

複数センサの融合によるクローラ型ロボットの3次元自己位置推定

Three-Dimensional Odometry for Tracked Vehicles Based on Multiple Internal Sensor Fusion

○岡田 佳都 正 永谷 圭司 正 吉田 和哉 (東北大)

○ Yoshito OKADA, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA
Tohoku University, yoshito@astro.mech.tohoku.ac.jp

Gyro-based odometry is a robust and easy-to-use localization method for mobile robots. However, the Gyro-based odometry for tracked vehicles has difficulties to estimate its exact localization because of track-terrain slippage and gyroscopes' bias-drifts. To solve these problems, we propose an extended 3-dimensional odometry method for tracked vehicles based on multiple internal sensor fusion. The proposed method consists of slippage-compensation using encoders and gyroscopes, attitude correction using an acceleration sensor and gyroscopes' bias value update. Finally, a performance test was carried out in real environment to confirm a validity of our approach. In this paper, we introduce the three-dimensional localization method by extended gyro-based odometry and report the experimental results.

Key Words : Tracked Vehicles, Localization, Gyro-based odometry, Internal Sensor Fusion

1 序論

クローラ式移動機構は、クローラの底面全体で路面を捉えるため、車輪式移動機構などと比較して高い不整地踏破性を有する。そのため、人間に代わり被災地の環境情報の獲得や要救助者の探索を行うことを目的とするレスキューロボット [1] の多くが、クローラ式移動機構を採用している (図 1)。

レスキューロボットの要素技術のうち、ロボットの自己位置推定に関する技術は、大域地図の構築や要救助者の位置把握に欠くことのできない重要な技術である。これに関して、筆者らは、内界センサと外界センサの融合によるクローラ型ロボットの高精度の自己位置推定手法の開発を目指している。その第一段階として、本研究では、ジャイロセンサを用いたオドメトリ (車輪の回転量から位置を推定する手法) による 3 次元自己位置推定手法を提案する。

クローラ式移動機構は、面で接地しながらスキッドステアリングにより旋回を行うため、旋回時にクローラと路面の間にすべりが生じる。オドメトリによる高精度の自己位置推定を実現するためには、このクローラのすべりを定量的に推定し補償する必要がある。そこで本研究では、過去に考案したジャイロセンサを用いた 2 次元平面内におけるすべり補償オドメトリ [2] を 3 次元に拡張した自己位置推定手法を考案した。また、合わせてジャイロセンサのドリフト対策を導入した。本稿では、まず提案手法の中核となるジャイロセンサを用いた 3 次元オドメトリ (3 次元ジャイロベースドオドメトリ) について述べ、そのあとすべり補償とその他の拡張について述べる。最後にテストベッドを用いた走行実験の結果を示す。



Fig. 1: A tracked vehicle on a uneven terrain

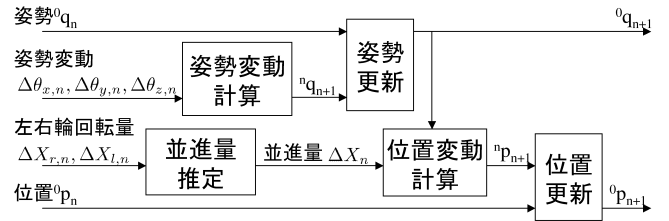


Fig. 2: A diagram of 3D gyro-based odometry

2 3次元ジャイロベースドオドメトリによる自己位置推定

2.1 概要

提案手法に用いる 3 次元ジャイロベースドオドメトリの概要図を図 2 に示す。本章では、3 次元ジャイロベースドオドメトリを構成する各要素について詳述する。

2.2 姿勢変動計算

ロボットの機体座標系を、機体中心を原点とし、正面に直交する向きに x 軸、上面に直行する向きに z 軸、右手系をなすように y 軸となるようにとる。ロボットの姿勢は、基準時刻における機体座標系と現在時刻における機体座標系の関係により表される。座標系の関係を表現するにはいくつかの方法があるが、本研究ではクォータニオンを用いる。サンプリング時刻 $t = t_n$ における機体座標系を x_n - y_n - z_n 、姿勢クォータニオンを 0q_n とする。次のサンプリング時刻 $t = t_{n+1}$ までに、ジャイロセンサにより、 x_n 軸まわりに $\Delta\theta_{x,n}$ 、 y_n 軸まわりに $\Delta\theta_{y,n}$ 、 z_n 軸まわりに $\Delta\theta_{z,n}$ なる 3 つの微小回転が検出されたとする。このとき、 $t_n < t < t_{n+1}$ の姿勢変動を表すクォータニオン ${}^nq_{n+1}$ は、微小回転を考慮する順番に関わらず、

$${}^nq_{n+1} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \\ \sin \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \\ \cos \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \sin \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \\ \cos \frac{\Delta\theta_{x,n}}{2} \cdot \cos \frac{\Delta\theta_{y,n}}{2} \cdot \sin \frac{\Delta\theta_{z,n}}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。

2.3 姿勢更新

新姿勢クォータニオン ${}^0q_{n+1}$ は、姿勢変動クォータニオン ${}^nq_{n+1}$ と旧姿勢クォータニオン nq_n の積により、

$${}^0q_{n+1} = {}^0q_n \times {}^nq_{n+1} \quad (2)$$

で与えられる。

2.4 並進量推定

$t_n < t < t_{n+1}$ における左右輪の回転量を $\Delta X_{r,n}$ および $\Delta X_{l,n}$ とすれば、並進量 ΔX_n は左右輪と路面との間にすべりが生じないという仮定のもとで、

$$\Delta X_n = \frac{\Delta X_{r,n} + \Delta X_{l,n}}{2} \quad (3)$$

と記述できる。しかし、レスキューロボットの多くが採用するクローラ型移動機構は、高い不整地踏破性能を有する反面、旋回時に路面との間にすべりを生じる。そのため、精度のよい並進量推定を行うには、このすべりを補償する必要がある。すべり補償に関する拡張については次章で述べる。

2.5 位置変動計算と位置更新

基準座標系 $x_0-y_0-z_0$ から見た位置変動ベクトル ${}^np_{n+1}$ は、並進量 ΔX_n と新姿勢クォータニオン ${}^0q_{n+1}$ を用いた座標変換により、

$$\begin{bmatrix} 0 \\ {}^np_{n+1} \end{bmatrix} = {}^0q_{n+1} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta X_n \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times {}^{n+1}q_0 \quad (4)$$

で与えられる。また、新位置ベクトル ${}^0p_{n+1}$ は、旧位置ベクトル 0p_n と位置変動ベクトル ${}^np_{n+1}$ の和として、

$${}^0p_{n+1} = {}^0p_n + {}^np_{n+1} \quad (5)$$

で計算できる。

3 3次元ジャイロベースドオドメトリの拡張

3.1 誤差要因とその対策

前章で述べた3次元ジャイロベースドオドメトリをクローラ型レスキューロボットに適用する場合、大きな誤差要因として次の2つが考えられる。

1つ目は、ジャイロセンサのゼロ位置変動である。ジャイロセンサは取付け軸まわりの角速度を、ゼロ位置（ジャイロセンサ静止時の出力）からの変動で出力する装置である。しかし、ジャイロセンサのゼロ位置は時間経過や外的な振動によって変動する。そのため、定期的にゼロ位置変動に対する対応を行わなければ、姿勢の推定における大きな積分誤差の要因となる。

2つ目は、クローラと路面との間に生じるすべりである。クローラ型ロボットの旋回には路面との間のすべりが伴うため、クローラの回転量から単純にロボットの正確な並進量を求めることが困難となっている。

これらの誤差要因に対し、3次元ジャイロベースドオドメトリを図3のように拡張することとする。提案手法では、ロボットの静止を検知し、静止時には各種の補正を行い、運動時にはすべり補償を加えたジャイロベースドオドメトリを行うことで推定精度の向上を狙う。なお、この拡張にあたり3軸加速度センサを導入している。この章では、提案手法を構成する各要素について詳述する。

3.2 静止判定

ロボットのクローラが回転しておらず、ロボットの加速度に変動が生じない状態が一定時間以上続いているとき、そのロボットは静止しているとみなしてよいと考えられる。すなわち、エンコーダと加速度センサの出力が一定の条件を満たす状態が続くとき、ロボットが静止していると判定する。

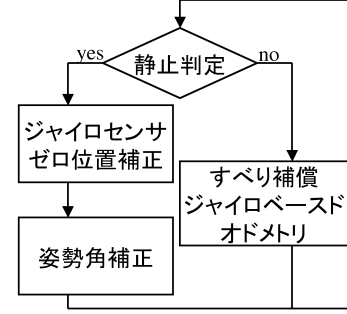


Fig. 3: A flowchart of the proposed method

3.3 ジャイロセンサのゼロ位置補正

ロボットが静止している際には、ジャイロセンサの出力は最新のゼロ位置を示す。この最新のゼロ位置を用いてプログラム内部で利用するゼロ位置の値を更新することで、ゼロ位置変動による積分誤差を抑えることが可能となる。

3.4 重力加速度ベクトルを利用した姿勢角補正

時刻 $t = t_n$ においてロボットが静止しており、その推定姿勢をロール・ピッチ・ヨー角で表すと $(\theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw})$ となるとする。このとき、姿勢クォータニオン 0q_n は、

$${}^0q_n = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta_{yaw}}{2} \\ 0 \\ 0 \\ \sin \frac{\theta_{yaw}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta_{pitch}}{2} \\ 0 \\ \sin \frac{\theta_{pitch}}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta_{roll}}{2} \\ \sin \frac{\theta_{roll}}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

と記述できる。一方、加速度センサより得られる重力加速度ベクトル G は、重力加速度 g 、真のロール角 θ'_{roll} およびピッチ角 θ'_{pitch} を用いて、

$$G = g \begin{bmatrix} \sin \theta'_{pitch} \\ -\cos \theta'_{pitch} \cos \theta'_{roll} \\ -\cos \theta'_{pitch} \sin \theta'_{roll} \end{bmatrix} \quad (7)$$

と書くことができる。これらを用いて、姿勢クォータニオン 0q_n を、

$${}^0q_n = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta_{yaw}}{2} \\ 0 \\ 0 \\ \sin \frac{\theta_{yaw}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta'_{pitch}}{2} \\ 0 \\ \sin \frac{\theta'_{pitch}}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta'_{roll}}{2} \\ \sin \frac{\theta'_{roll}}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

と補正する。

3.5 すべり補償ジャイロベースドオドメトリ

本節で述べるジャイロベースドオドメトリ手法は、過去に筆者らのグループが提案した2次元のすべり補償ジャイロベースドオドメトリ[2]を、3次元に拡張したものである。まず、クローラのすべりを定量的に扱うために、次の式で定義されるすべり率 s を導入する。

$$s = \frac{v - v'}{v} \quad (9)$$

ここで、 v はクローラの外周速度、 v' は路面に対するクローラ部中心の移動速度である。以降、クローラの左右をそれぞれ添え字 l および r で、時刻 $t = t_n$ におけるパラメータであることを添え字 n で表す。過去の研究により、左右クローラの外周速度比と左右クローラのすべり率比の間に近似的に次の関係があることが、半実験的に明らかになった。

$$\frac{s_{l,n}}{s_{r,n}} = -\text{sgn}(v_{l,n}v_{r,n}) \sqrt{\left| \frac{v_{r,n}}{v_{l,n}} \right|} \quad (10)$$

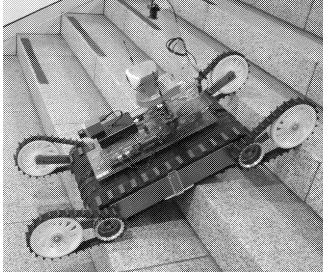


Fig. 4: The tracked vehicle testbed "Kenaf"

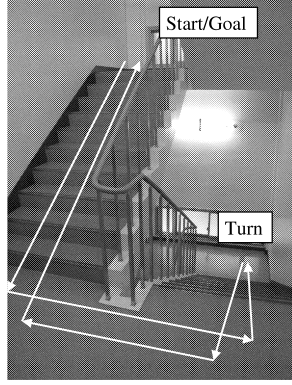


Fig. 5: The experimental path

また、ジャイロセンサにより計測される z_n 軸まわりの回転角速度 $\dot{\theta}_{z,n}$ について、運動学的関係から、

$$\dot{\theta}_{z,n} = \frac{(1 - s_{r,n})v_{r,n} - (1 - s_{l,n})v_{l,n}}{2d} \quad (11)$$

が言える。ここで、 $2d$ はロボットのトレッド長である。式 (10) と式 (11) を連立して解くことで、左右クローラのすべり率を推定することが可能となる。ロボットの並進速度 v_n を推定されたすべり率を用いて表すと、

$$v_n = \frac{(1 - s_{r,n})v_{r,n} + (1 - s_{l,n})v_{l,n}}{2} \quad (12)$$

となるから、すべりを補償した並進量 ΔX_n は、

$$\Delta X_n = v_n \Delta t \quad (13)$$

となる。ここで、 Δt はサンプリング周期である。

以上のすべり補償を図 2 の“並進量推定”において行うことで、クローラのすべりに起因する誤差を小さく抑えることが期待できる。

4 テストベッドを用いた走行実験

これまで述べてきた提案手法をクローラ型ロボットに実装し、その精度を走行実験により検証した。

4.1 実験装置

実験に使用したロボットは、本研究室で所有し開発を行っているクローラ型ロボット Kenaf である (図 4)。Kenaf には TechnoCraft 社製のマイコン内蔵型モータドライバ TEC-3PMD-RB-V1 が搭載されている。これに左右クローラの駆動モータに取り付けたエンコーダ、3 軸加速度センサおよび機体座標系に合わせて取り付けられた 3 台のジャイロセンサを接続し、内蔵マイコンにおいて自己位置推定演算を行った。なお、Kenaf のトレッド長は 140[mm]、サンプリング周期は 1[ms] である。

4.2 実験方法

実験場所としたのは、本学機械系 1 号館の 3 階から 4 階の階段部である。走行経路を図 5 に示す。4 階の階段手前を Kenaf の初期位置とし、階段を下って 3 階まで降り、3 階で 3 分間停止したあと、同じ階段を上って初期位置に戻る。この走行をテレオペレーションにより行い、拡張を行わない 3 次元ジャイロベースドオドメトリと提案手法について、推定位置履歴および走行終了時の推定自己位置を検証した。走行は、各手法につき 5 回ずつ行った。

Table 1: Estimated positions of the goal with the 3D gyro-based odometry

	x[cm]	y[cm]	z[cm]	norm[cm]
1	-39.1	-49.6	27.6	68.9
2	20.7	-48.4	59.2	79.3
3	-4.9	-21.1	51.9	56.2
4	12.7	10.7	62.5	64.7
5	43.7	23.0	61.7	79.0
ave	-	-	-	69.6

Table 2: Estimated positions of the goal with the proposed method

	x[cm]	y[cm]	z[cm]	norm[cm]
1	15.5	-37.0	22.7	46.1
2	-10.1	33.6	44.0	56.3
3	-37.9	67.0	34.5	84.3
4	11.6	-26.6	27.9	40.2
5	-7.0	17.2	62.6	65.3
ave	-	-	-	58.4

4.3 実験結果

実験結果を表 1 および表 2 に示す。推定位置と実際の位置の履歴が極めてよく一致していれば、走行終了時の推定自己位置はほぼ $(0, 0, 0)$ となるはずである。しかし、3 次元ジャイロベースドオドメトリでは 70[cm] 程度、提案手法でも 60[cm] 程度の誤差が生じるという結果となった。各手法において、もっとも平均に近い大きさの誤差を生じた試行の推定位置履歴を図 6 および図 7 に示す。

4.4 考察

表 1 および表 2 からは、両手法の違いを見てとることは難しいが、逆に共通した特徴が見受けられる。すなわち、 x 座標および y 座標に関しては正負にわたって値がばらばらになっているが、 z 座標に関しては全て正の値となっている。これは、両手法とも路面の傾斜がクローラのすべりに与える影響を考慮していないためであると考えられる。重力の作用等を考えると、斜面を下るときはクローラの外周速度を実際の移動速度が上回り、上るときは逆に外周速度が上回ることが予想できる。つまり、同距離を走行する場合、平面上と比較して、斜面を下るときはクローラの回転量は少なくとも、逆に上るときは多くなる。この結果、本実験の走行経路では初期位置と終了位置が同一であるにも関わらず、 z 座標の正方向に誤差が生じたと考えられる。

図 6 および図 7 からは、両手法の違いが見てとれる。提案手法では往路の履歴と復路の履歴がほぼ重なっているのに対し、拡張を行わない 3 次元ジャイロベースドオドメトリでは折り返し地点の前後で大きくロボットの進行方向にずれが生じているのがわかる。これは、提案手法では折り返し地点でのロボットの静止が検知され、その間に位置および姿勢の更新を停止し各種の補正を行っているのに対し、3 次元ジャイロベースドオドメトリでは静止中も姿勢推定における誤差が累積しているためといえる。

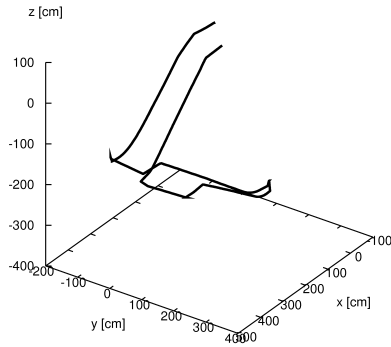


Fig. 6: A track record with the 3D gyro-based odometry (trial1)

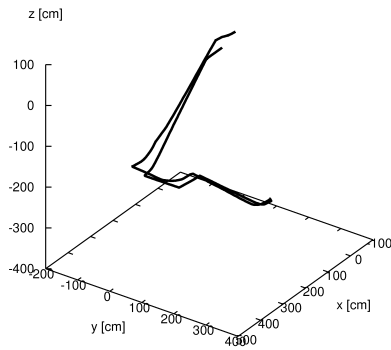


Fig. 7: A track record with the proposed method (trial2)

5 まとめと今後の課題

本稿では、レスキューロボットに有用であると考えられる外界および内界センサの融合による自己位置推定の基礎となる、複数内界センサの融合によるクローラ型ロボットの自己位置推定手法を提案した。提案手法では、ロボットの静止を検知し、その間に各種の補正を行うのみならず、移動中もすべり補償によって推定精度の向上を図っている。テストベッドによる走行実験の結果、拡張を行わない手法と比較し、提案手法がより高い推定精度を有することを確認した。

今後の課題としては、以下が考えられる。

- 長距離走行による自己位置推定精度の検証
- 斜面の影響を考慮したすべり補償
- 外界センサにより獲得した局所環境のマッチング等による推定位置の補正
- クローラアームの自律制御による不整地走行の安定化とそれに伴う自己位置推定の高精度化

参考文献

- [1] 吉田 他：“遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究”，第10回ロボティクスシンポジウム，pp.435-440, 2005
- [2] K.Nagatani, D.Endo, K.Yoshida：“Improvement of the Odometry Accuracy of a Crawler Vehicle with Consideration of Slippage”，Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, 2007
- [3] Borenstein, J., Feng, L.：“Gyrodometry:A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots”，Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996
- [4] J. Y. Wong：“Theory of Ground Vehicles”，Wiley-Interscience, 2001
- [5] 重原 他：“航空宇宙工学入門”，倍風館，1994

A クォータニオン

A.1 積

クォータニオンは、1つのスカラーと1つの3次元ベクトルから構成される。スカラー a とベクトル U からなるクォータニオン A と、スカラー b とベクトル V からなるクォータニオン B の積は、

$$A \times B = \begin{bmatrix} a \\ U \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ab - U \cdot V \\ aV + bU + U \times V \end{bmatrix} \quad (14)$$

で定義される。

A.2 任意軸まわりの回転による座標変換の表現

座標系 $x-y-z$ から新座標系 $x'-y'-z'$ への変換が、ベクトル (x, y, z) を軸とする角度 θ の回転により与えられるとき、この変換を表現するクォータニオン q は、

$$q = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \\ x \sin \frac{\theta}{2} \\ y \sin \frac{\theta}{2} \\ z \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

となる。

A.3 連続微小回転による座標変換の表現

クォータニオン $A = (a; U)$ 、 $B = (b; V)$ で表される連続的な2つの微小回転により、新座標系への変換が与えられるとする。 $|U| \ll 1$ 、 $|V| \ll 1$ であるから、この変換を表すクォータニオンは、微小回転を考慮する順番に関わらず、

$$A \times B = B \times A = \begin{bmatrix} ab \\ aU + bV \end{bmatrix} \quad (16)$$

としてよい。