

人工環境の平面をランドマークとして用いる EKF-SLAM

○尾崎 亮太 (明治大学), 黒田 洋司 (明治大学)

EKF-SLAM with planar landmarks in artificial environments

○ Ryota OZAKI (Meiji University), and Yoji KURODA (Meiji University)

Abstract : This paper presents online SLAM for localization of mobile robots in artificial environments. This method exploits global planar features as landmarks in extended Kalman filter (EKF). Planes are extracted from point-cloud of 3D-LiDAR as normals. These normals are projected onto “depth-Gaussian sphere”. The state vector of EKF has states of both a robot and landmarks. Observed planes and landmark planes are associated, and the state vector is updated. To avoid mismatching between observations and landmarks, some conditions are set. To evaluate the proposed method, an experiment with an actual robot was performed. It shows the method suppresses accumulative error of localization by using the landmarks.

1. 緒言

移動ロボットの分野では、未知の環境を走行するとき、自己位置推定と地図生成を同時に行う SLAM[1] がよく用いられる。ICP[2] や NDT[3] を用いたスキャンマッチングは、典型的な SLAM の手法の 1 つだ。Zhang[4] は、低ドリフトと低計算量を目的として、エッジと平面を特徴量として用いるスキャンマッチングを提案した。しかしながら、このようなスキャンマッチングは、相対変化量を積算するので、蓄積誤差を補正するのが難しい。一方、ランドマーク SLAM[1] は、ランドマークを観測している限り、蓄積誤差を補正しやすい手法である。特に、EKF を用いたランドマーク SLAM はよく知られている [5]。また、カメラを用いた Visual SLAM の分野では、平面特徴量を用いた手法が提案されている [6, 7]。しかし、これらの論文では、ロボットが通り過ぎて観測できなくなったランドマークの扱いに関して明記されていない。つまり、ロボットが同じ場所に戻ってくることが想定されておらず、誤マッチングを避ける方法が明記されていない。

上記の問題を解決するため、本論文では、ロボットが同じ場所に戻ってくることが想定した、人工環境の平面をランドマークとして用いる EKF-SLAM を提案する。

2. 人工環境の平面をランドマークとして用いる EKF-SLAM

2.1 平面特徴量の抽出

まず、3D-LiDAR の点群の各局所点群に主成分分析 (PCA) を適用することで、法線群を生成する。その法線群から、条件を設定することで、高い平面度を持つ平面のみを選定する。選定されたそれぞれの法線の原点を、原点に移動させて、深さを付加して法線の各成分をユーク

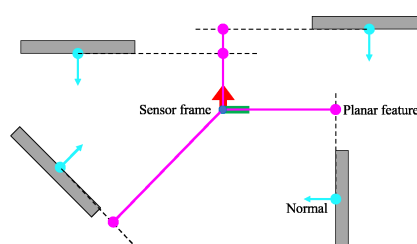


Fig. 1: Depth-Gaussian sphere

リッド空間に写像する (深さ付きガウス球 [8])。Fig.1 に、深さ付きガウス球の概要図を示す。深さ付きガウス球に写像された点群に対してユークリッドクラスタ分析を適用し、メンバの数が十分多いクラスタを選定する。選定された各クラスタの重心を特徴量として抽出する。

2.2 EKF の構成

状態ベクトルはロボットとランドマークの状態で構成され、EKF でそれを推定する。ジャイロスコープとホイールエンコーダを用いて予測を行う。また、観測された特徴量とランドマークの対応付けで更新を行う。対応付けされなかった特徴量は新たなランドマークとして登録される。

2.3 データアソシエーション

観測された特徴量とランドマークとのマハラノビス距離に閾値を設定することで、それらの対応付けを行う。ただし、幾何学的拘束を用いることで誤マッチングへの対策を行う。具体的には、1) 平面の裏側は観測できない拘束と、2) 距離が遠すぎるランドマークは観測できない拘束である。さらに、必要に応じて、ランドマークの統合を行う。つまり、ロボットが同じ場所に戻って来たときなどに、そのステップで観測しているランドマークと、過去に観測さ

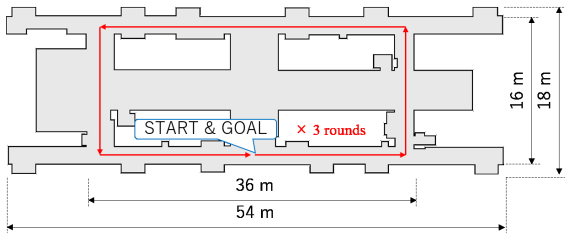


Fig. 2: Floor map

れたランドマークが同一だと判定されたら、統合するように実装されている。ただし、過去のステップで同時に観測されたランドマーク同士は、明らかに同一のランドマークでないため、統合されない。

3. 実験

3.1 実験概要

移動ロボットを走行させて、ロボットの位置と姿勢を推定する実験を行った。その推定は、提案手法と従来手法を用いてそれぞれ行われた。ただし、走行コースの全体でロボットの位置と姿勢の真値を計測することは難しいため、走行終了時（ゴール地点）の推定値のみを評価した。つまり、コース全体で発生した蓄積誤差が、走行終了時の誤差として表れると仮定して評価した。さらに、スタート地点とゴール地点を同一にし、ロボットがスタート地点に戻ってくるように操作することで、簡易的に走行終了時の真値を $(x, y, z, \phi, \theta, \psi) = \mathbf{0}_6$ とした。

ロボットに搭載したセンサは、3D-LiDAR (Velodyne HDL-32E)、IMU (Xsens MTi30)、ホイールエンコーダである。走行コースを Fig.2 に示す。1周 100 m のコースをロボットに 3 周走行させた。従来手法として、ジャイロオドメトリ [9] と LOAM[4] を用いた。

3.2 実験結果

Table 1 に、ゴール地点での自己位置推定の誤差を示す。提案手法による推定誤差が、従来手法の誤差より小さい結果となった。コース全体で発生した蓄積誤差が、走行終了時の誤差として表れると仮定しており、3 周走行後の提案手法によるユークリッド距離の推定誤差 d_{Euc} が小さいことから、提案手法が蓄積誤差を補正しながら走行できたと言える。また、ロボットがスタート地点に戻って来たとき、いくつかのランドマークは統合された。一方で、従来手法では蓄積誤差を補正するのは難しかった。特に、LOAM による推定では、各ステップの変位の推定精度は十分だが、推定が一度ずれてしまうと、その後は修正するのが難しい。

Table 1: Error of the estimated return pose

error in...	Proposed method	Gyrodometry	LOAM
x [m]	+0.005	-0.632	-0.117
y [m]	+0.041	+0.036	+0.077
z [m]	-0.088	-1.212	-0.574
d_{Euc} [m]	0.097	1.367	0.590
ϕ [deg]	-0.6	-2.1	-1.3
θ [deg]	+0.3	+1.2	-2.7
ψ [deg]	-1.2	-2.7	-1.4

4. 結言

人工環境の平面をランドマークとして用いる EKF-SLAM を提案した。その手法では、ランドマークを観測することで、ロボットの位置、姿勢とランドマークの位置が更新される。観測された平面特徴量とランドマークの対応付けでは、誤マッチングを防ぐよういくつかの条件を設定した。また、ロボットが同じ場所に戻って来ることを想定し、ランドマークの統合も実装した。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の、次世代人工知能・ロボット中核技術開発事業による支援を受けた。ここに篤く御礼申し上げる。

参考文献

- [1] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox: “probabilistic robotics”, *The MIT Press*, pp.309–336(2005).
- [2] S. Rusinkiewicz and M. Levoy: “Efficient Variants of the ICP Algorithm”, *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.145–152(2001).
- [3] P. Biber and W. Straßer: “The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.3, pp.2743–2748(2003).
- [4] J. Zhang and S. Singh: “LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time”, *Proceedings of Robotics: Science and Systems Conference*, pp.161–195(2014).
- [5] S. Huang and G. Dissanayake: “Convergence and Consistency Analysis for Extended Kalman Filter Based SLAM”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.23, No.5, pp.1036–1049(2007).
- [6] J. Martinez-Carranza and A. Calway: “Unifying Planar and Point Mapping in Monocular SLAM”, *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, pp.43.1–43.11(2010).
- [7] A. P. Gee, D. Chekhlov, WW. Mayol-Cuevas, A. Calway: “Discovering Planes and Collapsing the State Space in Visual SLAM”, *Proceedings of British Machine Vision Conference*, pp.1–10(2007).
- [8] 清水尚吾, 黒田洋司: “主平面を用いた点群の高速位置合わせ”, 第 19 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.453–458(2014).
- [9] J. Borenstein and L. Feng: “Gyrodometry: a new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.423–428(1996).