

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14761

研究課題名（和文）不確かさを考慮した実時間最適化に基づくロボット群の自律協調制御システム構築

研究課題名（英文）Real-Time Optimization-Based Autonomous Control of Multi-Robot Systems Under Uncertainty

研究代表者

山内 淳矢（Yamauchi, Junya）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号：60824563

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）：本研究課題は、不確かさを考慮した実時間最適化に基づくロボット群の自律協調制御システム構築を目指して以下の3点を実施するものである：1. 障害物がある環境モデルの学習，2. 対象ロボットの観測と障害物との衝突を回避する制御，3. 実験システム構築と提案アルゴリズムの検証に取り組んだ。1. に関しては、環境モデルを学習する手法を提案した。2. に関しては、対象物を複数台ロボットで観測しつつ、障害物を回避するアルゴリズムを提案した。本結果は学術雑誌と国際会議で発表した。3. に関しては、障害物を用いた実験システムを構築しアルゴリズム検証を行った。また、仮想空間にも同様の環境を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

システムの自律化は自動運転を始めとした高度システムを社会に実装していく上で欠かせない技術である。本研究は特にロボットに注目し、構造化されていない不確かさのある環境内でロボットを自律的に制御する自律化制御の基礎構築に貢献した。本研究において、機械学習と複数台ロボットの協調により環境の不確かさに頑健なシステム構築を目指した点に学術的意義がある。また、基礎理論を構築するだけでなく、その実装可能性を実験およびシミュレーションにより検証した点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research project aims to construct an autonomous cooperative control system for a group of robots based on real-time optimization considering uncertainty. For 1. we proposed a method to learn an environmental model, and for 2. we proposed an algorithm to avoid obstacles while observing the target object with multiple robots. For 3, we constructed an experimental system using obstacles and verified the algorithm. We also constructed a similar environment in a virtual space.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 協調自律制御 最適化に基づく制御 マルチロボットシステム

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) ロボット技術の進歩に伴い社会課題の解決にロボットの活用が期待され、ロボットの社会実装に向けた大きな動きが生まれていた。

(2) ロボットを社会に実装するためには、工場内などの構造化された環境における自動化ではなく、非構造的な環境内でもタスクを実行できるようにロボットを自律化させる必要がある。

(3) ロボットの自律性向上には様々なアプローチが考えられるが、学習と協調という2つの観点から取り組むことを考えた。

2. 研究の目的

本研究は主に以下の3つの課題に取り組むことを目的とした。

(1) 未知な環境内を視覚センサと LiDAR センサを搭載したロボットに運動させることでデータを収集し、環境に固定された障害物の位置・形状、さらに動的な障害物の運動を学習するアルゴリズムの提案を目指した。

(2) 学習した確率的な環境モデルに基づいて、ロボットに障害物を回避させる制御アルゴリズムの提案を目指した。

(3) 実際の複数台の移動ロボットを用いた実験を行うことで、提案アルゴリズムの有効性と実時間性を検証することを目指した。さらに、障害物がある環境を再現した仮想空間を作成し、提案アルゴリズムをより現実的な設定で検証するシミュレータを構築することを目指した。

3. 研究の方法

それぞれの課題に関する研究方法は以下の通りである。

(1) 環境内に固定された障害物の学習には LiDAR センサにより障害物周辺に得られる点群データを用いる。ロボット制御では実時間性が重要であり、点群データという大量のデータから軽量のモデルを構築する必要がある。この要求から、本研究課題ではスパースベイズ分類器により環境を学習する方法を採用した。また、運動する障害物の学習については、以前の研究により得られている結果を基礎とした。視覚情報から推定した対象物の位置姿勢のデータから対象物の運動モデルをガウス過程回帰により学習した。

(2) ロボットの安全性を保証するため、制御バリア関数による方法を採用した。ただし、従来の制御バリア関数による方法ではシステムの不確かさに対応できない。そこで、学習した環境モデルの不確かさを考慮した制御バリア関数法を考案し、安全性を考慮した制御アルゴリズムの提案を目指した。

(3) 実験システムは以前の研究により構築したシステムを基礎とし、提案アルゴリズムの実装に向けて発展させた。実際の障害物と仮想空間の障害物を統一的に扱うため、実験システムは Robot Operating System を用いて構築することを目指した。

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) LiDAR センサを搭載した複数台のロボットを静止した障害物が存在する環境内で運動させることで得られた点群データより、スパースベイズ分類器を学習するアルゴリズムを提案した。先行研究では同様にして得られた点群データからサポートベクトルマシンにより環境を学習していたが、確定的なモデルでありデータの品質を考慮したモデルではなかった。本研究によりスパースベイズ分類器を用いることで確率的な環境モデルを構築することができるようになり、データ品質に応じて障害物がある確率を求められるようになった。

(1-2) (1-1)のアルゴリズムは、各ロボットがそれぞれ取得したデータから学習した環境モデルをロボット間で局所的に交換し、各々でモデルを統合するアンサンブル学習にも拡張可能であることをシミュレーションにより示した。

(1-3) 動的な障害物の運動学習をガウス過程回帰により学習するアルゴリズムを提案した。また、対象物の真の運動と学習したモデルの誤差を情報理論分野で開発された手法を用いることで定量的に評価した。

(1-4) (1-3)のアルゴリズムを複数台のロボットで実行し、学習モデルをロボット間で局所的に交換しアンサンブル学習を行うことで、計算量を削減しつつ性能を維持することが可能なアルゴリズムを提案した。この際も学習誤差を定量的に評価することに成功した。

(1-5) 上記で得られたシステムに潜む不確かさの学習に関する基本的な知見を著書として執筆し出版した。

課題(2)に関する研究成果は以下の通りである。

(2-1) スパースベイズ分類器を制御バリア関数として用いることで、移動ロボットに障害物を避けさせることが可能なことを検証した。また、移動ロボットに環境内を探索させるアルゴリズムである被覆制御を、スパースベイズ分類器により安全な探索が可能なアルゴリズムへと発展させた。

(2-2) 学習した動的障害物の運動モデルをもとに、ロボットと障害物との相対位置姿勢を制御するアルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムでは目標の相対位置姿勢を指定しており、学習の不確かさを(1-3)の方法で評価することで制御性能の定量的な評価も行った。

(2-3) (1-4)で提案した分散学習モデルを用いた際も同様にして制御性能の定量的な評価を行った。また、複数台ロボットの一部分が対象物を見失った場合でも、グループのうち少なくとも1台が対象物を視覚センサで観測できればグループ全体の制御目標が達成されることも示した。

課題(3)に関する研究成果は以下の通りである。

(3-1) 静止した障害物が存在する環境のモデル学習アルゴリズムを実験システムに適用し、その実時間性を検証した。フィールドの大きさや障害物の数、形状の複雑さと実時間性とのトレードオフについても知見を得た。また、仮想空間でのシミュレーション検証も行った。本結果は国際会議で発表し、学術雑誌に掲載された。

(3-2) 各ロボットによるアンサンブル学習を適用した際の実験検証およびシミュレーション検証も行い、その結果を学術雑誌へ投稿する準備を進めている。

(3-3) 障害物の運動データから学習したガウス過程モデルをもとに、実際のドローンを制御する実験を行った。ドローンは機体に搭載されたカメラ情報とガウス過程モデルの予測に基づいて相対位置姿勢を制御しており、カメラ情報の処理と予測に時間がかかる。本実験では提案アルゴリズムが十分高速に実装可能であることが検証でき、その結果を国際学会に発表した。

(3-4) 分散的に学習した運動モデルを用いた際の、複数台ロボットの実験検証も行った。アンサンブル学習を適用していることで計算量を抑えつつ予測性能の大幅な劣化が抑えられていることが確認できた。アルゴリズムの実時間性も確認し、シミュレーション結果とともに本結果を国際学会に発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 山内淳矢, 水田和輝, 藤田政之	4. 巻 59
2. 論文標題 スパースベイズ手法による制御バリア関数の学習と安全な持続的被覆制御	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 -
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 -
1. 著者名 Yamauchi Junya, Saito Makoto, Omainka Marco, Hatanaka Takeshi, Fujita Masayuki	4. 巻 15
2. 論文標題 Cooperative visual pursuit control with learning of target motion via distributed Gaussian processes under varying visibility	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 228 ~ 240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2022.2155454	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 Yamauchi Junya, Adachi Tomoki, Nakayama Kazuhide, Hatanaka Takeshi, Fujita Masayuki	4. 巻 142
2. 論文標題 Persistent Coverage Control on a Sphere with Robot Safety Based on Control Barrier Functions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 1305 ~ 1312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.142.1305	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 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 Oshima Toshiyuki, Yamashita Shunya, Yamauchi Junya, Ibuki Tatsuya, Seto Michio, Hatanaka Takeshi	4. 巻 37
2. 論文標題 Loop-shaped distributed learning of an object with data-independent performance certificates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 169 ~ 182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2022.2128872	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 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 1 ~ 13
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 -

1. 著者名 Murao Toshiyuki, Koshio Yusuke, Kawai Hiroyuki, Yamauchi Junya, Hatanaka Takeshi, Fujita Masayuki	4. 巻 141
2. 論文標題 Passivity-Based Cooperative Dynamic Control for Human-Rigid Body Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	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 Omańska Marco, Yamauchi Junya, Beckers Thomas, Hatanaka Takeshi, Hirche Sandra, Fujita Masayuki	4. 巻 14
2. 論文標題 Gaussian process-based visual pursuit control with unknown target motion learning in three dimensions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 116 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2021.1936855	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 Yamauchi Junya, Gencho Takuma, Funada Riku, Hatanaka Takeshi, Fujita Masayuki	4. 巻 141
2. 論文標題 Persistent Visual Coverage Control Ensuring Field of Views' Overlap with Information Reliability and Energy Management	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 417 ~ 425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieej.iss.141.417	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, HARADA Yuhei, HATANAKA Takeshi, FUJITA Masayuki	4. 巻 56
2. 論文標題 Cooperative Pursuit Control Based on Networked Visual Motion Observer in Three Dimensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 386 ~ 393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.386	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 R. Funada, X. Cai, G. Notomista, M.W.S. Atman, J. Yamauchi, M. Fujita and M. Egerstedt	4. 巻 40
2. 論文標題 Coordination of Robot Teams Over Long Distances From Georgia Tech to Tokyo Tech and Back; An 11,000km Multi-Robot Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Magazine	6. 最初と最後の頁 53-79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MCS.2020.2990515	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 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) 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

[学会発表] 計15件(うち招待講演 2件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Tesshu Fujinami, Junya Yamauchi, Riku Funada and Masayuki Fujita
2. 発表標題 A Control Barrier Function Approach for Observer-based Visually Safe Pursuit Control with Spherical Obstacles,
3. 学会等名 The 22nd IFAC World Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤波徹柁, 山内淳矢, 舩田陸, 藤田政之
2. 発表標題 制御バリア関数に基づく障害物環境下での視野の安全性を考慮した追尾制御
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Marco Omainska, Junya Yamauchi and Masayuki Fujita
2. 発表標題 Visual Pursuit Control based on Gaussian Processes with Switched Motion Trajectories
3. 学会等名 The 9th IFAC Symposium on Mechatronic Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Saito, Junya Yamauchi, Tesshu Fujinami, Marco Omainska and Masayuki Fujita
2. 発表標題 Distributed Gaussian Process Based Cooperative Visual Pursuit Control for Drone Networks
3. 学会等名 The 9th IFAC Symposium on Mechatronic Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tesshu Fujinami, Junya Yamauchi, Marco Omainka and Masayuki Fujita
2. 発表標題 Gaussian Process Based Visual Pursuit Control with Automatic Gain Tuning,
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 Kazuki Mizuta, Yasuhide Hirohata, Junya Yamauchi and Masayuki Fujita
2. 発表標題 Safe Persistent Coverage Control with Control Barrier Functions based on Sparse Bayesian Learning
3. 学会等名 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田優也, 畑中健志, 山内淳矢, 藤田政之
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 富田佳秀, 仲野太喜, 山内淳矢, 中山一秀, 畑中健志, 藤田政之
2. 発表標題 制御バリア関数に基づく対象領域の切り替えを伴う可視性を考慮した被覆制御
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 J. Yamauchi, M. Omainka, T. Beckers, T. Hatanaka, S. Hirche and M. Fujita
2. 発表標題 Cooperative Visual Pursuit Control with Learning of Position Dependent Target Motion via Gaussian Process
3. 学会等名 The 60th IEEE Conference on Decision and Control (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Yamauchi, T. Adachi and M. Fujita
2. 発表標題 Optimization Based 3D Object Monitoring with Robot Safety by Control Barrier Functions on a Sphere
3. 学会等名 60th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 足立智貴, 山内淳矢, 中山一秀, 畑中健志, 藤田政之
2. 発表標題 ロボットの安全性を考慮した球面上での持続的被覆制御による立体物モニタリング
3. 学会等名 第8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 2021年

1. 発表者名 T. Hatanaka, K. Noda, J. Yamauchi, K. Sokabe, K. Shimamoto and M. Fujita
2. 発表標題 Human-Robot Collaboration with Variable Autonomy via Gaussian Process
3. 学会等名 3rd IFAC Workshop on Cyber-Physical & Human Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Yamauchi, T. Beckers, M. Omainka, T. Hatanaka, S. Hirche and M. Fujita
2. 発表標題 Visual Pursuit Control with Target Motion Learning via Gaussian Process
3. 学会等名 9th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Dan, J. Yamauchi, T. Hatanaka and M. 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 The 4th IEEE International Conference on Control Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Funada, M. Santos, T. Gencho, J. Yamauchi, M. Fujita and M. 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 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 伊吹竜也、山内淳矢、畑中健志、瀬戸道生	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 機械学習のための関数解析入門	

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 ロボット制御システム、ロボットシステム、操作システム、ロボット制御方法、およびロボット制御プログラム	発明者 藤田政之, 畑中健志, 山内淳矢, 他	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、W0/2021/157104	取得年 2021年	国内・外国の別 外国

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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