5 次元空間上の被覆制御問題を新規に提案し、制御バリア関数を用いた新規の制御方法を提案することに成功した。本成果は IEEE Control Systems Letter に国際共著論文として採録・掲載された。また、計測自動制御学会制御部門マルチシンプोजウムにて研究奨励賞を受賞した。

課題 1-3) については、Robot Zoo Sky での屋内実験に成功し、提案法が画像サンプリングの意味で理想的なドローン運動を実現することを確認した。また、取得した画像データに対して Structure-from-Motion とよばれる手法を適用することで 3D モデルを実際に構築し、1-2) で提案した制御法が大幅にモデル精度を向上させることを明らかにした。本成果は国際会議 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications に国際共著論文として発表した。また、以上の成果をもとに、農学を専門とする者を含むイタリアの研究者とともにワークショップ Control Systems and Robotics in the Framework of Agriculture 4.0 をオーガナイズし、成功を収めた。さらに、ドローン運動のみならず、カメラ姿勢を同時制御する問題を新たに定式化し、その解法を提案するとともに、本手法がさらにモデル精度を大幅に向上させることを示した。加えて、GPU を利用した計算の高速化についても検証を行い、提案法の実時間での実行可能性を明らかにした。本成果は国際論文誌に採録・掲載された。

課題 1-4) については、実際に異分野融合国際共同研究を実施し、提供されたデータを元に実際のリング圏を模したシミュレータを構築した。また、共同研究者の有する樹木位置の推定手法を統合することで、画像サンプリングの効率が二倍程度向上することを示した。本成果は国際会議 7th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture に異分野融合国際共著論文として採録され、発表された。

課題 1-5) では、モーションキャプチャという屋内限定の計測装置を前提とする 1-3) の実装方法を修正し、屋外でも利用可能な AR マーカーを用いた計測方法によって提案法が実装可能であることを示した。また、取得した作物の画像データから作物の 3D モデルを構築し、十分な精度のモデルが構築できることを示した。また、本実験を通して 1-2) の手法が広域の画像サンプリングに必ずしも適さないことを明らかにし、広域のサンプリングに適した制御方法を新規提案した。本成果は学術論文として国際誌に採録・掲載された。

課題 1-6) では、1-5) の AR マーカーを用いた位置計測システムをさらに改良し、RTK-GNSS を取り込んだ実験システムを構築し、マーカー等追加の設備を敷設することなく提案法が実装可能であることを示すことに成功した。

課題 1-7) では 1-2)、1-3) で提案した分散制御法と 1-1) で提案した人とマルチドローンの協調制御を融合し、安定性を担保した上で画像サンプリング精度を向上させる新規の人・ロボット群協調制御手法を提案することに成功した。提案法の特徴は、null-space-based interaction と呼ばれる手法を用いることで、ドローン群の画像サンプリングのための運動が人間に知覚されない制御構造を採用することにより、操作性の劣化や安定性の欠如を招かないことを理論的に保証したところにある。

以上を要するに、課題 1) では様々な新規のマルチドローン分散制御法、人・ロボット群協調制御法を提案することに成功し、それらの実装可能性を屋内・屋外実験を通して示すことに成功した。

課題 2) については、3 次元のマルチロボットのナビゲーション実験の操作データを元に人間の動的モデルを構築し、インターフェースやネットワーク構造に依らず、必ずしも人間が受動性を満たさないことを明らかにした。そこで、人間の劣受動性を許容する新たな制御構造を提案し、人間が受動性を満たさない場合にも逸脱量があるレベルを超えなければ安定性と運動同期が保証されることを理論的に保証した。また、新制御構造の下で操作実験を実施し、実験データから再度人間モデルを構築、ネットワーク構造に依らず人間が要求される劣受動性のレベルを満足することを示すことに成功した。以上の成果は書籍 Cyber-Physical-Human Systems: Fundamentals and Applications の Chapter としてまとめ、国内の研究者では唯一本書籍に掲載された。さらに、人間の受動性の逸脱度に応じて人とロボット群の間のフィードバックの強さを調整するコンセプトを示した。

課題 3) については、3 次元のナビゲーションを対象に 2D ディスプレイ + ゲームコントローラ、2D ディスプレイ + VR コントローラ、ヘッドマウントディスプレイ + VR コントローラということなるインターフェースに対して操作実験を行い、制御性能や受動性に関する客観評価、NASA TLX に基づく人間の主観評価を 10 名の被験者に対して実施した。結果として、すべての項目において、ヘッドマウントディスプレイ + VR コントローラのペアが最も優れた結果を与えることが確認され、VR 技術がもつ優位性が科学的に明らかになった。特に、受動性に代表される動的な特性に関する解析は従来研究には確認できない。以上の成果は IEEE Open Journal of Control Systems の Special section である「Modeling, Control, and Learning Approaches for Human-Robot Interaction Systems」に国際共著論文として採録、掲載された。

以上の成果が認められ、計測自動制御学会制御部門から 2023 年度パイオニア技術賞を受賞した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Lu Zhiyuan, Yamashita Shunya, Yamauchi Junya, Hatanaka Takeshi	4. 巻 15
2. 論文標題 Distributed online assignment of charging stations in persistent coverage control tasks based on LP relaxation and ADMM	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 191 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2022.2125246	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 NAKAYAMA Ryoga, TANEMURA Masaya, CHIDA Yuichi, AZUMA Shun-ichi, HATANAKA Takeshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Data-driven Search for the Graph Structure Improving Control Performance in Cooperative Control of Human-vehicle Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 103 ~ 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.59.103	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 Shimizu Takumi, Yamashita Shunya, Hatanaka Takeshi, Uto Kuniaki, Mammarella Martina, Dabbene Fabrizio	4. 巻 6
2. 論文標題 Angle-Aware Coverage Control for 3-D Map Reconstruction With Drone Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 1831 ~ 1836
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2021.3135466	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
1. 著者名 Dan Hayato, Hatanaka Takeshi, Yamauchi Junya, Shimizu Takumi, Fujita Masayuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Persistent Object Search and Surveillance Control With Safety Certificates for Drone Networks Based on Control Barrier Functions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 333 ~ 345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2021.740460	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Masaya Suenaga
2. 発表標題 Experimental Study on Angle-aware Coverage Control with Application to 3-D Visual Map Reconstruction
3. 学会等名 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Martina Mammarella
2. 発表標題 3D Map Reconstruction of An Orchard Using An Angle-aware Covering Control Strategy
3. 学会等名 7th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tkeshi Hatanaka
2. 発表標題 Impact of VR Technology on a Human in Semi-autonomous Multi-robot Navigation: Control Theoretic Perspective
3. 学会等名 4th IFAC Workshop on Cyber-Physical Human Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 住野 匠
2. 発表標題 VRインターフェースを利用した人・ロボット群協調制御における人間モデリングと受動性解析
3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水 拓実
2. 発表標題 果樹園における多角度撮影型被覆制御の実証実験
3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中山 龍雅
2. 発表標題 人間とロボット群の協調制御系における人間に対する追従しやすいグラフ構造の設計
3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米田 堯広
2. 発表標題 人間と平面移動型ロボット群の協調制御系における制御性能を考慮したグラフ構造探索
3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水 拓実
2. 発表標題 3次元農地マップ構築のための多角度撮影型被覆制御と検証実験
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田 優也
2. 発表標題 安全性確保に向けたバリア保証付き許容集合の乱択学習
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月 高広
2. 発表標題 人・ロボット群協制御系におけるVR技術の影響解析
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Shimizu
2. 発表標題 Angle-aware Coverage Control for 3D Map Reconstruction with Drone Networks
3. 学会等名 2022 American Control Conference (国際学会)
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	山内 淳矢 (Junya Yamauchi) (60824563)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教 (12601)	

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