

油圧アクチュエータを搭載したレスキューロボットの開発 —障害踏破能力を考慮した3次元経路計画—

○木村 優佑 (近畿大学), 大坪 義一 (近畿大学)

Development of rescue robot equipped with hydraulic actuator -3D planning including obstacle traversal ability-

○Yusuke KIMURA (KINDAI University), Yoshikazu OHTSUBO (KINDAI University)

Abstract : This paper shows a 3D path planning for a rescue robot with hydraulic actuators. We have developed a function to select the path from a 3D environment map with an octree structure. The path is calculated from orientation of the robot and the navigation function that refers to the distance to the destination.

1. 緒言

頻発する地震災害をはじめとして、日本は多くの災害に見舞われている。災害現場は建造物の倒壊や火災など多くの危険があり、人員を派遣しても救助者自身が要救助者となる二次災害を引き起こす可能性がある。そこで、レスキュー隊員に先行し、事前に要救助者の位置や危険な箇所の発見など、現場の状況を把握することで二次災害の発生を低減するレスキューロボットの開発、導入が進められてきた¹⁾。

さらに近年では、プラント災害やトンネル事故のような人の立ち入りが困難な現場での調査、作業を目的としたロボットの遠隔運用技術の開発が重要とされている²⁾。一方で、遠隔では多自由度を有するロボットの操縦が困難なことやロボットが行動不能に陥った際、人の手で回収することができない問題がある。そこで操作者に依存せず、災害現場で想定されるさまざまな地形から安全な走行経路を選択できる経路計画を行う必要がある。

そこで本論文では、踏破可能な障害を含む経路の生成機能の開発を行った。立体地形を認識するために3次元環境から octree 構造の地図情報を取得し、ロボットが存在可能な地形の領域分割を行った。また、ロボットが存在可能な領域においてロボットの3次元的な姿勢を考慮することで不整地や段差などの環境をロボットが走行可能かどうか判断し、最適な経路を生成する。

実験では災害現場で想定される環境をシミュレーション空間に再現し、最適な経路が生成されるか検証を行った。

2. レスキューロボットの概要

本研究で使用した開発中のレスキューロボット³⁾を Fig.1 に示す。開発中のレスキューロボットは全長 1000mm,

全幅 480mm, 全高 500mm で 2 台の走行ユニットとそれをつなぐ油圧駆動アーム、機体上部の制御ボックスからなる。

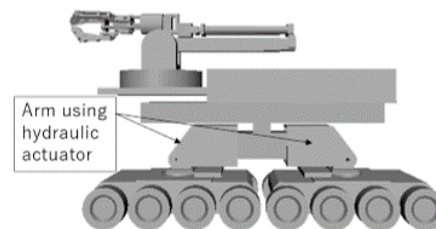


Fig. 1: Overview of robot using hydraulic actuator

開発中のロボットは災害現場での運用を想定し、不整地踏破能力と走行効率の両立を目的としている。一般的な車輪走行ロボットは障害踏破能力が低く、車輪半径以上の段差を乗り越えることができないなどの欠点があるため、不整地や階段などの環境に対応できる踏破性能を備えるものとして油圧駆動アームを搭載しており、車体の持ち上げ動作が可能である。

3. 経路計画手法

本研究では、既知情報として事前に取得した3次元環境地図を用いる。環境地図として取得された点群データを3D マッピングフレームワーク OctoMap⁴⁾ を用いて octree 構造に変換する。Octomap によって変換された環境地図のデータ構造から占有領域とフリー領域の分類を用いることで、ロボットが走行可能な地表面上を示す地面領域と壁や障害物を示す障害物領域に大別することができる。

Fig.2(a),(b) に示すように地面領域は占有ボクセルのうち、直上にロボット全高分のフリー領域が連続して存在すること、障害物領域はロボットの踏破可能高さを超えて占

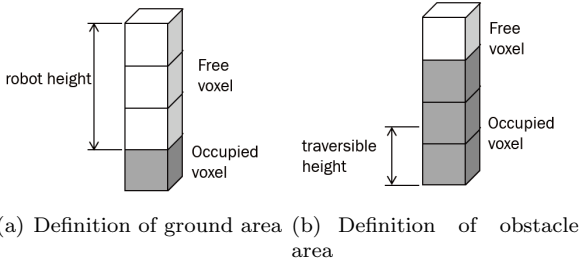


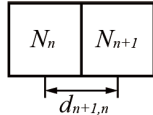
Fig. 2: Voxel map segmentation

有ボクセルが連続していることが条件となる。これにより、抽出した地面領域に対して経路の探索を行うことができる。

経路の探索には、大域経路計画に広く用いられているA* (A-star) アルゴリズム⁵⁾を使用する。経路の探索を効率化させるヒューリスティック関数は、2次元探索においては探索点と目標位置までのユークリッド距離を使用したものが一般的である。しかし、立体的な地形を有する3次元大域探索では直線距離の参照が必ずしも最適であるとはいえない。そこで、Wavefront Propagation アルゴリズム⁶⁾を用いたナビゲーション関数をヒューリスティック関数として導入した。

ここでは、地面領域内のあるノード n において、近傍点探索を行い、隣接するノード $n+1$ との中心座標の距離 $d_{n+1,n}$ を取得する。その値を隣接ノードに格納し、さらに次の隣接ノードの探索、距離の加算をすべてのノードに値が格納されるまで繰り返す。ナビゲーション関数 N_n を式(1), Fig.3 に示す。

$$N_{n+1} = N_n + d_{n+1,n} \quad (1)$$



$d_{n+1,n}$: distance between the centers of the cell

Fig. 3: Definition of Navigation function

Fig.4 において、ゴールのセルのナビゲーション関数の値を 0 として、式(1)で求められるナビゲーション関数 N_n が各セルに格納されている。矢印で示される値はセル間の移動コスト $C_{n+1,n}$ であり、 N_n に $C_{n+1,n}$ を加えた評価関数 $f(n)$ の値がより小さいセルに進むことで最適経路の探索となる。

Fig.4 における最適経路の探索例を示す。まず、Fig.4(a) のように近傍のセルを探索する。このとき、ナビゲーション関数が減少しないセルは除かれる。次に $f(n)$ の値が最も小さくなる Fig.4(b) で示されるセルに移動する。Fig.4(a) 同様に (b), (c) と探索を繰り返していき、(d) で示されるゴールまでの経路が求まる。

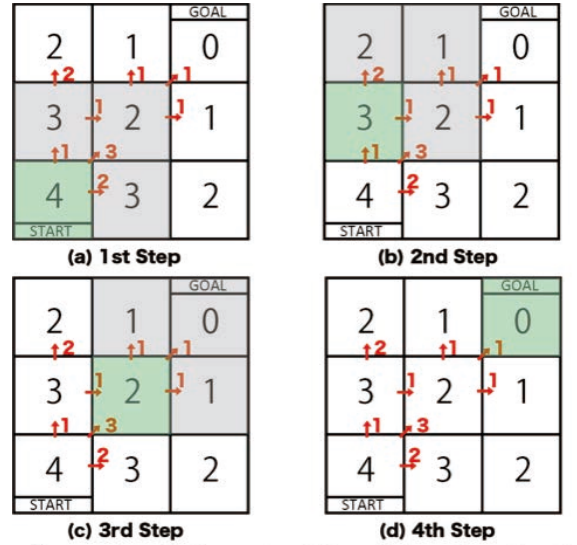
経路を評価する移動コストはロボットがとり得る 3次元姿勢ロール角 ϕ 、ピッチ角 θ とノード間のヨー角の変化量

$\Delta\psi$ をコストとした。あるノード n におけるコストを求める評価関数 $f(n)$ と移動コスト $C_{n+1,n}$ を式(2), (3) に示す。

$$f(n) = \alpha N_n + C_{n+1,n} \quad (2)$$

$$C_{n+1,n} = \beta(\phi_{n+1,n}/\phi_{max})^2 + \gamma(\theta_{n+1,n}/\theta_{max})^2 + \delta(\Delta\psi_{n+1,n}/\psi_{max})^2 \quad (3)$$

ロボットは等速で前進するものと仮定し、走行中に転倒しない限界姿勢を $\phi_{max} = 20[\text{deg.}]$, $\theta_{max} = 40[\text{deg.}]$, $\psi_{max} = 120[\text{deg.}]$ とした。 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は各値に対する重み係数である。



- The numbers in the center of the cell show the value of the navigation function.
- Red arrows and characters show the moving cost.
- The gray shaded area shows the exploration area.
- The green shaded area shows the current position.

Fig. 4: Example of path planning

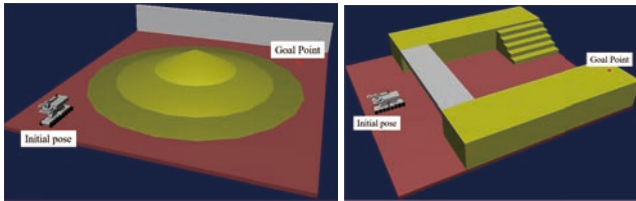
4. 経路生成実験

4.1 実験環境

実験はロボット用動力学シミュレータ Choreonoid⁷⁾ で作成した仮想環境におけるシミュレーションのデータを Choreonoid と ROS⁷⁾ の連携機能⁸⁾ を用いて、ROS に取得させて経路計画を行った。

シミュレーション空間内に用意した傾斜地、立体交差の2つの地形で3次元環境地図を作成し、開発した経路計画機能によって経路の生成実験を行った。実験を行った2つの地形を Fig.5 に示す。

Fig.5(a) は山状に傾斜した地形であり、中心に近づくほど傾斜が急となっている。地形は順に直径 3.0, 2.5,



(a) Mountain slope field (b) Overhead crossing field
Fig. 5: Field for path planning

2.0[m], 傾斜 10, 15, 25[deg.] の 3 種類の円錐で構成される。目標位置はロボットから円錐の頂点を通る直線上の地点に配置した。

Fig.5(b)は傾斜角 30[deg.] の階段を上って立体交差を通過する環境であり、目標位置は立体交差を通過した通路の最奥の地点に配置した。

また、Octomap のボクセル解像度はすべて 0.1[m] とし、Fig.2 で定義した領域分割に用いるパラメータとして、ここではロボットの全高 0.5[m], 最大踏破高さ 0.2[m] とした。

4.2 実験結果

2つの地形における経路生成の結果を以下に示す。

4.2.1 傾斜地形

傾斜地形の環境地図と生成経路を Fig.6 に示す。生成された経路は目標位置に対して直進せず、傾斜の急な場所を迂回して傾斜のなだらかな地形を選択しており、最適な経路であるといえる。

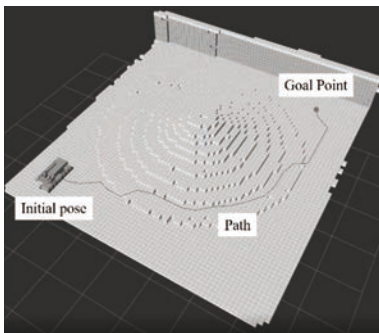


Fig. 6: Mountain slope map and generated path

4.2.2 立体交差

立体交差の環境地図と生成経路を Fig7 に示す。生成された経路は階段から立体交差を最短に近い経路で通過していることがわかる。また、経路上の階段走行時におけるロボットの推定姿勢は ϕ_{max} , θ_{max} をともに超えるものはなかったため、安定姿勢が維持できる最適経路を選択できていることがわかる。

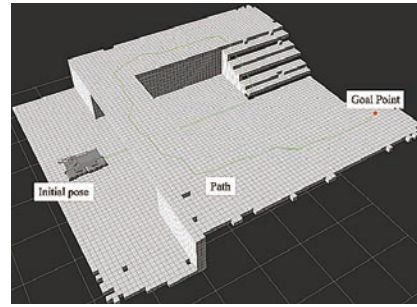


Fig. 7: Overhead crossing map and generated path

5. 結言

油圧アクチュエータによる障害踏破機構をもつロボットのための経路計画機能の開発を行った。3次元環境の地形認識のために Octomap を使用し、領域分割によって取得した地面領域内において経路計画を行った。経路の探索には A* アルゴリズムを使用し、探索のヒューリスティックとしてナビゲーション関数を使用した。移動コストには地形によって推定されるロボットの 3次元姿勢を用いた。

実験では傾斜地と立体構造の 2つの地形に対してロボットの踏破能力を考慮した最適な経路が生成可能であることが確認できた。また、1, 2秒で経路が生成が行えるため経路計画機能として実用に耐えるものといえる。

今後の課題として、ロボットの動的な姿勢の変化や車両特性を考慮するために運動モデルを加えた運動計画による自律走行機能の開発を行う必要がある。

参考文献

- [1] 川端邦明, " 檜葉遠隔技術センターにおける廃炉のための遠隔技術開発および操作訓練を支援する技術開発の取り組み " 日本ロボット学会誌, Vol.36, No.7, pp.460~463. (2017)
- [2] 増田 龍太郎, 中谷 政輝, 大坪 義一: " 不整地踏破を目的としたタイヤ空気圧可変装置の開発 " ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 2016, "2A1-17a3(1-3)"
- [3] Hornung, A, Wurm, KM, Bennewitz, M: "OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees.", *Autonomous Robots* 34(3), pp.189-206.(2013)
- [4] Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, Bertram Raphael: "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimal Cost Paths" *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 4 (2), pp.100-107.(1968)
- [5] Steven M. LaValle: "PLANNING ALGORITHMS" *Cambridge University Press*, pp.378-379.(2006)
- [6] 中岡 慎一郎: " 拡張可能なロボット用統合 GUI 環境 Choreonoid " 日本ロボット学会誌 Vol.31, No.3, pp.226-231.(2013)
- [7] M. Quigley, B. Gerkey, K. Conley, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, E. Berger, R. Wheeler, and A. Ng: "ROS: an open-source Robot Operating System," in *Proceedings of Open-source Software Workshop of the International Conference on Robotics and Automation(ICRA)* (2009)

- [8] 金広 文男, 中岡 慎一郎: “災害対応ロボットシミュレータ Choreonoid の ROS 連携機能”ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 2016, ”1A2-10a1”