

Fig.2 Flow of spatial change detection

3.1 ボクセル内の点群の分布の分類

ボクセル内の点群の有無のみで差分と評価する場合、差分として検出すべき点群以外にも、床や壁などの点群がボクセル内に含まれると、差分の検出は不可能である。そこで、提案手法では、ボクセル内の点群の分布を分類することによって、この問題を解決する。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。

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

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

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

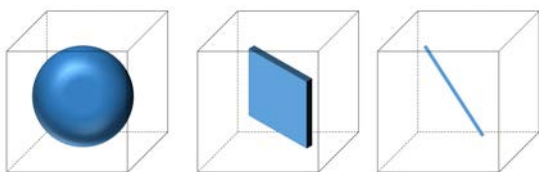


Fig.3 Classification of point distribution in ND voxel

3.2 地図データのオーバーラップボクセル化

NDT を用いた位置同定で同定誤差が生じた場合、格子状に区切る離散化の影響により、境界付近に存在する点群が地図データと計測データで別の座標のボクセルに格納されてしまうことがあり得る。そこで、提案手法では離散化の影響を低減するため、地図データをあらかじめオーバーラップ ND ボクセル化する。オーバーラップ ND ボクセル化とは、Biber ら [6] によって提案された手法を 3 次元に拡張し、各格子を半分ずつ重複するように配置する手法である。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。

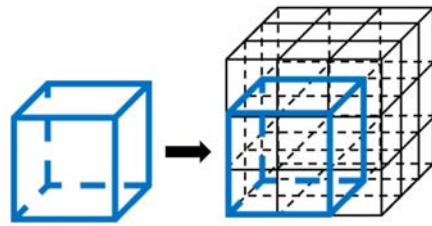


Fig.4 Overlapping of ND voxel

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

Kinect などの RGB-D カメラや、ステレオカメラで撮影した点群にはノイズが含まれ、差分検出を行う際にこのノイズを差分として認識してしまうことがある。そこで、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。

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

また、本研究では $\sigma = 200[\text{mm}]$ とした。

4 実験

4.1 屋外での差分検出実験

屋外の差分検出実験では、まず高精度レーザスキャナ (Faro Focus 3D) で 3 箇所撮影を行い、地図データを作成した。次に、差分として図 5 の箇所に ①: $40 \times 40 \times 40[\text{cm}]$, ②: $40 \times 40 \times 80[\text{cm}]$, ③: $80 \times 15 \times 60[\text{cm}]$, ④: $40 \times 40 \times 20[\text{cm}]$ (全て幅 × 奥行 × 高さ) の段ボールを設置し、実験用台車に乗せたステレオカメラでスタート地点からゴール地点までの 30m の撮影を行った。なお得られた距離画像の枚数は 430 枚であった。この 430 枚を用いて、図 2 の流れに従って差分検出を行った。図 6(a) に、差分検出の最も単純な手法である、位置同定によって合わせら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差分検出結果を示す。また、ボクセル内の点群の分布の分類、地図データのオーバーラップ ND ボクセル化、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の 3 つの手法それぞれの実効性を示すために、図 6(b),(c) および図 7 に段階的に実装した差分検出結果を示す。図 6(a) より、最も単純な手法で得られた差分ボクセルは 704 個であった。一方、図 6(b) は、ボクセル内の点群の分布の分類を実装した差分検出結果である。赤色のボクセルが計測データで球と判定され、地図データと異なっているボクセルである。同様に青色のボクセルがシート、緑色が線と異なって判定されたボクセルである。図 6(c) は、ボクセル内の点群の分布の分類、地図データのオーバーラップ ND ボクセル化を実装した差分検出結果である。差分ボクセルは 313 個であった。図 6(b), (c) とともに最も単純な手法である図 6(a) よりは誤判定は減少しているものの、依然として多くの箇所では実際には差分がないのにも関わらず差分ボクセルと判定されている。図 7 は、さらに連続した計測データによる投票を加え、本研究で提案した手法を 3 つ全て実装した差分検出結果である。差分ボクセルは 48 個であり、図 6 のように誤判定することなく、新たに置かれた 4 つの段ボール全てを検出できた。

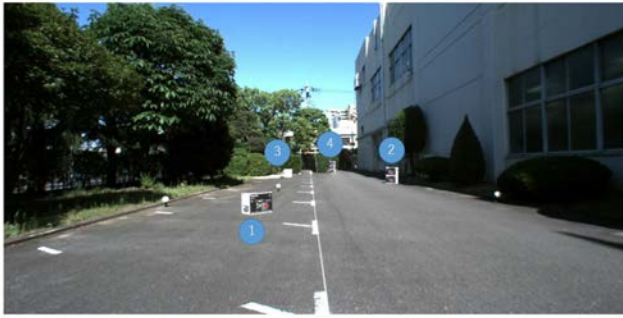


Fig.5 Four additional objects

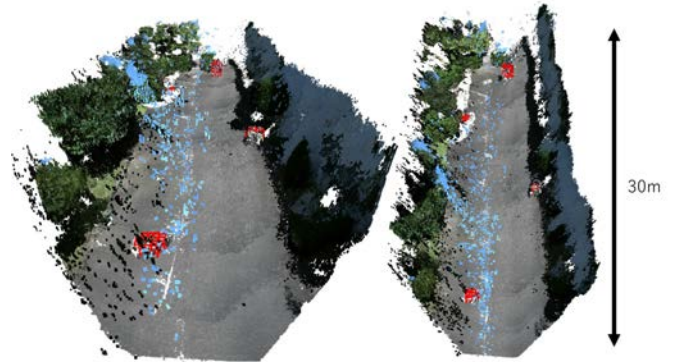
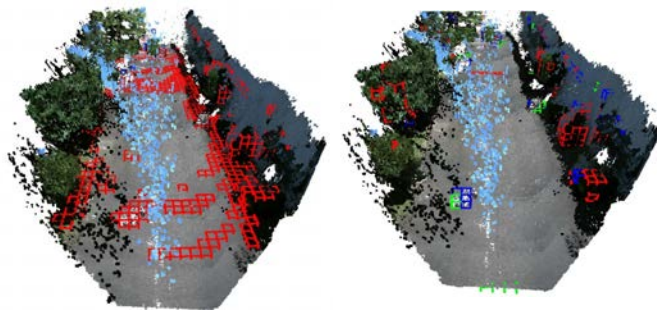
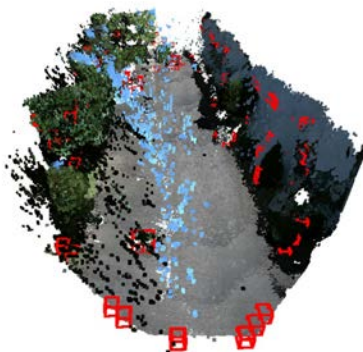


Fig.7 Proposed technique (Classification of point distribution, overlapping of ND voxels, and voting)



(a)Simple technique
(Existence of points)

(b)Classification of point
distribution



(c)Classification of point distribution and overlapping of
ND voxels

Fig.6 Performance comparison of spatial change detection techniques

4.2 実行時間の計測結果

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。ただしそれぞれ1枚の距離画像に対する平均実行時間である。これより、位置同定には多くの計算時間が必要であるが、一度位置同定ができれば、差分検出は極めて短時間で実行できることがわかる。

- 位置同定のみ：18.04[s]
- 差分検出のみ：103.26[ms]

5 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、NDTを用いた高速でノイズに頑健な差分検出手法を提案した。特に今回、以下の3つの手法を提案した。

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

屋外環境を30m移動する実験の結果、環境内に4つの物体を差分として置いた場合、上記3つの手法を全て用いた場合に全ての差分の検出に成功し、提案手法の有効性が確認された。

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.