

軟弱斜面回転時におけるクローラ型移動ロボットの横すべり補償制御

Side slip compensated control of tracked vehicle when rotating on a loose weak slope

○ 今野陽太 (東北大) 山内元貴 (東北大) 永谷圭司 (東北大)

Yota KONNO, Tohoku University, konno@frl.mech.tohoku.ac.jp

Genki YAMAUCHI, Tohoku University, genki@frl.mech.tohoku.ac.jp

Keiji NAGATANI, Tohoku University, keiji@ieee.org

When an eruptive activity began in active volcanoes, it is difficult to enter the volcano area. Therefore, expectations for robotic exploration are increasing to get information for observing the status of volcanos. Tracked vehicles have high terrainability, so it is suitable for exploring volcanic environments. However, when such a vehicle travels on a loose weak slope, a large side slip occurs, particularly in rotating motion. Odometry becomes inaccurate owing to this slip, and it fails to follow a specified route. In this research, we propose odometry and path following control method to compensate side slip. We verified the effectiveness of the control and the improvement of the position estimation accuracy in indoor sandy slope experiments.

Key Words: Unmanned Ground Vehicle(UGV), Tracked vehicle, Side slip compensated control

1 緒言

1.1 はじめに

日本での自然災害発生件数は非常に多く、災害への対策は欠かさないものとなっている。現在、日本にある110の活火山のうち、噴火警戒レベルが周囲1kmの立ち入りを制限されるレベル2を越えているものは10に達している[1]。これらの火山では、火砕流、噴石による被害が発生する恐れがあり、人が立ち入ったの探査は困難である。そこで、人の立ち入りが困難な場所でのロボットによる探査が期待されている。その際、ロボットは、ロボット自身や周辺環境の把握のための位置推定と指定された経路への追従を行う必要がある。

火山は、一般にスコリアや火山灰などに覆われた不整地であるため、広い接地面積を有し、不整地で高い走破性能を発揮するクローラが走行に適している。クローラ型移動ロボットの最も基礎的な位置推定手法であるオドメトリは、クローラの周速度を積分して位置を推定する手法である。そのため、オドメトリは、すべりの発生する軟弱不整地において走行路面の影響を受け、推定誤差が生じることで、ロボットの自己位置推定精度が悪化する。

1.2 先行研究

すべりを補償するため、遠藤らはジャイロスコープから得られる情報から、すべり率を推定する手法を提案した[2]。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を利用したものである。この手法により、ロボットの進行方向に発生するすべりについて飛躍的な改善がなされ、オドメトリの精度は向上した。ただし、この手法では、軟弱斜面上での走行時にロボットに大きな影響を及ぼすと考えられるロボットの進行方向と垂直な方向に発生する横すべりについて考慮されておらず、推定した位置に誤差が発生する可能性がある。

また、軟弱土壌において経路追従を行う際、すべりを補償するための制御として、石上らは四輪型移動ロボットでの横すべりを補償する経路追従制御を提案し、実機実験により制御の有効性を確認した[3]。この制御は、前輪が経路追従制御、後輪が横すべり補償制御を担うため、前輪と後輪を有し、それぞれが独立に駆動できることが適用のための条件となる。クローラ型移動ロボットには直接適用することが困難である。

また、実際に車両やロボットにおける経路追従はこれまでに様々な研究が行われてきた[4][5][6]。車両において、各車輪でのすべり角を考慮した運動学を構築し、経路追従を行う研究は様々なアプ

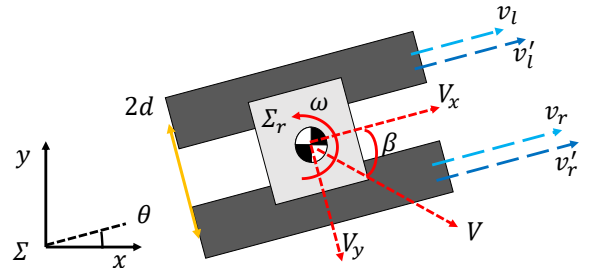


Fig.1 Robot kinematics including side slip

ローチで行われていた。しかし、軟弱斜面のような、大きなすべりの発生する環境で経路追従を行っているものは少なく、常に一定の横すべりが発生するような環境での、クローラ型移動ロボットによるすべり角を考慮した経路追従制御は行われていなかった。

1.3 研究の目的

以上を踏まえて、本研究では、スキッドステア型のクローラ移動型ロボットを対象とした横すべり補償オドメトリ、横すべり補償経路追従制御を提案し、実機実験による軟弱斜面での円弧経路追従試験を行い、提案手法の有効性、位置推定精度を検証する。

2 横すべり補償オドメトリ

2.1 従来のすべり補償オドメトリ

遠藤らは、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[2]。二つのクローラからなるロボットによる平坦な地面の走行を考える。 v_r, v_l をクローラの左右の周速度、 $2d$ を左右クローラの距離(トレッド)、 α_r, α_l を左右クローラのすべり率、 β

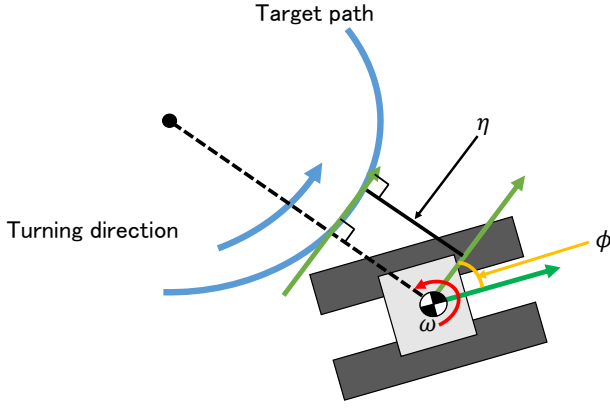


Fig.2 Basic path following

をすべり角とすると、ロボット座標系 Σ における並進速度 V は

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

となる。また、 α_r, α_l は実際のクローラの周速度を v'_r, v'_l とすると、

$$\alpha_r = 1 - \frac{v'_r}{v_r} \quad (2)$$

$$\alpha_l = 1 - \frac{v'_l}{v_l} \quad (3)$$

となる。式 (1)~(3) から以下のように x 方向変化量、 y 方向変化量、ロボット姿勢の変化量が計算できる。

$$\dot{x} = V \cos \theta = \frac{v_r(1 - \alpha_r) + v_l(1 - \alpha_l)}{2} \cos \theta \quad (4)$$

$$\dot{y} = V \sin \theta = \frac{v_r(1 - \alpha_r) + v_l(1 - \alpha_l)}{2} \sin \theta \quad (5)$$

$$\dot{\theta} = \omega = \frac{v_r(1 - \alpha_r) + v_l(1 - \alpha_l)}{2d} \quad (6)$$

式 (4)~(6) を時間積分することで、ロボット進行方向と平行な方向に発生するすべりを補償したオドメトリとなる。

2.2 横すべり補償オドメトリ

Fig.1 は、二つのクローラからなるロボットによる走行を、横すべりを考慮した形式で表したものである。従来のすべり補償オドメトリにて使用したパラメータに加えて、すべり角 β を考慮すると、ロボット座標系における並進速度 V_x 、横すべり速度 V_y は

$$V_x = \frac{v_r(1 - \alpha_r) + v_l(1 - \alpha_l)}{2} \quad (7)$$

$$V_y = V_x \cdot \tan \beta \quad (8)$$

となり、オドメトリは

$$\dot{x} = V_x \cos \theta - V_y \sin \theta \quad (9)$$

$$\dot{y} = V_x \sin \theta + V_y \cos \theta \quad (10)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_r(1 - \alpha_r) + v_l(1 - \alpha_l)}{2d} \quad (11)$$

となる。この時、すべり角 β が未知数として存在する。本研究グループでは、すべり角 β を重回帰分析により同定する手法を示しており [7]、本実験でも同様の手法を用いることとした。今回は、説明変数をロボットの進行方向と平行な方向に発生する速度、旋回速度、ロボットのヨー角、ロボットのロール角とし、すべり角の予測式を次式のように定義する。

$$\beta = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 \quad (12)$$

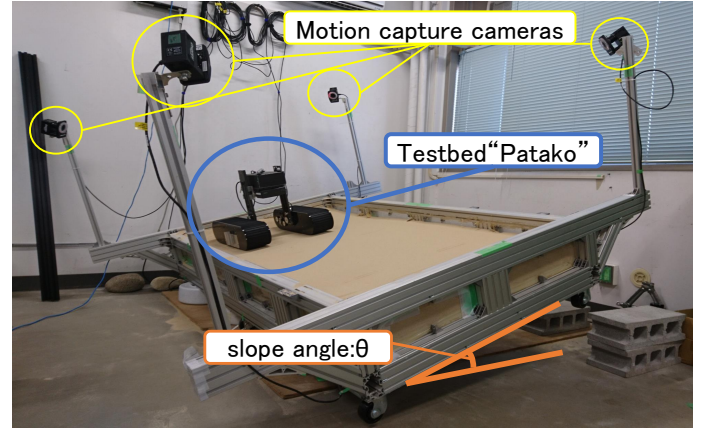


Fig.3 Experiment environment

ここで、すべり角 β が目的変数、 X_i は説明変数、 a_i は各説明変数の係数となる。 a_i を事前に同定しておくことで走行中にオンラインですべり角を推定し、経路追従における位置推定、ならびに制御式に利用することが可能となる。

3 横すべり補償経路追従制御

3.1 従来経路追従制御

一般にロボットの経路追従は、目標経路からの偏差を検知するための位置推定と、目標経路を追従するために指令を与える制御式が必要となる。Fig.2 に示す η は、目標経路に対する位置偏差、 ϕ は目標姿勢に対する角度偏差、 ω は現在の角速度を表している。 k_η, k_ϕ, k_ω をそれぞれの偏差に対応するゲインとすると、従来手法での角速度の制御式は、以下ようになる。

$$\dot{\omega} = -k_\eta \eta - k_\phi \phi - k_\omega \omega \quad (13)$$

$$\omega_{ref} = \omega + \dot{\omega} \Delta t \quad (14)$$

ω_{ref} は経路を追従するための目標角速度である。また、今回の実験では、円弧経路追従を行うため、 ω は以下のように取り扱われる。

$$\omega_{diff} = \omega - \omega_{required} \quad (15)$$

$$\omega_{required} = \frac{v}{r + \eta} \quad (16)$$

ここで、 $\omega_{required}$ は円を旋回するために必要な角速度であり、 ω_{diff} を式 (13) の ω に代入することで円弧経路追従が成立する。

3.2 横すべり補償経路追従制御

前章によって推定されたすべり角を位置推定に使用した場合、軟弱斜面上に発生するすべりの影響を考慮した制御が可能となる。しかし、その場合、位置偏差が発生してから制御式への補償を行うため、すべり角はフィードバック項となって考慮されるため、すべりに対する応答性が遅くなってしまうと考えられる。すべりに対する応答性を向上させるため、推定されたすべり角 β を、フィードフォワード項として、目標直線に対する角度偏差に加わると考え、本研究では角速度の制御式を以下のように提案する。ただし、比較のため、各ゲインは従来手法で使用した値から変更しないものとする。

$$\dot{\omega} = -k_\eta \eta - k_\phi (\phi - \beta) - k_\omega \omega \quad (17)$$

$$\omega_{ref} = \omega + \dot{\omega} \Delta t \quad (18)$$

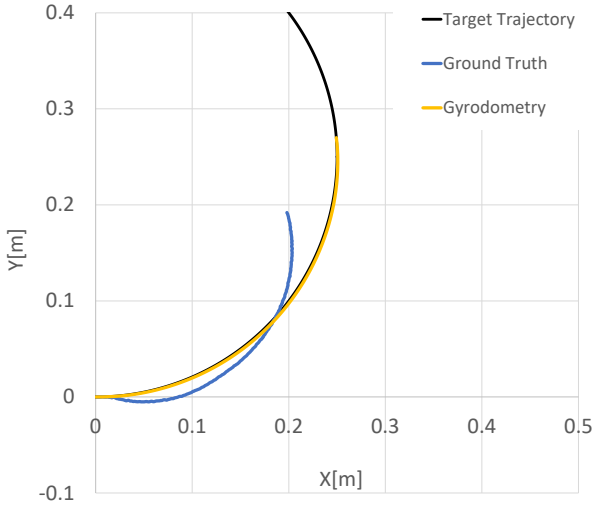


Fig.4 Result: Conventional method

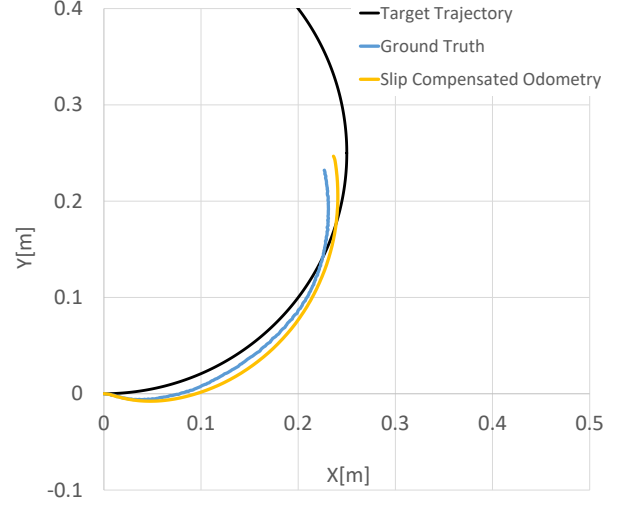


Fig.5 Result: Only slip compensated odometry method

4 横すべり補償オドメトリならびに横すべり補償経路追従制御の検証実験

4.1 実験条件, 目的

提案した位置推定手法と制御手法の有用性を検証するため, 従来のオドメトリ (姿勢の変化量の計算にジャイロドメトリ [8] を利用) と従来の制御追従手法を用いた走行との比較実験を行った. 具体的には, 従来の位置推定ならびに従来の制御追従手法を利用するパターン, 提案する横すべり補償オドメトリと従来の制御追従手法を利用するパターン, 提案する横すべり補償オドメトリと提案する横すべり補償経路追従制御を利用するパターンの3通りに対して, 走行試験を行った. 実験は, 斜面の傾斜角 θ を 15[deg], 指令速度を 5[cm/s] として, 各手法で軟弱斜面での円弧経路追従走行をそれぞれ 3 回行い, 目標経路とオドメトリの誤差を比較することで制御の有効性を検証した. さらに, ロボットの走行軌跡とオドメトリの誤差を比較することで位置推定精度を検証することとした.

4.2 実験環境

Fig.3 に実験環境を示す. 試験フィールドは, 長さ 2[m], 幅 1[m], 深さ 0.15[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" を使用した. Table.1 にテストベッドの仕様を示す. 走行の際, ロボットの位置および姿勢は, 試験フィールドの四隅に設置した MotionAnalysis 社製モーションキャプチャカメラ Osprey で計測した.

4.3 実験結果

Fig.4 は従来手法, Fig.5 は横すべりオドメトリのみを用いた手法, Fig.6 は提案手法で経路追従を行った結果である. 各手法 3 回の走行ではほぼ同様の傾向がみられたため, それぞれの代表例を示している. 全ての手法は半径 $r = 0.25[m]$, 中心 $X = 0, Y = 0.25[m]$ の円を目標経路として, $X = 0, Y = 0$ を走行開始地点とした. Fig.4 より, 従来手法は, オドメトリが目標経路を追従しているが, ロボットの走行軌跡は目標経路から離れた位置を走行していることがわかる. Fig.5 より, 横すべり補償オドメトリのみを用いた手

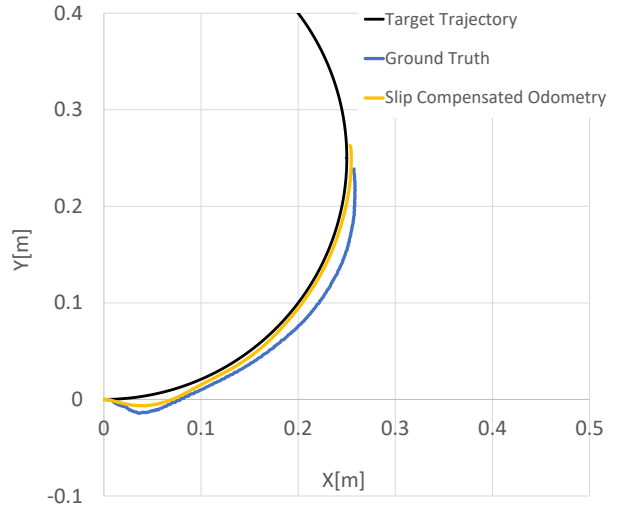


Fig.6 Result: Proposal method

法では, 横すべり補償オドメトリはすべりの影響を考慮できているが, 目標経路の追従には至っていない. 走行軌跡もそれに伴い目標経路の追従に至っていない. これに対し, Fig.6 より, 提案手法では, 横すべり補償オドメトリはすべりの影響を考慮し, かつ目標経路を追従している. 走行軌跡もそれに伴い, 目標経路を追従するような軌跡を描いている.

各手法の目標経路と使用したオドメトリの誤差を Fig.7 に示す. 誤差は目標経路の円に対して内側にずれたときは負の値, 外側にずれたときは正の値をとることとした. 従来手法でのオドメトリはほぼ誤差なく経路を追従しているとみなしている. 横すべり補償オドメトリのみを用いた手法での横すべり補償オドメトリは, 誤差が増加した後, 緩やかに減少し続け, 最終的に負の値に達する. 提案手法での横すべり補償オドメトリは, 誤差が増加した後, 横すべりオドメトリのみ手法よりも早く誤差の減少が始まり, 目標経路からの誤差は 0.5[cm] 程度で推移を続ける結果となった.

3 回の計測から, オドメトリと走行軌跡の平均二乗誤差平方根 (RMSE) の平均値, 標準偏差をとったものを Fig.8 に示す. RMSE は以下の式で示す. ただし, $(x_i - c)$ はオドメトリと走行軌跡の誤差, n は標本数である.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - c)^2}{n}} \quad (19)$$

Table 1 ロボット仕様

本体総重量	25[kg]
トレッド長さ	424[mm]
クローラ幅	110[mm]
クローラ長さ	600[mm]

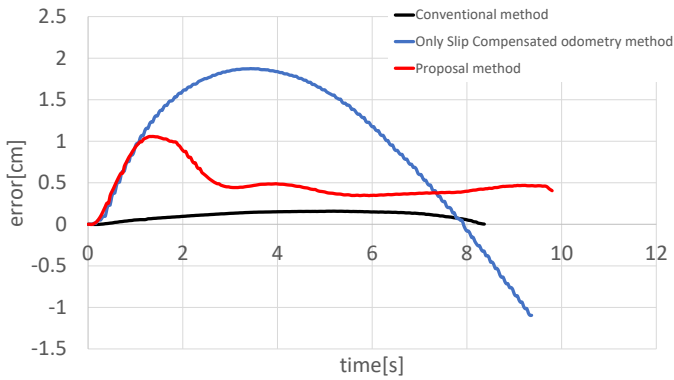


Fig.7 Error between odometry and target trajectory

従来手法は RMSE が 6[cm] 程度となる。横すべりオドメトリを用いた 2 手法ではどちらも RMSE は 2[cm] 程度に収まった。また、改良を加えた手法の評価指標として RMSE の改善率を用いた。RMSE の改善率は以下の式で定義される。

$$RMSE \text{ の改善率} = \frac{RMSE_c - RMSE_t}{RMSE_c} \times 100 \quad (20)$$

ここで、 $RMSE_c$ は基準となる手法 (今回は従来手法) の RMSE、 $RMSE_t$ は改良した手法の RMSE である。RMSE の改善率は、横すべりオドメトリのみ手法が 66%、提案手法が 60% となった。

4.4 考察

Fig.4 より、従来手法ではオドメトリがすべりを検知できず、目標経路を追従しているとみなしているが、走行軌跡はすべりの影響により、目標経路からずれていく結果となっている。また、Fig.5 より、横すべり補償オドメトリのみを用いた手法ではオドメトリがすべりを検知しているため、従来手法と比較して目標経路への追従性が上がっていると考えられる。しかし、すべりの影響はフィードバックでのみ考慮されているため、すべりに対しての応答性が悪くなっている。このことは、Fig.7 の誤差の値が緩やかに増減し、0 付近で収束しないことから明らかである。Fig.6 より、提案手法ではすべりの発生を検知した後、横すべり補償オドメトリは目標経路に復帰することが可能となっている。これは、すべりの影響をフィードフォワードとしても取り扱っているため、すべりに対する応答性が向上しているためだと考えられる。このことは、Fig.7 の誤差の値が、横すべりオドメトリのみ手法と比べて、早い段階で減少を始めて、誤差が 0.5[cm] と小さな値となることから正しいと考えられる。よって、提案手法は、従来手法、横すべりオドメトリのみを用いた手法と比較し、すべりに対して有効であると考えられる。

また、Fig.8 より、従来手法では、横すべり補償オドメトリを使用していないため、走行軌跡のすべりの影響がオドメトリに反映されず、走行軌跡とオドメトリの誤差は大きな値となってしまうことがわかる。横すべり補償オドメトリを用いた二つの手法では、提案手法と比較してオドメトリと走行軌跡の誤差は小さな値に収束していることから、自己位置推定の精度が向上していることが確認できる。また、横すべりオドメトリのみを用いた手法と提案手法を比較した際、提案手法は若干誤差が大きくなる値となっている。これは、走行開始直後に角速度が大きくなり、横すべり補償オドメトリで推定できない挙動を示しているためだと考えられる。

5 結言

本研究では、クローラ型移動ロボットが軟弱斜面を走行する際に発生する横すべりを補償する運動学から、横すべり補償オドメトリ、横すべり補償制御の提案を行い、実機を用いた円弧経路追従走行実験を行った。その結果、提案手法を適用することで、目標経路とオドメトリの推定値の誤差が、横すべり補償オドメトリ

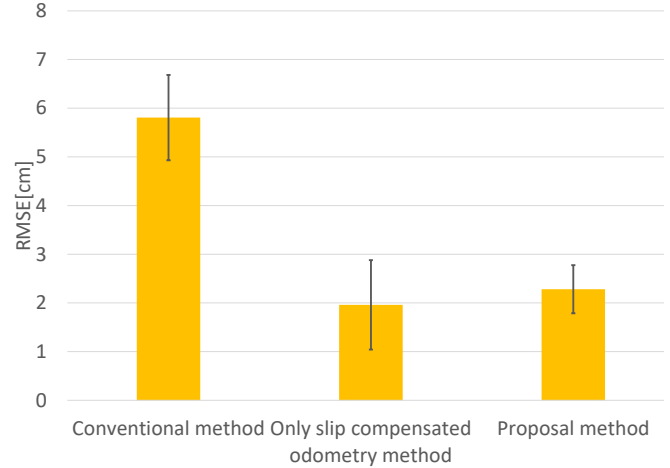


Fig.8 Root mean squared error between odometry and ground truth

のみを用いた場合から改善されることを示し、提案手法がすべりに対して有効に働くことを確認した。さらに、横すべり補償オドメトリを用いた手法では、走行軌跡とオドメトリの推定値との誤差が減少することから自己位置推定の精度が向上することを確認した。

今後の課題として、横すべり補償オドメトリを用いた場合、不安定な挙動により位置推定が困難となってしまう領域での挙動の安定化、ならびにオドメトリの改良があげられる。

参考文献

- [1] 日本の主な火山活動. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1701/12a/1612vol1-japan.pdf/>, 2017.
- [2] Daisuke Endo, Yoshito Okada, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida. Path following control for tracked vehicles based on slip-compensating odometry. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 2871–2876. IEEE, 2007.
- [3] Genya Ishigami, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida. Slope traversal experiments with slip compensation control for lunar/planetary exploration rover. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pp. 2295–2300. IEEE, 2008.
- [4] Romain Pepy, Alain Lambert, and Hugues Mounier. Path planning using a dynamic vehicle model. In *Information and Communication Technologies, 2006. ICTTA'06. 2nd*, Vol. 1, pp. 781–786. IEEE, 2006.
- [5] S Ali A Moosavian and Arash Kalantari. Experimental slip estimation for exact kinematics modeling and control of a tracked mobile robot. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 95–100. IEEE, 2008.
- [6] Jorge Villagra, Vicente Milanés, Joshué Pérez, and Jorge Godoy. Smooth path and speed planning for an automated public transport vehicle. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, No. 2, pp. 252–265, 2012.
- [7] 山内元貴, 今野陽太, 永谷圭司. 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. 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 2X1–06, September 2016.
- [8] Johann Borenstein and Liqiang Feng. Gyrodometry: A new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots. In *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, Vol. 1, pp. 423–428. IEEE, 1996.