



近接点の幾何学的性質を利用した 多角形状自由領域を有するポーズグラフ地図の構築

野々村 陸大^{*1} 田崎 勇一^{*1} 永野 光^{*2} 横小路 泰義^{*1}

Construction of a Pose-Graph Map Associated with Polygonal Free Space Based on a Geometric Property of Proximity Points

Rikuto Nonomura^{*1}, Yuichi Tazaki^{*1}, Hikaru Nagano^{*2} and Yasuyoshi Yokokohji^{*1}

In this paper, a novel pose-graph associated with polygonal free space information is proposed for use in mobile robots. Free space information is essential for autonomous mobile robots to navigate freely and safely in the environment. In a large-scale environment, existing map representations such as occupancy grid maps have problems of increasing in data size and computational cost. The proposed map representation is a pose-graph in which polygonal free space information is associated with its nodes, and it is constructed based on the geometric property of proximity points. By using this map, the free space information can be represented with less data, and moreover, interior points of the free space can be sampled with lower computational cost. In the experiment conducted in real indoor and outdoor environments, the free space obtained from the occupancy grid map and the proposed map are compared in terms of area size, data size, and computational cost.

Key Words: mobile robot, free space, proximity points, polygon map

1. 緒 言

少子高齢化に伴う労働人口の減少に伴い、人間の仕事やサービスを代替できる自律移動ロボットの需要が高まっている。ロボットが自律移動を行うためには、環境の地図を構築し、自己位置を推定する必要がある。この二つを同時に行う技術として SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) [1] 技術が研究されてきた。自律走行に用いる地図では、環境は占有領域 (Occupied space), 自由領域 (Free space), 未知領域 (Unknown space) に分けられる [2]。特にロボットが走行できる場所を表す自由領域の情報は、ナビゲーションや経路計画などのタスクを行うためにも地図に付随させることが求められる。一般的な環境地図として、環境を格子状に分解し、各格子が物体による占有度情報を持つ占有格子地図 [3] がある。占有格子地図では格子を細かくしていくことで環境を精緻に表現することができるが、二次元地図の場合はデータ量が分解能に対して二乗のオーダで増加するため地図の保存に大量のメモリを要するだけでなく、経路計画のような計算コストの大きいタスクを行う場合には計算遅延が生じる可能性がある。そのため、特に屋外のような広大で長時間の運用が求められる環境で占有格子地図を利用することは、特に計算資源の少ない小型のロボットにとっては難しく、自律移動のためには少ないデータで自由領域の情報を保持することが重要である。

屋外で占有格子地図を用いた研究 [4] [5] として、点群の距離と反射率の情報を半教師あり学習で用いて不整地での自由領域を把握した例 [4] や、二次元の占有格子地図を複数階層作成し物体の硬さや透明性を考慮した経路計画を行った例 [5] がある。しかし、各格子が複数の特徴量を持つ [4] ことや、局所的な経路計画でも GPU を必要とする [5] ことから、データ量や計算コストの増加が懸念される。

大規模環境を少ない情報量で表現する形式としてトポロジカル地図が知られている [6] [7]。トポロジカル地図は環境をグラフでモデル化しておりノードが物体や領域の位置を、エッジがノード同士の幾何学的なつながりを表す。トポロジカル地図のデータ量は環境の大きさには依存せず、経路計画などのタスクにおいて占有格子地図よりも計算コストが低いことが知られている。Choset らは一般化ボロノイグラフを用いて自己位置推定と経路計画の方法を提案した [6]。戸田らは Growing Neural Gas [8] を用いてノードが位置や地面の傾きなどの複数の情報を保持するグラフを構築し、未知環境での経路計画を行った [7]。ただし、トポロジカル地図では保持できる幾何情報を限界があるため、複雑な環境下での自律走行には不十分なことがある。

ポーズグラフ地図はトポロジカル地図と同様に環境をグラフ構造で表現するが、ノードがロボットの姿勢やランドマークの位置情報を、エッジがノード間の相対関係を表しており、トポロジカル地図にはない空間情報を保持できる。したがって、計算の効率性と空間的な精度が求められる SLAM では、ポーズグラフ地図に基づいた研究も行われている [9] [10]。ポーズグラフにカメラから得られる物体の分類情報を付加することでポーズグラフ最適化を行った例 [9] や、単眼カメラから得られる ORB 特徴量 [11] をノードに紐づけることでループ閉じ込み

^{*1}神戸大学大学院工学研究科

^{*2}京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科

^{*1}Kobe University, Graduate School of Engineering

^{*2}Kyoto Institute of Technology, Faculty of Fiber Science and Engineering

を実現した例 [10] があるものの、ポーズグラフと自由領域情報を明示的に関連付けた例は少ない。

他にも、ベクトルベースの地図が提案されている [12]～[14]。Dichtl らは PolyMap [15] と呼ばれる物体や自由領域を囲む多角形から成る地図を用いてナビゲーションを行った [12] ほか、Baizid らは物体を線分の集合として表現した VectorMap を構築した [13]。VectorMap はグラフ構造で保存されるため、グラフ理論に基づいたアルゴリズムを用いて他のタスクに応用できる特徴がある。さらに、Gao らは点群データから得られる物体の輪郭に沿った線分の端点を特徴点として、自由領域を囲うようなポリゴンマップを生成した [14]。しかし、このように周辺環境を多角形化する手法では、複雑な物体が多い環境では多角形の形も複雑化するため、多角形の精度悪化が懸念されるだけでなく、一般に自由領域の境界は非凸多角形として表現されるため、自由領域の内外を判定するには無視できない計算コストを要する。加えて、[7] [12] [13] では検証がシミュレーションのみに留まっているほか、[14] では単調な屋内空間でしか実験が行われていない。

本研究では屋外を含む実環境での長時間の自律走行に用いることを目標とし、多角形状の自由領域が各ノードに付随した新しいポーズグラフ地図の構築と評価を行う。この地図は特徴点の一種である近接点 [16] の幾何学的性質を用いて構築され、ロボットの走行軌跡であるポーズグラフのノードに自由領域情報が紐づいている。用いるポーズグラフは [16] で提案したもので観測点をノード、近接点をランドマークとしており、近接点を利用したループ閉じ込みやポーズグラフ最適化を行うことで観測点と近接点の絶対座標が得られる。本研究で提案する地図表現により自由領域情報を保持するためのデータ量が少なくてできるほか、個々の自由領域を凸多角形として表現するため、自由領域内の点を抽出する際の計算コストも低くできる。本研究の具体的な貢献は以下の通りである：

- ノードに凸多角形状の自由領域が付随するポーズグラフ地図の生成法を示す。
- 近接点の幾何学的性質にもとづき、任意の点が自由領域の内部にあるかを低い計算コストで判定する方法を導く。
- 屋内外の実環境データをもとに地図を生成する。
- 得られた自由領域の面積や地図のデータ量、計算コストについて生成した地図と占有格子地図を定量的に比較する。

なお、本論文では新しい地図の表現方法の提案と評価を行うことを目的としており、ポーズグラフの生成は [16] で示す方法を用いる。また、提案する地図を用いた経路計画やナビゲーション手法の具体的な検討は今後の課題とする。

2. 近接点の定義と幾何学的性質

2.1 近接点の定義

まず、本研究で用いる特徴点である近接点 [16] について説明する。ある観測点により得られる三次元点群を、三次元空間上の点 $\mathbf{r}_i = [r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}]^T$ の集合 $\mathcal{P} = \{\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N\}$ として表す。近接点は、ある局所範囲内の点群の中で観測点との距離が最小になる点である。三次元空間では、 $d(\mathbf{r}) = \|\mathbf{r}\|$ を点群内のある点と観測点の距離、 $\theta(\mathbf{r}) = \text{atan}2(r_y, r_x)$ を方位角、 $\phi(\mathbf{r}) = \text{atan}2(r_z, \sqrt{r_x^2 + r_y^2})$ を仰角とすると、次式を満たす点 r が近接点である。

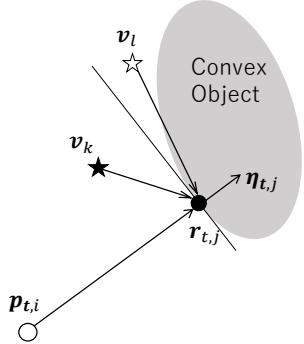


Fig. 1: Geometric property of proximity points

$$\mathbf{r} = \underset{\mathbf{r}' \in N(\mathbf{r})}{\operatorname{argmin}} d(\mathbf{r}')$$

$$\mathcal{N}(\mathbf{r}) = \{\mathbf{r}' \in \mathcal{P} \mid |\theta(\mathbf{r}') - \theta(\mathbf{r})| < \sigma_\theta, |\phi(\mathbf{r}') - \phi(\mathbf{r})| < \sigma_\phi\} \quad (1)$$

ここで、 $\mathcal{N}(\mathbf{r})$ は観測点から点 \mathbf{r} を結ぶ線分を中心として一定方位角 σ_θ 、一定仰角 σ_ϕ の範囲内にある点群の集合である。近接点を決定するときには、この角度範囲内の最近傍点を中心に再度同じ角度範囲内の最近傍点を求める処理を繰り返し最終的な最近傍点を近接点とするため、近接点は各凸物体上に一つずつ検出される。また、凹物体も凸物体の結合として扱うことができ、それらの凸物体上に一つずつ近接点が検出される。計算の際の角度閾値 $\sigma_\theta, \sigma_\phi$ は、経験的に調整されるパラメータであるが、本研究では先行研究 [16] での値と同じ $\sigma_\theta = 10$ [deg], $\sigma_\phi = 10$ [deg] を用いている。なお、実際の近接点検出の際にには微小な凹凸部分やノイズにより、長い壁のような物体上に複数の近接点が検出されることがある。このような現象は特に点群の密度に対して角度閾値が小さい場合に生じやすい。

以上のように、近接点はそれを検出した観測点に関連付けて定義される特徴点である。また、ある時刻 t における観測点 p_t から得られる近接点の集合 $\mathcal{R}_t = \{r_{t,1}, r_{t,2}, \dots, r_{t,i}\}$ はひとまとめに記録される。

2.2 近接点にもとづく自由領域の判定

次に、近接点の幾何学的性質について説明する。その定義から、近接点は観測点から見て周囲の点群より手前にある点であると言える。したがって、近接点における観測点と近接点を結ぶベクトルに垂直な直線、すなわち近接点における物体の接線より観測点側の領域には点群が検出される物体は存在しないため、その近接点にとっての自由領域であるといえる。

ここで、空間中のある点 v_k が、ある観測点 p_t から得られたひとつの近接点 $r_{t,j}$ における自由領域内か判定することを考える。つまり Fig. 1 のように観測点 p_t から近接点 $r_{t,j}$ が得られる場合、 v_k が近接点における物体の接線に対して観測点側にあるか否か考えることになる。ここで、近接点における物体の接線の法線を $\eta_{t,j} = (\mathbf{r}_{t,j} - \mathbf{p}_t) / \|\mathbf{r}_{t,j} - \mathbf{p}_t\|$ とし、 v_k から近接点へ向かうベクトル $\mathbf{r}_{t,j} - \mathbf{v}_k$ と $\eta_{t,j}$ の内積を計算する。 v_k が $r_{t,j}$ における接線に対し観測点 p_t 側にあるための必要十分条件は次のように表せる。

$$\eta_{t,j}^T (\mathbf{r}_{t,j} - \mathbf{v}_k) > 0 \quad (2)$$

Fig. 1 では v_k に対しては式 (2) が成立立つが、 v_l に対して

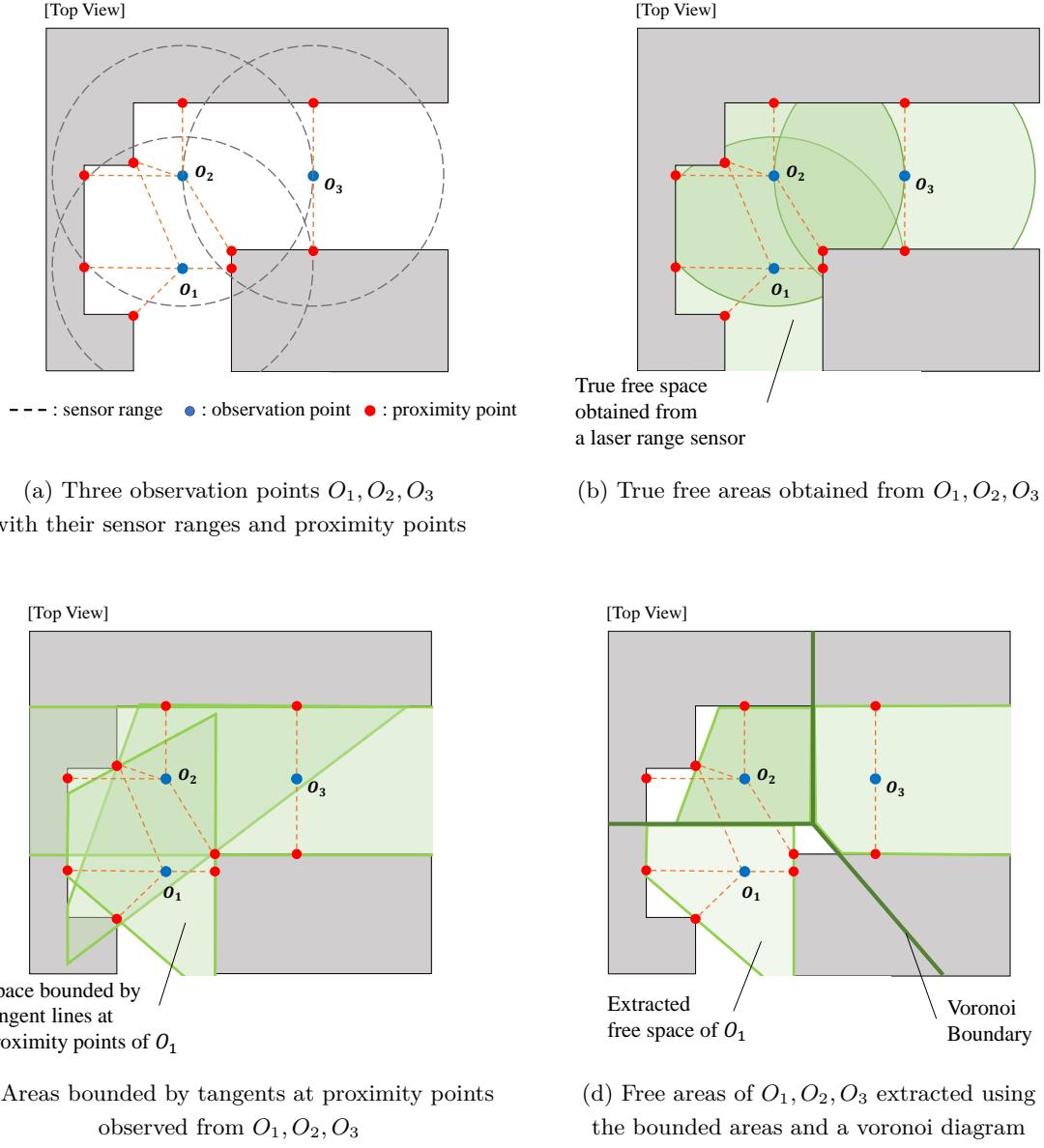


Fig. 2: Free areas obtained by using geometric properties of proximity points and voronoi diagram

は式 2 は成り立たないため, v_k は近接点 $r_{t,j}$ の自由領域内にあるが, v_l はないことが分かる。

通常, 一つの観測点からは複数の近接点が得られるため, その観測点における自由領域は各近接点における接線によって囲まれる領域となる。このときある点 v_k が自由領域内か判定するには, 観測点 p_i で得られる近接点 $\mathcal{R}_t = \{r_{t,1}, r_{t,2}, \dots, r_{t,i}\}$ に対し, 全ての $j \in \{1, \dots, i\}$ について式 (2) の条件を満たすか確認すればよい (式 (3))。

$$\eta_{t,j}^T (r_{t,j} - v_k) > 0, \forall j = 1, 2, \dots, i \quad (3)$$

3. 多角形状自由領域を有するポーズグラフ地図の構築

以下では提案する地図の形式を簡便に多角形地図 (Polygon map) と呼称する。多角形地図では, 前節で述べた近接点の幾何学的性質から得られる領域と, 観測点を母点としたボロノイセルの重なる領域を自由領域とし, それが各観測点に結びつく。

以下では, その理由について説明する。

上述のように観測点から複数の近接点が得られた場合, 各近接点における物体の接線によって囲まれる多角形領域は, その観測点における自由領域となるが, ロボットが移動する場合には観測点と近接点のデータは複数の時刻で記録される。

例えば, Fig. 2a のような三つの観測点 O_1, O_2, O_3 から近接点が得られる状況を考える。Fig. 2b は測域センサを用いて得られる真の自由領域を表している。特に屋外のような大規模環境では, Fig. 2a のようにセンサ範囲外にも物体が存在するほか, 複数の観測点が互いのセンサ範囲外に位置することになる。このとき, 各観測点で得られた近接点における物体の接線によって囲まれる領域は Fig. 2c のようになり, それぞれの観測点のセンサ範囲外にある物体も含まれてしまう。したがって, 自由領域として用いるためには, この領域を観測点の近傍領域で区切る必要がある。

ところで, 自由領域の情報を用いて経路計画を行う場合, 経路の候補となる点が自由領域内にあるか判定する必要がある。

多角形地図を用いる場合、環境中の全ての観測点における自由領域を参照するのではなく、その点に最も近い観測点だけについて参照することで計算コストを下げられるほか、Fig. 2c のように実際は物体が存在する場所を自由領域とすることはなくなる。このように空間上の複数の観測点に対して、ある点がどの観測点に最も近いかを考えることは、観測点を母点としたボロノイ図を考えることと等価である。ボロノイ図は、母点と呼ばれる空間上の複数の点に対し、どの母点に最も近いかという関係で平面を分割した図であり、分割する境界をボロノイ境界、分割された各領域をボロノイセルと呼ぶ。

以上の理由から、多角形地図における自由領域は、各観測点の近接点から得られる領域とそのボロノイセルの重なる領域となる。Fig. 2d は Fig. 2a の例における多角形地図の自由領域を表している。なお、開けた領域内でボロノイ図を作成すると端にあるボロノイセルが閉じずに無限に広がるため、本研究では近接点の存在範囲を限界とした有限範囲内でボロノイ図を作成する。

経路計画を行うとき、経路の候補となる点が自由領域か判定する場合、多角形地図ではある点が自由領域内にあるかを判定するためにその点の最近傍の観測点とその近接点の情報のみを用いる。このとき、最近傍の観測点を選ぶことはボロノイセルを考えることに等しいため、明示的にボロノイ境界を計算する必要はない。また、近接点の幾何学的性質から得られる領域内にある点があるかを判定するためには、前節で述べた内積計算をするだけでよいため、この領域も明示的に保持する必要ない。つまり、実際の多角形地図では Fig. 2d に示したような凸多角形状の自由領域情報を明示的に保持するのではなく、観測点と近接点の結びつき、およびそれぞれの座標情報のみで自由領域情報を暗示的に保持できる。

以上のように、多角形地図では保持すべき情報量を少なくすることができ、自由領域内の点を用いたタスクにおいて計算コストを下げられるだけでなく、ループ閉じ込みやポーズグラフ最適化は必要であるものの計測データを記録するだけで自由領域情報を保持した地図を構築できるという利点がある。本研究で提案する地図は Fig. 3 のようにノードに凸多角形状の自由領域が付随するポーズグラフ地図であるが、自由領域の境界といった領域情報を明示的に保持する必要はない。

4. 実測データを用いた地図生成とその評価

多角形地図の有効性を示すため、屋内の単一観測点、屋外の単一、複数観測点において計測したデータを用いて占有格子地図との比較を行う。なお、単一の観測点でのデータではボロノイ図の母点は一つしかないと、多角形地図の自由領域は近接点における物体の接線によって囲まれる領域そのものとなる。比較項目は、得られる自由領域の面積と形状、自由領域を得るために必要な計算時間、地図のデータ量である。

自由領域の形状比較では、ハウドルフ距離 (Hausdorff distance) を用いる。ハウドルフ距離は二つの集合間の距離を表す指標であり、二つの集合 $A = \{a_1, \dots, a_p\}$, $B = \{b_1, \dots, b_q\}$ に対し、次のように定義される [17]。

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)). \quad (4)$$

ただし、

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|. \quad (5)$$

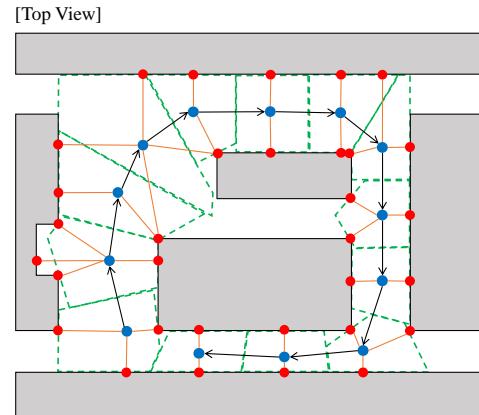


Fig. 3: Proposed pose-graph map implicitly holds polygonal free spaces

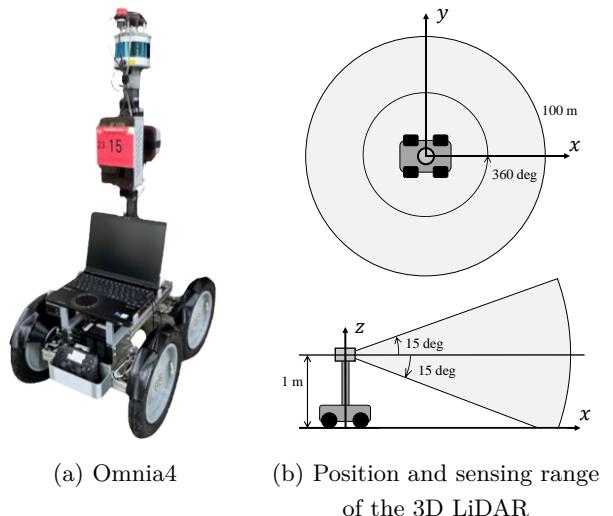


Fig. 4: Mobile robot used for measurement

つまり、ハウドルフ距離は二つの集合の要素同士の最短距離のうち最大の値であり、値が小さいほど集合が類似していることを示す。本研究では占有格子地図と多角形地図の自由領域のハウドルフ距離を計算することで、自由領域の形状の違いを定量的に評価する。

計算時間については、占有格子地図の各セルの占有度を参照する時間と、多角形地図において占有格子地図のセルと同じ間隔で生成した格子点が自由領域内にあるか判定する時間とを比較する。この際、生成した格子（点）全体に対する計算時間を比較対象とする。また、地図のデータ量は自由領域を表現するために保持しなくてはならない情報量と考え、占有格子地図の点群の数と多角形地図の近接点の数とを比較する。なお、多角形地図では自由領域を明示的に保持しなくてよいが、ここでは実際に保持している自由領域を視覚的に示すため、緑色の枠線で表される多角形の内部を自由領域として描画している。

データ計測には Fig. 4a の移動ロボット Omnia4 を用いる。Omnia4 に搭載されている 3D LiDAR は Velodyne VLP-16

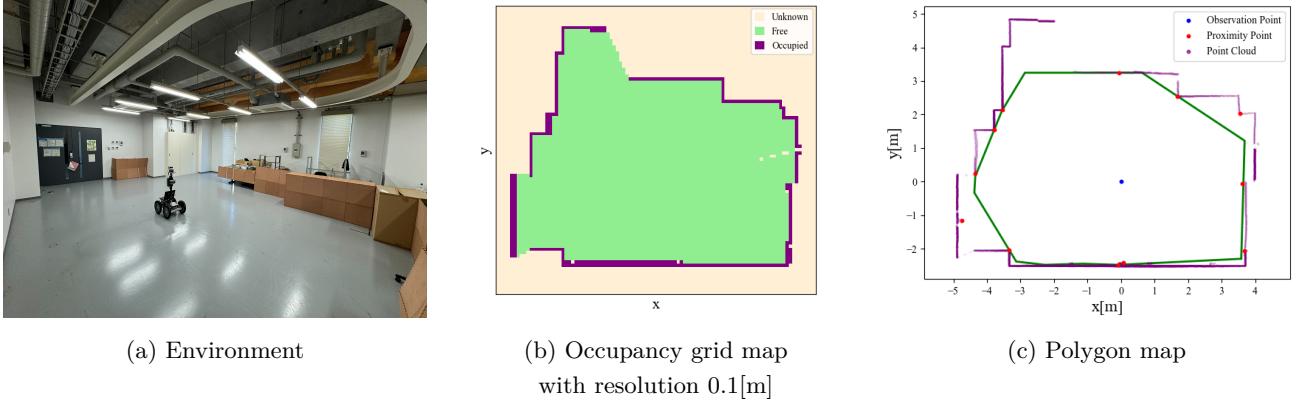


Fig. 5: Experimental setup and constructed maps in the indoor environment

Table 1: Comparison of occupancy grid map and polygon map with single observed data in indoor environment

Method	Freearea		Calculation time [s]	Number of points to hold
	Size [m ²]	H[m]		
Occupancy grid map	46.16	1.53	0.21	26284
Polygon map	38.88	—	1.90	12

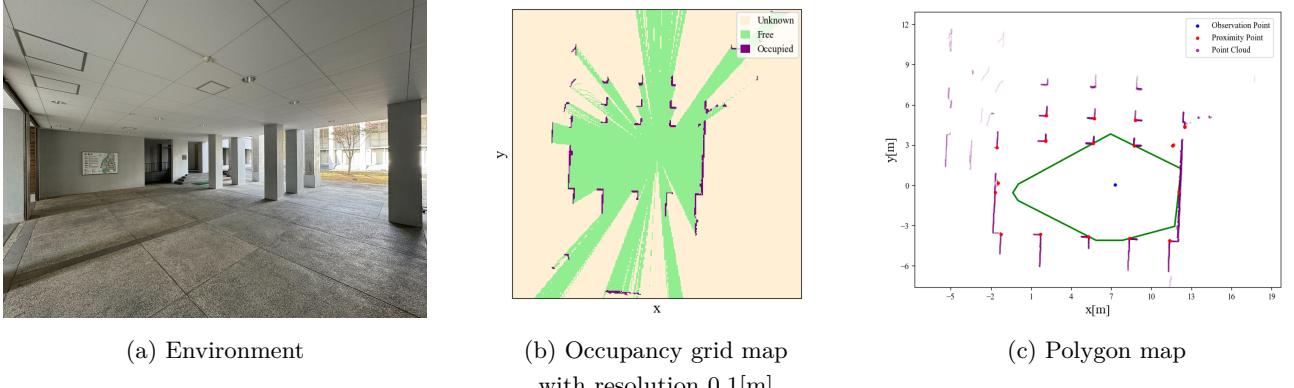


Fig. 6: Experimental setup and constructed maps with single observed data in the outdoor environment

Table 2: Comparison of occupancy grid map and polygon map with single observed data in the outdoor environment

Method	Freearea		Calculation time [s]	Number of points to hold
	Size [m ²]	H[m]		
Occupancy grid map	244.2	28.0	0.20	23292
Polygon map	70.66	—	2.72	25

LITE であり, Fig. 4b に設置位置と計測範囲に示す. 最大距離 100[m], 水平方向 360°, 垂直方向 ±15° の視野で毎計測約 60 万点の点群を記録できる. Omnia4 では毎秒 2 回の計測を行い, 点群と近接点を同時に保存することができる. データ計測後, 比較の前には地面点群の除去やノイズの除去を行っており, 地面点群の検出には CSF (Cloth Simulation Filter) [18], ノイズの除去には SOR (Statistical Outlier Removal) filter [19] を用いる. また, 点群や近接点は三次元座標が記録されるが, 本稿では二次元の多角形地図を作成するため, 全ての点において鉛直方向の座標を 0 として扱う. なお, 地図の構築や比較では 12th Gen Intel Core i5-12400 2.50 GHz, RAM 16GB の PC を用いる.

4.1 実験 1：屋内の単一観測点での比較

まず, Fig. 5a に示すような屋内環境で実験を行う. 単調な環境を用意するために複雑な形状の物体を覆うように簡易的な壁

を設置し, 単一の観測点で点群データを計測する. なお, 設置した壁より奥に計測された点群データはあらかじめ除去した.

Fig. 5b, 5c に構築した占有格子地図と多角形地図を示す. 占有格子地図は観測点を中心に 15[m] 四方の範囲で一辺 0.1[m] のセルを用いて作成した. 占有格子地図では緑色のセル, 多角形地図では緑色の枠線で表される多角形の内部が自由領域である. さらに, 各地図における自由領域の面積, 計算時間, 地図のデータ量を比較した結果を Table 1 に示す. Table 1 から多角形地図の自由領域は占有格子地図の自由領域の 84% 程度であり, Fig. 5b, Fig. 5c の左上の凹んだ場所において多角形地図の自由領域は保守的に検出されていることが分かる. これはハウスマルフ距離にも現れているものの, 下のまっすぐな壁の部分などの単調な部分では大差なく自由領域を検出できている.

また, 自由領域の表現に必要な点の数は約 1/2000 になっている. Omnia4 では点群や近接点を CSV で保存しているが,

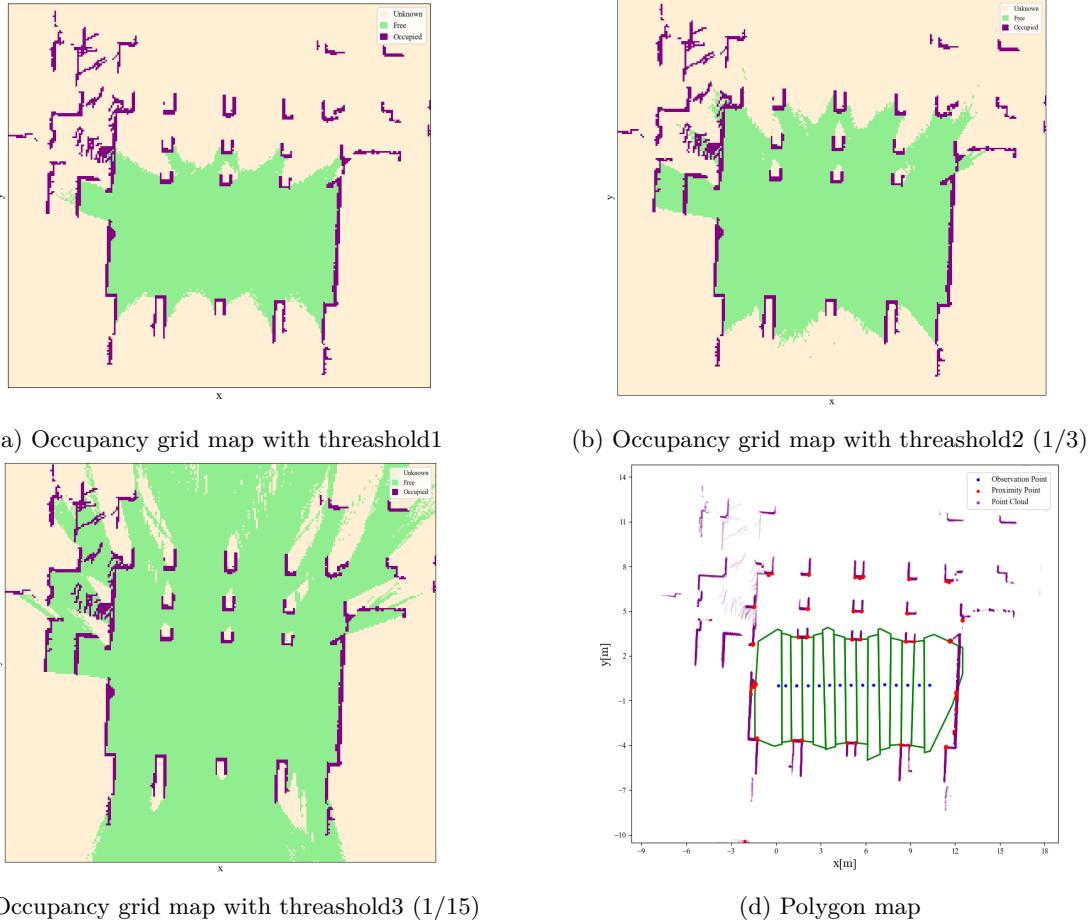


Fig. 7: Constructed maps with multiple observed data in the outdoor environment
(All of the occupancy grid maps are with resolution 0.1[m])

Table 3: Comparison of occupancy grid map and polygon map with multiple observed data in the outdoor environment

Method	Freearea		Calculation time [s]	Number of points to hold
	Size [m ²]	H[m]		
Occupancy grid map	Threshhold1	117.8	3.64	8.94×10^5
	Threshhold2 (1/3)	165.8	6.19	
	Threshhold3 (1/15)	244.2	27.7	
Polygon map	70.66	—	5.56	25

この実験環境での点群と近接点の CSV ファイルのサイズはそれぞれ約 880[KB], 約 0.5[KB] である。このように単調な環境であれば占有格子地図のデータ量であっても問題にならない程度であるものの、多角形地図を用いることでデータ量を大きく削減できていることが分かる。

4.2 実験 2：屋外の単一観測点での比較

次に、Fig. 6a に示す、神戸大学工学研究科棟付近の周囲に壁や柱、階段などがあるような環境で実験を行う。計測した場所には屋根があるものの付近に広場や道路があり、遠くまで見通せる屋外環境となっている。構築した占有格子地図と多角形地図を Fig. 6b, Fig. 6c に示す。占有格子地図は観測点を中心と 30[m] 四方の範囲で一辺 0.1[m] のセルを用いて作成した。さらに、自由領域の面積、計算時間、地図のデータ量を比較した結果を Table 2 に示す。

Table 2 から多角形地図の自由領域は占有格子地図の自由領域の約 30% であり、実験 1 の屋内環境と比べて多角形地図で

の自由領域はとても小さくなっていることが分かる。Fig. 6 を見ると、多角形地図では柱の間などで実験 1 の凹んだ部分のように保守的な検出がされているほか、Fig. 6c では観測点の上下に三つずつある柱のうち、一番左の柱に検出される近接点における接線により、手前側の近接点における接線により多角形が閉じてしまうため、左側の壁付近では自由領域が検出されていない。このように周囲に物体が多い広大な環境では、単一観測点での多角形地図は自由領域を広く取れないことがわかる。この傾向はハウスドルフ距離でも示されており、実験 1 の値よりも形状近似精度が大きく悪化していることが分かる。データ量については実験 1 と同様に、多角形地図を用いることで大きく削減できている。

4.3 実験 3：屋外の複数観測点での比較

次に、実験 2 と同じ屋外環境 (Fig. 6a) で計測したデータを用いて比較実験を行う。屋外のような大規模環境では、自律移動のためのデータ収集のために複数の位置にある観測点から

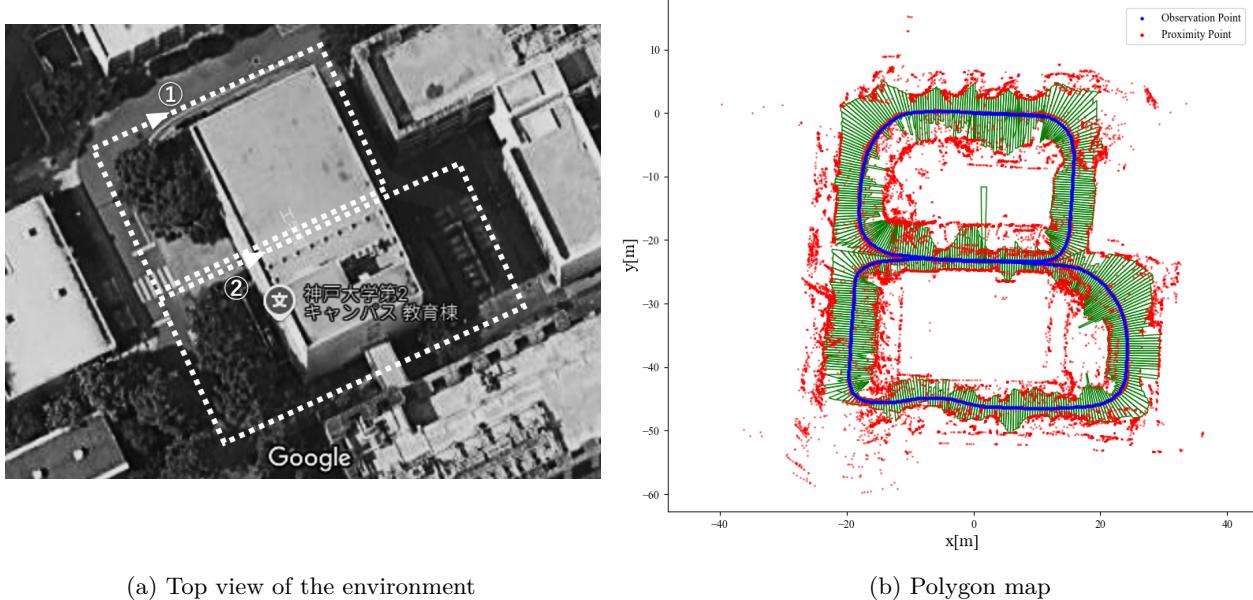


Fig. 8: Experimental setup and constructed maps in the large-scale outdoor environment at Kobe University

得られたデータを用いることが一般的である。そのような状況を想定し、Fig. 6a の奥の壁から手前に向かって Omnia4 を手動操作で走行させ、14箇所の観測点から得られたデータを用いて占有格子地図と多角形地図を構築する。構築した占有格子地図と多角形地図を Fig. 7 に、比較の結果を Table 3 に示す。占有格子地図では、自由セルと判定するための閾値を3段階用意し、Fig. 7a に示す占有格子地図を基準に、閾値を $1/3$ にした Fig. 7b と $1/15$ にした Fig. 7c を作成した。

Table 3 から多角形地図の自由領域は Fig. 7a の占有格子地図の自由領域の約 82%、Fig. 7b の約 43%、Fig. 7c の約 29% である。実験 2 の多角形地図と比較すると、複数の観測データを用いることで実験 2 と比べて多角形地図での自由領域は広く取れる傾向にあることが分かる。ハウスドルフ距離は閾値が小さい占有格子地図 (Fig. 7c) では実験 2 と同程度まで大きくなっている。特に観測点が存在しない柱の間において多角形地図による自由領域の近似精度は悪化していることが分かる。計算時間については、実験 1、2 と比べて計算時間の差が大きくなっている。実験 3 では実験 2 と同様に参照する近接点が多いだけでなく、最近傍の観測点を選ぶ操作が毎回行われるため、多角形地図の計算時間がより増加している。

また、データ量の削減の効果は非常に大きいことが分かる。この実験でのデータ計測時間は 15 秒程度であるが、占有格子地図のための点群データの CSV が約 12[MB] であるのに対し、多角形地図に必要な近接点の CSV は約 9[KB] である。

以上から、観測点が存在しない入り組んだ場所においては多角形地図の近似精度は良くないものの、複数の観測点を用いることで開けた環境においては自由領域を広く検出できるほか、データ量の観点で大きな優位性があることが分かる。

4.4 実験 4：分岐を含む屋外環境での多角形地図構築

次に、神戸大学工学研究科教育棟周辺で Fig. 8a に示す二つのルートを走行し、計測したデータを用いて多角形地図を構築した (Fig. 8b)。これらのルートではキャンパス内の道路や建物の下の通路を通り、教育棟の南北でそれぞれ約 50[m] × 20[m]

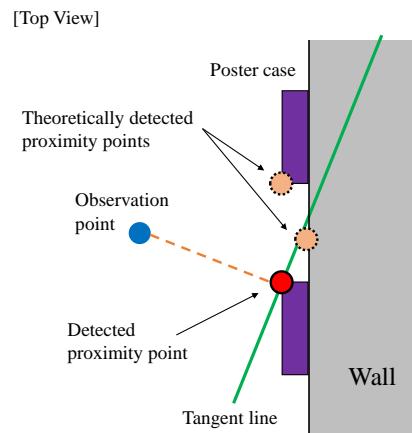


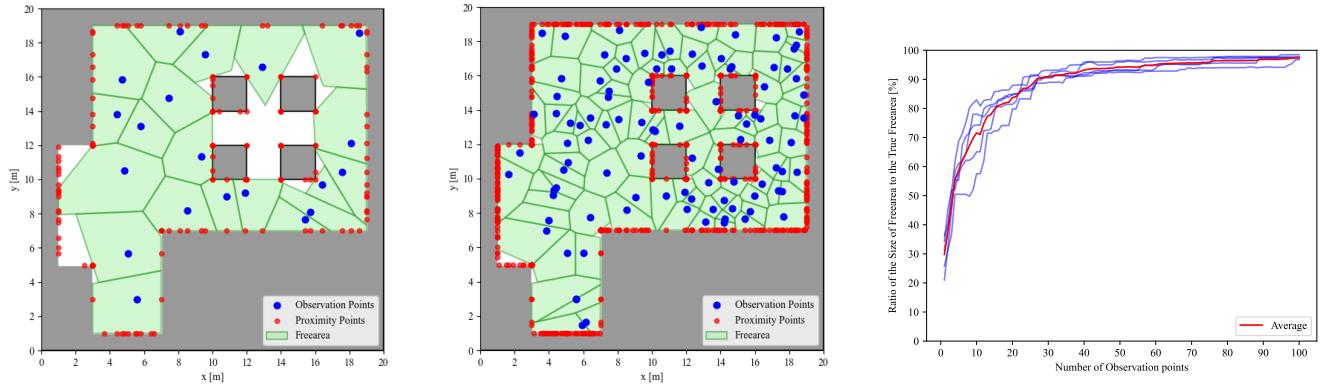
Fig. 9: Proximity points on the wall and the poster cases

四方を走行している。付近には建物やベンチ、植木などが存在し、歩行者や自転車が通行することがある。多角形地図の構築前には近接点を用いたループ閉じ込みとポーズグラフ最適化 [16] を行っている。

今回の計測は各ルート 5 分程度の走行を行ったが、このような広大な環境であっても記録される近接点のデータは 600[KB] 以下であり、多角形地図の優位性は失われない。

5. 課題と今後の展望

4.3 節の実験において、Fig. 7d では最も右にある観測点の自由領域が壁の外側にはみ出ている。右側の壁にはポスタークースが設置されており、壁は一様ではなく凹物体の集合のような形状をしている。今回の計測では、Fig. 9 のように一部のポスタークースにだけ近接点が検出されたため、自由領域を表す多角形が壁の手前側で閉じることなく外側にはみ出てしまつた。近接点を利用して環境を表現するための情報量を少なくできるものの、今回のように正しい位置に近接点が検出さ



(a) Polygon map with 20 observation points

(b) Polygon map with 100 observation points

(c) Ratio of the size of freearea with different number of observation points

Fig. 10: Experimental setup and results with different number of observation points

れない場合に自由領域を正確に表現できなくなってしまう問題がある。しかし、観測点をさらに増やすことや近接点取得の際のパラメータ調整などで対応可能な問題であり、Fig. 9 の結果で自由領域がはみ出している部分も大きくはないため、4.3 節の実験では Fig. 7b の多角形地図を用いている。

また、多角形地図には Fig. 5c の左上部分、Fig. 7d の柱の間や奥を自由領域として検出できない問題がある。これに対し、近接点の周囲の点群も用いて自由領域を検出する方法が考えられるが、近接点周囲の点は様々に分布しており、様々な環境で一貫して適用することは困難である。他にも、ボロノイセルではなく N 近傍の観測点とその近接点を論理和的に参照する方法も考えられるが、近接点の検出精度は観測点から離れるほど低下するほか、ノイズへの敏捷性の観点から適用は現実的ではない。本研究の多角形地図では、ボロノイセルの内側にない限りノイズの影響はほとんど受けないほか、手法の単純さも考慮すると、自由領域を増加させるには観測点を増やすことが最も有効な対策であると考えられる。

実験 4 で構築した多角形地図 (Fig. 8b) では、計測の際に地面に出現する近接点は除去されているが、動物体上の近接点は除去されておらず、一部の近接点が自由領域に含まれている。特に、計測時に操作者はロボットの 10[m] 程度後方を追従しており、観測点の軌跡に沿った近接点が記録された。操作者上の近接点は、それを検出した観測点のボロノイセルに含まれないが、別の観測点におけるボロノイセルには含まれている。したがって、別の観測点における自由領域内に操作者上の近接点が含まれており、近接点検出の段階で動物体上に生じる近接点の除去は今後の課題である。また、実験 3 と同様に一部の近接点が正しく検出されずに自由領域が正しく表現されていない部分も存在する。したがって、自律走行や経路計画に用いる際には近接点検出の精度を高めたり、観測点を増やしたりする工夫が必要である。また、Fig. 8b の左下部分では自由領域が非常に狭く検出されているが、この場所は地面が傾いており、斜面上に検出される近接点が除去されていないため、自由領域が本来よりも保守的に検出されている。斜面や不整地における地面上の近接点の扱いも今後の課題である。

実験では、特に凹型の壁や柱に挟まれた場所において、多角形地図が占有格子地図と比べて自由領域を保守的に検出することが多いことが分かった。そこで、多角形地図が環境の自由領域を正確に表現するにはどの程度の観測点が必要かをシミュ

レーションをもとに考察する。20m 四方の中に直線的な壁や凹んだ壁、四角い柱があるような環境においてランダムに生成した観測点と、それに対応する近接点を用いて多角形地図を構築する。観測点の数は 1 個から 100 個まで増やしていく、得られる自由領域の面積を真の自由領域と比較する。シミュレーションの様子と結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10c は真の自由領域に対する面積比を示しており、青線が計 5 回行ったシミュレーションで得られた面積比、赤線はその平均値を表している。所々、面積が増加しなかったり減少したりする箇所があるが、これは新たに生成された観測点とのボロノイ境界により自由領域が狭められたためである。この結果から、柱の間などの入り組んだ場所を含めて自由領域を被覆するには多くの観測点が必要なことは課題であるが、被覆面積は指数関数的に増加するため少數の観測点でも大部分の自由領域を得ることができることが分かる。

本稿ではここまで、多角形地図の構築方法とその有効性について述べてきた。実際のロボットで多角形地図を用いた自律移動を行う場合は経路計画が必要となる。経路計画には様々な手法が存在するが、二次元的な地図を用いて行う場合には自由領域内の点を結ぶ経路を求めることが一般的である。先述の通り、多角形地図では自由領域の内点を得るために最近傍の観測点での情報を用いるだけよい。また、占有格子地図のように環境を区切ることなく、領域情報をそのまま保持できていることも提案した多角形地図を用いる大きな利点であり、自由領域上に経路となるグラフを生成するなど、様々な経路計画手法に対して応用の幅も広いと考えられる。多角形地図上で経路計画を行う上では、隣接するボロノイセル間を結ぶことで自由領域内を通る経路を計画することもできると考えられる。4.4 節の実験におけるデータ計測走行経路①と② (Fig. 8a) のそれぞれに属するノードのボロノイセルが通路の分岐点において接しており、これを利用することで計測時の走行経路とは異なる経路を計画できる可能性が示されている。実験 1,2,3 では、多角形地図における自由領域の内点判定の時間が占有格子の自由セルを参照する時間よりも長くなっていた。しかし、経路計画においては占有格子地図を用いた経路計画よりも参照する点の数が少なくなり、結果的に計算時間が短縮されることが考えられる。例えば、占有格子地図では現在位置のセルから目的地のセルまで連続するセルすべての占有度判定を行う必要がある一方、多角形地図ではボロノイセルや近接点の幾何学的性質を用

いることで、現在位置と目的地を結ぶ線分上を自由領域とすることができる可能性がある。多角形地図の特性を活かした経路計画は今後の研究課題である。

また、特に屋外環境のような物体が移動し、環境が変化しやすい場合には、自律移動に用いる地図を更新することが求められる。多角形地図は観測点と近接点の結びつき、およびその座標情報のみで自由領域情報を表現しており、自由領域内の点を得るためにには最近傍の観測点とその近接点の情報だけを参照するだけでよい。したがって、新たな観測点でのデータを得ることは観測点を母点とするボロノイ図と近接点における接線によって囲まれる領域の重なる領域である自由領域が得られるに等しい。ループ閉じ込みやポーズグラフ最適化による観測誤差の修正は必要だが、新たな観測を記録するだけで多角形地図は更新できると考えられる。

他にも、本研究では二次元的な多角形地図を構築したが、三次元点群を用いて三次元の多角形地図を構築することも可能である。その際は、近接点における物体の接線ではなく接平面を考えることになるが、基本的な考え方は二次元と同様である。三次元でのデータは二次元のデータよりも多くの情報を持つため計算コストが大きくなる懸念はあるが、二次元で占有格子地図と比べてデータ量を大幅に削減で来ていたため、三次元ではボクセルマップを用いる場合よりも多角形地図の方が有用であることが予想される。ただし、地面の傾きや凹凸により自由領域が必要以上に狭められる可能性があるため、地面の近接点は壁などの物体の近接点とは異なる取り扱いを考える必要がある。

6. 結 言

本研究では、点群の特徴点の一種である近接点の幾何学的性質をもとに、多角形地図という新しい地図表現手法を提案した。多角形地図は観測点と近接点の情報のみで自由領域情報を暗示的に保持しており、入り組んだ環境での自由領域の表現に課題は残るもの、開けた場所では複数の観測データを用いることで有効性を高めることができることを示した。また、多角形地図は特にデータ量の観点で占有格子地図と比較して有効性が高く、経路計画や三次元地図への拡張においても有用であると考えられる。今後は多角形地図を用いた経路計画や地図の更新を行い、実環境での SLAM と自律移動の実現を目指す。

参 考 文 献

- [1] C.Cadena, L.Carbone, H.Carrillo, Y.Latif, D.Scaramuzza, J.Neira, I.Reid and J.J.Leonard: "Past, Present, and Future of Simultaneous Localization And Mapping: Towards the Robust-Perception Age," IEEE Transactions on Robotics, vol. 32, no. 6, pp. 1309-1332, 2016.
- [2] A.Hornung, K.M.Wurm, M.Bennewitz and C.Stachniss: "OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees," Autonomous Robots, vol. 34, no. 3, pp. 189-206, 2013.
- [3] H.Moravec and A.Elfes: "High resolution maps from wide angle sonar," IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 116-121, 1985.
- [4] B.Sugerman, B.Steder and W.Burgard: "Traversability analysis for mobile robots in outdoor environments: A semi-supervised learning approach based on 3D-lidar data," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, WA, USA, pp. 3941-3946, 2015.
- [5] A.J.Sathyamoorthy, K.Weerakoon, M.Elnoor, M.Russell, J.Pusey, D.Manocha: "MIM: Indoor and outdoor navigation in complex environments using multi-layer intensity maps," 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Yokohama, Japan, pp. 10917-10924, 2024.

- [6] H.Choset, K.Nagatani: "Topological simultaneous localization and mapping (SLAM): toward exact localization without explicit localization," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 17, no. 2, pp. 125-137, 2001.
- [7] Y.Toda, K.Ozasa, T.Matsuno: "Growing neural gas based navigation system in unknown terrain environment for an autonomous mobile robot," Artificial Life and Robotics, vol. 28, no. 1, pp. 76-88, 2023.
- [8] B.Fritzke: "A growing neural gas network learns topologies," Advances in neural information processing systems, vol. 7, 1994.
- [9] S.L.Bowman, N.Aтанасов, K.Daniilidis, G.J.Pappas: "Probabilistic data association for semantic SLAM," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1722-1729, 2017.
- [10] R.Mur-Artal, J.M.Montiel, J.D.Tardos: "ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system," IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 5, pp. 1147-1163, 2015.
- [11] E.Rublee, V.Rabaud, K.Konolige, G.Bradski: "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF," 2011 International Conference on Computer Vision, pp. 2564-2571, 2011.
- [12] J.Dichtl, X.S.Le, G.Lozenguez, L.Fabresse, N.Bouraqadi: "Robot navigation with polymap, a polygon-based map format," Intelligent Systems and Applications: Proceedings of the 2019 Intelligent Systems Conference (IntelliSys), vol. 2, pp. 1138-1152, 2020.
- [13] K.Baizid, G.Lozenguez, L.Fabresse, N.Bouraqadi: "Vector maps: A lightweight and accurate map format for multi-robot systems," International Conference on Intelligent Robotics and Applications, pp. 418-429, 2016.
- [14] H.Gao, X.Zhang, J.Wen, J.Yuan, Y.Fang: "Autonomous Indoor Exploration Via Polygon Map Construction and Graph-Based SLAM Using Directional Endpoint Features," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 16, no. 4, pp. 1531-1542, 2018.
- [15] J.Dichtl, L.Fabresse, G.Lozenguez, N.Bouraqadi: "Polymap: A 2d polygon-based map format for multi-robot autonomous indoor localization and mapping," Intelligent Robotics and Applications: 11th International Conference, Newcastle, NSW, Australia, pp. 120-131, 2018.
- [16] Y.Tazaki, K.Wada, H.Nagano, Y.Yokokohji: "Robust Pose-graph Optimization Using Proximity Points," Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 35, no. 6, pp. 1480-1488, 2023.
- [17] D.P.Huttenlocher, G.A.Klanderman, W.J.Rucklidge: "Comparing images using the Hausdorff distance," IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence vol.15, no.9, pp. 850-863, 1993.
- [18] W.Zhang, J.Qi, P.Wan, H.Wang, D.Xie, X.Wang, G.Yan: "An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation," Remote Sensing, vol. 8, no. 6, pp. 501, 2016.
- [19] R.B.Rusu, S.Cousins: "3D is here: Point cloud library (PCL)," 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1-4, 2011.

野々村 陸大 (Nonomura Rikuto)

2024 年神戸大学工学部機械工学科卒業。現在、神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程前期課程在学中。自律移動ロボットの地図生成とナビゲーションに関する研究に従事。日本ロボット学会、IEEE 学生会員。（日本ロボット学会学生会員）

田崎 勇一 (Tazaki Yuichi)

2008 年東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻博士課程修了。工学博士。2007 年～2009 年、日本学術振興会特別研究员。2008 年、Honda Research Institute Europe (Germany) 客員研究員。2009 年～2016 年、名古屋大学大学院工学研究科助教。2016 年～、神戸大学大学院工学研究科准教授、現在に至る。人型ロボットの運動計画と制御、自律移動ロボットの地図生成とナビゲーションに関する研究に従事。計測自動制御学会、

日本ロボット学会, IEEE 会員. (日本ロボット学会正会員)

永野 光 (Nagano Hikaru)

2015 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了. 博士 (工学). 東北大学大学院情報科学研究所特任助教, 神戸大学大学院工学研究科助教等を経て, 2024 年京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究所准教授となり, 現在に至る. 触覚知覚メカニズムに基づくインターフェースの研究開発に従事. IEEE, 日本ロボット学会, 日本機械学会等の会員. (日本ロボット学会正会員)

横小路 泰義

1988 年京都大学大学院博士課程中途退学. 同年に京都大学工学部オートメーション研究施設助手. 1992 年機械工学教室助教授, 2007 年機械理工学専攻准教授を経て 2009 年より神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻教授. 博士 (工学). 遠隔操作システム, ハaptic インターフェース, ロボットハンド等の研究に従事. 計測自動制御学会および日本機械学会のフェロー. システム制御情報学会, 日本バーチャルリアリティ学会, IEEE などの会員. (日本ロボット学会正会員・フェロー)