

自律移動ロボットの経路計画のための点群データ処理に関する研究

天野 剛志

指導教員：村上 和人

1 はじめに

公共空間で働く移動型ロボットは、障害物を回避するなど、安全性に配慮しながら移動することが重要となる。安全性に配慮した移動を実現するためには、障害物を考慮した目的地までの経路計画が必要である。ロボットが移動する際、障害物を避けながら目的地まで移動可能な経路を見つける手段として 3D マップが有用である。3D マップとは、 (x, y, z) の位置情報である点群データで表現された地図である。

経路計画の際、ロボットが現在、3D マップのどの位置にいるかという自己位置推定が必要である。そこで、ロボットがセンシングした点群データと 3D マップの点群データを位置合わせし、自己位置を推定する。

公共空間には、歩行者などの移動物体が存在する。移動物体は、計測中に位置が変化するため、点群データ中に移動物体が存在すると正しい自己位置が推定されない。移動物体を除去するために、点群データから物体の移動速度を推定する必要がある。

ロボットが長期間活動する場合、環境変化の可能性が高くなる。移動物体を除去しても、環境変化があった場合、自己位置推定が困難になる。環境変化を 3D マップに反映するため、3D マップを最新の状態に更新する必要がある。3D マップの最新化に点群更新が必要であるが、更新後の点群データに雑音が多く含まれる場合、自己位置推定精度が低下する。そのため、雑音を除去する必要がある。また、長期間センシングしたデータをそのまま保存すると膨大な量になり、処理時間が増大する。

点群データを位置合わせする手法として、Normal Distributions Transform (NDT) アルゴリズム[1]がある。NDT は、効率的な収束演算で x - y 平面上の 2 次元位置 \mathbf{p} と z 軸周りの回転角 θ を獲得する。しかし、 z 軸方向の情報を持たないため、高さの推定が困難である。

本稿では、3 次元空間内での自己位置推定手法を考案する。また、雑音を低減する点群更新手法の考案、点群データから物体の移動速度推定を行う。

2 Multi-Layer NDT による自己位置推定手法

2.1 基本アイデア

建物内の自己位置をロバストに推定するために、3D 空間内を複数の層に分割する。 x - y 、 y - z 、 z - x 平面上に投影された各層の点群データに対して NDT アルゴリズムを 3 軸方向に適用する。ロボットの 6 自由度の位置・姿勢を推定する。

2.2 Multi-Layer NDT

図 1 (a) は、従来 2 次元点に対して用いられていた NDT の模式図である。図 1 (b)、(c)、(d) は、Multi-Layer NDT の模式図であり、それぞれ x - y 、 y - z 、 z - x 平面に NDT を適用する様子を示している。

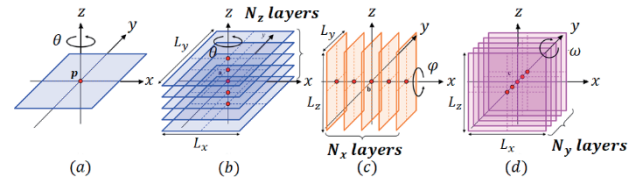


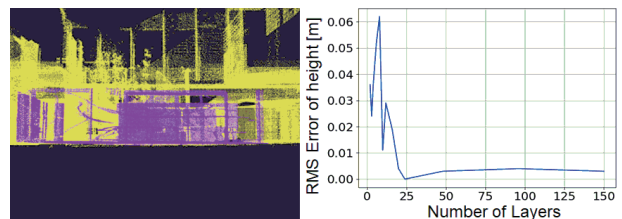
図 1 NDT と Multi-Layer NDT

3D マップは、 $N_x \times N_y \times N_z$ 個のボクセルグリッドに分割されると仮定する。 N_z 層の NDT は、3 次元位置 $\mathbf{a} = (a_x, a_y, 0)$ および z 軸周りの角度 θ を推定する。 N_x 層の NDT では、 x 軸周りの 3 次元位置 $\mathbf{b} = (0, b_y, b_z)$ および角度 φ を推定する。 N_y 層では、 y 軸周りの 3 次元位置 $\mathbf{c} = (c_x, 0, c_z)$ および角度 ω を推定する。 $T_x = (c_x + a_x)/2$ 、 $T_y = (a_y + b_y)/2$ 、 $T_z = (b_z + c_z)/2$ を計算することにより、3D マップ中の 3 次元位置 (T_x, T_y, T_z) を得る。

2.3 自己位置推定実験

愛知県立大学情報棟内を 3D LiDAR で計測した点群データから 3D マップを作成した。3D マップの点群データと新たに計測した点群データに Multi-Layer NDT を適用した。図 2(a)中の黄色の 3D 点が 3D マップの点群データ、紫色の 3D 点が計測した点群データである。

また、層の分割数 N_x, N_y, N_z を 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 48, 96, 150 に変化させた。分割数と高さ推定誤差の関係の一例を図 2(b)に示す。図 2(b)より、分割数が 24 以上になると、RMS 誤差が 0.01m 以下に収まっていることがわかる。実験環境は高さ 7.61m であるため、1 層の厚さは約 0.32m となる。実験環境程度の規模の建物に Multi-Layer NDT を適用する際、1 層の厚さを 0.32m ほどに分割することで位置合わせすることができる。



(a) 位置合わせした点群データ (b) 層の分割数と高さ推定誤差の関係

図 2 Multi-Layer NDT による自己位置推定の一例

3 3D マップの点群更新手法

3.1 点群更新の基本アイデア

3D マップの最新化するため、3D マップに最新の点群データを累積する。点群データ中の孤立点は、正しく物体が計測されていないものや、雑音であることが多い。そのため、孤立点を優先的に削除し、累積した点群データを一定数まで減らす。これにより、点群数の急激な変化を抑制するとともに、雑音などの不要な点群を抑制する。

3.2 一定点数置換手法

自己位置から半径 R 、高さ H の円柱型の更新空間内の 3D

マップの点群データを対象として、点群データを更新する。

直前点群データが N 点存在し、最新の点群データが M 点計測された場合、3D マップの点群データに新たに計測した点群データを累積する。その後、孤立点を削除し、一定点数 N' 点の点群データを3Dマップの点群データと置き換える。

3.3 点群更新手法の比較実験

最新データに置き換える手法、現在までのデータを累積する手法、一定点数置換手法で雑音を含む点群データを更新し、雑音低減の様子を確認した。更新後の点群データに含まれる雑音の割合を算出した。点群更新の回数と雑音の割合の関係を図3に示す。図3より、一定点数置換手法は他の手法よりも雑音を低減した。雑音による自己位置推定精度の低下を防ぐためには、一定点数置換手法で3Dマップを更新すればよい。

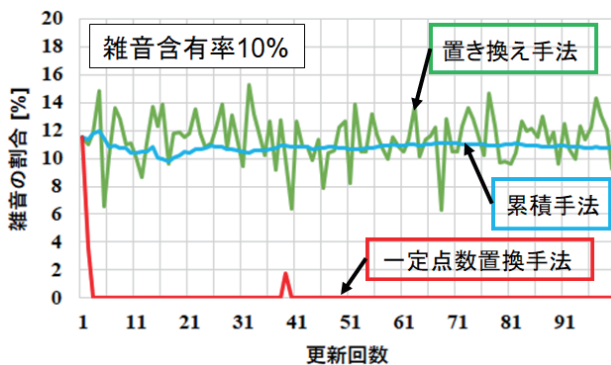


図3 更新回数と雑音の割合

4 点群データからの移動速度推定手法

4.1 基本原理

3D LiDAR は、開口部からレーザー光を照射し、レーザー光が物体に反射して開口部に返ってくるまでの時間差を計測することで物体までの距離情報を取得する。

3D LiDARにより得られた点群データを模式的に図4に示す。図4に示すように、静止時には鉛直上方に並ぶように分布していた3D点群が、移動時には移動方向に傾斜した分布となる。

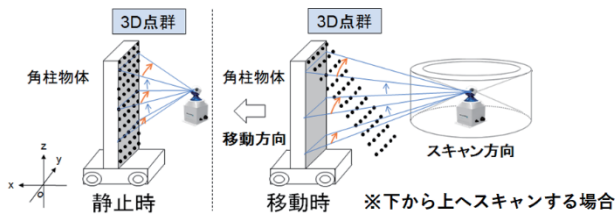


図4 静止物体の計測と移動物体計測時の点群分布

z 軸方向に角柱状の物体であれば、物体の移動にともなう3D点群分布の傾きとスキャニング速度との関係から物体の移動速度を求めることができる。その様子を x 軸方向に移動しているケースで示す。微小時間 Δt の間にレーザー照射点が Δx 、 Δz だけ移動したとする。このとき、物体の x 軸方向への移動速度 v_x と z 軸（鉛直上方）へのスキャニング速度 v_z との関係は、

$$\Delta x = v_x \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta z = v_z \cdot \Delta t \quad (2)$$

となる。 v_z はスキャナと物体の間の距離 d と仰角方向のスキャニングの角速度 ω の積

$$v_z = d \cdot \omega \quad (3)$$

から得られる。よって、物体の移動速度 v_x は、

$$v_x = \Delta x / \Delta t = \Delta x (v_z / \Delta z) = (\Delta x / \Delta z) \cdot d \cdot \omega \quad (4)$$

のように得られる。

4.2 移動速度推定手法

基本原理は前節で述べたように、移動物体の3D点群から傾きを算出し、これとスキャニングの速度から移動物体の速度を求める。スキャナから1ラインごとに3D点が入力されることを利用し、1ライン分の3D点を一つの塊とみなして、時刻 t から始まるスキャン1ライン分の点群重心 G_t 、時刻 $t + \Delta t$ から始まるスキャン1ライン分の点群重心 $G_{t+\Delta t}$ を求め、 G_t 、 $G_{t+\Delta t}$ を結ぶ直線の傾きを移動物体の3D点群の傾きとみなして算出する。

4.3 移動速度推定実験

紙を表面素材とする角柱物体を3D LiDARから遠ざかる方向に100回移動させた。モーションキャプチャシステムで角柱物体の移動速度を取得した。物体の移動速度と移動速度推定手法による推定速度の関係を図5に示す。図5より、0.50m/s以下の移動物体をRMS誤差0.07m/sで検出した。

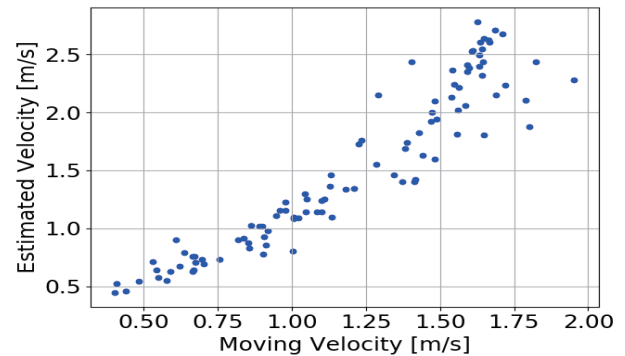


図5 移動物体の速度と推定速度の関係

5 おわりに

NDTを利用して3次元位置を推定する手法を考案した。また、雑音を除去する点群更新手法の考案、点群データから物体の移動速度推定を行った。3次元自己位置推定を実現したが、点群データの密度が大きく違う場合、点群更新時に疎な点が雑音として除去され、3Dマップの形状が崩れる可能性が高い。これにより正しい自己位置が推定されないため、点群データの粗密を処理する必要がある。また、移動物体の速度と移動方向を考慮した移動経路をリアルタイムで生成することが今後の課題である。

参考文献

- [1] P. Biber and W. Strasser, "The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching", International Conference on Intelligent Robots, 2003.