

統計的識別および存在確率のボクセル管理による Visual SLAM における移動障害物の除去 Removal of Moving Obstacles in Visual SLAM by Statistical Identification and Voxel Management of Existence Probability

月野 駿佑[†]
Shunsuke TSUKINO

木室 義彦[†]
Yoshihiko KIMURO

1. はじめに

屋内環境における移動ロボットの自律制御において、SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) は「自己位置推定」と「環境地図生成」を同時に行う重要な技術である。SLAM には主に、レーザセンサを用いた Laser SLAM とカメラ画像を用いた Visual SLAM があるが、生成された 3 次元環境地図には、しばしば人や可動物体などの移動障害物がノイズとして含まれる。このノイズは、位置推定やナビゲーションに影響を及ぼすため、その除去が望まれている。この解決には、大きく分けて画像による物体認識と移動障害物の存在確率との 2 つのアプローチが存在する。

我々は、複数ロボット間での SLAM の実行と地図データの共有を目指している。このとき、単なるノイズ点群の除去ではなく、移動障害物の存在可能性を共有する必要があると考えている。このため、Visual SLAM で得られた屋内の 3 次元環境地図に対し、屋内環境における仮説に基づく移動障害物の存在確率をボクセル単位で算出・管理する手法を提案する。これにより、機械学習に依存せず、統計的に移動障害物を識別・除去する。ここでは、その手法の概要および現時点での実装状況を報告する。

2. 関連研究

レーザセンサや SLAM で得られた 3 次元点群に対する移動障害物除去に関しては、いくつかの研究が報告されている。徳田らは、機械学習により抽出されたカメラ画像内の物体領域と状態格子地図を用いて移動障害物が存在した位置を記録・管理する手法を提案し、カメラ画角外の障害物除去に成功している[1]。また、S. Han らは、Visual SLAM の入力画像から人物を検出し、マスク処理を施すことで移動障害物の影響を最小化している[2]。これらの研究では、入力画像に機械学習を適用しており、高精度に物体検出が可能であるが、学習済みモデルに含まれないものは検出できないという課題があった。一方、移動障害物の事前知識を必要としない時間差分による 3 次元点群処理を行うものがある。H Lim らの ERASOR は、屋外環境の移動障害物は地面に接しているという仮定に基づき、格子内の疑似占有率を計算することで、未知の移動障害物も検出、除去可能なことを示した[3]。本研究は、このような統計的アプローチを屋内環境に適用する。特に、屋内環境における「天井付近には移動障害物が存在する確率が低い」という仮定に基づいて存在確率を算出する。

3. 提案手法

3.1 概要

先に述べた ERASOR は、傾斜を含む地表面の上部に現れる構造物や移動障害物を格子内の疑似占有率で求める。

[†]福岡工業大学 Fukuoka Institute of Technology

これに対し、我々は、屋内環境の天井とこれを支持する壁などの躯体、および移動障害物を格子内の疑似占有率で求めることとする。すなわち、上方の水平な天井面とこれに垂直な壁面に囲まれた領域内をボクセルで管理し、これに、移動障害物の存在確率を格納する。

提案手法の処理手順を Figure 1 に示す。この手法では、まず、Visual SLAM で得られた 3 次元点群を入力とする。天井および壁面は、通常であれば RANSAC 等を用いて平面抽出ができる。しかしながら、我々が想定している屋内環境は壁面の湾曲や天井高の変動がある。このため、主成分分析 (PCA) を用いた法線推定を行い、点群に対して壁面、天井・床のラベル付けを行う。次に、ラベル付けされた点群をボクセルに変換し、壁面、天井ラベルのボクセル群に囲まれた部分を移動障害物が存在する可能性のある内部領域とする。この内部領域に対して、天井から遠いほど、また、壁面から遠いほど移動障害物の存在確率を高くする (Figure 2)。この図では、濃色のボクセルが移動障害物領域を示しており、存在確率に応じたボクセル管理を行う (図では、存在確率を濃淡で表示)。この手法は、天井と壁面で囲まれた空間を処理対象とすることから、湾曲した壁面や通路幅が変化するような複雑な屋内環境にも適用可能である。以上の処理を通じて移動障害物の検出、除去を実現し、結果として移動障害物を含まない、構造的に普遍性の高い 3 次元環境地図の構築が可能になると考えている。

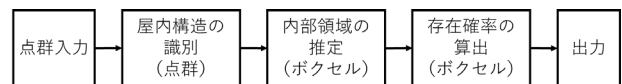


Figure 1 Processing steps of the proposed method

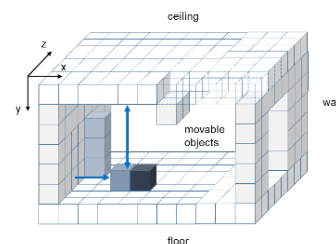
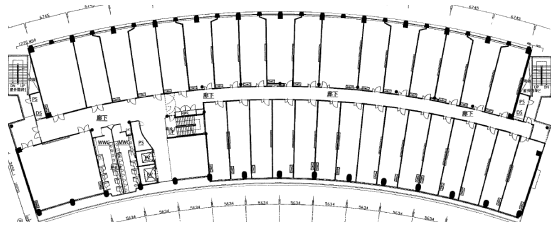


Figure 2 Voxel-based Existence Probability in Indoor Env.

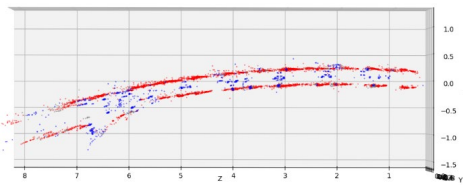
3.2 屋内構造の識別

屋内環境では、移動障害物は壁面や天井・床といった静的構造の内部領域に存在する。そこで、まず、点群にラベル付けを行い、主要な屋内構造 (壁面、天井・床など) を抽出する。これにより、各点がどの構造に属するかを判別可能となる。点群のラベル付けには、各点の近傍に対して適用した主成分分析から得られた局所的な法線ベクトルを用いる。法線ベクトルとグローバル座標軸との直交性に基づき、壁面、天井・床などの分類を行う。具体的には、共分散行列の最小固有値に対応する固有ベクトル \mathbf{n} を法線ベ

クトルとし、その向きと座標軸とのなす角から構造を決定する。Figure 3 にラベル付けされた点群の例を示す。対象は大学構内の湾曲した廊下であり、壁面を赤、天井・床を青、その他を灰色で示している。この処理結果は、後述の内部領域推定や存在確率算出に用いられる。



(a) Completion drawing of experimental environment



(b) Obtained labeled point clouds from SLAM
(Red: wall, Blue: ceiling/floor, Gray: other)

Figure 3 Experimental environment and input point cloud

3.3 内部領域の推定

屋内構造の識別結果に基づき、内部領域をボクセル単位で推定する。まず、ラベル付き点群をボクセルに投影し、その後、ボクセル数を垂直方向にヒストグラム化、そのピークを天井領域とする。床ラベルも同様であるが、床面はテクスチャが少なく、点群が得られない場合も多い。天井高より低く、壁ラベルに囲まれた領域を内部とみなす。なお、Visual SLAM は、疎なテクスチャ領域での環境地図生成が十分に行えない。そのため、モフォロジー処理（膨張、収縮処理）による補間を行っている。Figure 4 は、推定された内部領域の例である。Figure 3 と同様、Visual SLAM により得られた屋内の 3 次元環境地図を用いた。なお、図中、一部推定できていない欠落領域は Visual SLAM の限界に起因するものであり、3D Laser SLAM などで解決できる。

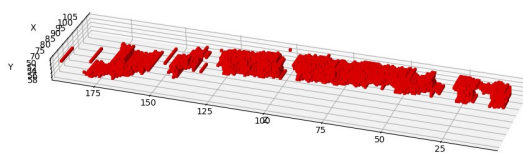
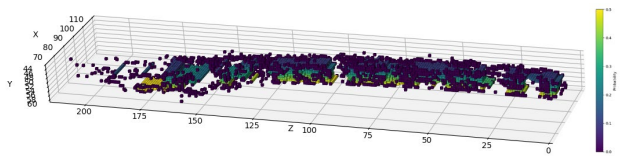


Figure 4 Estimated internal regions (voxels)

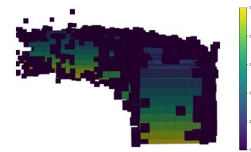
3.4 存在確率の算出

3.3 節で求めたラベル付きボクセルと内部領域のボクセルに対して移動障害物の存在確率を定義する。これは、椅子や人などの障害物がある領域に存在する可能性を示す指標であり、各ボクセル単位で算出される。明らかな壁面や天井・床には移動障害物の存在確率 0.0 を割り当てる。他のボクセルには、高さ方向に応じて 0.1~0.5 の範囲で線形に変化する存在確率を内部領域に適用している。Figure 5 は、Figure 4 のボクセル図に対し、存在確率を濃淡で可視化したものである。最終的に抽出された 3 次元点の総数は 7035 点、ボクセルサイズは 0.32[m]、存在確率が付与され

た総ボクセル数は 8598 個であった。このボクセル群を共有して、他の SLAM が実行される。なお、現状では、その他ラベルが内部領域に存在する場合の存在確率が十分考慮できていないため、引き続き、改良が必要である。



(a) 3D view of voxel-wise probability



(b) View from XY plane

Figure 5 Example of existence probability application

3.5 手法の評価

本手法を評価するためには、環境地図および移動障害物との平均重なり率といった指標が必要となる。また、移動が短期に起こるものと移動しにくいものも存在する。ERASOR が用いた KITTI データセットでは、移動障害物を含む物体の各ラベルが与えられており、移動障害物の検出性能が定量的に評価可能である。一方、本研究における実験データには正解ラベルの付与が行えていないため、実験データセットの整備、または、KITTI データセットと同様の公開されたさまざまな屋内環境のデータセットでの検証が必要である。

4. おわりに

本研究では、Visual SLAM により得られた屋内環境の 3 次元点群から移動障害物の存在確率をボクセル単位で算出、管理する手法を提案した。壁面や天井・床を識別できると仮定し、それらに囲まれた領域を内部空間と定義することで、構造に基づく確率付与を可能とした。特に、屋内特有の「天井付近には移動障害物が少ない」という仮定を用い、高さ方向の存在確率を設定した。一方、点群の密度、特に壁面の疎密が内部領域の推定精度に影響する課題も確認された。今後は、内部領域に他ラベルが存在する場合や時間的変化を考慮した存在確率の設定、評価用データセットの整備を通じ、提案手法の定量的評価と移動障害物の存在確率を含んだ地図の共有を目指す。

参考文献

- [1] 徳田 孝介, 浦崎 圭介, 橋川 雄樹, 田崎 豪, “状態格子地図による三次元地図のノイズ除去”, 第 41 回 日本ロボット学会学術講演会, 2023.
- [2] S. Han, M. U. Ahmed, P. K. Rhee, “Monocular SLAM and Obstacle Removal for Indoor Navigation”, in Proc. 2018 International Conference on Machine Learning and Data Engineering (iCMLDE), pp.67-76, 2018.
- [3] H Lim, S Hwang, H Myung, “ERASOR: Egocentric Ratio of Pseudo Occupancy-Based Dynamic Object Removal for Static 3D Point Cloud Map Building”, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.6, No.2, pp.2272-2279, 2021.