

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04382

研究課題名（和文）自律ロボットが情報の不確かさを克服して危険を回避しタスク達成するための行動決定法

研究課題名（英文）Research on decision making methods that makes mobile robots avoid risks on their tasks under uncertainty

研究代表者

上田 隆一（Ueda, Ryuichi）

千葉工業大学・先進工学部・准教授

研究者番号：20376502

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：自律で移動するロボットが自身の位置を精度よく計測できないときに、適切な行動をとるための行動決定アルゴリズムを考案した。また、このアルゴリズムを含め、障害物回避等の機能を持つ自律移動ロボット用のソフトウェアパッケージを開発し、GitHubを通じて公開した。また、開発したソフトウェアの一部について実機での動作確認や実験を行い、実機でも利用可能であることを示した。これらの成果については、7本の国内学会予稿、1本の英文投稿論文で公表されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究、開発したソフトウェアパッケージは計算量が大きいものの、移動ロボットで用いられる現行のものより適切な行動決定ができることが理論的に裏付けられている。そのため、ロボットに搭載できる計算機の性能が向上するか、リモートで計算機を活用するインフラが整うと、利用価値が次第に高くなっていくと考えている。また、学会で発表した実験結果についても、これまで計算量が大きくて適用不可能だと考えられていたことが適用できることを示したことは意義があると考えている。

研究成果の概要（英文）：We have proposed an algorithm for determining the appropriate action to be taken by an autonomous mobile robot when it is unable to accurately measure its own position. We also developed a software package for autonomous robots that includes this algorithm and other functions such as obstacle avoidance, and released it through GitHub. In addition, we confirmed some parts of the software on the actual robot and conducted experiments for evaluation. These results have been published in seven domestic conference proceedings and one paper submitted for an international journal.

研究分野：知能ロボット

キーワード：移動ロボット ナビゲーション 動的計画法 価値反復 POMDP

1. 研究開始当初の背景

人間が移動したり手先で細かい作業をしたりするときは、目的地までの距離や物体の大きさ、摩擦力などを常に正確に把握しているわけではない。目的地に近づくと地図を注意深く見たり、手作業では指の一部を物体に固定して精度を出したりするなど、要所では正確さを得ようとする。しかし不要なときは、はたから見るといい加減に動いているように見える。

一方、これをロボットで再現することは未解決の問題である。工学には「工作機械以上の精度の部品は作れないこと」を意味する母性原理という言葉があり、何かタスクを行うロボットも、そのタスクに必要な動きやセンシングの精度が十分に確保されるように設計される。しかしこの原理の言う「精度」がタスクに対して本当に必要なものかどうかは自明ではない。ロボットが一般に人間のように滑らかに動かない理由にはハードウェアの性能上の制約もあるが、不要なときに精度を確保しようとする方針にも原因がある。

しかし、「精度を確保しないで作業する」(もっと言うと、「いい加減に作業する」)ことをロボットにプログラムすることは、従来の枠組みでは困難である。

申請者らは、自律移動ロボットを屋外で数キロ走らせる技術チャレンジである「つくばチャレンジ」に参加しており、移動ロボットにおいてこのような問題と向き合ってきた。移動ロボットは、センサで直接認識できない角を曲がるときに脱輪することがある。図1に、低い縁石の角を曲がるときに移動ロボットが引っかけた典型的な例を示す。移動ロボットがセンシングできない角を曲がる場合、自身の位置計測の結果と、自身が持っている地図を照らし合わせて角を曲がるが、このとき、位置計測の精度が得られないなら角から離れて大回りで角を曲がれば十分である。しかし、そのような判断ができるアルゴリズムがなく、しかも位置計測の精度を高める方向に研究者が考えがちである。とにかく精度を高めるという考え方は、冒頭で述べた「不要なときに精度を確保しようとする方針」であり、また、実世界では限界がある。



図1: ロボットが角で縁石に乗り上げリタイヤ (2018年つくばチャレンジにて)

2. 研究の目的

そこで、自己位置の計測精度に応じたリスク回避の機能を追加して改良すること、その有効性を実機で確認することの2つを目的とした。申請時は、PFC (probabilistic flow control) という筆者らのアルゴリズムを改良して実装することを想定した。

3. 研究の方法

(1) 価値反復パッケージの開発

移動ロボットのナビゲーションのために一般的に用いられるものとは異なるアーキテクチャのソフトウェアが必要であったので、一からソフトウェアパッケージとして構築することとなった。このパッケージ(価値反復パッケージ[9])にリスク回避の機能を追加したのは研究期間の最終年度であったが、機能追加前から、既存のものを代替するオープンソースパッケージとして公開した。このパッケージで使っている価値反復というアルゴリズムは計算量が大きいので、高性能な計算機を購入して開発と実行を効率的に行った。

(2) センシングできない障害物の回避アルゴリズムの実装とシミュレーションでの検証

考案したアルゴリズムをいくつか考案し、シミュレーション環境で検証した。また、最終的に提案することとなったアルゴリズムを、価値反復パッケージに組み込んだ。

(3) 実機実験の環境構築

公道を走行できる屋外移動ロボットを購入してソフトウェアシステムを構築し、価値反復パッケージや提案したアルゴリズムを速やかに実験できるようにした。また、つくばチャレンジに参加することで、ロボットが公道を走行できるよう、ソフトウェアの改善を続けた。また、本研究が実際に意義のあるものなのか実際に起こるトラブルを通じて確認した。

(4) 実機実験

(3)の移動ロボットで、価値反復パッケージがシミュレーションだけでなく実環境でも実行できることを確認した。また、PFC自体が実機で動作しなかったため、小型のロボットを実験に用い、実機で動作することを確認した。

4. 研究成果

3の(1)~(4)について、それぞれ学術講演会や投稿論文で公表した。順に説明する。

(1)については、開発状況を逐一国内学会で公表した(下記「公表した文献」の[2,4,5])文献[2]においては、目的地までロボットを誘導するという基本機能を実装し、文献[4]においては予期していなかった障害物を回避する機能を実装した。また、文献[5]については、文献[4]のアルゴリズムを改良した。文献[5]については、文献[a]で紹介された。

(2)については、文献[1]において、筆者らの従来の手法「PFC (probabilistic flow control) [b]」に基づき、(1)のパッケージに搭載するアルゴリズムの検討結果を公表した。ただ、明確にすぐれている方法ではないと判断し、文献[7]では別の手法群である augmented MDP に属するアルゴリズムの一種を実装した。

(3)については、開発したロボットのシステムについて文献[3]で公表した。また、本研究で提案

するアルゴリズムが安定して動作するように、ロボットが自身の位置を計測する（自己位置推定する）ためのソフトウェアを、よく使われる旧式のものから研究代表者自身が開発したものを使うように変更した。この開発したソフトウェア[10][11]は、つくばチャレンジの他のチームでも利用されることとなり、本研究の副次的な成果物となった。

（４）については、価値反復パッケージを実機利用し、ナビゲーション機能について、文献[8]で公表予定である。また、センシングできる障害物の回避機能についても実験し、英文論文にまとめて投稿した。センシングできない障害物の回避アルゴリズムについては研究期間内に検証できなかったが、文献[7]で実装した手法が実機で動作するめどが立った。

これらの実験とは別に、文献[6]において、PFCの実機での動作について、英文投稿論文で公表した。

公表した文献

[1] 上田隆一, 鈴木勇矢: 自己位置が不確かな状況における移動ロボットの危険回避行動の生成, 第 38 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. RSJ2020AC2C2-02, オンライン開催, 2020. (口頭発表)

[2] 上田隆一, 池邊龍宏, 林原靖男: brute-force な価値反復を用いた実時間経路計画 ROS パッケージ, 第 39 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. RSJ2021AC2I1-04, オンライン開催, 2021. (口頭発表)

[3] 池邊 龍宏, 曹 越, 高橋 秀太, クルス ペレス アントニオ, 林原 靖男, 上田 隆一: 小型移動ロボットによるつくばチャレンジへの挑戦, 第 22 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.3390-3393, オンライン開催, 2021. (口頭発表)

[4] 上田 隆一, 池邊 龍宏, 林原 靖男: 移動ロボットのナビゲーションのための brute-force な価値反復を用いた大域計画・局所計画アルゴリズム, 第 27 回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp.109-112, 2022. (査読付き講演論文)

[5] 上田 隆一, 池邊 龍宏, 林原 靖男: 価値反復による準静的な障害物を考慮した実時間経路計画, 第 40 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. RSJ2022AC12I2-01, 2022. (口頭発表)

[6] Ryuichi Ueda: Generation of search behavior of robots by an extended probabilistic flow control, International Journal of iRobotics, Vol. 5, No. 2, pp. 29-35, 2022. (英文投稿論文)

[7] 上田隆一, 登内リオン, 池邊龍宏, 林原靖男: 移動ロボットのための自己位置の不確かさを考慮したセンシングできない固定障害物の回避手法 ---価値反復を用いたナビゲーションにおける状態空間の局所拡張---, 第 28 回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 118-123, 2023. (査読付き講演論文)

[8] 登内 リオン, 池邊 龍宏, 林原 靖男, 上田 隆一: 価値反復による移動ロボットの屋外ナビゲーション, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023 講演論文集, 2P1-G06, 2023. (to appear, 口頭発表)

他, 投稿中の英文論文一報。

公表したソフトウェア

[9] ryuichiueda/value_iteration: https://github.com/ryuichiueda/value_iteration

[10] ryuichiueda/emcl: <https://github.com/ryuichiueda/emcl>

[11] ryuichiueda/emcl2: <https://github.com/ryuichiueda/emcl2>

その他参考文献

[a] 中西 佑太: 学生編集委員会企画: 第 40 回日本ロボット学会学術講演会レポート(一般セッション: 経路計画), 日本ロボット学会誌, Vol.41, No.2, pp.153-154, 2023.

[b] Ryuichi Ueda: Generation of compensation behavior of autonomous robot for uncertainty of information with probabilistic flow control, *Advanced Robotics*, Vol.29, No.11, pp.721-734.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryuichi Ueda	4. 巻 5
2. 論文標題 Generation of search behavior of robots by an extended probabilistic flow control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of iRobotics	6. 最初と最後の頁 29-35
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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上田隆一, 池邊龍宏, 林原靖男
2. 発表標題 brute-forceな価値反復を用いた実時間経路計画ROSパッケージ
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池邊 龍宏, 曹 越, 高橋 秀太, クルス ペレス アントニオ, 林原 靖男, 上田 隆一
2. 発表標題 小型移動ロボットによるつくばチャレンジへの挑戦
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田隆一, 池邊龍宏, 林原靖男
2. 発表標題 移動ロボットのナビゲーションのためのbrute-forceな価値反復を用いた大域計画・局所計画アルゴリズム
3. 学会等名 第27回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田隆一, 鈴木勇矢
2. 発表標題 自己位置が不確かな状況における移動ロボットの危険回避行動の生成
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田 隆一, 池邊 龍宏, 林原 靖男
2. 発表標題 価値反復による準静的な障害物を考慮した実時間経路計画
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田隆一, 登内リオン, 池邊龍宏, 林原靖男
2. 発表標題 移動ロボットのための自己位置の不確かさを考慮したセンシングできない固定障害物の回避手法 ---価値反復を用いたナビゲーションにおける状態空間の局所拡張---
3. 学会等名 第28回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 登内 リオン, 池邊 龍宏, 林原 靖男, 上田 隆一
2. 発表標題 価値反復による移動ロボットの屋外ナビゲーション
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

path planning with real-time brute-force VI
<https://www.youtube.com/watch?v=01NjnF0sIdA>
Raspberry Pi 4Bだけで移動ロボットを屋外自律移動させてみた
<https://www.youtube.com/watch?v=Dgd2t0CEYno>
つくばチャレンジ2021本走行(11/21) [信号あり横断歩道まで約500m走行]
<https://www.youtube.com/watch?v=TeF1nFxjLRQ>
ryuichiueda / value_iteration
https://github.com/ryuichiueda/value_iteration
uhobeike / vi_grid_map
https://github.com/uhobeike/vi_grid_map
津田沼チャレンジ Raspberry Pi Cat
<https://www.youtube.com/watch?v=0bsD6C73Xr4>
ryuichiueda/value_iteration: https://github.com/ryuichiueda/value_iteration
ryuichiueda/emc1: <https://github.com/ryuichiueda/emc1>
ryuichiueda/emc12: <https://github.com/ryuichiueda/emc12>

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	林原 靖男 (Hayashibara Yasuo) (20298293)	千葉工業大学・先進工学部・教授 (32503)	

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