

不整地の環境変化に効率的に対応する移動ロボットの動作計画

Efficient Motion Planning for Mobile Robots Dealing with Changes in Rough Terrain

○学 勝間 慎弥 (東大) 正 Woo Hanwool (東大/秋田県立大) 正 池 勇勲 (中央大)
正 田村 雄介 (東大) 正 山下 淳 (東大) 正 浅間 一 (東大)

Shinya KATSUMA, Univ. of Tokyo, katsuma@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hanwool WOO, Univ. of Tokyo, Akita Pref. Univ., woo@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Yonghoon JI, Chuo Univ., ji@mech.chuo-u.ac.jp
Yusuke TAMURA, Univ. of Tokyo, tamura@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Atsushi YAMASHITA, Univ. of Tokyo, yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hajime ASAMA, Univ. of Tokyo, asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

This paper proposes a novel motion planning method in rough terrain that improves our previous work. The previous method can generate a collision-free path within a short time, however, there is room to improve the quality of its path, especially about the length of its path. In this work, we add a path deformation step after a path generation step. The path deformation is performed by optimization. The objective function of optimization consists of path length, difference between original path and deformed path, and risk of deformed path. Experimental results show that the proposed method can deform a re-planned path appropriately and can reduce the length of the path.

Key Words: Mobile Robots, Rough Terrain, Motion Planning, Optimization

1. 序論

近年、災害現場などの不整地において移動ロボットの重要性が高まっている。不整地における移動ロボットの操作は遠隔操作によって行われることが多いが、作業効率の低さが問題である。よって不整地移動ロボットには、自ら周囲の環境を把握して適切な経路を生成する能力が必要である。

不整地移動ロボットを対象とする経路計画の先行研究として Ji らは大規模不整地での経路計画手法を提案した[1]。この手法では、移動ロボットの位置だけでなく姿勢についてもロール角・ピッチ角の情報を考慮した探索を行っているため、3次元的な凹凸のある不整地でも安全な経路の生成が可能である。しかしこの手法は既知で変化しない環境を想定している。よって、環境変化に対応するには毎回ゼロから経路生成を行う必要があるため、実行時間が増加するという問題がある。

実行時間の問題を解決するため、我々は効率的な再探索を行うことで実行時間の増加を防ぐ動作計画手法を提案した[2]。この手法では探索木を再利用することで再探索にかかる時間の短縮が可能である。しかし、この手法では新たに生じた障害物を遠回りして回避する経路が生成される可能性がある。

この問題を解決するため、本研究では経路長を短縮する経路変形ステップを新たに追加する。移動ロボットを対象とする経路変形手法として、Yoshida らは障害物との距離に基づいた経路変形手法[3]を提案しているが、この手法は2次元平面における移動ロボットの位置のみを考慮した手法であるため、3次元不整地における移動ロボットの姿勢を考慮する本研究には適用できない。そこで提案手法では経路変形を行う際、移動ロボットの姿勢に基づいた経路の危険度を考慮する。経路の危険度を組み込んだ最適化を行うことによって、経路の安全性を保証しつつ経路長の短縮が可能である。

2. 環境変化に対応可能な動作計画

2.1 問題設定

本研究では屋外不整地での走行が可能な移動ロボットを対象とする。移動ロボットには事前に構築された環境地図とその環境地図に対する探索によって生成された初期経路[1]、及

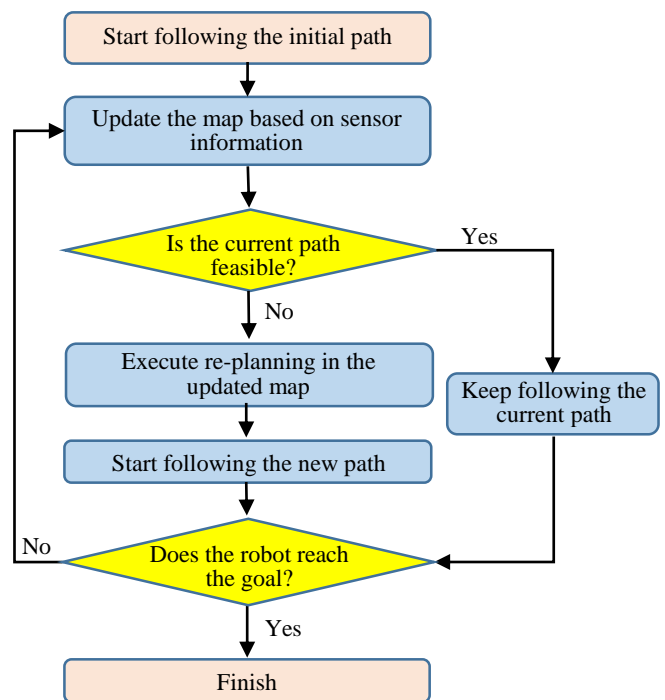


Fig. 1 Flowchart of motion planning

び初期経路生成時に得られた探索木が与えられているものとする。ロボットは初期経路に沿って移動を開始すると同時に、センサによって環境の情報を取得し、その情報をもとに環境地図の更新を行う。ここで、ロボットが保持する環境地図のうちセンサ情報によって更新されていない場所は事前に構築された環境地図から変化していないと仮定する。

2.2 動作計画手法の概要

[2]で提案された動作計画の概要を図1に示す。この動作計画では、移動ロボットはまず事前に構築された環境地図に対

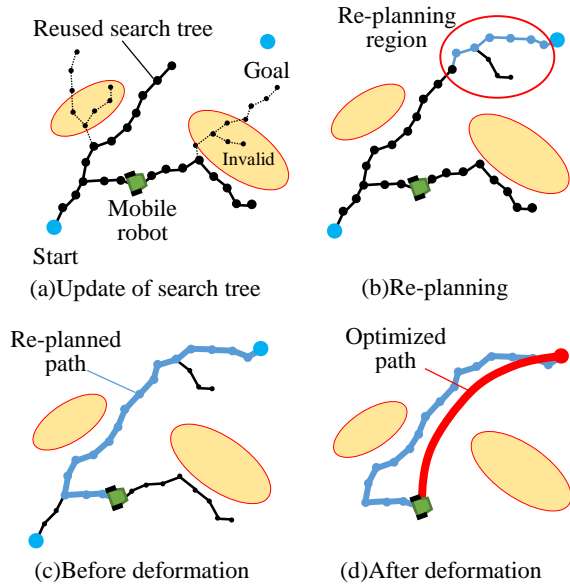


Fig. 2 Conceptual image of proposed method

して生成された初期経路の走行を開始する。初期経路を走行しながら周囲の環境情報を取得し、現在の経路が走行可能かどうか判定する。そこで環境に変化が生じ、走行不可能と判定された場合にのみ現在位置から目標位置に向かって再探索を行う。この手順を移動ロボットが目標位置に到達するまで繰り返すことにより、環境変化に対応可能な動作計画を実現する。

2.3 経路変形ステップを追加した再探索手法

経路変形ステップを追加した再探索手法の概念図を図2に示す。図2(a)の緑色の物体が移動ロボットを示しており、図に示す位置に移動ロボットが到達したとき、障害物の発生が検知されるとする。このとき、まず初期経路生成時に得られた探索木の更新が行われる。探索木の更新では、元の探索木のうち環境変化によって生じた新たな障害物と干渉しているノード及びその子ノードが削除される。図2(a)の点線が削除された部分を、実線が再利用された探索木を示している。再探索時の経路生成にはこの更新された探索木を利用する。

更新後の探索木を用いた再探索を図2(b)に示す。再探索ではまず、更新後の探索木の中で目標位置に最も近いノードを探す。次に、そのノードから目標位置まで探索木を伸ばして探索を行う。目標位置まで探索木が到達したら、目標位置から現在位置に最も近いノードまでノードをたどることで新たな経路を生成する。生成された経路を図2(c)に青色で示す。この手順で再探索を実行することにより、図2(b)の赤枠で示す領域に再探索領域を制限することができるため、探索時間の削減が可能である。

しかし図2(c)から分かるように再探索によって生成された経路を走行すると移動ロボットは一度後退しなければならない。よって経路生成にかかる時間は短縮可能であるが、移動ロボットの走行にかかる時間が長くなる可能性がある。この問題を解決するため、提案手法では経路生成後に新たに経路変形ステップを追加する。変形後の経路を図2(d)に赤色で示す。図に示すように、変形によって経路長の短縮を図る。

2.4 経路変形ステップ

本研究における経路の定義を図3に示す。経路は位置の集

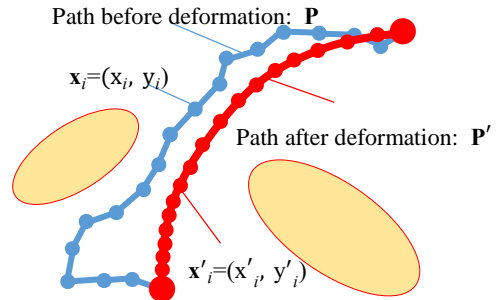


Fig. 3 Definition of path

合によって表現されるものとし、経路変形は経路上の位置を移動させることによって実行される。この定義のもとで、経路変形は以下のような最適化問題として定式化される。

$$\min_{\mathbf{P}'} f(\mathbf{P}') = \alpha \sum_{i=1}^{n-1} \|\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i\|^2 + \beta \|\mathbf{P}' - \mathbf{P}\|^2 + D(\mathbf{P}') \quad (1)$$

ここで $\mathbf{P} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$ は変形前の、 $\mathbf{P}' = \{\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_n\}$ は変形後の経路を示しており、 \mathbf{x}_i は経路を構成する位置 (x_i, y_i) を示している。 α と β は重みづけパラメータである。 $\sum_{i=1}^{n-1} \|\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i\|^2$ は変形後の経路の経路長を意味するため、式(1)によって経路長が短くなるように経路が変形される。また、提案手法では元の経路との乖離度 $\|\mathbf{P}' - \mathbf{P}\|^2$ を目的関数に加えた。これは必要以上に経路が変形されることを防ぎ、最適化にかかる計算時間を削減するためである。さらに走行不可能な領域に経路が変形されるのを防ぐため、危険度関数 $D(\mathbf{P}')$ を目的関数に加えた。危険度関数は以下のように定義される。

$$D(\mathbf{P}') = \begin{cases} 0, & \text{if } \mathbf{P}' \text{ is feasible} \\ \infty, & \text{if } \mathbf{P}' \text{ is not feasible} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)において経路 \mathbf{P}' が feasible か否かは経路上の点に移動ロボットが走行不可能な位置が含まれるか否かで判定される。各位置における走行可能性の判定には[1]を用いる。式(2)は経路 \mathbf{P}' が走行不可能な場合に無限大の値を返すため、式(1)の経路変形は移動ロボットが走行不可能な経路に変形されないように進められる。

以上のように設計された目的関数を用いて式(1)の最適化計算を行う。最適化計算には非線形最小二乗問題を解くのに適した Levenberg-Marquardt 法を用いる。この最適化計算によって得られた経路を最終的な経路として出力する。

3. 実験

3.1 実験設定・手順

本研究で新たに提案した経路変形手法の有効性を検証するための実験を行った。本実験では、7 m × 28 m の屋外環境に 1.4 m × 1.0 m の青色の板を設置して環境変化と仮定した。対象とする環境を図4に示す。この環境変化に対して[2]を用いて再探索経路を生成する。そして、得られた再探索経路に対して本研究が提案した経路変形手法を実行し、適切な経路変形が可能かどうかを検証する。

3.2 経路変形結果

本研究が提案した経路変形手法による経路変形結果を図5に示す。図は実験対象の環境を上から見た図であり、黄色の点線で囲まれた物体が新たな障害物を、青色の経路が[2]によって得られた再探索経路を、赤色の経路が本研究が提案した経路変形手法によって最適化された経路を示している。なお、本



Fig. 4 Experimental condition

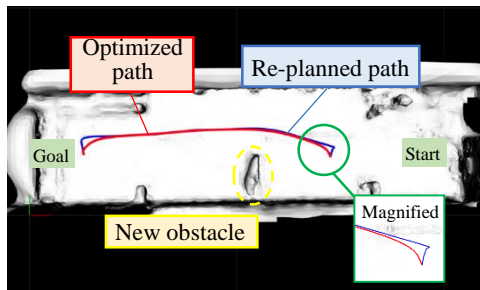


Fig. 5 Path deformed by optimization

Table 1 Path length

	Length [m]
Before optimization	18.1 m
After optimization	17.2 m

実験では、 $\alpha=1.0, \beta=0.1$ とした。図5の拡大した部分に示すように、[2]によって得られた再探索経路は障害物を回避するため一旦後退するような経路になっている。しかし、本研究が提案した経路変形手法によって最適化された経路は障害物を回避しつつ短い距離で目標位置に向かう経路となっている。このことから、提案手法を用いることで、障害物を遠回りして回避する経路を効率的に障害物を回避する経路に変形可能であることが分かった。

また、最適化による経路長の変化を表1に示す。経路長は最適化前が18.1 m、最適化後が17.2 mとなり、経路長が短縮された。よって本研究で提案した経路変形手法により、再探索経路の経路長の短縮が可能であることが分かった。

4. 結論

本研究では3次元不整地での環境変化に対応可能な移動ロボットの動作計画手法を提案した。提案手法では、[2]で提案された環境変化に対して再探索を行う動作計画の枠組みに経路変形のステップを追加した。経路変形は最適化問題を解くことで実行され、再探索によって得られた経路の経路長の短縮が可能である。そして、実環境の地図を用いた実験によって、本研究が提案した経路変形手法の有効性を確認した。

今後の展望として経路変形に要する時間の短縮があげられる。本研究で提案した経路変形の計算には、経路生成にかかる時間に比べて長い時間が必要であった。したがって、今後はより効率的な経路変形手法を構築する必要がある。

参考文献

- [1] Ji Y., Tanaka Y., Tamura Y., Kimura M., Umemura A., Kanashima Y., Murakami H., Yamashita A. and Asama H., "Adaptive Motion Planning Based on Vehicle Characteristics and Regulations for Off-Road UGVs", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 599-616, 2019.
- [2] 勝間 慎弥, Woo Hanwool, 田村 雄介, 山下 淳, 浅間 一, "オフライン探索の結果を用いた効率的な再探索を行う不整地移動ロボットの動作計画", 第19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講演論文集 (SI2018), pp.1569-1574, 2018.
- [3] Yoshida E. and Kanehiro F., "Reactive Robot Motion using Path Replanning and Deformation", *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5456-5462, 2011