

移動ロボットの障害となる段差・くぼみを記録した地図の生成と経路計画

○構 勇海 (筑波大学), 萬 礼応 (筑波大学), 大矢 晃久 (筑波大学)

Generation of map that containing step, dent information that hinder mobile robots and route planning using the map

○Isami KAMAE (Univ. of Tsukuba), Ayanori YOROZU (Univ. of Tsukuba), and Akihisa OHYA (Univ. of Tsukuba)

Abstract : In autonomous navigation of mobile robots, it is difficult to detect and avoid small steps and dents, which is one of the causes of failure. Therefore, by traveling in the traversable area in advance and creating a “step map” that holds information on the steps and dents, a route plan that takes the steps and dents into consideration is performed. In this report, we propose the format of a “step map” and its construction method.

1. 緒言

近年、宅配ロボット [1] や道案内ロボット [2] など、人が生活する屋外実環境で活動する自律移動ロボットの需要が高まっており、屋外環境での確実な自律移動を実現する技術が求められている。ロボットが走行する歩道や施設敷地内には、Fig.1. のような高さ数 cm ほどの小さな段差やくぼみが多く存在する。屋外環境における自律移動の課題として、一般的な障害物検出ではこれらの小さな段差やくぼみの検出が困難であることがあげられる。自律移動ロボットは測域センサやステレオカメラ等の外界センサを用いて障害物検出を行うが、これらの外界センサはロボットの前方や周囲の環境認識を行うことを目的としているため、地面に対して水平に取り付けられることが多い。このため、建物の壁面や周囲の歩行者など、高さのある障害物の検出は容易だが、地面から数 cm 程度の低い位置にある障害物、つまり、小さい段差やくぼみの検出は困難である。屋外実環境における自律移動の技術チャレンジ「つくばチャレンジ」においても、ロボットが段差やくぼみを検出できず、そのまま衝突して走行不能に陥る事態が発生している。このことから、屋外環境において確実な自律走行を行うためには、それらの段差やくぼみを検出し回避する必要があるといえる。

そこで本研究では、高さ数 cm 程度の小さな段差やくぼみの位置や高さを記録した「段差地図」を作成し、段差地図を用いた「段差・くぼみを考慮した経路計画」を行うことで、自律移動ロボットが段差やくぼみにスタックすることを防ぐ。

センサを用いて段差やくぼみを走行時に計測しそれらを回避する経路計画を行うことで、計測範囲内にある段差・くぼみへのスタックを防ぐことは可能であるが、センサの計測範囲には限りがあるため、計測範囲外の段差やくぼみを回避する経路計画を行うことは不可能である。そこで、

走行エリアを事前に走行して段差やくぼみの位置と高さを記録した「段差地図」を作成する。一般に、段差やくぼみが頻繁に変化することはないと考えられるため、段差地図を用いることで自律移動時に走行エリアの段差やくぼみの位置や高さをあらかじめ把握でき、段差やくぼみを考慮した最適な経路計画が可能となる。走行時の計測範囲内の段差のみを用いた経路計画のイメージ図を Fig.1., 段差地図を用いた段差・くぼみを考慮した経路計画のイメージ図を Fig.1. に示す。Fig.1. では、検出した段差を回避しつつ目的地までの最短経路の計画を行っている。その結果、下の通路を進もうとするが、センサの計測範囲外に段差があったため来た道を戻らなくてはならず、最適な経路とは言えない。Fig.1. は、段差地図を用いた段差やくぼみを考慮した経路計画を表しており、計測範囲外の段差を事前に把握しているため、全ての段差を回避しつつ目的地までの最短経路を計画することが可能となる。

本研究では、段差地図を用いて段差やくぼみを考慮した経路計画を行い、ロボットが屋外自律移動時に段差やくぼみにスタックすることを防ぐことを目的とする。本稿では、まず第一に走行エリアの段差やくぼみの位置と高さを事前に記録して作成する「段差地図」が持つべき情報とその保存形式について検討する。次に、センサデータから段差地図を構築する方法を提案する。そして、実際の屋外環境で段差地図を作成する実験を行い、段差を検出した結果について報告する。

2. 関連研究

2次元測域センサを用いた段差検出の試みとして、保坂らのロボット前方に取り付けた2次元測域センサを上下に姿勢を変化させて段差を検出する手法 [3] や、奥村らの2次元測域センサを水平面から40°傾斜させて取り付けて段差を検出する手法 [4] があげられる。また、3次元測域セン



Fig. 1: 歩道の段差・くぼみ

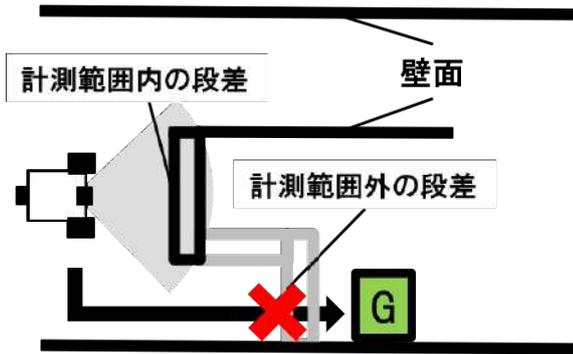


Fig. 2: 走行時に計測範囲内の段差のみを用いた経路計画

サを用いた段差検出の試みとして、平岡らの走行しながら平面走行時の3次元距離データとの差分を計算して段差を検出する手法 [5] や、藤岡らのデータ取得順に隣り合う点群データの高さの差分が閾値を超える場合に段差と判別する手法 [7], 秋本らのデータ取得順に隣り合う点群のベクトルから平面に対する傾き成分を求め、これが閾値を超えた場合段差と判別しそれらを回避する手法 [7] があげられる。しかしこれらの手法においては、屋外実環境で多く見られる5cm以下の小さい段差やくぼみの検出には成功していない。

本研究では、段差地図を用いて段差・くぼみ情報を蓄積することによって、5cm以下の小さい段差やくぼみの検出を計画している。また、これらの手法では、計測された段差を回避する(局所的な)経路計画は行われているものの、センサの計測範囲外にある段差を回避する経路計画は行われていない。本研究では、段差やくぼみの位置と高さを記録した「段差地図」を作成することで、センサの計測範囲外にある段差やくぼみを回避する(大域的な)経路計画を行う。

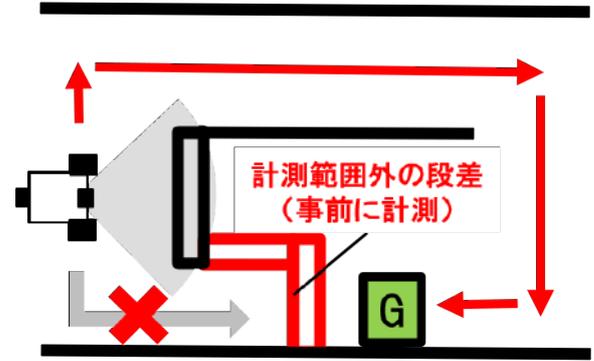


Fig. 3: 事前に作成した段差地図を用いて計測範囲外の段差を回避する経路計画

3. 段差地図の形式と構築方法

3.1 段差地図の形式

関連研究 [3][4][6] のように、段差の検出には高さの絶対値が用いられることが多い。しかし、高さの絶対値によって段差やくぼみを検出した場合、ロボットの姿勢が変化した際や緩やかな斜面を計測した際に、走行が可能な平坦な路面を段差やくぼみと誤検出してしまう可能性がある。そこで本研究では「高さの差分値」に着目し、高さの急激な変化を段差地図に記録する。本研究で作成する段差地図のイメージ図を Fig.4 に示す。段差地図とは、各グリッドに隣接グリッド(上グリッドと右グリッド)との高さの差分値を格納したグリッドマップである。これにより、ある領域内において生じた高さの変化を記録することが可能となる。この時、斜め方向にあるグリッドとの差分値については、格納するデータの整合性を取ることが困難である(例えば、あるグリッドに対し「右上グリッドとの差分値」と、「右+上グリッドとの差分値」が同じ値になるとは限らない)ため、段差地図には含めないこととした。また、下グリッドと左グリッドとの差分値については、該当するグリッドに直接アクセスすれば差分値が求められるため、段差地図には含めないこととした。

3.2 段差地図の構築方法

3D-LiDAR を用いて取得した点群から各グリッドの高さを求め、各グリッド間の高さの差分値を求めることで、段差地図を作成する。段差地図作成の流れを示した図を Fig.5 に示す。具体的な段差地図の作成手順は、以下のとおりである。

- (1) 3D-LiDAR を用いてロボット前方の路面を計測し、点群を取得する (Fig.5 内の点群は高さによって色分けして表示 (青:-5cm, 緑:0cm, 赤:5cm))

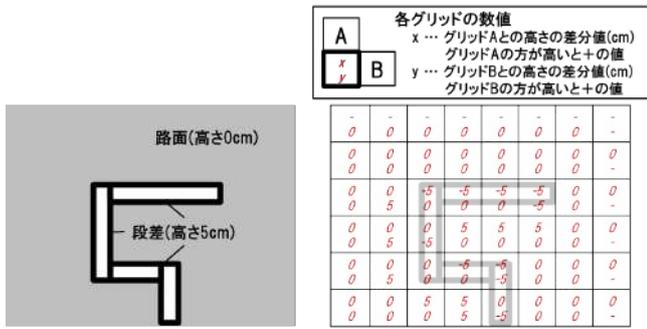


Fig. 4: 段差がある環境 (左) から作成した段差地図のイメージ (右)

- (2) 取得した点群を座標変換し、各点群が段差地図のどのグリッドに入るか計算する
- (3) 各グリッドに入った点群のz値(高さ)の平均値を計算し、そのグリッドの高さとする
- (4) 隣接グリッドとの高さの差分値を計算する
- (5) 計算した差分値を各グリッドに格納する
既にグリッドに差分値が格納されている場合、既存データと新規データの平均値を求め、その値を新たに格納する
- (6) ロボットが移動しながら(1)~(5)を繰り返す

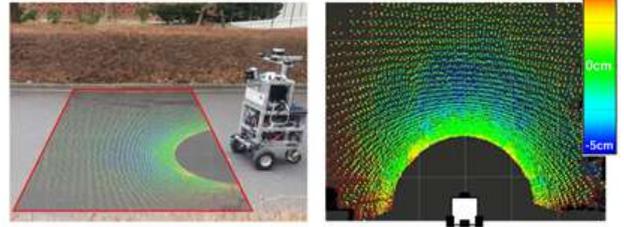
4. 段差地図作成実験

4.1 実験条件

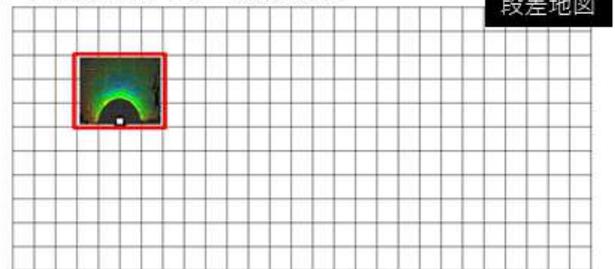
実験に使用したロボットを Fig.6 に示す。ロボットの前方には北陽電機株式会社製の 3D-LiDAR 「YVT-X002」が搭載されている。3D-LiDAR は上下を反転し、85cm の高さに 21° 下向きに傾斜させて取り付けられている。これによって、Fig.7 に示すように、ロボットの前方 0.57m~3m の路面計測が可能となる。

Fig.8 に示すような、高さおよそ 6cm の段差を計測対象として、段差地図作成実験を行った。計測対象の段差に沿ってロボットを 0.3m/s で直進させ、ロボット前方の路面の高さを計測し、上記の手法を用いて段差地図を作成した。この時、取得点群データにインタレース処理を施しているため、センサの動作フレームレートは 5fps となっている。つまり今回の実験では、ロボットが 0.06m 進むごとに点群計測と段差地図の更新が行われている。また、段差地図のグリッドサイズは 0.1m とした。

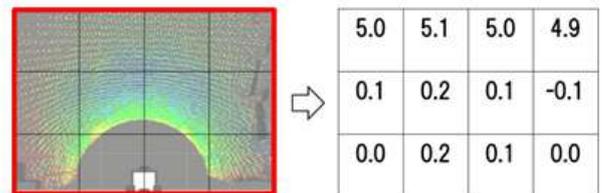
1. 点群取得



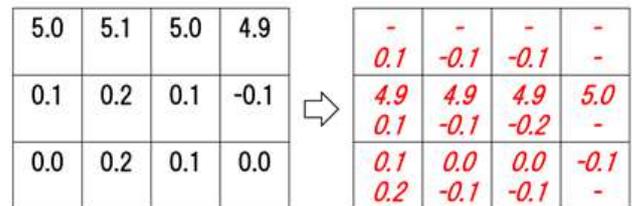
2. 取得点群を座標変換



3. 各グリッドの高さを算出



4. 隣接グリッドとの高さの差分値を算出



5. 各グリッドに差分値を格納



6. マップ完成まで1.~5.を繰り返す

Fig. 5: 段差地図作成フロー

4.2 実験結果

Fig.9 に作成した段差地図を各グリッドの差分値によって色分けして表示した図を示す。ロボットは図の左から右に向かって進んでいる。この図では、各グリッドに格納された 2 つの差分値大きい方の値から、差分値の絶対値 0~



Fig. 6: 実験に使用したロボット

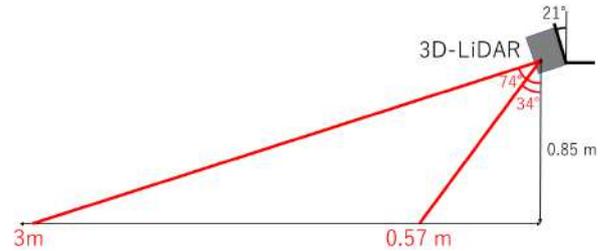


Fig. 7: センサの取り付け角度と計測範囲



Fig. 8: 実験環境 (赤い丸で囲った部分が約 6cm の段差)

10cm を青～赤のグラデーションで表している。Fig.9 から、計測対象とした段差に沿って緑～赤色のグリッドが生じていることがわかる。このことから、段差によって生じる高さのギャップを計測できていることがわかる。また、Fig.9 の左端および右端あたりにおいて、扇状に水色～緑色のグリッドが生じていることが、右下あたりに緑色～赤色のグリッドが生じていることがわかる。前者は、スロープを乗り越える際にロボットの姿勢が急激に変化したことにより、一時的に路面の高さの急激な変化が生じたように見えるためであると考えられる。また後者は、グリッドの高さ (4 章 2 節, 段差地図作成手順 (3)) を点群の中央値から計算して段差地図 (Fig.10) を作成することで解消していることから、グリッドに入った点群の高さの平均値を計算した際、センサの計測ミス等によって生じた外れ値に強く影響を受けたことが原因であると考えられる。これらの課題は、マップの作成方法やグリッドの大きさを変化させることで解消できるか今後検討していく。

次に、簡単な応用例として、作成した段差地図を用いて「差分値が 5cm 以上のグリッドを段差」として作成した障害物地図を Fig.11 に示す。この図は、段差が生じているグリッドを赤色、通行可能な平面のグリッドを緑色で表現している。Fig.11 から、段差に沿って赤色のグリッドが生じていることから、計測対象とした段差を正しく検出できていることがわかる。

5. 結言

本研究では、移動ロボットの段差やくぼみへのスタックを防止することを目的として、段差やくぼみの位置情報と高さ情報を含んだ「段差地図」を作成し、段差地図を活用

して段差やくぼみを考慮した経路計画を行うことを目的としている。まず、段差地図の形式と構築方法の検討を行った。次に、大学構内において段差を計測し、提案した構築方法を用いて段差地図を作成した。そして、差分値を閾値とした簡易的な手法によって高さ 6cm 程度の段差検出が可能であることを確認した。

今後は、高さ 5cm 以下の小さな段差やくぼみに対しての段差地図作成、段差地図を活用した段差やくぼみを考慮した経路計画の有用性検証、リアルタイムに計測した高さデータを用いた段差地図に記録されていない段差やくぼみを回避する手法の検討などを行っていく。

参考文献

- [1] “宅配ロボット・配送ロボット DeliRo (デリロ)”, <https://www.zmp.co.jp/products/lrb/deliro>.
- [2] “駅業務支援ロボット”, <http://www.signal.co.jp/products/platform/robot/index.html>.
- [3] 保坂 健人, 藤岡 直幹, et al.: “公共空間を自律移動する電動カートの開発”, つくばチャレンジ 2014 参加レポート集, pp.76-80, 2014.

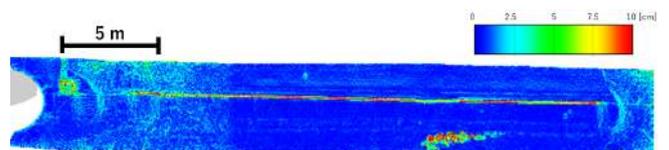


Fig. 9: 差分値によって色分けした段差地図

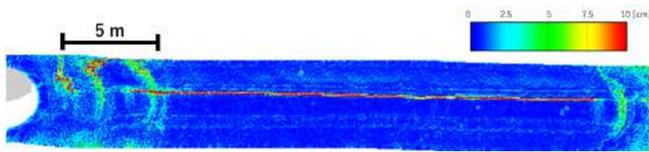


Fig. 10: 差分値によって色分けした段差地図（グリッド高さを点群の中央値から算出）



Fig. 11: 作成した段差地図から、「差分値が 5cm 以上を段差」とした段差検出の結果（赤：段差，緑：走行可能領域）

- [4] 奥村 純平, 石川 顕輔, et al.: “迷羊大つくばチャレンジ 2016 の取り組み”, つくばチャレンジ 2016 参加レポート集, pp.165-170, 2016.
- [5] 平岡 翼, 柳川 拓也, et al.: “芝浦工業大学長谷川研自律移動ロボット班の取り組み”, つくばチャレンジ 2016 参加レポート集, pp.39-41, 2016.
- [6] 藤岡 直幹, 保坂 健人, et al.: “自律移動ロボットにおける三次元レーザースキャナの多目的運用方法の検討”, 計測自動制御学会システム・情報部門 学術講演会 2014, pp.419-424, 2014.
- [7] 秋本 翔平, 高橋 清明, et al.: “つくばチャレンジ 2016 における関西大学の自律移動ロボットの開発”, つくばチャレンジ 2016 参加レポート集, pp.67-70, 2016.