

距離データに対する NDT を用いた高速な差分検出手法の提案 -移動ロボットによる差分検出実験-

○桂右京 倉爪亮(九州大学) 石上智英 岡田典(パナソニック(株))

1. はじめに

近年、日本では少子高齢化のため、労働不足の問題が深刻化している。この労働不足の解決にはロボットの活用が有効であり、特に日常生活環境で生活支援を行うサービスロボットの実現が期待されている。サービスロボットの導入が望まれている分野は、介護支援や清掃業務、警備作業など多岐に渡るが、それらに共通して、自己位置同定とロボット周囲の状況の理解は必要不可欠な機能である。特に外部環境における異常や変化(差分)の検出は、計画された動作の修正や警備作業では必須の機能である。そこで本研究では、距離データを用いた高速な差分検出システムの開発を行っている。

移動ロボットの位置同定手法として、これまで2次元の距離センサとあらかじめ取得した2次元地図データを比較し、位置同定を行う手法が多く提案されている[1][2][3]。しかし、近年、3次元レーザスキャナの普及により、高精度な3次元地図データがロボット用途としても利用可能になっている。一方、Kinect(Microsoft)などのRGB-Dカメラと呼ばれる低価格距離センサによって、リアルタイムで3次元距離データが手軽に得られるようになった。

そこで本研究では、自律移動ロボットに搭載した距離センサで取得した3次元計測データと、レーザスキャナにより得られる3次元地図データを比較することで、自己位置同定と差分検出を行う手法を開発する。しかし、従来広く用いられている、計測データと地図データに含まれる3次元点群を直接用いたICP(Iterative Closest Point)法[4][5]では、3次元点間の対応をすべて求める必要があり、膨大な計算コストがかかってしまい、実時間で自己位置同定や差分検出の処理を行うことはできない。一方、3次元距離データを用いた手法として、Normal Distribution Transformation(NDT)[6]を使用した高速な自己位置同定手法が提案されている[7]。

そこで我々はこれまでに、NDTにより生成されるNDボクセルを使用することで、高速かつノイズに頑健に差分検出を行う手法を開発した[8]。本報告では、移動ロボットに搭載したレーザ距離センサとRGB-Dカメラを用いて、移動ロボットで自動で移動しながら、大規模空間で自己位置同定および差分検出を実時間で実行するシステムを構築し、提案手法による差分検出実験を行ったので報告する。

2. NDT を用いた位置同定

これまでに我々は、3次元点群情報を用いた高速な位置同定手法を提案している[7]。ここで位置同定とは、3次元点群からなる地図データと計測データを比較し、

両者が最も一致する地図データと計測データ間の相対位置姿勢を求める問題である。本研究における3次元計測データとは、RGB-Dカメラにより得られる30万点もの距離データであり、3次元地図データとは、レーザスキャナにより得られる数千万点もの大規模な距離データである。最も代表的な位置同定手法であるICP法は、3次元計測データの1点1点に対して、3次元地図データとの最近傍点を探索し対応付けるために、膨大な計算コストがかかってしまう。これに対し、NDTは、ICP法に代わる複数距離データの高速な位置同定手法として提案されたものである[6]。NDTでは、3次元の点群データを、点の分布を3次元正規分布で表現したNDボクセルに変換する(図1)。開発した位置同定手法[7]は、地図データと計測データに含まれる3次元点群からNDボクセルを計算し、パーティクルフィルタを用いて両者を比較することで、高速に両者の相対位置を求める方法である。

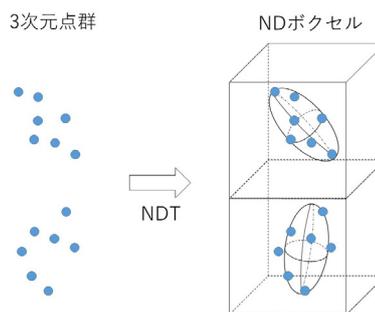


図1 NDT の概念図と ND ボクセル

3. NDT を用いた高速な差分検出手法

本章では、NDTを利用した位置同定[7]の際に生成されたNDボクセルを使用し、高速に差分検出を行う方法[8]について説明する。最も簡単な差分検出手法として、位置合わせされた地図データと計測データのボクセル内に、点群が含まれているかのみを用いた場合、量子化誤差や位置同定の誤差により、誤検出や、検出もれなどの問題が生じる。そこで、開発した手法では、頑健な差分検出を実現するために、以下の3つの手法を用いている。差分検出手法の大まかな流れを図2に示す。

1. ボクセル内の点群の分布の分類
2. 地図データのオーバーラップボクセル化
3. 連続した計測データによる差分の正規分布に従った投票

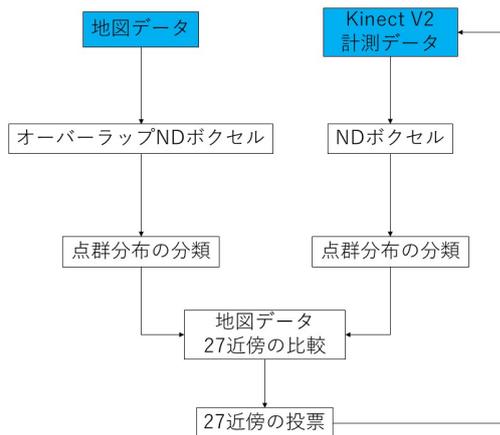


図2 差分検出の流れ

3.1 ボクセル内の点群の分布の分類

ND ボクセルを生成する際の分散行列の固有値を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 (\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3)$ とした時、以下の式 (1)~(3) で、全ての ND ボクセルを球、シート、線の3つに分類する。

$$\text{球} : \lambda_3 \approx \lambda_2 \approx \lambda_1 \gg 0 \quad (1)$$

$$\text{シート} : \lambda_3 \approx \lambda_2 \gg \lambda_1 \approx 0 \quad (2)$$

$$\text{線} : \lambda_3 \gg \lambda_2 \approx \lambda_1 \approx 0 \quad (3)$$

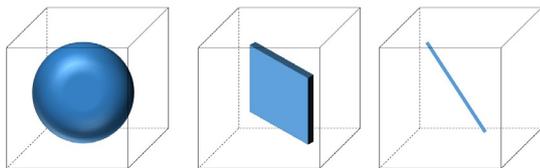


図3 ND ボクセル内の点群の分布の分類

地図データと計測データの比較では、両者の ND ボクセルに対してそれぞれ点群の分布の分類を行い、両者が同じ分類（球、シート、線）である時には同一の ND ボクセルであるとみなす。

3.2 地図データのオーバーラップボクセル化

図4にオーバーラップ ND ボクセルの概念を表す。計測データ 1 ボクセルと、オーバーラップ ND ボクセル化された地図データの 27 近傍を比較することによって、離散化の影響を低減することができる。

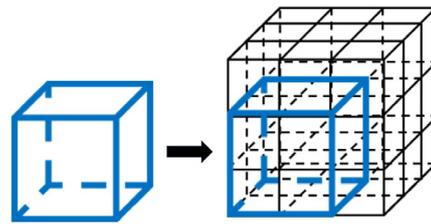


図4 オーバーラップ ND ボクセル

3.3 連続した計測データによる差分の正規分布に従った投票

連続して撮影した計測データを投票することによって、ノイズにより一時的に差分として検出されたボクセルの影響を低減する。提案手法ではさらに、各フレームで差分として検出された ND ボクセルに対し、その 27 近傍のボクセルに対して、式 (4) に示す 3 次元の正規分布に従った重みで投票を行うことによって、位置同定の誤差を軽減する。

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

なお、以降の実験では $\sigma = 200[\text{mm}]$ とした。

4. 自己位置同定と差分検出システム

提案した手法の有用性を検証するために、レーザ距離センサと RGB-D カメラを搭載した移動ロボットを用いて、大規模空間での自己位置同定および差分検出を行うシステムを構築した (図5)。自己位置同定には全周レーザ距離センサである Velodyne HDL-32e を、差分検出には密な 3 次元点群が必要であるため、RGB-D カメラである Kinect V2 を採用した。



図5 移動ロボット

また、自己位置同定と差分検出の大まかな流れを図6に示す。

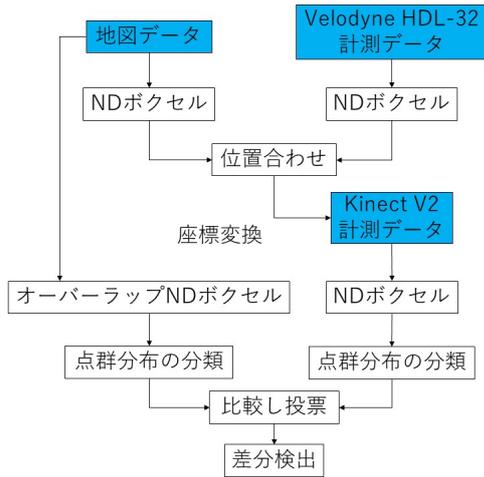


図6 自己位置同定および差分検出の流れ

5. 移動ロボットを用いた自己位置同定および差分検出実験

5.1 大規模空間での差分検出実験

差分検出実験では、まず高精度レーザスキャナ (Faro Focus 3D) で8箇所撮影を行い、 $40m \times 11m$ の地図データを作成した。次に、差分として図7の箇所①: $40 \times 40 \times 40[cm]$, ②: $40 \times 40 \times 70[cm]$, ③: $40 \times 25 \times 20[cm]$ (全て幅×奥行×高さ)の段ボールおよびゴミ箱を設置し(図8)、移動ロボットで図7の矢印の経路を移動した。

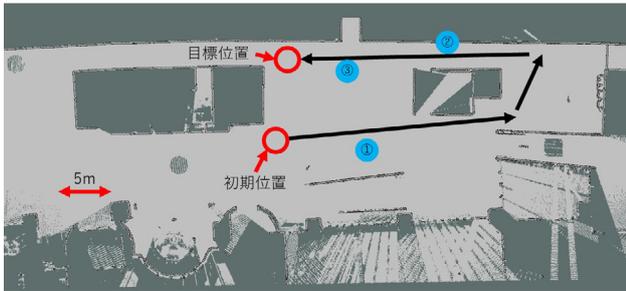


図7 実験環境



図8 設置した差分物体

初期位置の決定は、まず適当な位置を手動で与えて、[7]の手法によりレーザ距離センサから得られた3次元

点群と地図データをNDボクセルを用いて比較し、パーティクルフィルタで決定した。また、目標位置は手動で与えた。その後、Robot Operating System (ROS)のNavigationパッケージを使用し、ダイクストラ法で経路を探索した。その後、移動ロボットを計画された経路に沿って自動で移動させ、レーザ距離センサによる位置情報[7]とオドメトリ情報を1Hzで融合した。その際、1秒に1回取得される座標変換行列を使用し、RGB-Dカメラから得られる距離データを座標変換し、上述した手法で差分検出を行った。なお、ボクセルの大きさは自己位置同定、差分検出ともに $40[cm]$ とした。

図9に、初期位置から目標位置まで移動ロボットが移動した際の差分の検出結果を示す。実験の結果、新たに設置された3つの差分物体以外にも、多くの誤検出が生じていることがわかる。詳しく解析した結果、これらの誤検出は主にRGB-Dカメラによる計測データを分類する際に、ボクセル離散化の影響で壁や床がボクセルの角の一部の領域にわずかに含まれてしまい、本来シートと分類すべきところを線と分類されたためであった。これは例えば計測データもオーバーラップボクセル化し、ボクセルの近傍も参照することで壁や床をシートと正しく分類することで解決できる。しかし、本実験環境では、環境内に線と分類すべき物体がないことから、実験では球とシートの2つに分類することとした。図10は、点群の分布を球とシートの2つに分類を行った際の、差分の検出結果である。実験の結果、この場合には、新たに設置された3つの差分物体のみを正確に検出することができた。

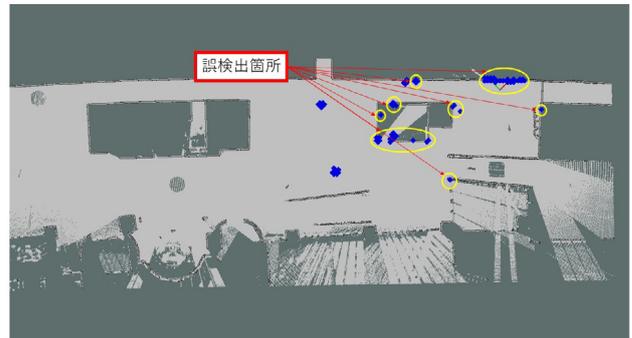
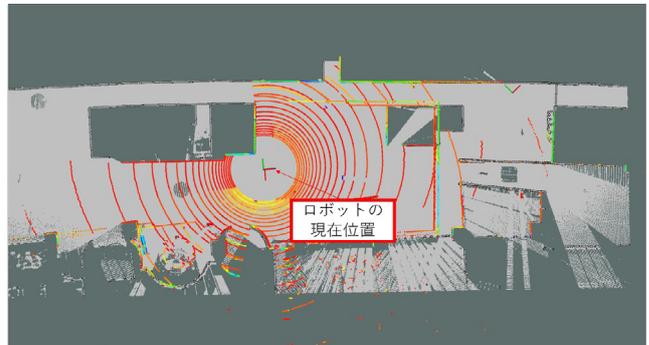


図9 実験結果



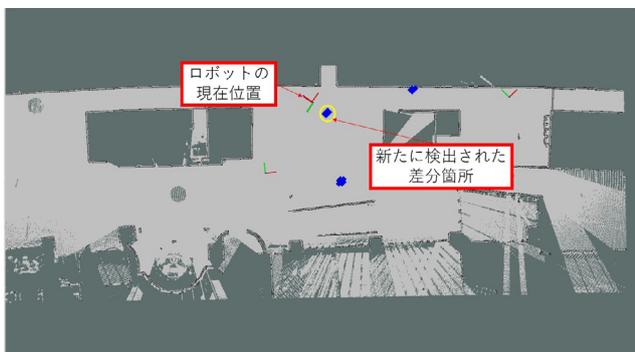
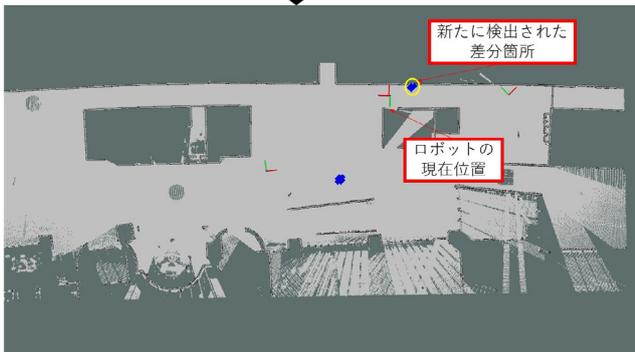
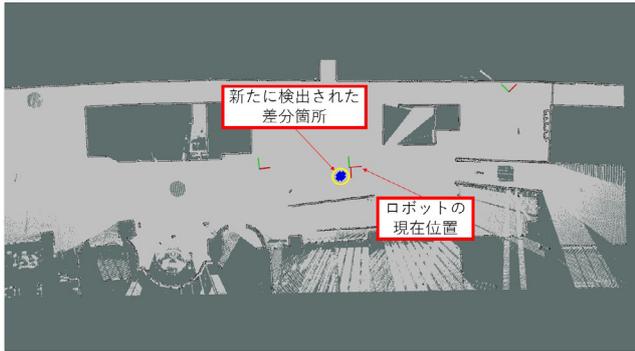


図 10 点群の分布の分類を球とシートにした際の実験結果

5.2 自己位置同定および差分検出の実行時間計測結果

自己位置同定および差分検出の実行時間を計測した。結果を以下に示す。それぞれ1枚の距離画像に対する平均実行時間である。ただし、上述した実験では、表示や経路生成を同時に行うため、それぞれ1秒に1回実行を行っている。

- 自己位置同定 : 0.989[s]
- 差分検出 : 0.079[s]

6. まとめ

本研究では、3次元距離センサを搭載した自律移動ロボットに対し、以下の3つの手法を特徴とするNDTを用いた高速でノイズに頑健な差分検出手法を開発した。

1. ボクセル内の点群の分布の分類
2. 地図データのオーバーラップボクセル化
3. 連続した計測データによる差分の正規分布に従った投票

本報告では、移動ロボットに搭載したレーザ距離センサとRGB-Dカメラを用いて、移動ロボットが自動で移動しながら、大規模空間で自己位置同定および差分検出を実時間で行うシステムを構築した。また、環境内に3つの物体を差分として置いた場合、開発した手法により全ての差分の検出に成功し、提案手法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] J.-A. Meyer and D. Filliat: "Map-based navigation in mobile robots: Ii. a review of map-learning and path-planning strategies," Cognitive Systems Research, vol.4, no.4, pp.283-317, 2003.
- [2] F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard and S. Thrun: "Monte carlo localization for mobile robots," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.1322-1328, 1999.
- [3] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox: Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005.
- [4] A. Nuechter, H. surmann, K. Lingemann, J. Hertzberg and S. Thrun: "6D slam with an application in autonomous mine mapping," Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1998-2003, 2004.
- [5] A. Nuechter, K. Lingemann, J. Hertzberg and H. Surmann: "6D slam-3D mapping outdoor environments," J. Field Robot, vol.24, no.8-9, pp.699-722, 2007.
- [6] P. Biber and W. Straber: "The normal distribution transform: a new approach to laser scanmatching," Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2743-2748, 2003.
- [7] 鄭 龍振, 倉爪 亮, 岩下 友美, 長谷川 勉: "大規模な三次元環境地図とRGB-Dカメラを用いた移動ロボットの広域位置同定", 日本ロボット学会誌, Vol.31 No.9, pp.896-906, 2013.
- [8] 桂 右京, 倉爪 亮, 石上 智英, 岡田 典, 距離データに対するNDTを用いた高速な差分検出手法の提案, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2017, pp.2A2-O08, 2017.5.10-13