

令和 5 年 6 月 21 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：2021～2022

課題番号：21K20425

研究課題名（和文）自律移動ロボットに対する情報削減的計測戦略を有した経路計画・追従システムの構築

研究課題名（英文）Minimum Sensing Strategy for Path Planning and Path Following for an Autonomous Robot

研究代表者

船田 陸（Funada, Riku）

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：50844247

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、目的地への移動に必要な情報のみに注意を払う効率的な計測によって、ロボットの自律的な移動を達成させる経路計画・経路追従制御手法の構築を目的とした。この達成に向けて、まずセンサから推定・制御系に流れる情報量を用いて計測にかかるコストを定量化し、その最小化を実現する経路計画・経路追従手法を構築した。つぎに、ロボットに搭載されているセンサの特性を、上述の経路計画・追従制御に反映した。これによって、移動時にセンサの空間分解能や計測頻度を動的に調整することが可能となり、計測にかかるコストの削減を実現した。最後に、提案手法の有効性をシミュレーションにより検証をした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物流・保守点検といった分野で移動ロボットの活用が進む中、環境中を自律的に移動可能なシステムが求められている。この実現には、ロボットが自律的に環境を認識することが必要不可欠だが、環境認識に伴う計算量は膨大となる。本研究では、環境に対してあえて不注意になることを許容した経路計画・追従制御手法を構築することによって、計測に伴うコストを削減しつつ目的地への移動が可能となるシステムの構築を進めた。また、学術的にも、計測コストの削減を情報量の削減という新たな視点から数学的に厳密な形で表現しており、独自性が高いといえる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research project is to develop the minimum sensing strategy for a path planning and path following task, where the sensing effort of the robot is minimized to save the computational burden and energy. For this goal, we first quantify a sensing effort by a novel information-theoretic cost, where the amount of information acquired by the sensor is employed. Then, a path planning and path following method minimizing the designed sensing cost is developed. Second, we integrate the sensor model of the robot into the above path planning and path following method. The proposed method can present how the robot should adjust its sensor's specifications, such as the resolution and sensing frequency. Finally, we conducted simulation studies to verify the effectiveness of the proposed methods.

研究分野：制御

キーワード：制御 計測 経路計画 経路追従 移動ロボット

1. 研究開始当初の背景

物流・保守点検といった分野で移動ロボットの活用が進む中、未知環境下を自律的に移動可能なシステムが求められている。この実現のために、ロボットには動的に変化する環境を把握しつつ、目的地への経路を探索し追従することが要求される。この内、外界把握は、広い範囲を精緻に認識する手法があるものの、その膨大な計算量がシステム全体のボトルネックになることが報告されている。この外界把握に伴う膨大な処理量は、少ない計算資源しか持たない小型ロボットに対してより重大な課題となる。

この計測にかかる処理量を削減する有望な方法として、制御目標の達成に寄与しない情報を早期に捨てるということが考えられる。すなわち、ロボットが目的地に到達するために必要最小限の情報のみを環境から取得し、それ以外の情報は計測しないということである。本研究では、あえて環境に対して不注意になることで、ロボットの推定・制御系における計算不可の削減を目標とする。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、目的地到達に必要な環境情報だけに注意を払う効率的な計測によって、移動ロボットの自律移動を実現する経路計画・追従制御手法を構築することである。この枠組みを構築するために、まず計測コストを定量的に評価できる形で設計する。この際、提案する計測コストは、計測範囲・精度・頻度といったセンサ特性の制御によって調整できる必要がある。つぎに、設計した計測コストを最小化する経路計画・経路追従制御手法を提案する。特に、経路追従制御に関しては、リアルタイム計算が実現できるように設計する。最後に、シミュレーションや実験によって提案手法の有効性を検証する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、本研究課題では以下の方針に従って研究を実施した。

(1) ロボットの自己位置推定精度・制御性能と計測コストの間にある相関関係の明示化
環境に対してあえて不注意になるということは、計測コストの削減を実現できる反面で、推定精度・制御性能の劣化を引き起こす。このトレードオフを数学的に厳密な形で導出するために、計測コストとセンサ特性間の関連性を定量的に評価できる形で計測戦略を設計する。

(2) 計測コストを考慮した経路計画・経路追従制御則の構築

上述の計測コストを加味した上でロボットを目的地へと到達させるためには、計測コストを最小化する経路計画・経路追従制御則の設計が必要不可欠である。本課題では、制御入力とセンサ特性からなる目的関数を最適化する。

4. 研究成果

本研究課題で得られた結果は次の通りである。

(1) センサ特性の操作と推定・制御に伴う処理量の関係のモデル化

まず、環境推定・制御に伴う処理量を削減するために、有向情報量と呼ばれる指標を計測コストとして採用した。この有向情報量は、センサが環境中からどれだけの情報を取得し、推定・制御系に送るかを定量化したものである。この指標を小さくすることで推定・制御系が処理すべき情報量の削減が実現される。具体的には、センサの空間分解能を落とす、計測頻度を下げるといった操作によって有向情報量を下げることができる。

(2) 計測コストの削減を達成する経路計画・経路追従制御手法の構築

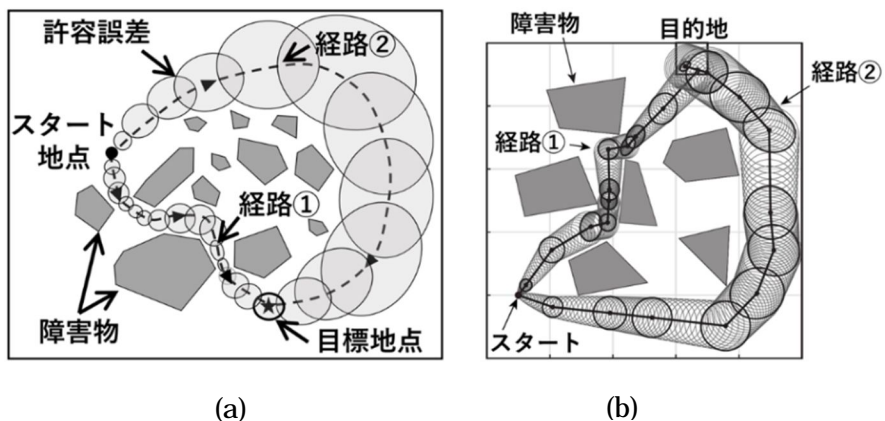
つぎに、上記で導入した計測コストを削減しつつ、経路長や制御入力を小さくする経路計画・経路追従制御を構築した。この際、ロボットの位置は確率分布として表現される。この定式化により、計測コストを削減するとロボット位置の不確かさを表す確率分布が大きくなるということが表現できる。提案した経路計画手法では、図1で示される通り少ない計測でロボット位置に誤差が含まれる状況でも、目標地点に到達できるような経路を生成した。また、上述の確率分布は楕円形状をとる。そこで、ロボットや障害物を楕円体としてモデル化し、リアルタイムで衝突回避を実現する制御手法も提案した。

また、図1の経路で示された目標軌道とロボットの許容誤差を満たしつつ、追従する計測・追従制御則を構築した。提案手法はリアルタイムに計算できる。また、ロボットに搭載されているセンサの特性が計測・制御則に反映されているため、どのようにセンサ特性を操作すべきかを提示できる。

(3) 提案手法の有効性検証

シミュレーションによって、目標としていた少ない計測で辿れる経路が生成されることを確認した(図1)。また、経路追従制御においても、経路計画時に要求された計測戦略・推定精度を満たしつつ、ロボットを目的地へと移動させられることを確認した。また、実験システムも構築し、提案手法の検証を進めている。

以上の研究成果は、国際学術誌論文へ採択され、国際・国内学会においても複数発表をしている。この内、国内学会発表においては受賞をした。



(a) (b)

図1 経路・計測戦略の計画結果

(a)は概略図，(b)はシミュレーション結果である。

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 3件）

1. 著者名 Pedram Ali Reza, Funada Riku, Tanaka Takashi	4. 巻 39
2. 論文標題 Gaussian Belief Space Path Planning for Minimum Sensing Navigation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Robotics	6. 最初と最後の頁 2040 ~ 2059
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TR0.2022.3228128	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, Hirano Taichi, Funada Riku, Sampei Mitsuji	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 Watanabe Ryunosuke, Ibuki Tatsuya, Sakayanagi Yoshihiro, Funada Riku, Sampei Mitsuji	4. 巻 10
2. 論文標題 Risk-Aware Energy Management for Drive Mode Control in Plug-in Hybrid Electric Vehicles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 103619 ~ 103631
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3206091	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 Ito Takumi, Funada Riku, Mochida Shunsuke, Kawagoe Takahiro, Ibuki Tatsuya, Sampei Mitsuji	4. 巻 37
2. 論文標題 Design and experimental verification of a hoverable quadrotor composed of only clockwise rotors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 667 ~ 678
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2023.2185813	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13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Riku Funada, Keigo Miyama, Tamon Toyooka, Takashi Tanaka, Mitsuji Sampei
2. 発表標題 Minimum Sensing Strategy for a Path-following Problem via Discrete-time Control Barrier Functions
3. 学会等名 The 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Mochida, R. Terunuma, T. Ito, R. Funada, T. Ibuki and M. Sampei
2. 発表標題 Optimization of Rotor Arrangement for a Multirotor UAV with Robustness against a Single Rotor-Failure
3. 学会等名 The 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Fujinami, J. Yamauchi, R. Funada and M. 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 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 照沼怜士, 持田峻佑, 伊吹竜也, 船田陸, 三平満司
2. 発表標題 単一のロータ故障に対する耐故障性をもつUAVヘキサロータの実機検証
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 藤波徹柁, 山内淳矢, 船田陸, 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 川越貴啓, 船田陸, 伊吹竜也, 三平満司
2. 発表標題 ホバリング可能性を考慮したマルチリンク型UAVの形状制御
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 A.R. Pedram, R. Funada and T. Tanaka
2. 発表標題 Dynamic Allocation of Visual Attention for Vision-based Autonomous Navigation under Data Rate Constraints
3. 学会等名 The 60th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Funada, K. Miyama, T. Tanaka and M. Sampei
2. 発表標題 Minimum Sensing Path-Following via Discrete-time Control Barrier Function
3. 学会等名 The 13th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Nishimoto, R. Funada, T. Ibuki and M. Sampei
2. 発表標題 Collision Avoidance for Elliptical Agents with Control Barrier Function Utilizing Supporting Lines
3. 学会等名 The 2022 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Funada
2. 発表標題 Visual Environmental Monitoring for Teams of Quadcopters
3. 学会等名 The 2021 Conference on Control Technology and Applications, Workshop "The Confluence of Vision and Control" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 舩田陸, 西本昂樹, 伊吹竜也, 三平満司
2. 発表標題 支持超平面を用いた制御バリア関数にもとづく楕円体エージェント間の衝突回避手法の提案
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 宮間圭吾, 舩田陸, 田中崇資, 三平満司
2. 発表標題 経路追従問題における離散時間制御バリア関数に基づいた情報削減的計測戦略
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 馬庭龍一, 船田陸, 三平満司
2. 発表標題 ドローン群の視野重複を保証する制御バリア関数に対する勾配計算に基づいた解析
3. 学会等名 日本機械学会第17回「運動と振動の制御」シンポジウム
4. 発表年 2021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

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	The University of Texas at Austin		