

鉛直壁面を用いた移動ロボットのための自己姿勢推定

Pose Estimation for mobile robots with vertical walls

○学 尾崎亮太 (明治大) 正 黒田洋司 (明治大)

Ryota OZAKI, Meiji University, ee53031@meiji.ac.jp

Yoji KURODA, Meiji University

This paper presents a pose estimation method for mobile robots with vertical walls in urban areas. This proposed method exploits the fact that most of all artificial walls are built vertically. It corrects accumulative error of estimated poses by estimating the gravity vector with the fact without any 3d maps or 3d models. The poses which are estimated with vertical walls are integrated with integration of angle velocity from inertial sensors thorough 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 moves.

Key Words: Mobile robot, Pose Estimation, 3D point cloud, Gauss map, Artificial environment

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。移動体の姿勢は、一般に、ジャイロスコープや加速度センサを使って推定することが多い。しかし、地面上を走行する移動ロボットの場合、ロボット自身の加速度や地面からの振動が推定精度に影響を与える[1]。また、ジャイロスコープを用いた角速度の積分(レート積分)では、積算誤差が発生する。一方、この蓄積誤差を補正するため、事前に用意した情報とセンサ情報をマッチングする手法があり、特に事前環境地図を用いる手法が多く提案されている[2]。しかしながら、事前地図の使用は、適用可能環境を限定する。

本研究では、従来のレート積分による姿勢推定に対して、鉛直な壁面を用いてロボット座標系での重力方向ベクトルを推定し補正する。提案手法は、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せず蓄積誤差を補正する。屋外での実機走行実験によって、本研究の有用性を示す。

2 鉛直壁面を用いた姿勢推定

本手法では、ロボットが静止している状態で慣性センサによって初期姿勢を求め、それに対してレート積分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、ロボット座標系での重力ベクトルを推定し、蓄積誤差を補正する。重力ベクトルの推定及び補正の詳細を2.1~2.3節で記述する。レート積分で推定する姿勢を予測、壁面情報で推定する姿勢を観測とし、拡張カルマンフィルタ(E.K.F.)で統合する。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、各姿勢角度変化が急激なものではなく、E.K.F.で十分扱えると仮定する。

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。

2.1 主法線抽出

3次元距離センサで得られる点群情報に対して主成分分析を用いることで、各注目点に対する法線を算出する。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)。
- 1ステップ前の推定重力ベクトル \mathbf{G}'_{robot} をもとに、観測された法線 \mathbf{N} が鉛直面を持つかを判定する(式(1)で算出される角度 β が十分小さい)。

$$\beta = \left| \cos^{-1} \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{G}'_{robot}}{\|\mathbf{N}\| \|\mathbf{G}'_{robot}\|} - \frac{\pi}{2} \right| \quad (1)$$

- 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)。

抽出された法線群をガウス球[3]に写像し、球内の点群に対してユークリッド距離に基づくクラスタ分析を適用する。本手法では、適当な法線を反転させガウス球を半球のみに反映する。つまり、平行で向かい合う壁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、メンバが閾値より少ないクラスタは外れ値として除去する。各クラスタが持つ点群の重心を算出し、それらの位置ベクトルを支配的な法線(主法線)として用いる。

2.2 単位重力ベクトル推定

クラスタリングされた主法線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}_{robot} を推定する。主法線の数に応じて以下のように算出する。

- 主法線の数: 3以上
主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、各クラスタが持つ点の数で重み付けを行う。
- 主法線の数: 2
2つの法線ベクトルの外積を重力方向ベクトルとする。
- 主法線の数: 1
ワールド座標系における絶対的な姿勢を得るには、平行でない鉛直面が2面以上必要であるが、1ステップ前の推定重力ベクトル \mathbf{G}'_{robot} を用いて、式(2)のように部分的に推定重力ベクトルを補正し算出する。観測された主法線ベクトルを \mathbf{N} とする。

$$\mathbf{G}_{robot} = \frac{\mathbf{G}'_{robot} - (\mathbf{G}'_{robot} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}}{\|\mathbf{G}'_{robot} - (\mathbf{G}'_{robot} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}\|} \quad (2)$$

- 主法線の数: 0
重力方向を推定することが出来ない。

2.3 姿勢推定補正

重力ベクトルの推定誤差が、推定姿勢の誤差であることを用いて推定を補正する。補正後の姿勢を表す四元数 $\mathbf{q}_{pose.wall}$ の算出法を以下で示す。1ステップ前の推定重力ベクトル \mathbf{G}'_{robot} と、2.2節で推定した推定重力ベクトル \mathbf{G}_{robot} において、この2ベクトル間の回転を表す四元数を \mathbf{q}_{error} とする。推定重力ベクトル \mathbf{G}'_{robot} に対応する推定姿勢を表す四元数を \mathbf{q}'_{pose} としたとき、次のように推定姿勢は補正される。

$$\mathbf{q}_{pose.wall} = \mathbf{q}'_{pose} \mathbf{q}_{error} \quad (3)$$

$\mathbf{q}_{pose.wall}$ および \mathbf{q}'_{pose} はワールド座標系での姿勢であり、 \mathbf{q}_{error} はロボット座標系での誤差(回転)である。

Table 1: Errors in pose estimations

	error in...	roll _w [deg]	pitch _w [deg]	yaw _w [deg]
1 round	proposed method	-0.947	+1.381	+3.250
	rate-integration	-0.287	+2.206	+3.154
	AHRS	-1.000	+2.294	-2.918
2 rounds	proposed method	-1.048	+1.872	+5.105
	rate-integration	-3.139	+0.167	+5.052
	AHRS	-1.218	+1.832	+26.718
3 rounds	proposed method	-0.714	+1.517	+9.554
	rate-integration	-2.070	+3.259	+9.200
	AHRS	-1.198	+1.663	+19.476
ave. (absolute value)	proposed method	0.903	1.590	5.970
	rate-integration	1.832	1.878	5.802
	AHRS	1.139	1.930	16.371
cov.	proposed method	0.020	0.043	6.998
	rate-integration	1.384	1.647	6.373
	AHRS	0.010	0.071	159.139

3 評価実験

3.1 実験概要

起伏のあるコースで移動ロボットを走行させ、提案手法および従来手法により、時々刻々のロボットの自己姿勢を推定する実験を行った。そして、走行距離の変化に応じた姿勢推定の誤差を評価した。本実験では、従来手法として、レート積分で推定された姿勢と姿勢計測装置（AHRS）で計測された姿勢を用いた。真値には、走行開始時と終了時にモーションキャプチャ（Vicon Vero v1.3X）で計測した姿勢を用いた。走行コースは、屋外の1周約250[m]、高低差約3[m]のコースであり、周回数を変えて複数の走行を行った。ただしスタート地点とゴール地点はモーションキャプチャを設置した屋内である。ロボットに搭載したセンサは、Velodyne HDL-32E, Xsens MTi30, ホイールエンコーダである。

3.2 実験結果

表1に姿勢推定の誤差を示す。表中の誤差は、ワールド座標系の座標軸を基準とした姿勢角の誤差である。レート積分に対して提案手法は、平均的にロール角、ピッチ角の推定誤差が小さく、走行距離の変化における推定誤差の分散も小さい。AHRSによる姿勢計測に関して、計測は走行終了時にロボットが静止している状態で行われており、走行中における計測に比べて精度よく計測ができるはずである。そこで、式(4)のように推定姿勢と並進速度を統合した場合、ロール角、ピッチ角の推定誤差はZ_w軸方向の並進誤差として表れるという仮定のもと、別の評価を行う。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{L}_{\text{world},k} &= \mathbf{L}_{\text{world},k-1} + \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{V}_{\text{robot},k} dt \\
 &= \mathbf{L}_{\text{world},k-1} + \mathbf{R}_k^T \mathbf{V}_{\text{robot},k} dt \\
 &= \begin{pmatrix} L_{X_w,k-1} \\ L_{Y_w,k-1} \\ L_{Z_w,k-1} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_k^T \begin{pmatrix} V_{\text{robot},X_r,k} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} dt
 \end{aligned} \quad (4)$$

$\mathbf{V}_{\text{robot}}$ はロボット座標系での並進速度ベクトル、 $\mathbf{L}_{\text{world}}$ はワールド座標系でのロボットの推定位置ベクトルである。本実験では、ホイールエンコーダで計測される並進速度を用いる。表2に、推定姿勢と並進速度を統合した場合のZ_w軸方向の並進誤差を示す。提案手法の並進誤差が比較手法の誤差より小さいことから、走行中の姿勢角推定の誤差も小さいと言える。

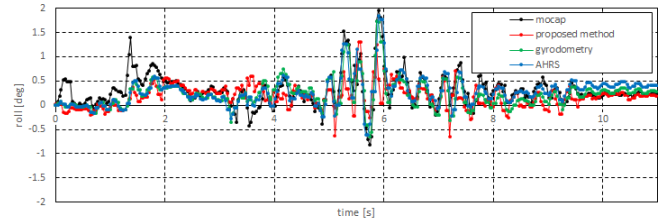
3.3 追加実験

提案手法の瞬間的な推定精度を検証するため、移動ロボットが走行時に振動するような玄関マットの上を走行させて、姿勢を推定する実験を行った。モーションキャプチャで計測される時々刻々の姿勢を真値として評価した。

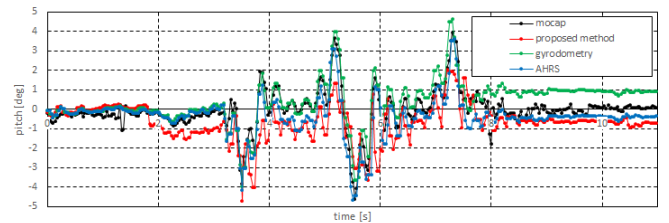
図1に、推定姿勢角および真値の時間推移結果を示す。真値に対する推定誤差の絶対値の時間平均は、ロール角に関して、提案手法で6.877deg/s、レート積分で4.805deg/s、AHRSで5.003deg/s

Table 2: Errors in position estimations

	error in...	Z _w [m]
1 round	proposed method	+0.0185
	rate-integration	-0.2194
	AHRS	+0.6763
2 rounds	proposed method	-0.1813
	rate-integration	+2.9508
	AHRS	+1.2496
3 rounds	proposed method	+0.6073
	rate-integration	+1.2231
	AHRS	+1.2725



(a) roll



(b) pitch

Fig.1: Real-time attitude angles

であった。また、ピッチ角に関して、提案手法で25.578deg/s、レート積分で17.232deg/s、AHRSで14.024deg/sであった。比較手法に比べて、提案手法は瞬間的な精度が低い結果となった。鉛直面の抽出の処理時間や、観測ノイズが原因であると考えられる。瞬間的な推定精度が低いことが、提案手法の今後の課題であるとわかった。

4 結言

従来のレート積分による姿勢推定に対して、鉛直な壁面を用いてロボット座標系での重力方向ベクトルを推定し補正する手法を提案した。実験結果より、提案手法が事前環境地図を必要とせず蓄積誤差を補正することを示した。

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] Vaganay, J., Aldon, M.J. and Fournier, A., "Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, pp.277-282, 1993.
- [2] Quddus, M.A., Ochieng, W.Y., and Noland, R.B., "Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol.15, no.5, pp.312-328, 2007.
- [3] Horn, B.K.P., "Extended gaussian images", Proceeding of the IEEE, vol.72, no.12, pp.1671-1686, 1984.