

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2018～2019
課題番号：18H05903・19K21077
研究課題名（和文）持続的環境モニタリングに向けた協調自律モバイルセンサネットワークシステムの構築

研究課題名（英文）Shared Autonomous Mobile Sensor Network Systems for Persistent Environmental Monitoring

研究代表者
山内 淳矢（Yamauchi, Junya）

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：60824563
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、持続的環境モニタリングに向けた協調自律モバイルセンサネットワークシステムの構築に向けて、(1) ドローン群によるフィールドの指定・複数台地上ロボット群の動的な位置推定、(2) 環境重要度の学習と被覆制御、(3) 電池充電を考慮したモニタリングの持続化に取り組んだ。(1)に関しては、地上ロボットの動的な位置推定に関する理論構築に成功し、論文誌に採択された。(2)に関しては、学習した環境重要度に応じた被覆を達成するアルゴリズム提案に成功し、国際会議に採択された。(3)に関しては、計画通りロボット群の電池を自律的に充電させるアルゴリズム提案を行い、実験による検証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ロボット制御では様々な制約のもと、目的を達成する必要がある。本研究課題では、ロボットの安全性、性能保証、制御の持続化を制約条件として記述し、最適化問題として記述可能であることを明らかにした。また、ロボット制御の場合は実時間性が特に重要であり、実験結果からも本研究課題で提案したアルゴリズムが実時間での適用が十分可能であることを示し、学術的に意義深い結果である。また、環境のモニタリングは重要な社会的課題である。本研究課題はロボット群による環境モニタリングに向けた理論と実験の両面からの取り組みとなっており、社会的意義も大きい結果である。

研究成果の概要（英文）：This project aimed at (1) proposing position estimation algorithms of ground robots by multi-drones, (2) proposing learning methods for information of environments and coverage control algorithms, (3) proposing persistification algorithms of monitoring by considering battery charge for shared autonomous mobile sensor network systems. On topic (1), we succeeded in deriving theoretical results for dynamical estimation of ground robots' motion. The result was published in a domestic journal. On topic (2), we proposed coverage control algorithms according to learned information of environments. The results were published in international conferences. On topic (3), we succeeded to propose persistification algorithms of monitoring as planned, and verified the algorithms by experiments. The results were published in international conferences.

研究分野：システム制御

キーワード：制御工学 協調制御 モバイルセンサネットワーク 環境モニタリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 物理空間とサイバー空間を相互に結合したサイバーフィジカルシステムの重要性が認識され始めており、超スマート社会と呼ばれる次世代の社会構造構築に向けて、サイバーフィジカルシステムの利用が期待されていた。

(2) 超スマート社会ではロボティクスが重要な要素技術であり、ロボットにセンサを搭載して複数台をネットワーク化したモバイルセンサネットワークによる環境のモニタリングが応用先として期待されていた。

(3) 複数台のロボットを協調的に制御するアルゴリズムがシステム制御の分野で研究されていた。被覆制御は協調制御のうちの一つであり、環境のモニタリングへの有望な手法であると考えられていた。

(4) 環境の学習と被覆制御を組み合わせた研究は海外では精力的に取り組まれてきた一方、国内ではまだまだ少ない状況であった。また、安全性や性能、充電行動など様々な機能を備えた自律性の達成についても国内ではほとんど取り組まれていなかった。

2. 研究の目的

本研究は主につぎの3つの課題に取り組むことを目的とした。

(1) まず、複数ドローンにより地上を運動するロボットのフィールド情報を取得し、地上ロボットの位置を動的に推定するアルゴリズム提案を目的とした。このとき、ドローンに搭載された視覚センサを利用したアルゴリズムを想定した。

(2) 環境内でモニタリングすべき重要領域は均一ではなく、事前に知ることはできないことが想定された。そこで、ロボット群のセンサから得られた情報から環境学習を学習し、より重要な領域を被覆する制御アルゴリズムの提案を目的とした。

(3) 環境を持続的にモニタリングする場合は、バッテリー駆動のロボット群を充電させる必要がある。そこで、被覆制御を行う各ロボットに自律的に充電行動をとらせることで、モニタリングを持続化させるアルゴリズム提案を目指した。

3. 研究の方法

課題(1)に関する研究方法は以下の通りである。

(1-1) 複数ドローンを未知な環境外乱があるもとで、協調的に制御するための制御アルゴリズム提案に取り組んだ。外乱を生成する動的システムの一部モデル情報が取得可能な際に、そのモデルから外乱情報を推定することが可能であるという内部モデル原理を用いた。

(1-2) 地上ロボットの動的位置推定には、視覚情報から運動モデルを用いることで3次元運動を推定可能な推定器がすでに提案されていた。本研究課題では、その結果を複数の場合に拡張することに取り組んだ。

課題(2)に関する研究方法は以下の通りである。

(2-1) ロボット群が観測した環境情報をもとにガウス過程回帰を用いることで、環境全体の情報を推定するアルゴリズム開発に取り組んだ。

(2-2) 学習した環境の重要度に基づいて、ドローン群の視覚センサを用いた被覆を達成する制御アルゴリズムの提案に取り組んだ。

(2-3) フィールドが指定した重要度に応じてどの程度被覆されているかを被覆性能としたとき、設定した性能を保証するアルゴリズム開発を、制御バリア関数を用いた手法に基づいて取り組んだ。

課題(3)に関する研究方法は以下の通りである。

(3-1) 各ロボットの電池の状態を考慮し、被覆制御から充電行動に切り替えるアルゴリズム提案に取り組んだ。制御バリア関数により充電行動への切り替えを最適化問題として定式化し、実時間で解くことで達成を目指した。

4. 研究成果

課題(1)に関する研究成果は以下の通りである。

(1-1) 環境からロボット群が受ける外乱が線形システムにより生成される状況を考え、その線形システムの一部パラメータを用いた協調制御アルゴリズムを提案した。各ロボットに提案した協調制御アルゴリズムを適用することで、外乱を推定しつつすべてのロボット間の位置と姿勢を一致させることができることを理論的に証明した。本結果は学術雑誌に掲載された。

(1-2) 従来研究において、視覚情報から対象物の三次元運動を推定する機構と、それに基づいた制御が提案されていた。また、推定機構をネットワーク化することで協調的に推定する機構が提案されていた。本研究ではそれらを組み合わせることで、複数ドローンの視覚センサにより協調推定しながら対象物に追従する制御アルゴリズムの提案に成功した。

(1-3) 複数ドローンの視覚センサの情報を実時間処理することで対象物の情報を取得し、制御

に利用する実験システムを構築した。実験システムにより、対象物を協調的に追従する制御アルゴリズムの検証を行った。本結果は学術雑誌に掲載された。

課題(2)に関する研究成果は以下の通りである。

(2-1) 複数ドローンの視覚センサを用いて平面を被覆する問題を考え、視覚センサ間に被覆の穴が生じない制御アルゴリズムを提案した。被覆の穴はドローン群が集中している場所で生じる可能性があり、重要な情報がある可能性が高い場所である。被覆穴が生じさせないことを制御バリア関数により記述し、実時間最適化問題として定式化し、毎時刻解くことで目的が達成されることを理論的に示した。

(2-2) 実験システムによる検証も行い、ロボティクスで最大の国際会議で発表された。

(2-3) 重要度関数が時間により変化しない場合、ロボット群の配置は収束して変更されない。このままでは動的に変化する環境には適用できないため、重要度関数が時間により変化する被覆制御を考えた。先行研究で同様の問題はすでに考慮していたが、どの程度の被覆が達成されるかは保証できなかった。そこで、制御バリア関数を用いて一定以上の被覆性能を達成することを制約条件として記述し、最適化問題を毎時刻解くことで被覆性能を保証可能な制御アルゴリズムを提案した。

(2-4) 被覆性能だけでなく、衝突回避などのロボット群の安全性を保証する制約を導入することで多機能な制御を達成する制御アルゴリズムを提案した。さらに、実験システムによる検証を行い、有効性の検証を行った。本結果は国際会議での発表が決定している。

課題(3)に関する研究成果は以下の通りである。

(3-1) 被覆制御をロボットに適用してモニタリングを行う際、ロボットのバッテリーは考慮されていなかった。そこで、各ロボットのバッテリー残量がある一定以下にしないことを制御バリア関数により制約条件として記述し、他の制約条件も用いて最適化問題を定式化した。最適化問題は2次計画問題となるため実時間で解くことが可能である。結果として、モニタリングを持続化させる2次計画法に基づいた制御アルゴリズムを提案し、実験においてもその有効性と実時間での適用が可能であることを示した。

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 0件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 FARRAS Aditya Wildan, HATANAKA Takeshi, NGUYEN Tam W., FUNADA Riku, YAMAUCHI Junya, FUJITA Masayuki | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Distributed Dynamic Reference Governor for Constrained Semi-Autonomous Robotic Swarms with Communication Delays and Experimental Verification | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration | 6. 最初と最後の頁 237 ~ 245 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI: 10.9746/jcmsi.12.237 | 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 YAMAUCHI Junya, DOI Mamoru, IBUKI Tatsuya, HATANAKA Takeshi, FUJITA Masayuki | 4. 巻 55 |
| 2. 論文標題 Passivity-based Pose Synchronization under Disturbances in Three Dimensions | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers | 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） DOI: 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 - |
| 1. 著者名 Ibuki Tatsuya, Wilson Sean, Yamauchi Junya, Fujita Masayuki, Egerstedt Magnus | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 Optimization-Based Distributed Flocking Control for Multiple Rigid Bodies | 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） DOI: 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 山内淳矢, 原田裕平, 畑中健志, 藤田政之 | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 ネットワーク化視覚運動オブザーバに基づく3次元空間内での協調追尾制御 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集 | 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） なし | 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 6件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 R. Funada, M. Santos, J. Yamauchi, T. Hatanaka, M. Fujita and M. Egerstedt |
| 2. 発表標題 Visual Coverage Control for Teams of Quadcopters via Control Barrier Functions, |
| 3. 学会等名 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 M. W. S. Atman, K. Noda, R. Funada, J. Yamauchi, T. Hatanaka and M. Fujita |
| 2. 発表標題 On Passivity-Shortage of Human Operators for A Class of Semi-autonomous Robotic Swarms |
| 3. 学会等名 2nd IFAC Conference on Cyber-Physical & Human Systems (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Gennaro Notomista, Xiaoyi Cai, Junya Yamauchi and Magnus Egerstedt |
| 2. 発表標題 Passivity-Based Decentralized Control of Multi-Robot Systems with Delays Using Control Barrier Functions |
| 3. 学会等名 2019 International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Aditya Wildan Farras, Junya Yamauchi, Takeshi Hatanaka and Masayuki Fujita |
| 2. 発表標題 Safe Cooperative Control of Human Robotic Network Teaming with Control Barrier Function |
| 3. 学会等名 the 2020 SICE International Symposium on Control Systems (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年～2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Riku Funada, Maria Santos, Takuma Gencho, Junya Yamauchi, Masayuki Fujita and Magnus Egerstedt |
| 2. 発表標題 Visual Coverage Maintenance for Quadcopters Using Nonsmooth Barrier Functions |
| 3. 学会等名 2020 International Conference on Robotics and Automation (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年～2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hayato Dan, Junya Yamauchi, Takeshi Hatanaka, and Masayuki Fujita |
| 2. 発表標題 Control Barrier Function-Based Persistent Coverage with Performance Guarantee and Application to Object Search Scenario |
| 3. 学会等名 4th IEEE Conference on Control Technology and Applications (国際学会) |
| 4. 発表年 2020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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
| | | | |