

# 3次元点群解析に基づくロボット移動可能領域の半自動認識手法

○相川 雄也 (名古屋大学) 片山 晋 (名古屋大学) 浦野 健太 (名古屋大学)  
米澤 拓郎 (名古屋大学) 河口 信夫 (名古屋大学)

With the improvement of robot performance, the operation of various autonomous mobile robots is expanding in indoor and outdoor spaces. Since structures such as sidewalks and stairs are designed based on human standards, the autonomous movement of robots of different sizes and performance requires path planning that takes into account the shape of the road environment. In this study, we semi-automatically generate and evaluate 3D vector maps that represent three-dimensional road surface areas from point cloud maps measured with a handheld scanner.

## 1. はじめに

自律移動ロボットの性能の向上に伴い、屋外空間での多種多様な自律移動ロボットの運用が拡大している。主な利用方法としては、物流サービスにおける自動配送ロボットや、電動車いすの自動走行などが挙げられる [1][2]。ロボットの自律移動には、周辺環境から移動可能な範囲を認識して移動する必要がある。そのため、移動に関連する地理情報をもつ地図データを事前に作成し、経路計画に利用する自律移動手法が提案されている。自動車の自動運転では、高精度地図と呼ばれる移動レーンや信号機の位置などの情報を含むベクター地図の整備により対応している [3]。多くの場合、ベクター地図は点群データや画像データを参考に手作業で作成している。

令和4年改正道路交通法で定義された「遠隔操作型小型車」に属する自律移動ロボットは、歩行者相当のルールに従って走行する必要がある [4]。よって、自動車が専用の車道を移動するのに対し、歩道や室内など、ロボット専用設計されていない空間の移動が必要となる。そのため、段差や傾斜、道幅等の移動に影響する情報が記載された地図データを利用し、各種ロボットのサイズや性能を考慮した経路計画が求められる。

しかし、自動車の高精度地図のような自律移動ロボット用の地図データは、現在整備されていない。また、Open Street Map や基盤地図情報等の既存の電子地図は、段差や傾斜、道幅等が記載されていない場合が多く、記載のある箇所についても、更新頻度や許容誤差、解像度の関係でロボットの経路計画に必要な精度を満たしていない可能性がある。そのため、移動に影響する情報が記載されたロボット用の地図データの効率的な作成が課題となっている。

そこで本研究では、ハンディスキャナで取得した点群地図から、連続した路面領域を表す3次元ベクター地図の半自動生成手法を提案する。3次元ベクター地図は、ロボットの移動が想定される路面と、段差や壁、芝生などの領域との境界線を表し、路面の高低差や傾斜角、道幅等の数値の容易な抽出が期待される。

提案手法では、階段やスロープ、芝生等を含んだ地形から、手動でロボットの移動が想定される路面の1点を選択する。その後、選択した1点と滑らかに連続する路面を抽出し、壁面や芝生との境界線を生成する。手動で作成した正解データを用いて、提案手法で半自

動生成した路面領域の定量評価を行った。評価の結果、完全性、正確性、品質は93.0%~98.0%であった。

## 2. 関連研究

自律移動ロボット用のベクター地図生成に関連して、自動車向けのベクター地図生成手法と、3次元点群地図のクラスタリングにおける先行研究について述べる。

### 2.1 自動車向けのベクター地図生成

車道の構成要素として、車道部と歩道部の境界線や、横断歩道、信号機等があり、これらの位置や属性を表す線や面を、MMS (Mobile Mapping System) で取得した点群や画像データから生成する研究が行われている。本間らは、MMSの点群データから車道境界線の自動抽出を行い、10.5~19.6mmの精度で車道境界線を生成した [5]。また、深層学習を用いたベクター地図の生成手法も研究されており、LiDARで取得した点群とカメラ画像から、車道境界線や横断歩道等を表すベクター地図を生成する様々なモデルが考案されている [6][7]。

これらのベクター地図生成手法は、MMSデータ計測時の軌跡が車道内にあり、車道は縁石や歩道に挟まれた、ある程度直線で平坦な領域であるという前提を利用している。しかし、本研究で考慮するロボット専用設計されていない空間では、データ計測時の軌跡が、全てのロボットにとって移動可能な領域内にあるとは限らず、地形の形状や位置関係が車道と比較して多様であるため、自動車用の手法を歩道や室内に直接適用するのは困難であると考えられる。

### 2.2 3次元点群地図のクラスタリング

3次元点群地図のクラスタリングにより路面や構造物等を認識する研究が行われている。Baladoらは屋外の点群地図をRegion growing法と機械学習により歩道や階段等の構造にクラスタリングし、歩行者と車椅子それぞれの移動経路を計算した [8]。また、Jiahaoらは屋外の色付き点群地図を計測時のストリートビューと鳥瞰図の2種類の視点の画像に変換し、Segment Anythingにより歩道や横断歩道のマスクを生成した [9]。屋内では、Jungらは複数の部屋を含む点群地図を天井、床、壁にクラスタリングし、屋内のBIM (Building Information Modeling) の自動生成を行った。 [10]

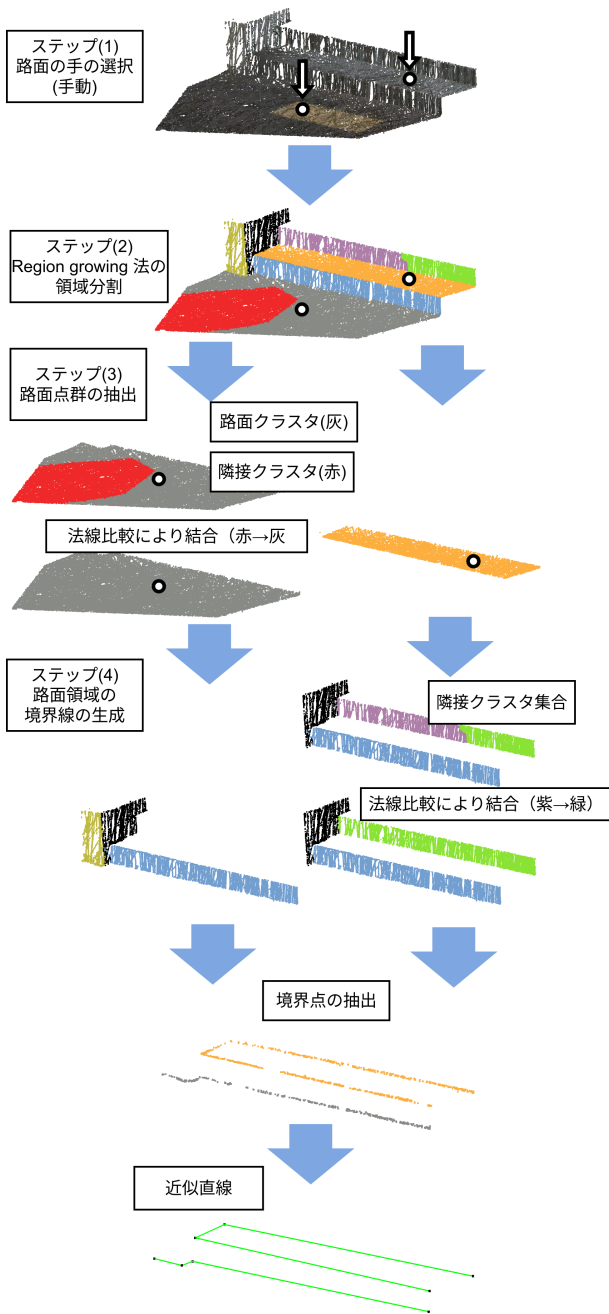


図1 手法全体の流れ

### 3. 提案手法

本研究では、ハンディスキャナで計測した3次元点群を入力として、路面と周囲の領域の境界を表す3次元ポリラインを出力することを目的とする。歩道や階段の踏面など、ロボットの移動が想定される面を「路面」とする。3次元点群から、(1)手動でロボットの移動が想定される路面の1点を選択した後、(2)Region growing法による点群地図の領域分割を行う。そして、(3)路面の点群を抽出し、(4)路面と周囲の領域との境界線を生成する。ステップ(1)は手動で行い、(2)~(4)は自動で行う。手法全体の流れを図1に示す。

#### 3.1 手動による路面の点の選択

ハンディスキャナで計測した3次元点群には、上記の路面以外にも、屋根やブロック塀の上面など、ロボットの移動が想定されない水平面が存在する。本手法では、各路面から手動で1点選択し、ステップ(2)の路面の抽出の基準とする。領域が平面や斜面で滑らかに連続している場合、1つの路面とする。階段の違う段の踏面など、路面同士に段差がある場合は、異なる路面とする。

#### 3.2 Region growing法による点群地図の領域分割

Region growing法の手順を以下に示す。

- (1) あるシード点の $k$ 近傍点の法線と曲率を計算する
- (2) シード点と近傍点の法線のなす角度が $\theta_{th}$ 未満の場合、同じクラスタとみなし追加する
- (3) 追加された近傍点の曲率が $c_{th}$ 未満の場合、次のシード点とする

上記の手順を繰り返すことで、点群地図は複数のクラスタに分割される。点群が滑らかな面を形成する部分は同じクラスタになり、面同士が離れたり傾きが大きく変わる部分では異なるクラスタになる。本研究では、路面から壁面や芝生、ノイズ等をより確実に分離するために、意図的にオーバーセグメンテーションを行った。パラメータは $k = 250$ [個]、 $\theta_{th} = 30$ [deg]、 $c_{th} = 0.02$ [ $m^{-1}$ ]とした。過剰に分割した部分はステップ(3)以降のクラスタの結合により解消される。また、点数が50未満のクラスタはノイズに分類した。

#### 3.3 路面点群の抽出

クラスタリング後、路面点群の抽出を行う。ステップ(2)で過剰に分割されたクラスタの結合により、連続した路面を1つのクラスタに結合する。まず、ステップ(1)で選択した路面の基準となる点を含むクラスタを、路面クラスタに設定する。次に、路面クラスタと他クラスタの点の最小距離が $1$ [cm]以下のクラスタを、隣接クラスタとして全て選択する。各隣接クラスタについて、以下の手順を行う。

- (1) 路面クラスタ内の点群から、注目する隣接クラスタ内の任意の点が、距離 $50$ [cm]以内に存在する点を抽出し路面クラスタ代表点群とする。
- (2) 注目した隣接クラスタ内の点群から、路面クラスタ内の任意の点が、距離 $50$ [cm]以内に存在する点を抽出し隣接クラスタ代表点群とする。
- (3) 路面クラスタ代表点群と路面クラスタ代表点群の法線のなす角度が $5$ [deg]以下の場合、隣接クラスタを路面クラスタに結合する。

#### 3.4 路面領域の境界線の生成

ステップ(3)で結合した路面クラスタと、その隣接クラスタの集合との境界線を生成する。各路面クラスタとその隣接クラスタ集合について、以下の手順を行う。

- (1) 隣接クラスタ集合内で、最短距離が $1$ [cm]以下で法線のなす角度が $10$ [deg]以下のクラスタの組は全て結合する。

- (2) 路面クラスタ内の点群から，結合後の各隣接クラスタの点群との最短距離が $2[cm]$ 以下の点群を，その隣接クラスタとの境界点とする．境界点が2点未満の隣接クラスタは，路面付近のノイズとみなし，以降の手順を行わない．
- (3) 各隣接クラスタとの境界点について，主成分分析により近似直線を求める．
- (4) 近似直線上に境界点を射影し，近似直線の両端点を求め，線分を生成する．

隣接クラスタ集合内で，隣接しており結合されなかったクラスタの組がある場合は，追加の手順により，線分を接続，延長する．生成した線分の集合を路面領域の境界線とする．

- (1) それぞれの近似直線を  $xy$  平面に投影し，交点の  $xy$  座標を求める．
- (2) 近似直線の交点における  $z$  座標の平均値を交点の  $z$  座標とする．
- (3) 各隣接クラスタの境界線分を端点の一方を交点に更新する．

#### 4. 評価

本章では，提案手法により点群地図から路面領域の境界線を生成し，結果を定量評価する．

##### 4.1 使用データ

Leica 社製 BLK2GO ハンディスキャナにより，名古屋大学東山キャンパス内の点群地図を作成した．図2に検証区間を示す．検証区間は工学部3号館入口周辺であり，4つの路面が存在する．スロープで接続されたドア前のスペースと階段を含む領域を路面1，階段の踏面を低い順に路面2，3，4とする．路面1と芝生が隣接しており，点群地図上に計測者が写ったノイズは除去していない．点群は約193万点からなり，路面における密度は約1万点/ $m^2$ である

##### 4.2 評価方法

路面境界線の生成結果を Heipke[11] の提案手法によって定量評価する．点群地図を参考に手動で作成した正解データを正解境界線，提案手法によって生成した境界線を抽出境界線とする．定量評価は，正解境界線，抽出境界線を  $xy$  平面に投影して行う．図3に示すように，正解境界線からバッファ幅  $w_b$  を持つバッファ内の抽出境界線を True Positive (TP)，バッファの外

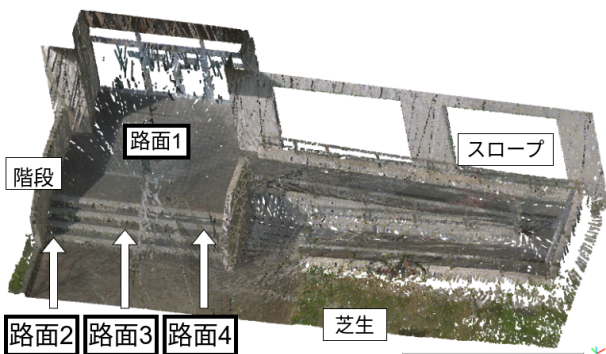


図2 検証区間全体の点群地図

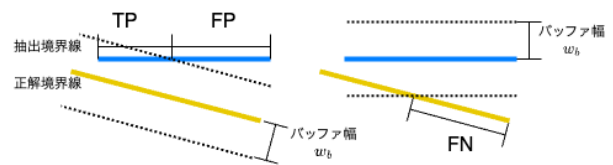


図3 TP, FP, FN の定義

にある抽出境界線を False Positive (FP) と定義する．また，抽出境界線からバッファ幅  $w_b$  を持つバッファの外にある正解境界線を False Negative (FN) と定義する．抽出境界線の完全性，正確性，品質は式(1)~(3)で定義される．高精度道路地図作成の実務業では，取得点群の車道境界線からの誤差がおよそ50mm以内であることが望まれる[5]ため， $w_b$ を10[mm]~100[mm]の範囲で評価した，検証区間内の路面1~4と全体について，完全性，正確性，品質を算出した．

$$\text{完全性} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (1)$$

$$\text{正確性} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\text{品質} = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (3)$$

##### 4.3 評価結果

図4，5に，手動で生成した正解境界線と提案手法で生成した抽出境界線を示す．また，表1に  $w_b$  を変化させた場合の全体の評価結果を示す． $w_b = 50[mm]$ での検証区間全体における完全性，正確性，品質は93.0%~98.8%であった．表2に  $w_b = 20[mm]$ での各路面及び全体の評価結果を示す．

抽出境界線には，図6のように本来境界線が引かれるべき箇所で見切れている箇所が見られ，特に路面1のスロープ周辺で多く発生した．これは路面2~4と比較し路面1の精度が低い原因であると考えられる．スロープ壁面で入力点群の密度が局所的に低い部分がある

表1 全体の定量評価結果

	$w_b[mm]$					
	10	20	30	40	50	100
完全性 [%]	70.7	90.3	92.5	93.5	94.1	96.1
正確性 [%]	76.0	96.4	98.1	98.7	98.8	99.1
品質 [%]	57.8	87.4	91.0	92.4	93.0	95.3

表2 各路面及び全体の定量評価結果 ( $w_b = 20[mm]$ )

	完全性 [%]	正確性 [%]	品質 [%]
路面1	86.0	94.9	82.1
路面2	100.0	100.0	100.0
路面3	96.9	97.3	94.3
路面4	99.7	100.0	99.7
全体	90.3	96.4	87.4



在し、ステップ(4)で同じスロープ壁面上の複数のクラスタが隣接していないと判定したため、クラスタとクラスタの隙間で境界線の生成に失敗したことが原因であると考えられる。路面1~3周辺では点群密度が比較的高かったため、そのような失敗はほとんど見られない。

よって、半自動生成した路面領域の境界線は、入力データの点群密度が十分であれば、ベクター地図に利用できると思われる。

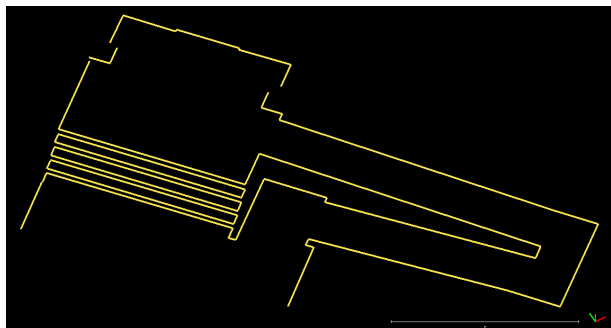


図4 正解境界線

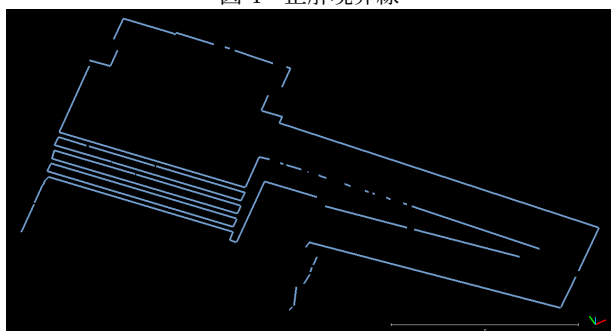


図5 抽出境界線

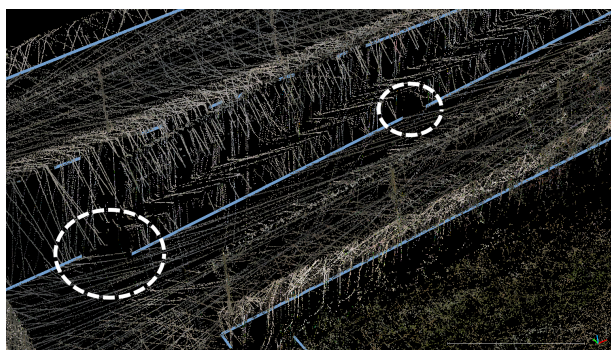


図6 境界線生成の失敗例

## 5. まとめと展望

本論文では、3次元点群地図を用いた路面領域の3次元ベクター地図の半自動生成手法を提案し、生成結果の定量評価を行った。Region growing法によるクラスタリングと主成分分析による近似直線により、スロープを含む傾斜が滑らかに変化する領域でも3次元ベクター地図が生成可能であることが示された。評価の結果、路面周囲の芝生や壁面の点群密度が極端に低い部分では、路面の境界を正しく認識できず、境界線が途切れることが示された。

提案手法では、手動で路面内の1点の選択により路面の存在を取得したが、ロボット用の地図データの完全な自動生成には、センサデータから路面の存在を自動で取得する必要がある。そのため、画像データや点群の反射強度などの別のセンサデータと組み合わせ、複雑で立体的な地形から路面領域の正確な認識を目指す。

また、ロボットのサイズや性能に応じた経路計画を可能にする地図データの生成に向けて、点群と提案手法で生成した境界線から、路面の道幅や傾斜、路面間的高低差等の情報を抽出し、路面領域への付与を行う予定である。さらに、地図データの路面領域に付与された情報から、各種ロボットの特徴や与えられたタスクに応じて経路を選択するシステムの構築、シミュレーションを目指す。

謝辞 本研究の一部は、科研費若手研究24K20868, 内閣府 SIP3 JPJ012495 に支援いただいています。

## 参考文献

- [1] 安藤健. 移動ロボットを活用した屋内外搬送ソリューション. *IATSS Review (国際交通安全学会誌)*, 46(3):194-202, 2022.
- [2] 安藤 健 and 上松 弘幸. 自律移動ロボットのIoT化と新規市場創出. *日本ロボット学会誌*, 37(8):703-706, 2019.
- [3] Rong Liu, Jinling Wang, and Bingqi Zhang. High Definition Map for Automated Driving: Overview and Analysis. *The Journal of Navigation*, 73(2):324-341, 2020.
- [4] 令和4年改正道路交通法(遠隔操作型小型車の交通方法等)の概要. [https://www.meti.go.jp/shingikai/mono\\_info\\_service/jidosoko\\_robot/pdf/008\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jidosoko_robot/pdf/008_05_00.pdf). (Accessed on 07/05/2024).
- [5] 本間 亮平, 伊達 宏昭, and 金井 理. スキャンラインの湾曲度評価に基づくMMS取得点群からの車道境界線抽出. *写真測量とリモートセンシング*, 60(2):53-64, 2021.
- [6] Yunpeng Zhang, Zheng Zhu, Wenzhao Zheng, Junjie Huang, Guan Huang, Jie Zhou, and Jiwen Lu. BEVerse: Unified perception and prediction in birds-eye-view for vision-centric autonomous driving. *arXiv: 2205.09743*, 2022.
- [7] Yicheng Liu, Yuantian Yuan, Yue Wang, Yilun Wang, and Hang Zhao. VectorMapNet: End-to-end Vectorized HD Map Learning. *arXiv: 2206.08920*, 2023.
- [8] Jesús Balado, Lucía Díaz-Vilariño, Pedro Arias, and Henrique Lorenzo. Point clouds for direct pedestrian pathfinding in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 148:184-196, 2019.
- [9] Jiahao Xia, Gavin Gong, Jiawei Liu, Zhigang Zhu, and Hao Tang. Pedestrian-accessible infrastructure inventory: enabling and assessing zero-shot segmentation on multi-mode geospatial data for all pedestrian types. *Journal of imaging*, 10(3):52, 2024.
- [10] Jaehoon Jung, Cyrill Stachniss, Sungha Ju, and Joon Heo. Automated 3d volumetric reconstruction of multiple-room building interiors for as-built bim. *Advanced Engineering Informatics*, 38:811-825, 2018.
- [11] Christian Heipke, Hélène Mayer, Christian Wiedemann, and Olivier Jamet. Evaluation of automatic road extraction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(3 SECT 4W2):151-160, 1997.