

軟弱斜面におけるクローラ型移動ロボットの すべり補償オドメトリ

○山内元貴 今野陽太 永谷圭司 (東北大学)

1. 緒言

クローラは、広い設置面積を有しており、砂や砂利などの軟弱不整地において、高走破性能を発揮する。そのため、PackBot や Quince といった小型な Search and Rescue Robot に多く利用されている [10]。これらのロボットは、人の立ち入りが困難な場所への探査が求められる。その際、ロボットには、ロボット自身や探査対象の位置および周辺環境の把握のために、高い位置推定能力が要求される。

位置の推定には、測域センサによるマッチング [1]、カメラによる Visual Odometry [2] などがあり、これらは並行して運用されることはある [3] もの、最も基礎的な位置推定手法はオドメトリである。クローラ型移動ロボットのオドメトリは、クローラの周速度を積分して位置を推定する。そのため、走行路面の影響を受け、特に、軟弱な不整地を走行する際に発生すすべりにより、オドメトリに推定誤差が生じる。このすべりを補償するために、遠藤らはジャイロスコープから得られる情報から、旋回走行時のすべり率を推定する手法を提案した [5]。この手法は、主に2つのクローラを有するスキッドステア型の移動ロボットを対象として、左右のクローラすべり率の比と周速度の比の関係式(式(8))を利用したものである。硬質な地面や芝生で利用できることが検証されている。しかしながら、主に硬質な地面を走行する場合について検証されており、砂地や砂利などの軟弱な土壌の上を旋回走行する場合に、同様の関係式が成立するか未検証である。また、従来手法では、軟弱な土壌を走行する際に発生する横すべりについて考慮されておらず、特に、傾斜地を旋回走行する場合には、推定した位置に大きな誤差が発生する可能性がある。

本研究では、2つのクローラを有するクローラ型移動ロボットを対象(図1)として、斜面を旋回走行する際に発生する縦すべりおよび横すべりを推定する手法を提案する。縦すべりについては、従来手法である左右のクローラすべり率の比と周速度の比の関係式が、斜面走行時にも適用できるか検証する。横すべりについては、重回帰分析手法を用いて、ロボットのロール角、旋回半径、旋回量からすべり角を推定する手法について検証する。本稿では、まず、すべり率とすべり角を用いて、すべりを考慮したロボットの運動学を提案する。次に、テストベッドを軟弱斜面上で旋回走行させ、提案手法による位置推定精度を検証する。

2. すべりを考慮したオドメトリ

遠藤らが提案したすべり補償オドメトリ [5] では、縦すべりを考慮したクローラ型移動ロボットの運動学を提案した。本研究では、旋回走行時に進行方向と垂直

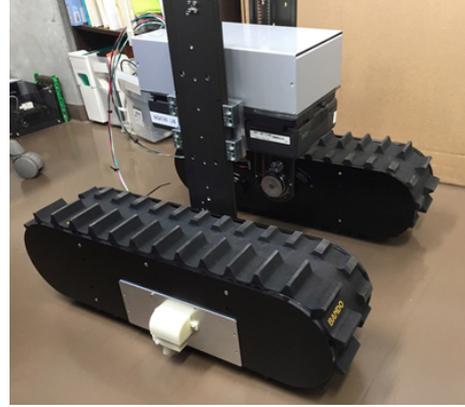


図1: クローラ型移動ロボット”Patako”

な方向の速度(横すべり速度)を加えた運動学について述べる。2つのクローラからなるロボットが、平坦な地面を走行する時(図2)、ロボット座標系 Σ_r における縦速度 V_x 、横すべり速度 V_y は、

$$V_x = \frac{v_r(1 - \alpha_r) + v_l(1 - \alpha_l)}{2d} \quad (1)$$

$$V_y = V_x \cdot \tan\beta \quad (2)$$

となる。ここで、 v_r, v_l は、エンコーダで計測した左右クローラの周速度、 $2d$ は左右クローラの距離(トレッド)、 α_r, α_l は、左右クローラのすべり率、 β はすべり角である。 α_r, α_l は、実際のクローラの周速度 v'_r, v'_l を用いて、以下のように定義される。

$$\alpha_r = 1 - \frac{v'_r}{v_r} \quad (3)$$

$$\alpha_l = 1 - \frac{v'_l}{v_l} \quad (4)$$

並進速度 V_x 、横すべり速度 V_y および旋回角 θ を用いた、2次元平面上のロボットの運動学は以下の通りとなる。

$$\dot{x} = V_x \cdot \cos\theta - V_y \cdot \sin\theta \quad (5)$$

$$\dot{y} = V_x \cdot \sin\theta + V_y \cdot \cos\theta \quad (6)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_r(1 - \alpha_r) - v_l(1 - \alpha_l)}{2d} \quad (7)$$

式(5)~(7)の運動学を用いて、すべりを補償したオドメトリを計算することができる。

2.1 すべり率の推定

縦速度 V_x について、式(1)に示すように、未知数は、すべり率 α_r, α_l である。遠藤らは、左右クローラの接

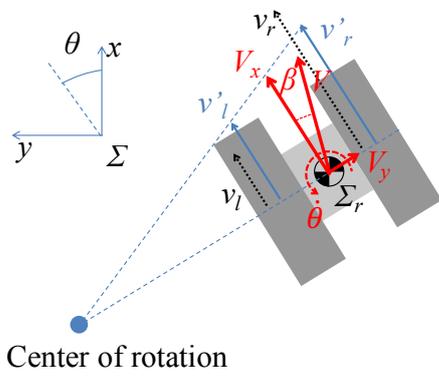


図2: 2次元平面上のロボットの運動学

地圧が等しい時, すべり率 α_r, α_l は, クローラの周速度と以下の関係があることを明らかにした [5].

$$\frac{\alpha_l}{\alpha_r} = -\text{sgn}(v_r \cdot v_l) \left(\left| \frac{v_r}{v_l} \right| \right)^n \quad (8)$$

式 (8) の関係式を利用するために, 旋回走行させ式 (8) における n を同定しておく. 式 (7) は, ロボットに搭載したジャイロスコプの旋回角速度と等しいことから, α_r, α_l を走行中に求めることができる. しかしながら, 式 (7) は, 軟弱な水平面や斜面上で成立することが確認されていない. そこで, 本研究では, 硬質な水平な地面および軟弱な斜面において旋回走行試験を行い, クローラの縦すべりと周速度との関係を明らかにする.

2.2 すべり角の推定

横すべり速度 V_y は, 式 (2) より V_x およびすべり角 β より求められる. ここで, V_x は式 (1) から得られるとすると, すべり角 β が未知数となる.

ロボットのすべり角は, 進行方向と垂直な方向に働く力 (以下, 横力) によって発生する. 軟弱な斜面上を旋回する際に, 旋回中に発生する横力は, クローラ側に働く排土抵抗とクローラ底部に働くすべり抵抗 [8] によるもの, およびクローラ自重の斜面と平行な成分がある. 排土抵抗は, 土壌の性質を表す土壌パラメータと, 旋回半径, 旋回量およびロボットの形状から求めることができる. すべり抵抗は, 旋回半径, 旋回量およびロボットの形状から求めることができる. また, クローラ自重による横力は, ロボットのロール角から計算できる. 以上から, 土壌は均一であり変化しないものとする, 旋回半径, 旋回量およびロール角が, 横力の変数となる. なお, 旋回量とは, ロボットが旋回を開始した時点をも $0[\text{deg}]$ とした, 旋回角の変位である.

本研究では, 重回帰分析手法を用いて, すべり角の予測式 (式 (9)) における係数を同定する. 重回帰分析とは, 1つの目的変数を複数の説明変数を用いて, 予測する線形分析手法である. 上述の通り, 同一のロボット, 走行環境の場合, 変化するパラメータは, 旋回半径, 旋回量およびロール角であるため, これらのパラメータおよび定数の4つを説明変数として, すべり角の予測式を次式のように定義する. なお, 旋回半径に

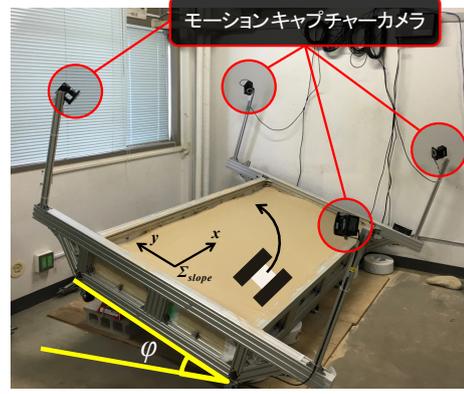


図3: 実験環境

関して, 半径が大きくなるにつれて旋回によるすべり角への影響が少なくなり, 半径が無限大 (直進) には, 旋回半径による影響がなくなることが想定されるため, 旋回半径の逆数を, 説明変数に用いることとする.

$$\beta = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \quad (9)$$

ここで, すべり角 β が目的変数, X_i は説明変数であり, a_i は各説明変数の係数である. 得られた実験結果から二乗和誤差 R_2 を最小となるように a_i の組みを同定する.

$$R_2 = \sum (B_i - \beta_i)^2 \quad (10)$$

ここで, B_i は, i 番目における計測値 (すべり角), β_i は i 番目における予測した目的変数 (すべり角) である. 重回帰分析により説明変数の係数を同定することで, 走行時にすべり角を推定することができ, 位置推定に利用することができる.

3. 旋回走行実験

3.1 実験環境

軟弱な斜面上における遠藤らに縦すべりモデルおよび, 重回帰分析によるすべり角の推定手法を検証するため, 屋内軟弱斜面フィールドにて旋回走行実験を行った. さらに, 推定したすべり率およびすべり角を自己位置推定に適用し, 従来手法と精度を比較した.

図3に実験環境を示す. 試験フィールドは, 長さ $2[\text{m}]$, 幅 $1[\text{m}]$, 深さ $0.15[\text{m}]$ であり, 豊浦砂が敷き詰められている. テストベッドは, 2つのクローラから構成された移動ロボット "Patako" (図1) を利用する. 表1にテストベッドの仕様詳細を示す. なお, 事前にテストベッドを硬質な地面 (P タイル) を走行させ, 式 (8) の n を同定した.

実験では, ロボットは旋回角 $0[\text{deg}]$ (図3における x 方向とロボットの向きが平行) な状態から走行を開始し, $90[\text{deg}]$ (y 方向とロボットの向きが平行) ほど旋回走行させる. この際, ロボットの位置および姿勢は, 試験フィールドの4隅に設置した MotionAnalysis 社製モーションキャプチャカメラ Osprey で計測した. 斜面の傾斜角は, $0, 8, 15[\text{deg}]$ として, 各傾斜角において, 指令速度を $5[\text{cm/s}]$, 指令角速度を $10, 20, 30[\text{deg/s}]$ と変化させ, 旋回走行させた.

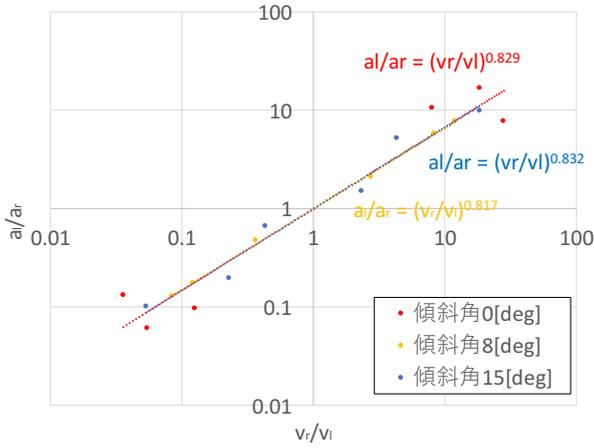


図 4: 周速度とすべり率の関係

3.2 縦すべり

横軸 $\frac{v_r}{v_l}$, 縦軸 $\frac{a_l}{a_r}$ をそれぞれ取り, 対数表示したグラフを図 4 に示す. 傾斜角が 0[deg] の時, $n=0.829$, 8[deg] の時, $n=0.817$, 15[deg] の時, $n=0.832$ となった. 表 1 に示したように, 硬質な地面 (P タイル) で同定してパラメータ n は 0.824 であり, 軟弱な地面の上を走行した値とほぼ同じ値となった.

以上から, パラメータ n は, 本実験環境においては, 均一かつ平坦な地面では,

1. 硬質な地面と軟弱な地面では, パラメータ n は変化しない.
2. 傾斜地を走行する場合でも, 水平面で同定した数値が利用できる.

ことが明らかになった.

3.3 横すべり

式 (9) で定義した予測式に基づき, 重回帰分析により求めた説明変数の係数および, 説明変数が目的変数に与える影響の大きさ (t 値) を表 2 に示す. 係数の絶

表 1: ロボット仕様

Weight	25 [kg]
Tread	0.41 [m]
Track Width	0.11 [m]
Track Length	0.60 [m]
n(p-tile)	0.824 [-]

表 2: 重回帰分析の説明変数の係数

係数名	数値	t 値
a_0 (定数)	-10.5	-23.3
a_1 ($\frac{1}{\text{旋回半径}}$)	25.6	18.5
a_2 (ロール角)	-0.335	-11.5
a_3 (旋回量)	0.163	30.2

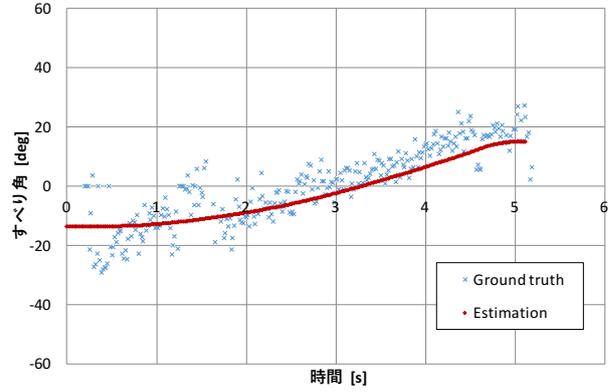


図 5: すべり角推定結果

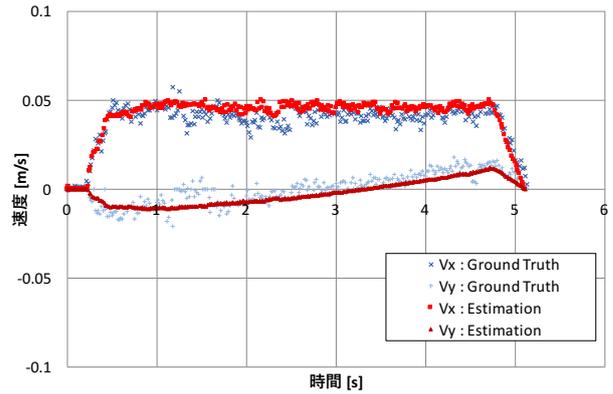


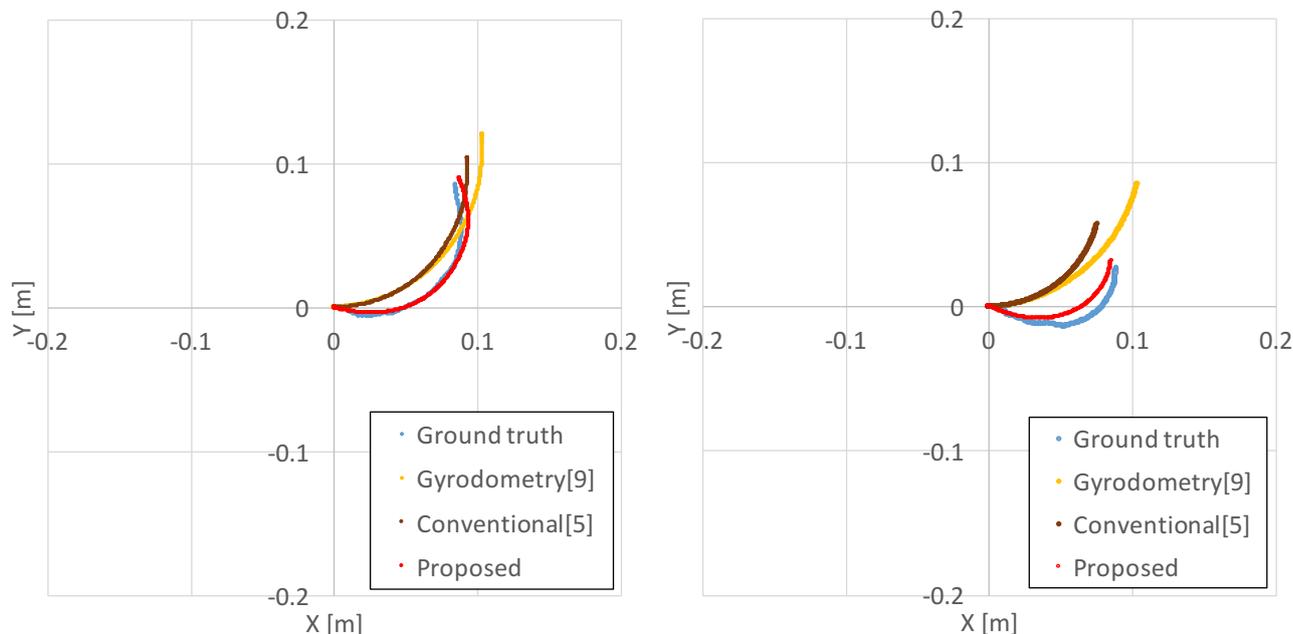
図 6: 並進速度および横すべり速度推定結果

対値は, 係数の単位系によって変化するため, 係数間の絶対値を比較することはできない. そのため, 重回帰分析では t 値を用いて, 係数の妥当性を評価する. t 値は, 説明変数の係数を, その標準誤差で割った値であり, 各係数の単位によらず, 目的変数への影響を表す数値である. ある説明変数の t 値の絶対値が, 2 を超えている場合, 目的変数へ効果のある変数であるとされている. ここで, 各係数の t 値の絶対値は全て 2 以上であることから, 設定した説明変数は, 目的変数への影響を与えていることがわかる.

各係数の正負について, 定数係数 a_0 およびロール角の係数 a_2 は負値であり, その他は正値となった. 斜面を旋回する場合, 自重による横力は, 斜面下向きに作用するため, ロール角の係数は負値となると考えられる.

3.4 位置推定

推定した縦すべり率およびすべり角から, V_x および V_y を求め, 運動学 (式 (5),(6)) へ適用する. 傾斜角 15[deg] の斜面を, ロボットが速度 5[cm/s], 角速度 20[deg/s] で旋回走行した際の実験結果を例として, すべり角および速度の推定結果を示す. 図 5 に, 横軸に時間, 縦軸にすべり角を取ったグラフを示す. 走行開始時は, すべり角は負値であるのに対し, 旋回するにつれてロール角が小さくなり, 一方で旋回量は増すため, すべり角は正値に変化している. 推定値は, 真値とオフセットがあるものの, 真値と近い挙動を示しており, すべり角の変化を推定することができている.



(a) (傾斜角 8[deg], 速度 5[cm/s], 旋回角速度 30[deg/s]) (b) (傾斜角 15[deg], 速度 5[cm/s], 旋回角速度 30[deg/s])

図 7: 位置推定結果

図 6 に、横軸に時間、縦軸に速度をとったグラフを示す。縦速度 V_x は、定常走行状態ではほぼ一定値であり、横すべり速度 V_y は、図 5 で示したすべり角の変化と同様に変化していることが確認出来る。

これらの V_x, V_y から推定した位置および、従来手法により推定した位置を図 7 に示す。いずれの結果においても、従来手法であるジャイロドメトリ [9] や縦すべりを考慮したオドメトリ [5] と比較して、実際の走行軌跡に近い推定結果が得られた。

4. まとめと今後の課題

本稿では、クローラ型移動ロボットが軟弱斜面を走行する場合に発生するすべりを補償する運動学を提案し、実機を用いた巡回走行試験を行い、提案手法を検証した。その結果、縦すべりに関して、軟弱な斜面を走行する場合についても、従来手法が成立することを確認した。また、重回帰分析手法より同定した説明変数の係数を用いて、すべり角を推定することで、横すべりを推定できることを示した。推定したすべりを、運動学に適用することで、従来手法と比較して位置推定精度が向上したことを確認した。

今後の課題として、異なる土壌条件やロボット形状における提案手法の有効性の確認が挙げられる。

参考文献

- [1] T. Suzuki, M. Kitamura, Y. Amano and T. Hashizume, "6-DOF localization for a mobile robot using outdoor 3D voxel maps," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2010.
- [2] S. A. Rodriguez F, V. Fremont and P. Bonnifait, "An experiment of a 3D real-time robust visual odometry for intelligent vehicles," in Proc. 12th Int. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems, 2009.
- [3] M. Achtelik, A. Bachrach, R. He, S. Prentice, and N. Roy. Stereo vision and laser odometry for autonomous helicopters in GPS-denied indoor environments. In Proceedings of the SPIE Unmanned Systems Technology XI, volume 7332, Orlando, F, 2009.
- [4] J. Shen, D. Tick and N. Gans, "Localization through fusion of discrete and continuous epipolar geometry with wheel and IMU odometry," in Proc. American Control Conf., 2011.
- [5] D. Endo, Y. Okada, K. Nagatani and K. Yoshida, "Path following control for tracked vehicles based on slip-compensating odometry," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2007.
- [6] J. Yi, J. Zhang, D. Song and S. Jayasuriya, "IMU-based localization and slip estimation for skid-steered mobile robots," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2007.
- [7] M. Reinstein, V. Kubelka and K. Zimmermann, "Terrain adaptive odometry for mobile skid-steer robots. Robotics and Automation", in Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 2013.
- [8] 近藤 博, 鈴木 賢一, 杉山 昇, "クローラ式車両の巡回抵抗に関する基礎的研究", 東海大学紀要, 1983
- [9] J. Borenstein and L. Feng, "Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots", in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1996.
- [10] K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, K. Otake, K. Yoshida, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, M. Fukushima and S. Kawatsuma, "Emergency Response to the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using Mobile Rescue Robots", Journal of Field Robotics, Volume 30, Issue 1, pp. 44-63, 2013.