

スライディングモード制御による 除雪ロボットの軌道追従制御

Line following control for the snow removal robot using
the sliding mode control

○駒米光太郎*, Ernesto Rivas*, 中村久一郎*, 水戸部和久*

○Koutarou Komagome*, Ernesto Rivas*,
Kyuitirou Nakamura*, Kazuhisa Mitobe*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード : 除雪ロボット(snow removal robot), 屋外ロボット(outdoor robot),
自律化(automation), 軌道追従制御(line following control)

連絡先 : 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16

山形大学工学部機械システム工学科 6-501 水戸部研究室

水戸部和久, Tel : 0238-26-3230, Fax : 0238-26-3205, E-mail : mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp

1.はじめに

本研究は、自律移動型の小型除雪ロボットへの応用を目的として、軽量且つ小型のクローラーロボットの軌道追従制御を問題とする。目的とするロボットは、雪を回収しブロック状に成形するロボットと雪ブロックを運搬するロボットからなるシステムである。軽量なクローラーロボットが移動しながら雪ブロックを回収するためには、外乱の影響を打ち消すロバスト性が高い軌道追従制御が必要である。

本研究では、通常の状態フィードバック制御に加えスライディングモード制御を検討する。スライディングモード制御は目標

ダイナミクスへのフィードバックを高ゲインで行うため、状態フィードバック制御に比べロバスト性が期待できる制御である。車輪型ロボットのスライディングモード制御については非ホロノミック拘束下での運動制御の問題として議論され、軌道の安定化[1]、外乱に対するロバスト性[2][3]、離散時間での実装[4]などが報告されている。

本論文では、本体に搭載された USB カメラおよび ARToolKit[5]を用いて自己位置を測定し、小型除雪ロボットの軌道追従制御としてのスライディングモード制御の評価について述べる。

2. 試作小型除雪ロボットのハードウェア

軌道追従制御実験のために試作したクローラーロボットの外観を Fig.1 に示す. 試作したロボットは雪上車のラジコン車に以下の変更を施したものである. 前面に雪ブロックを回収するためのグリッパを取り付けた. 左右のクローラーを駆動するモーターを制御性の良いモーターに変更し, 減速機にモーターの回転を検出するロータリーエンコーダーを左右の回転軸に取り付けた. 上部には自己位置検出のために USB カメラを取り付け, 画像情報は外部の PC に取り込まれる. 各クローラーの回転速度はロボット内部に実装したマイコンが制御する. 回転速度の指令は PC から USB ケーブルを介して行う. 制御システムの構成を Fig.2 に示す.

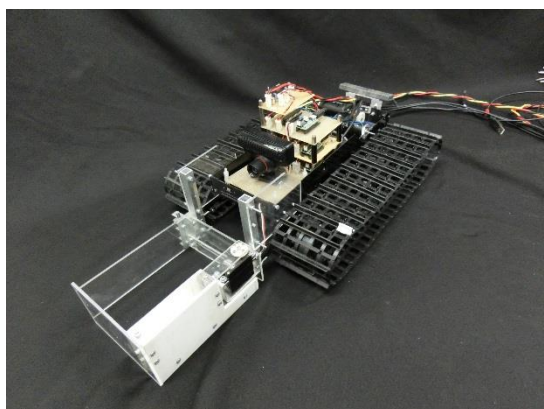


Fig.1 Snow removal robot prototype

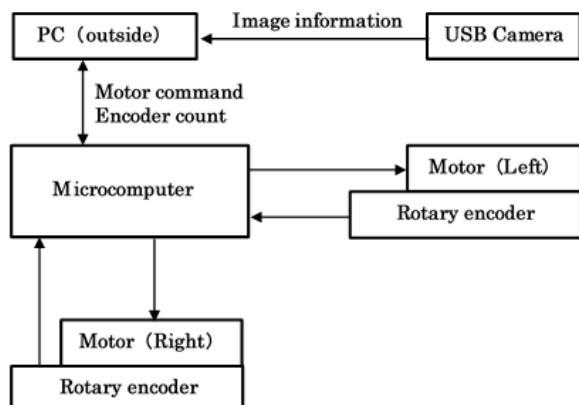


Fig.2 Structure of the control system

3. スライディングモード制御の追従制御則

クローラーロボットの運動を簡単な 2 輪の差動駆動モデルでモデル化する. Fig.3 に示すような X-Y 平面におけるロボットの運動を式(1), (2)の通りモデル化する.

$$\dot{x} = v \sin \theta \cong v \theta \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = u \quad (2)$$

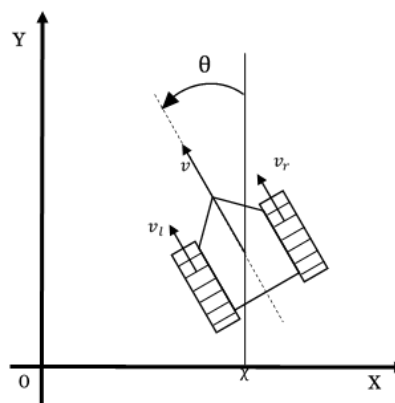


Fig.3 The unicycle model

ここで, ロボットの速度 v および角速度 $\dot{\theta}$ は左右のクローラーの速度により操作可能と考える. 左右のクローラー速度を v_l, v_r , 左右のクローラー間の距離を L とすれば, 次式が成り立つ.

$$v = \frac{v_l + v_r}{2} \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = u = \frac{v_l - v_r}{L} \quad (4)$$

以下では, v を一定とする拘束下で角速度の指令値 u を制御入力として制御系を構成する. スライディングモード制御の切り替え線を次式で与える.

$$x + \alpha \theta = 0 \quad (5)$$

ここで, α は正数であり制御下でのロボットの運動に影響する. スライディングモード制御においてロボットの運動は $\theta = \dot{x} / v$ により,

$$x + \frac{\alpha}{v} \dot{x} = 0 \quad (6)$$

を満足する. すなわち,

$$x(t) = x_0 e^{-\frac{v}{\alpha}t} \quad (7)$$

$$\theta(t) = \frac{x_0 \alpha}{v} e^{-\frac{v}{\alpha}t} \quad (8)$$

となり、いずれも指数関数的に0に収束する。切り替え線への到達条件から制御則を決定する。入力 u を $u = -k_x x$ で与え、Fig.4に示すような X - θ 平面において状態 (x, θ) が2つの領域Iおよび領域IIのどちらかにあるかによってフィードバックゲイン k_x を切り替える制御を行った。ここで、式(5)より $s = x + \alpha\theta$ とおく、リアプノフ関数の候補として、

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (9)$$

を考えると、

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(\dot{x} + \alpha\dot{\theta}) \\ &= s(v\theta + \alpha u) = -s(\alpha k_x x - v\theta) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。制御則はFig.4に示す領域Iおよび領域IIに対して以下の通りに定める。領域Iにおいては、

$$u = -k_I x \quad (11)$$

ここで、ゲインは $0 > k_I > -\frac{v}{\alpha^2}$ を満足する。領域IIにおいては、

$$u = -k_{II} x \quad (12)$$

ここで、ゲインは $k_{II} < -\frac{v}{\alpha^2}$ とする。いずれの領域でも $\dot{V} \leq 0$ となり、状態 (x, θ) は切り替え線に拘束される。

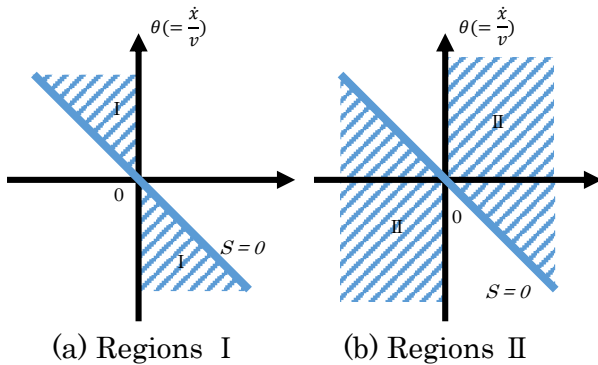


Fig.4 Sliding surface $s = 0$ and regions I and II

4. ARToolKit

本研究では、小型除雪ロボットの軌道追従制御に ARToolKit を使用した。ARToolKit とは、AR アプリケーションの実装を支援する C/C++用のプログラミングライブラリである。ARToolKit を使用することにより、カメラでのマーカの認識、マーカに対するカメラの位置・姿勢を検出することが可能となる。Fig.5 に ARToolKit の座標系を示す。

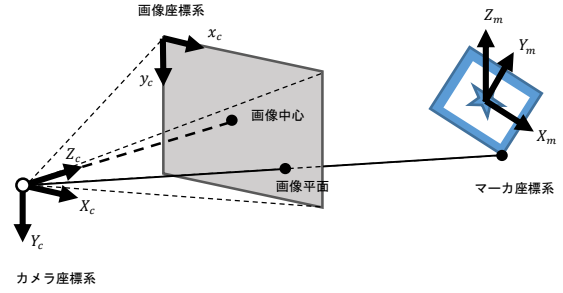


Fig.5 Coordinate system of the ARToolKit

ロボットとマーカの関係を図.6に示す。

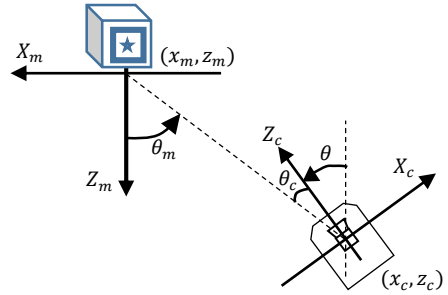


Fig.6 Positional relationship between the robot and marker

Fig.3 におけるロボットの姿勢角 θ の計算法を以下に示す。ARToolKit により得られたカメラの座標系でのマーカの位置 (x_m, z_m) から、座標変換によりマーカ座標系でのカメラ位置 (x_c, z_c) を得る。カメラはロボットの進行方向を向いているので、Fig.3 におけるロボットの姿勢角 θ は以下の通り計算できる。まず、カメラ座標から見たマーカの方角 θ_c を求める。

$$\theta_c = \tan^{-1}(x_c/z_c) \quad (13)$$

同様にマーカ座標から見たカメラの方向 θ_m は,

$$\theta_m = \tan^{-1}(x_m/z_m) \quad (14)$$

θ_c, θ_m により, ロボットの向き θ は次式となる.

$$\theta = \theta_c + \theta_m \quad (15)$$

5. 実験環境

小型除雪ロボットシステムにおいて, 運搬ロボットが雪ブロックを回収する作業を想定して, 目標物に対して所定の位置から接近する制御の実験を行う. Fig.7 に示すようにロボット前方に目標であるマーカを配置し, ARToolKit によりカメラ画像からマーカに対するロボットの位置・姿勢を検出する. 検出された位置・姿勢値を使用して軌道追従制御を行う. 目標であるマーカは大小2つを使用する. 単一のマーカの場合, マーカとカメラ間の距離により位置・姿勢の検出値に誤差が生じてしまう. 走行時にマーカとカメラ間の距離によって認識するマーカを切り替えることにより, 位置・姿勢の検出値の安定化を行う.

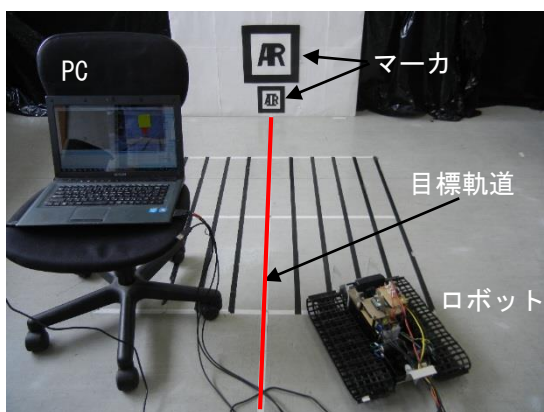


Fig.7 Experimental environment

6. 走行実験と実験結果

6.1. 実験方法

Fig.8 に示すようにマーカからの距離が2000[mm]の地点をスタートラインとし, マーカの300[mm]前をストップラインとする. スライディングモード制御を実装したロボットに目標軌道からの初期誤差や制御の設

定値の変更, 外乱を与えた際の目標軌道上への収束性の確認, 同じ条件化での状態フィードバック制御との比較を行うことでスライディングモード制御の評価を行う.

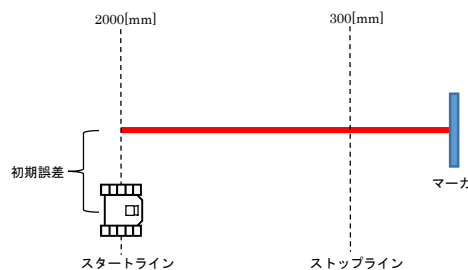
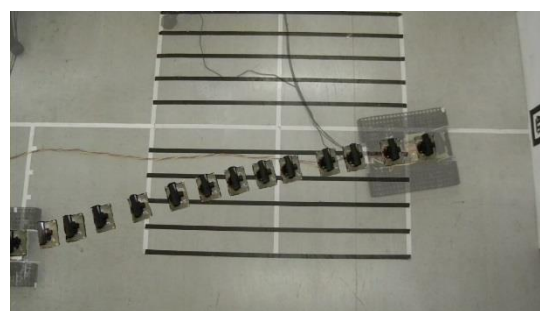


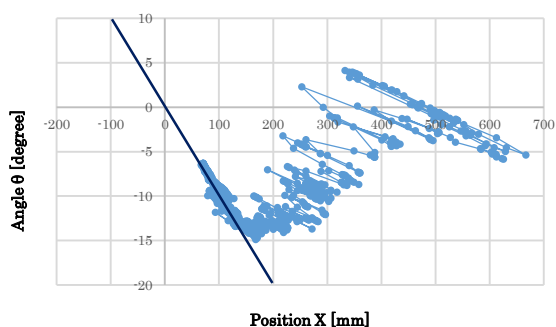
Fig.8 Experimental setup

6.2. スライディングモード制御の実験結果

スライディングモード制御を実装したロボットに初期誤差 500[mm]を与えて走行実験を行った. Fig.9 にロボットの軌跡および実験時のロボットの状態(x, θ)を示す.



(i) Trajectory of the robot



(ii) Relationship of the x and θ

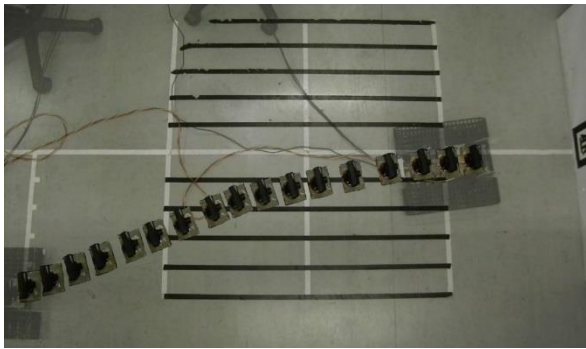
Fig.9 Experimental result of the sliding mode control

スライディングモード制御を実装したクローラーロボットが目標軌道上に収束しながら走行していることが Fig.9 から確認できる.

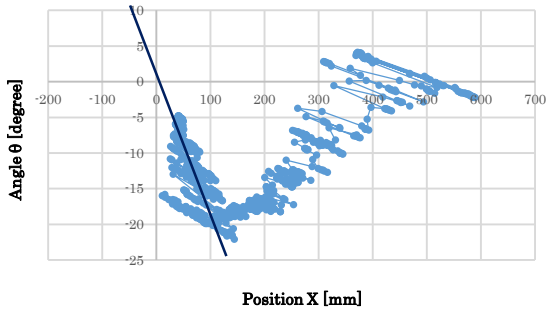
さらに、ロボットの状態 (x, θ) が切り替え線に拘束されていることも確認することができる。このことから、スライディングモードがロボットに作用していることが確認できる。

6.3.切り替え線に関する実験結果

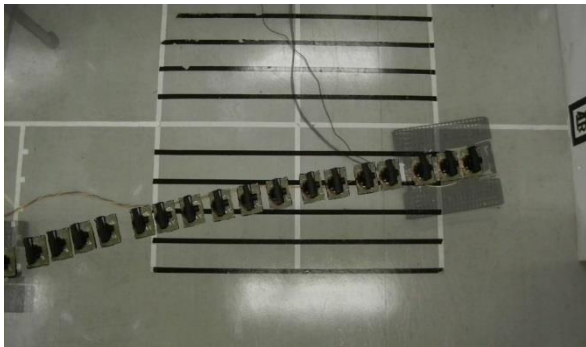
スライディングモード制御の切り替え線の傾きがロボットに及ぼす影響を確認するため、式(5)の α の値を変えて実験を行う。Fig.10 にロボットの軌跡および実験時のロボットの状態 (x, θ) を示す。初期誤差は500[mm]である。



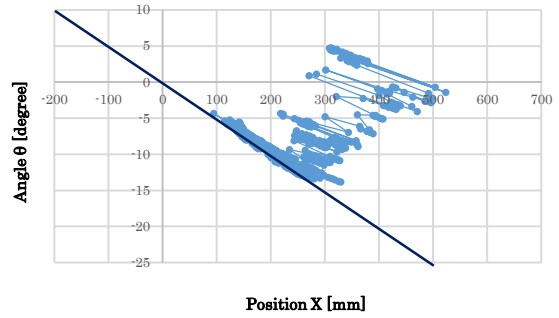
(i) Trajectory of the robot
 $\alpha = 5$



(ii) Relationship of the x and θ
 $\alpha = 5$



(i) Trajectory of the robot
 $\alpha = 20$



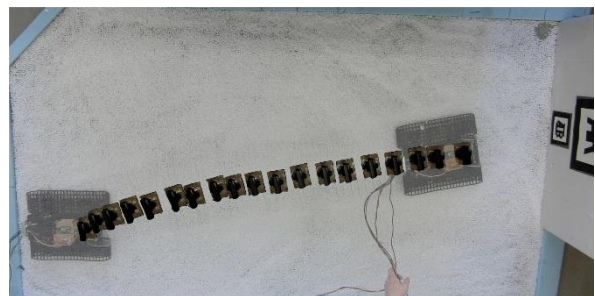
(ii) Relationship of the x and θ
 $\alpha = 20$

Fig.10 Experimental result about the line of the sliding mode control

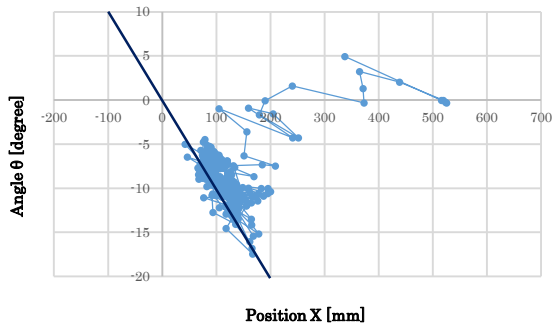
Fig.10 より、スライディングモード制御の切り替え線の傾きによってロボットの走行経路の変化を確認することができる。 $\alpha = 20$ の場合、切り替え線の傾きが緩やかなためロボットの角度変化が小さくマーカに向かって一直線に走行している。 $\alpha = 5$ の場合、切り替え線の傾きが急なためロボットの角度変化が大きくなり、マーカに向かって曲線を描きながら走行している。相対的に切り替え線の傾きが急な方がロボットの角度変化が大きくなり目標軌道への収束性が良くなる結果を得た。

6.4.ロバスト性に関する実験結果

スライディングモード制御のロバスト性を確認するため、ロボットが走行する路面の摩擦抵抗を小さくして実験を行う。摩擦抵抗を低減するために直径6[mm]の発泡スチロールボールを使用する。Fig.11 にロボットの軌跡および実験時のロボットの状態 (x, θ) を示す。初期誤差は500[mm]である。



(i) Trajectory of the robot



(ii) Relationship of the x and θ

Fig.11 Experimental result about the robustness of the sliding mode control

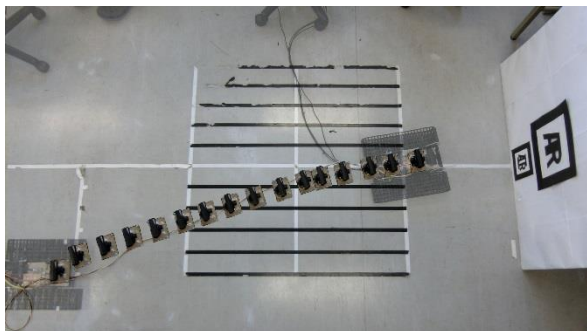
摩擦抵抗が小さい路面の走行の場合でも、マーカーに向かって曲線を描きながら走行していることが確認できる。Fig.11より、ロボットの状態 (x, θ) が切り替え線に拘束されていることから、スライディングモード制御のロバスト性の高さを確認できる。

6.5.状態フィードバック制御との比較

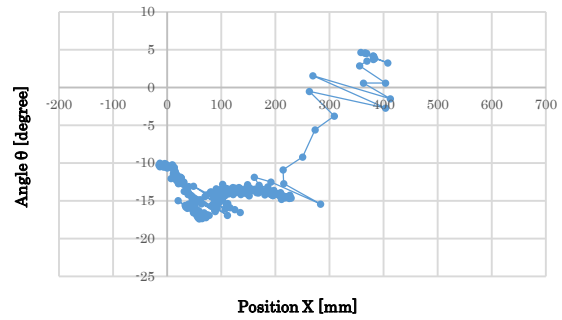
スライディングモード制御の評価のため、連続的な状態フィードバック制御との比較実験を行う。状態フィードバック制御において、式(1), (2)のモデルに式(16)のフィードバック入力式を与えるとする。

$$u = k_x x + k_\theta \theta \quad (16)$$

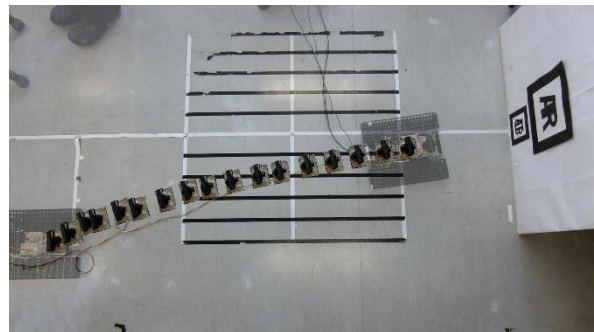
Fig.12 に状態フィードバック制御とスライディングモード制御のロボットの軌跡およびロボットの状態 (x, θ) を示す。初期誤差は500[mm]とする。



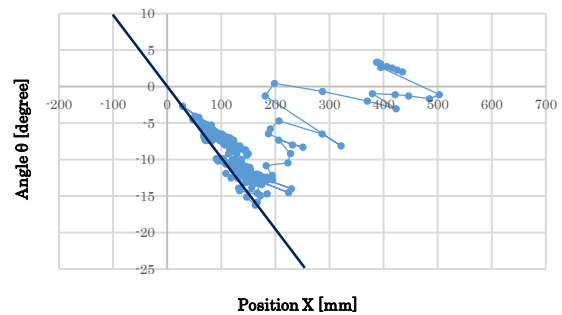
(i) Trajectory of the robot state feedback control



(ii) Relationship of the x and θ state feedback control



(i) Trajectory of the robot sliding mode control



(ii) Relationship of the x and θ sliding mode control

Fig.12 Result of a comparative experiment

Fig.12より、状態フィードバック制御とスライディングモード制御を実装したロボットが双方とも曲線を描きながらマーカーへ走行していることが確認できるが、以下の違いが確認できる。スライディングモード制御に対して状態フィードバック制御は目標軌道上に位置は収束しているが、角度の補正が十分に行われていない。この状態では雪ブロックを回収することが困難であるといえる。

7.考察

スライディングモード制御はロボットの状態 (x, θ) を切り替え線上に拘束されるためロボットの走行軌跡は走行路面が変わっても変化はないといえる. Fig.9 と Fig.11 から走行路面が異なってもロボットの走行軌跡に変化がないことが確認できる. このことから, スライディングモード制御はロバスト性が高いといえる. しかし, Fig.11 のロボットの状態 (x, θ) は Fig.9 の状態 (x, θ) に比べて検出値のばらつきが生じている. これは摩擦抵抗が小さい路面を走行しているため, すべりによってロボットに振動が生じてカメラが揺れるため検出値にばらつきが生じたと考えられる. Fig.10 より, 切り替え線の傾きはロボットの走行軌跡に変化が生じることが確認できた. 目的とするロボットは目標に対して曲線を描きながら走行することが求められるため傾きが急な方がロボットに適切であるといえる. Fig.12 より, 状態フィードバック制御では最終停止位置でスライディングモード制御よりも誤差が大きく生じた. 状態フィードバック制御はゲインを大きくすることで追従性を向上させることが可能であるが, 大きな行き過ぎ量が生じカメラがマーカを見失うという問題が起こるため, 状態フィードバックは適切なゲインの設定が難しい. 対して, スライディングモード制御は高ゲインを設定しても切り替え線上に拘束されるために状態フィードバック制御よりも使いやすい制御といえる.

今後の課題として, 実用化に向けてロボットにグリッパを取り付け雪ブロックの回収を行う実験, 雪上での走行実験をすることが挙げられる.

8.おわりに

本研究では, 自律移動型の小型除雪ロボットの軌道追従制御としてスライディングモード制御を検討し, 走行実験からロボットに与える影響を確認した.

9.参考文献

- [1] J.Guldner and I.Utkin. "Stabilization of nonholonomic mobile robots using Lyapunov functions for navigation and sliding mode control", Proc.IEEE Int.Conf.Decision Contr., pp.2967-2972,1994.
- [2] Jung-Min Yang and Jong-Hwan Kim, "Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 3, 1999.
- [3] R. Solea, A. Filipescu and G. Stamatescu, "Sliding-mode real-time mobile platform control in the presence of uncertainties", Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, 2009.
- [4] M. Letizia Corradini, T. Leo and G. Orlando, "Experimental Testing of a Discrete-Time Sliding Mode Controller for Trajectory Tracking of a Wheeled Mobile Robot in the Presence of Skidding Effects", Journal of Robotic Systems 19 (4), 177-188, 2002.
- [5] <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>