

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

○勝間 慎弥, Woo Hanwool, 田村 雄介, 山下 淳, 浅間 一 (東京大学)

Efficient Path Re-Planning for Mobile Robots in Rough Terrain Using Offline Search Tree

○Shinya KATSUMA, Hanwool WOO, Yusuke TAMURA,

Atsushi YAMASHITA, and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : We propose an efficient path re-planning method which reuses offline search tree for mobile robots in rough terrain. Mobile robots in rough terrain cannot follow a planned path because of changes in environment. To solve this problem, we realize a fast re-planning by using search tree obtained by offline path planning.

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。災害現場は危険であるため人間が立ち入ることができないことが多く、そのような環境下では人間の代わりにロボットが作業を行う必要がある。しかし不整地では瓦礫や土砂によって複雑な路面が形成されているため、ロボットが転倒する可能性がある。ゆえに不整地では周囲の環境を把握しながら適切な経路を生成して自律走行できるロボットが望ましい。

2005 年に開催された DARPA グランドチャレンジでは、山岳地帯や砂漠地帯などの未舗装道路を無人走行することを目指して様々なロボットが開発されたが、走行する環境の情報は事前に与えられていた [1]。そのため既知の環境に対して走行不能に陥らない安全な経路を生成することが重要であった。このような不整地環境下において、限られた情報から人間が安全な経路を事前に指定するのは困難であるため、ロボット自身が地図情報をもとに経路を計画する必要がある。

不整地移動ロボットの動作計画の先行研究として田中、池らは大規模な不整地での動作計画手法を提案した [2, 3]。この手法ではランダムサンプリングを用いた探索手法により、水平方向の地図のサイズが $200\text{m} \times 200\text{m}$ という大規模な不整地に対して、5 秒という短い探索時間で経路生成が可能である。ここでランダムサンプリングとは移動ロボットの位置・姿勢の情報を持つノードをランダムに生成し、このノードからなるグラフを用いて高速に探索を行うことが可能な経路生成手法のことである [4]。また移動ロボットの位置・姿勢について高さ方向の変位やロール角・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ロボットが転倒しない動作計画手法である。しかしこの手法では移動ロボットが走行する

環境の情報は既知であることを前提としているため、生成した経路を実際に走行する際に環境が変化していた場合、ロボットが転倒する危険性がある。

土居らは不整地移動ロボットの位置誤差を考慮した動作計画手法を提案した [5]。この手法では不整地走行時に生じると考えられる位置誤差の影響で経路から外れた場合でも、安全性が保障された経路を生成することが可能である。この手法は [2, 3] と比べてよりロバスト性の高い経路生成手法であるが、[2, 3] と同様に環境の情報は既知であることを前提としているため、環境の変化に対する安全性は保証されていない。しかし現実の不整地では、土砂崩れや落石などによって環境が変化する。したがって環境の変化に対して安全性を保証する動作計画は極めて重要である。

環境の変化を考慮した動作計画の手法として Bruce らは、環境の変化に対して新しい経路の探索と移動ロボットの動作を並行して行う動作計画手法を提案した [6]。この手法では新しい経路を探索する際に、以前の探索で得られた経路に近い経路が得られるバイアスをかけることで再探索を効率的に行っている。しかし、この手法では環境の変化が検知される度に探索に用いるグラフをゼロから再生成しているため、以前の探索で得られたグラフのうち作り直す必要のない部分も再生成している。結果として、必要以上に計算時間がかかるという問題点がある。

以上の問題点を踏まえて、本研究では不整地環境の環境変化に応じた再探索を行う移動ロボットの動作計画手法を提案する。提案手法ではオフライン探索時に用いたグラフを部分的に再利用することで効率的な再探索を行う。

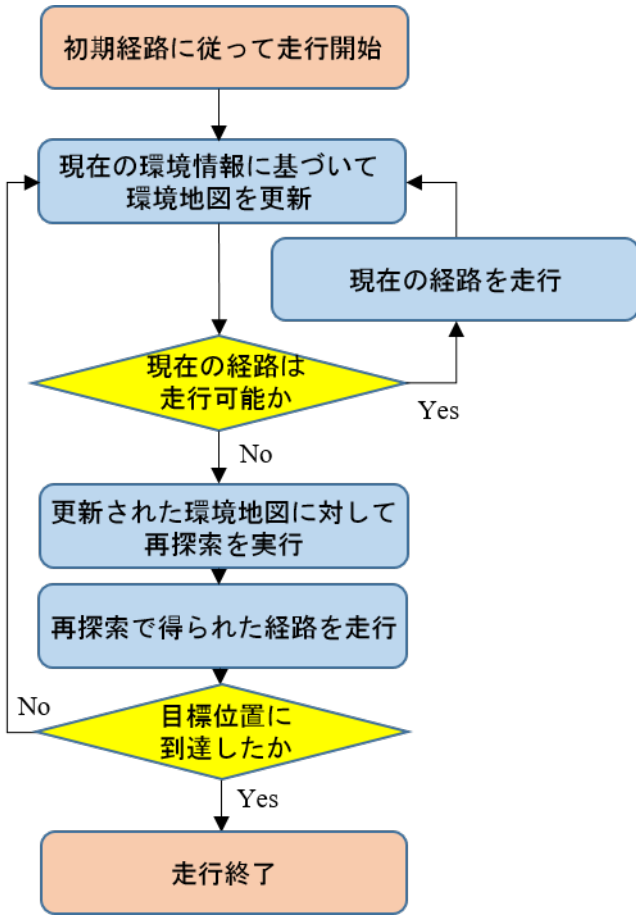


Fig. 1: Flow chart of motion planning

2. 提案手法

2.1 問題設定

本研究では屋外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測定された環境地図とその環境地図に対するオフライン探索によって生成された初期経路、及びオフライン探索時に得られたグラフ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た移動を開始すると同時に、センサによって実際に走行している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による情報によって更新されていない場所は事前に測定された環境地図から変化していないと仮定する。

本研究では上記の問題設定のもとで環境の変化に対しても安全性を保证する動作計画手法を提案する。

2.2 概要

本研究で提案する動作計画手法のフローチャートを Fig. 1 に示す。はじめに移動ロボットはオフライン探索

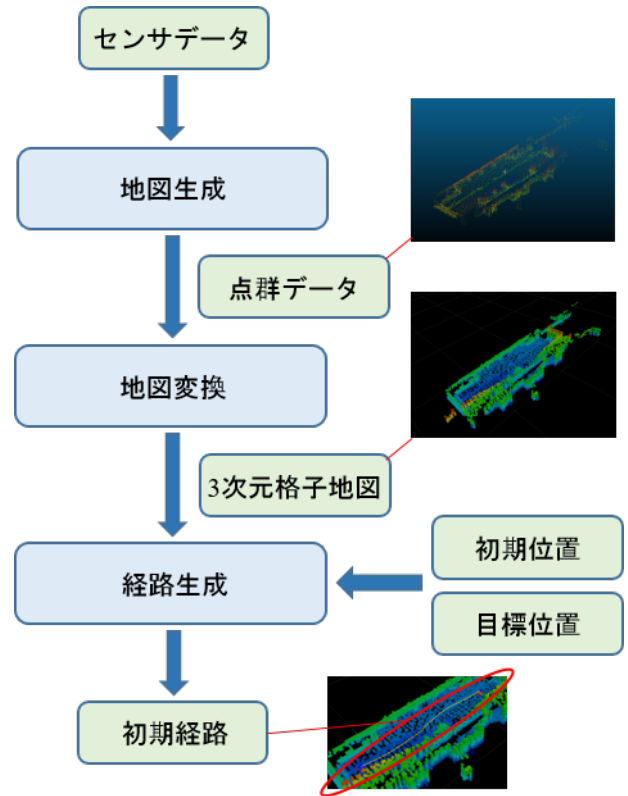


Fig. 2: Map generation and initial path planning

で得られた経路に従って走行を開始する。走行中に環境の情報をセンサによって取得し、環境地図を更新する。そして更新された地図を用いて、その時点での目標位置までの経路は走行可能であるか判定する。この判定によって走行不能と判定された場合にのみ、ロボットの現在位置から目標位置に向かって再探索を行う。再探索を実行する際にはオフライン探索実行時に得られたグラフを利用した効率的な再探索を行う。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、環境の変化に対応可能な動作計画を実現する。

2.3 環境地図及び初期経路の生成

本研究で用いた環境地図と初期経路の生成手法を Fig. 2 に示す。先行研究 [2, 3, 5] では、ロボットが走行する環境の地図は既知のデータとして扱っていたが、本研究では実際のロボットが走行する環境の地図をセンサによって得られたデータから生成する。具体的には 3DLidar センサによって得られた点群データから特徴量を抽出してマッチングを行うことによって 3 次元の環境地図が生成される [7]。生成された環境地図は物体が存在する場所に点群データの形式で保存される。

次にこの点群データをもとに環境地図を OctoMap による 3 次元格子地図に変換する [8]。この変換を行う目的は、点群データを 3 次元格子地図に変換することによって、経

路生成にかかる時間を削減することである．3次元格子地図はオフラインでの経路生成時に利用されるとともに，実際に走行するロボットに事前の環境地図として与えられる．

地図変換によって得られた3次元格子地図をもとにオフラインでの経路生成を行う．本研究では経路生成時の探索手法として，ランダムサンプリングを用いる[2, 3, 5]．ランダムサンプリングでは，まずコンフィグレーション空間内にランダムにノードを生成する．次にそのノードが空間内の障害物と干渉していないか判定する．干渉していないと判定された場合にのみ，そのノードはグラフに追加される．この作業を繰り返し行い，生成されたノードが目標位置に達した時に探索が終了する．本研究では探索のプランナとしてPath-Directed Subdivision Trees (PDST)を用いる[9]．PDSTを用いることで大規模環境に対しても探索が不十分な場所を少なくすることが可能である．このオフライン探索によって得られた経路データを初期経路として実際に走行するロボットに与える．

2.4 走行可能性の判定

更新された環境地図におけるロボットの走行可能性は次のような手順で判定を行う．まずはじめに進行方向の走行経路のうち，センシング可能な領域内のロボットの位置・姿勢を計算する．その位置・姿勢のうちロボットが実現不可能な位置・姿勢がないかどうかをチェックする．1箇所でも実現不可能な位置・姿勢がある場合，その経路は走行可能でないと判定する．ここである位置・姿勢が実現可能かどうかは環境との干渉があるかどうかによって判定する．この干渉の検出にはFCL (Flexible Collision Library)を利用する[10]．

2.5 走行不可能と判定された場合の経路の再探索

先行研究[2, 3, 5]では走行する環境の情報は既知で変化しないことを前提としていた．しかし，土砂崩れや落石が想定される不整地環境下で，走行する環境が変化しないと仮定するのは現実的ではない．よって本研究では現在の経路が走行不可能と判定された場合に経路の再探索を行う．

本研究で用いる再探索の概念図をFig. 3に示す．経路の再探索は以下の手順に従って行う．

- 1) オフライン探索で得たグラフから更新された環境地図と干渉しているノードとその子ノードを削除する (Fig. 3(b))．
- 2) 1) で削除されていないノードのうち最も目標位置に近いノードを探す (Fig. 3(c))．

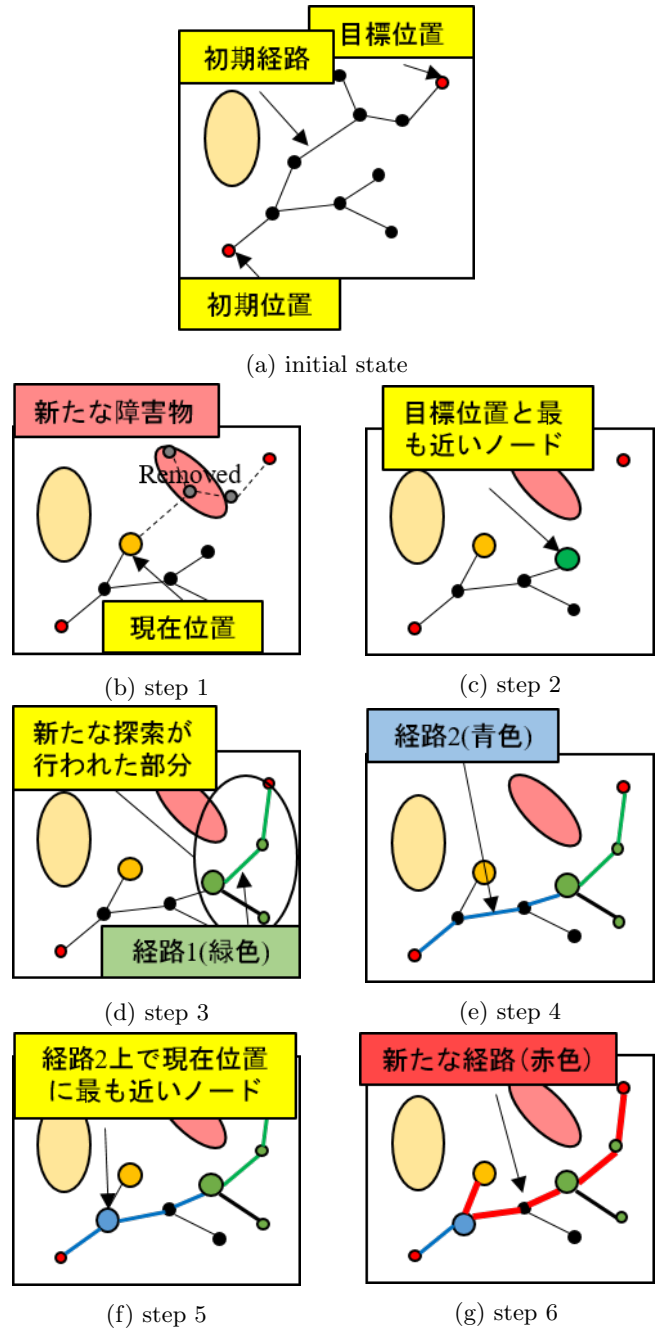


Fig. 3: Concept of re-planning

- 3) 2) で得たノードの位置から目標位置までの探索を行う．この探索で得られた経路を経路1とする (Fig. 3(d))．
- 4) 2) で得たノードから初期位置までオフライン探索で得たグラフ上で親ノードをたどった経路を経路2とする (Fig. 3(e))．
- 5) 経路2上で現在位置から最も近いノードを探す (Fig. 3(f))．
- 6) 現在位置から5) で得られたノード，経路2，2) で得られたノード，経路1，目標位置のノードの順でグラフをたどり，新たな経路とする (Fig. 3(g))．

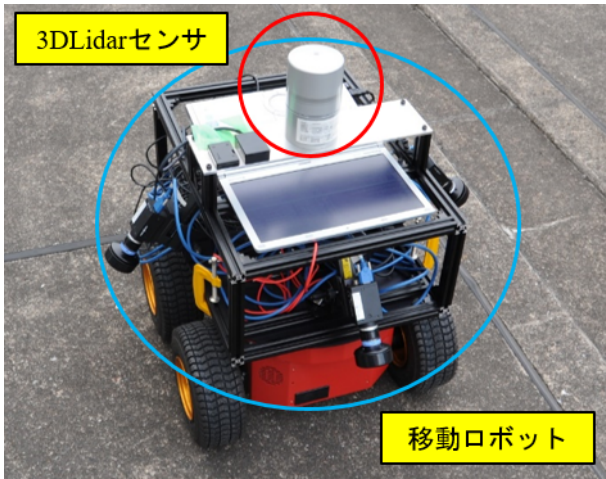


Fig. 4: Mobile robot and 3D Lidar sensor

提案手法では障害物に干渉しているノードとその子ノードのみを削除し、それら以外のグラフは再利用している。このようにグラフを再利用することで、再探索時の探索空間の削減及び計算時間の短縮が可能となる。

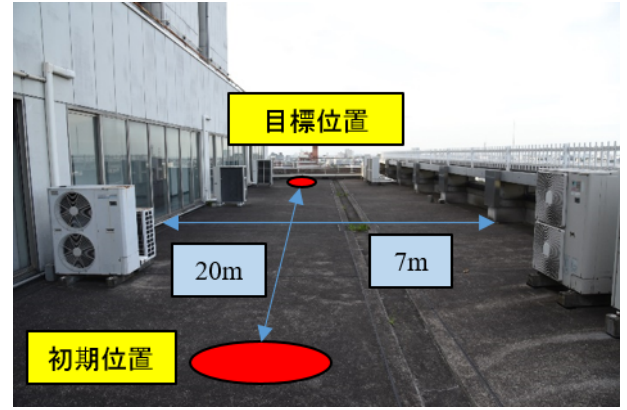
3. 実験

3.1 実験設定

提案手法が環境の変化に対応可能か検証するために、実際の移動ロボットを用いて屋外環境で実験を行った。実験に使用した移動ロボットを Fig. 4 に、実験を行った環境を Fig. 5 に示す。本実験では移動ロボットとして MobileRobots 社の PIONEER-3AT を用いた。また 3DLidar センサとして Velodyne 社の HDL-32e を用いた。HDL-32e は水平全方位 360° と垂直視野 41.3° のセンシングが可能である。実験環境は 27m × 7m の広さを持つ屋外環境であり、初期位置と目標位置は 20m 離れた位置に設定した。また、この実験では Fig. 5(b) の青いバリケードが環境の変化によって生じた新たな障害物であると仮定し、障害物の設置位置は初期値と目標位置の中間地点とした。

3.2 実験手順

本実験でははじめに環境変化前の実験環境の地図を生成した。この環境変化前の地図に対してオフライン探索を行い、初期経路とオフライン探索のグラフを得た。次に環境変化後の実験環境の地図を生成し、この環境変化後の地図に対して初期経路上の障害物を回避する経路の再探索を行った。ランダムサンプリングの結果は毎回異なるため再探索は 5 回行い、その際の平均生成ノード数と平均探索時間を記録した。



(a) before



(b) after

Fig. 5: Environment for this experiment

3.3 地図生成結果

提案手法を用いて生成した環境の地図のうち環境の点群データを Fig. 6 に、環境の Octomap を Fig. 7 に示す。ただしボクセルの 1 辺の大きさは最大で 0.5m、最小で 0.25m である。この結果から点群データ、Octomap とともに障害物の場所に応じた適切な地図生成が行われていることが分かる。

3.4 再探索による経路生成結果

環境変化前の地図に対してオフライン探索を行って生成された初期経路を Fig. 8(a) に、環境変化後の地図において初期経路が障害物と干渉している様子を Fig. 8(b) に示す。その障害物を回避するために行った再探索により得られた経路を Fig. 9 に示す。本研究の提案手法であるオフライン探索時に得られたグラフを用いる再探索によって得られた経路を Fig. 9(a) に、オフライン探索時に得られたグラフを用いない再探索によって得られた経路を Fig. 9(b) に示す。いずれの場合においても、図のように環境変化後の地図に対して障害物を回避する経路を生成することができた。

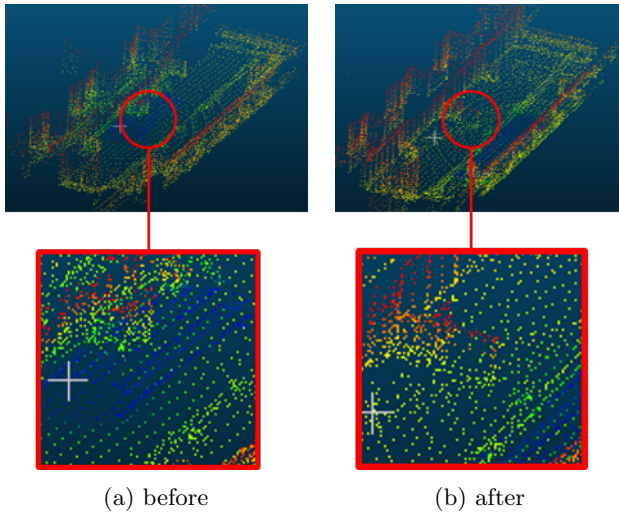


Fig. 6: Point cloud data of the environment

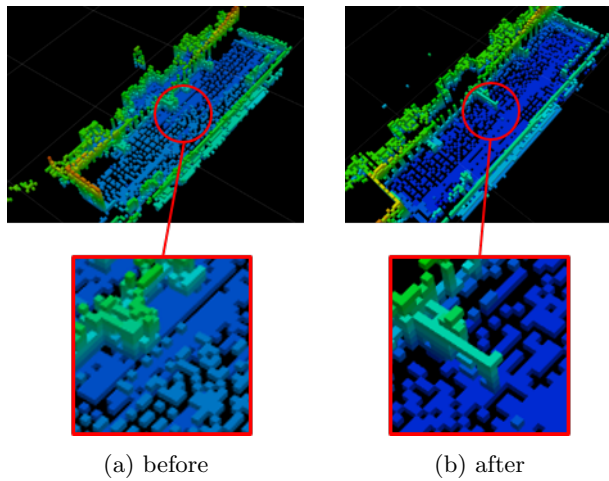


Fig. 7: Octomap data of the environment

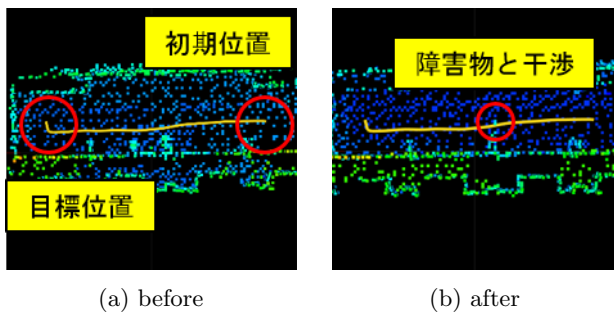
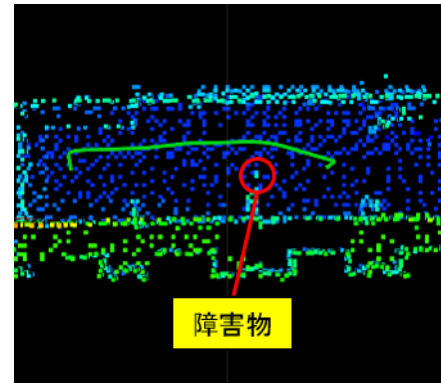
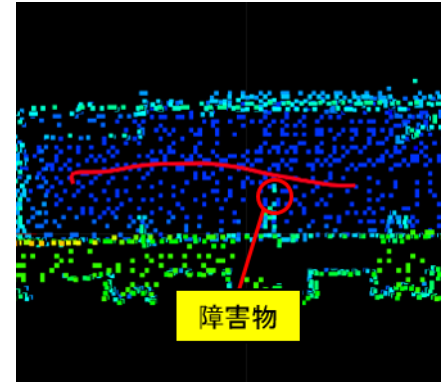


Fig. 8: Initial path obtained by offline path planning



(a) proposed method



(b) re-planning without
offline search tree

Fig. 9: Path obtained by re-planning

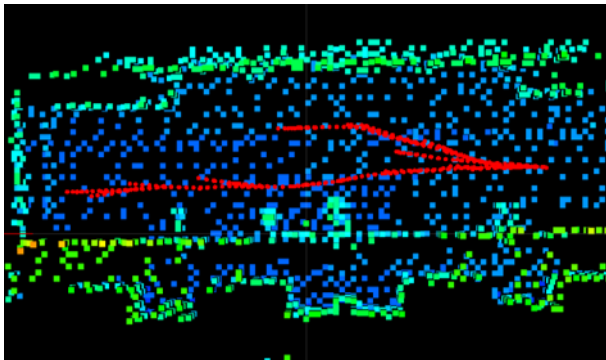
また Fig. 10 に探索時に得られたグラフのノードを示す。図より提案手法ではオフライン探索時に得られたグラフを用いない場合に比べて、再探索時に新たに生成されるノードの数が少なくなっていることが分かる。実験では特定の初期経路に対する再探索を提案手法を用いる場合とオフライン探索時に得られたグラフを用いない場合とで行ったが、提案手法を用いることによりオフライン探索時に得られたグラフを用いない場合に比べ、5回の試行で平均 64.1% ノード数の削減ができた。具体的にはノード数を 1659.8 個から 578.2 個に削減できた。また探索時間についても 5回の試行で平均 59.6%短縮できた。具体的には探索時間を 3.05 秒から 1.10 秒に短縮できた。このように提案手法ではオフライン探索時に得られたグラフを部分的に再利用することによって、効率的な再探索が可能である。

4. 結論

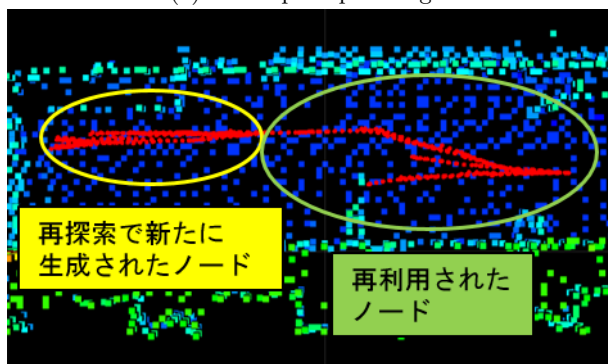
本研究ではオフライン探索時に得られたグラフを用いることで効率的に再探索を行う不整地移動ロボットの動作計画手法を提案し、実環境の地図を用いた実験によって提案手法の有効性を確認した。提案手法では再探索を行う際にオフライン探索時に得られたグラフのうち新たな障害物と

干渉していない部分のグラフを再利用した。そうすることで再探索時に新たに生成されるノードの数を削減し、探索に要する時間を短縮することが可能となった。

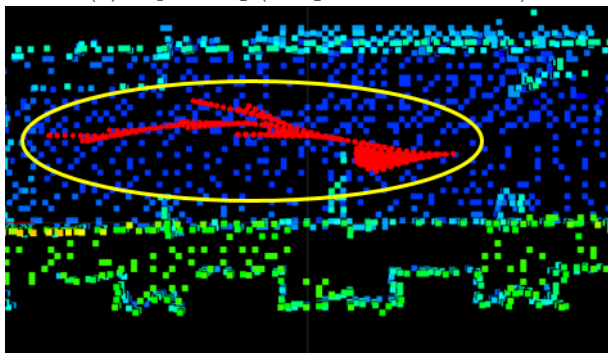
今後の展望として提案手法の効率を高めることを考えている。提案手法では走行する経路上に少しでも事前環境から変化が生じている場合に再探索を行うため、必要以上に再探索が実行され、移動ロボットの走行時間が長くなる可能性がある。よって環境変化の程度に応じて最小限の再探索を行う動作計画手法を導入する。そして実際の移動ロボットを用いて実環境の環境変化で生じた障害物の回避が可能か検証していきたい。



(a) offline path planning



(b) re-planning (using offline search tree)



(c) re-planning (not using offline search tree)

Fig. 10: Nodes made during path planning

参考文献

- [1] “DARPA Grand Challenge”, <http://archive.darpa.mil/grandchallenge>, (閲覧日 2018.7.3) .
- [2] 田中佑典, 池勇勲, 田村雄介, 木村麻衣, 梅村篤志, 金島義治, 村上弘記, 山下淳, 浅間一, “3次元環境地図を用いた不整地走行無人車両の動作計画”, 第22回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp.198–199, 2017.
- [3] Yonghoon. Ji, Yusuke. Tanaka, Yusuke. Tamura, Mai. Kimura, Atsushi. Umemura, Yoshiharu. Kanashima, Hiroki. Murakami, Atsushi. Yamashita and Hajime. Asama, “Adaptive Motion Planning Based on Vehicle Characteristics and Regulations for Off-Road UGVs”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018.
- [4] Rajeev. Motwani and Prabhakar. Raghavan, “Randomized algorithms”, *ACM Computing Surveys*, vol. 28, pp.33–37, 1996.
- [5] Yuki. Doi, Yonghoon. Ji, Yusuke. Tamura, Yuki. Ikeda, Atsushi. Umemura, Yoshiharu. Kanashima, Hiroki. Murakami, Atsushi. Yamashita and Hajime. Asama, “Robust Path Planning against Pose Errors for Mobile Robots in Rough Terrain”, *Proceedings of the 15th International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, 2018.
- [6] James. Bruce and Manuela. Veloso, “Real-time randomized path planning for robot navigation”, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ*, vol. 3, pp.2383–2388, 2002.
- [7] Ji. Zhang and Sanjiv. Singh, “LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time”, *Robotics: Science and Systems*, vol. 2, pp.9–17, 2014.
- [8] Armin. Hornung, Kai M. Wurm, Maren. Bennewitz, Cyrill. Stachniss and Wolfram. Burgard, “OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees”, *Autonomous Robots*, vol. 34, no. 3, pp.189–206, 2013.
- [9] Andrew M. Ladd and Lydia E. Kavraki, “Fast Tree-based Exploration of State Space for Robots with Dynamics”, *Algorithmic Foundations of Robotics*, vol. 6, pp.297–312, 2004.
- [10] “FCL: A Flexible Collision Library”, http://gamma.cs.unc.edu/FCL/fcl_docs/webpage/generated/index.html, (閲覧日 2018.7.3) .