

# 建造物の壁に対する相対姿勢を用いた姿勢推定

尾崎 亮太<sup>\*1</sup>, 黒田 洋司<sup>\*2</sup>

## Pose Estimation with Relative Poses to Walls of Buildings

Ryota OZAKI<sup>\*1</sup> and Yoji KURODA<sup>\*2</sup>

<sup>\*1\*</sup><sup>\*2</sup> Department of Mechanical Engineering, School of Science and Technology, Meiji University  
1-1-1 Higashimita, Kawasaki Tama-ku, Kanagawa 214-8571, Japan

This paper presents a pose estimation method which is robust to accumulative error by estimating relative poses to building walls for mobile robots in urban areas. This method exploits that most of artificial walls are built vertically. It estimates poses by not only an inertial sensor and real-time SLAM but also observations of normals from point cloud of artificial walls for estimating absolute poses in the gravity coordinate system. And those three types of poses which are estimated by each way are combined by extended Kalman filter. To evaluate the proposed method, outdoor experiments with an actual robot are performed. It shows the method keeps correcting accumulative error while the robot is driven.

**Key Words** : Pose estimation, Mobile robot

### 1. 緒 言

移動ロボットのナビゲーションや姿勢制御を行うためには、3次元空間における時々刻々の姿勢を推定する必要がある。移動体の姿勢推定法として、内界センサを使ったデッドレコニングによる推定と、外界センサを使ったSLAMによる推定とを統合する手法が提案されている<sup>(1)</sup>。このような手法は、初期姿勢に対する相対変化を推定するため、蓄積誤差を補正することが難しい。

そこで本研究では、従来用いられる、慣性センサとSLAMの統合に加え、鉛直に建てられた建造物の壁に対する相対姿勢をワールド座標系における絶対姿勢として観測することで、誤差の蓄積を適時補正することができる姿勢推定法を提案する。なお、本手法は、一般的な建造物の壁がおおよそ鉛直に建てられていることを利用し、事前環境地図を必要としない。そして、屋外での実機走行実験によって本手法の有用性を示す。

### 2. 建造物の壁に対する相対姿勢を用いた姿勢推定法

まず座標系を以下に定義する。

- ロボット座標系：ロボットに固定され、進行方向をx軸の正とする右手直交座標系とする。
- ワールド座標系：ロボット初期姿勢位置において

原点がロボット座標系と一致し、重力方向をz軸の負とする右手直交座標系とする。

本提案手法では、ロボット静止時にIMUによって初期姿勢を求め、それに対してデッドレコニングおよびSLAMで推定される相対姿勢変化を積算する。そして、壁面を観測した場合は、2-1、2-2章のように推定したロボット座標系での重力ベクトルを用いて、蓄積誤差を補正する。なお、デッドレコニングで推定する姿勢を予測、SLAMで推定する姿勢を観測1、壁面に対する相対姿勢を観測2とし、これらは拡張カルマンフィルタで統合される。車輪型ロボットで人工環境を走行することを想定しており、各姿勢角度変化がある程度急激なものではなく、カルマンフィルタで十分扱えると判断する。

**2-1 主法線抽出** センサで得られる点群に対して主成分分析を用いて、各注目点に対して法線ベクトルを算出する。この法線群から、信頼性の高い鉛直面を持つ法線を以下の条件で抽出する。

- 注目点を持つ近傍点の数が十分多い(密度が高い)。
- 法線と1ステップ前の推定重力ベクトルとの角度が直角に十分近い。1ステップ前の推定重力ベクトルをもとに鉛直面であるかを判定している。
- 法線に垂直な平面と近傍点群の二乗誤差が十分小さい(平面度が高い)。

抽出された法線群でガウス球<sup>(2)</sup>を生成し、球内の点群に対して階層クラスタ分析を適用する。なお本手法では、適当な法線を反転させガウス球をさらに半球

<sup>\*1</sup> 明治大学理工学部機械工学科 (〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1) ee53031@meiji.ac.jp

<sup>\*2</sup> 明治大学理工学部機械工学科 (〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1) ykuroda@isc.meiji.ac.jp

のみに反映している。つまり、平行で向かい合う平面は同じ法線ベクトルを持つようにする。クラスタリング終了後に、一定回数以上統合されなかったガウス球の点または点群は外れ値として除去する。

**2.2 重力方向推定** クラスタリングされた法線（ガウス球内の点）を用いてロボット座標系における単位重力ベクトル  $\mathbf{G}$  を推定する。クラスタリングされた法線の数に応じて以下のように算出する。ただし、算出後に、1ステップ前の重力方向をもとに、算出したベクトルの向きを適当に決める必要がある。

- 法線の数：3以上

法線をガウス球における点として扱い、この点群に対する主成分分析で得た法線を重力ベクトルとする。ただし、クラスタが持つ点群の数で重み付けを行っている。

- 法線の数：2

2本の法線ベクトルの外積を重力ベクトルとする。

- 法線の数：1

1ステップ前の推定重力ベクトル  $\mathbf{G}'$  を用いて、式(1)のように部分的に推定重力ベクトルを補正し算出する。観測された法線ベクトルを  $\mathbf{N}$  とする。

$$\mathbf{G} = \frac{\mathbf{G}' - (\mathbf{G}' \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}}{\|\mathbf{G}' - (\mathbf{G}' \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}\|} \quad (1)$$

- 法線の数：0

重力方向を推定することが出来ない。

### 3. 実験

図1に明治大学生田キャンパス内の実験環境の航空写真を示す。一周約250m、高低差約3mのコースを、スタートの位置、姿勢と、ゴールの位置、姿勢が同じになるようにロボットをコントローラー操作し3周させる。提案手法および比較手法で姿勢を推定し、並進運動は各手法共通でホイールオドメトリのみを用いる。姿勢推定の比較手法としてジャイロオドメトリと、LSD-SLAM<sup>(3)</sup>を行う。LSD-SLAMでも姿勢のみを推定し共通のホイールオドメトリと統合する。また、本実験ではLSD-SLAMでのループクローズは行っていない。提案手法の観測の一部となるSLAMにも、LSD-SLAMを用いる。ロボットに搭載され使用するセンサは、Velodyne HDL-32E, Xsens MTi10, RealSense D435, ホイールエンコーダである。RealSenseはRGB-Dカメラであるが、LSD-SLAMのために画像のみを利用しているため、深度情報は利用していない。

表1に、3周後の推定位置姿勢と初期位置姿勢との誤差を示す。ユークリッド距離で表した位置推定誤差に関して、比較手法に比べ提案手法が小さいことから、走行中の姿勢推定の誤差も提案手法の方が小さいと言

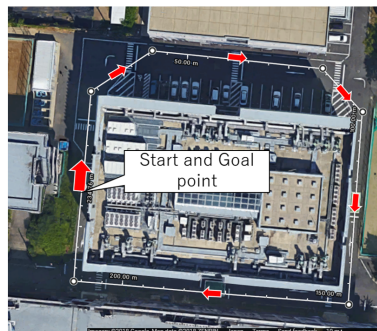


Fig. 1 The experimental environment

Table 1 Return position and pose errors

error in...	Proposed method	LSD-SLAM	Gyrodometry
$x$ [m]	-1.877	-1.517	-10.296
$y$ [m]	1.180	1.802	-1.430
$z$ [m]	-0.446	4.216	18.534
<i>Euc.distance</i> [m]	2.261	4.829	21.250
<i>roll</i> [deg]	-0.045	5.171	0.261
<i>pitch</i> [deg]	-0.897	-18.218	-4.344
<i>yaw</i> [deg]	1.358	-2.735	15.431

える。特に、Z軸（鉛直）方向の並進誤差が小さく抑えられており、壁面を用いたロール、ピッチ補正による結果だと考察する。

### 4. 結 言

従来の慣性センサとSLAMによる移動ロボットの姿勢推定に加え、鉛直に建てられている建造物の壁に対する相対姿勢を利用する姿勢推定法を提案した。実験結果より、本提案手法の、蓄積誤差に対する補正の有用性が示された。

### 謝 辞

本研究の一部は、NEDO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。また、実験に使用した移動ロボットはSEQSENSE株式会社より提供を受けたものである。ここに篤く御礼申し上げる。

### 参 考 文 献

- (1) L. von Stumberg, V. Usenko and D. Cremers, "Direct Sparse Visual-Inertial Odometry using Dynamic Marginalization", in *International Conference on Robotics and Automation*, (2018).
- (2) B.K.P. Horn, "Extended gaussian images", *Proceedings of the 1984 IEEE*, (1984), pp.1671-1686.
- (3) J. Engel, J. Stueckler and D. Cremers, "LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM", *Computer Vision-ECCV 2014, European Conference on Computer Vision*, (2014), pp.834-849.