

スリップを考慮したクローラ型移動ロボットの軌跡追従制御の実現

Trajectory control of crawler type mobile robot with consideration of a slip

正 吉田 和哉 正 永谷 圭司
岡田 佳都 遠藤 大輔 (東北大)

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

Trajectory tracking for crawler robot is considered in this paper. Such robot has a difficulty to estimate its exact position because of slippage between the crawler and the ground. To compensate the slippage, we propose a trajectory tracking method for crawler robot based on slip-estimation using its encoders and a gyro sensor. An actual experiment testing was carried out to confirm its performance. In this paper, we introduce the trajectory tracking method and report the experimental result.

Key Words : Crawler type robot, Trajectory control

1 はじめに

近年、相次ぐ震災・テロをきっかけに、人による救助に先立って被災現場の情報収集や要救助者の発見等を行うロボットシステムの開発が、ロボティクス分野の各研究機関において進められており、本研究室でもクローラタイプの遠隔操作型レスキューロボットの研究開発を行っている [1]。

本プロジェクトでは、災害時に地上の通信設備が被害を受けていることを想定し、このレスキューロボットの遠隔操作に衛星通信を用いる。このとき問題となるのが、衛星通信に伴う数秒の時間遅れによるロボットの操作性の低下である。このためロボット周辺環境の情報リアルタイムに手に入らず、ラジコンのような速度指令による直接的な遠隔操作は非常に困難となる。この問題に対処するため、本研究グループでは軌跡追従指令による操作の導入を検討している。これは、オペレータより与えられた目標軌跡に対してロボットが追従走行を行うという操作方式であり、ロボットに正確な軌跡追従走行性能があれば、時間遅れによる操作性の低下を最小限に抑えた円滑な遠隔操作の実現が期待できる。

一般に、ロボットの軌跡追従走行は、自己位置推定とそれに基づいた軌跡追従制御を行うことによって実現される。しかし、クローラロボットにおいては、クローラのスリップによって累積するオドメトリの誤差のため、自己位置推定をオドメトリに依存する正確な軌跡追従走行は困難とされてきた。

そこで、本研究では、エンコーダおよびジャイロセンサより得られた情報からクローラのスリップの大きさを推定する自己位置推定手法 [2] を利用し、クローラロボットの軌跡追従制御を実現した。また、実クローラロボットを用いて、追従性能の検証を行った。

2 スリップを考慮したクローラロボットの自己位置推定

本研究では、本体左右に1つずつのクローラを有するロボットを対象とした。ロボットは、搭載されたエンコーダによってクローラの外周速度 v を、ジャイロセンサによってロボット自身の方位角速度 Ω を獲得できるものとする。

2.1 スリップを考慮したクローラロボットの運動学

クローラロボットがカーブ走行をする際、すなわち左右クローラの外周速度が異なる場合、地面とクローラの間にはスリップ(クローラの進行方向に対する滑り)が生じる。このスリップのために、オドメトリに自己位置推定を依存している場合、軌跡追従走行の基盤となる自己位置推定の正確さが大きく損なわれてしま

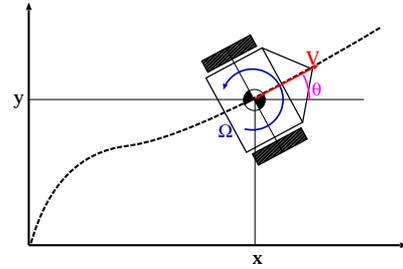


Fig. 1: Kinematics model of a mobile robot

う。したがって、クローラロボットの正確な軌跡追従走行の実現のためには、スリップを考慮した自己位置推定を行う必要がある。

このスリップを定量的に扱うため、本研究では次の式 (1) で定められるスリップ率 a を導入する。スリップ率 [3] は、スリップが生じない場合のクローラの理想の移動に対する、実際のクローラの空転度合いを示すもので、左右クローラに対してそれぞれ定義できる。

$$a = \frac{v - v'}{v} \quad (1)$$

ただし、 v' はクローラの実際の対地並進速度である。

このスリップ率を用いれば、クローラロボットの運動学の一般式は次のように記述できる。

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

$$\dot{y} = V \sin \theta = \frac{v_r(1 - a_r) + v_l(1 - a_l)}{2} \sin \theta \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \Omega = \frac{v_r(1 - a_r) - v_l(1 - a_l)}{2d} \quad (4)$$

ただし、 (x, y, θ) はロボットの位置および姿勢方位角、 V はロボットの並進速度、 $2d$ はトレッド長である。また、添え字 l は左クローラの、添え字 r は右クローラに関するパラメータであることを表す。なお、 (x, y, θ) の定義は図 1 に示す移動ロボットの一般的な運動学モデルに準ずるものである。

2.2 スリップ率に関する仮定と自己位置推定

式 (4) における Ω はジャイロセンサにより得られるが、この式のみでは条件不足となり、 a_l および a_r の 2 変数は確定しない。

Table 1: Value of n on various surfaces

路面	n
P タイル	0.48
ベニヤ板	0.62
人工芝	0.51

そこで、スリップ率に関する仮定式を導入することで条件を増やし、スリップ率 a_l および a_r を決定することを考える。

文献 [2] において、遠藤らは、仮定式を導く足がかりとなる以下に示すスリップ率の特性を経験的に明らかにした。

- v_l, v_r が同符号のとき、 a_l, a_r は異符号となる。
- v_l, v_r が異符号のとき、 a_l, a_r は同符号となる。
- v_l と v_r の差が大きくなるほど、 a_l と a_r の差も大きくなる。

これらの特性から、次のような仮定式を得る。

$$\frac{a_l}{a_r} = -\text{sgn}(v_l \cdot v_r) \cdot \left| \frac{v_r}{v_l} \right|^n \quad (5)$$

式 (5) におけるパラメータ n を同定するため、いくつかの路面において複数回の走行実験を行った。その走行データの分析から、各路面における n の値について表 1 の結果を得た。この結果から、本研究では、 $n = 0.5$ であるとみなした次の経験則的な仮定式を採用する。

$$\frac{a_l}{a_r} = -\text{sgn}(v_l \cdot v_r) \cdot \sqrt{\frac{v_r}{v_l}} \quad (6)$$

この式 (6) および式 (4) を合わせて解くことでスリップ率の推定値が決定できる。それらから求まるロボットの推定位置・姿勢の微分 ($\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$) の時間積分により、ロボットの推定位置 ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta}$) の算出が可能となる。

3 クローラロボットの軌跡追従制御

3.1 クローラロボットの逆運動学

クローラロボットの走行を制御するには、制御則に従って定められた目標並進速度 V^{ref} および目標方位角速度 Ω^{ref} を実現するように、左右クローラの目標外周速度 v_l^{ref} および v_r^{ref} を定めればよい。クローラロボットの逆運動学より、これらの速度の関係は次のように記述できる。

$$\begin{pmatrix} v_l^{ref} \\ v_r^{ref} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1-a_l} & -\frac{d}{1-a_l} \\ \frac{1}{1-a_r} & \frac{d}{1-a_r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V^{ref} \\ \Omega^{ref} \end{pmatrix} \quad (7)$$

この式にはスリップ率 a_l および a_r が含まれるため、一般にはこの式からクローラの目標外周速度を定めるのは困難である。しかし、2.2 節に示した手法により、スリップ率の推定値が得られるため、目標外周速度 v_l^{ref} および v_r^{ref} を決定することができる。

3.2 直線追従制御の制御則

直線追従制御の概念図を図 2 に示す。ある目標直線に対してロボットを追従走行させるには、ロボットの方位角と目標直線のなす角 φ およびロボットと直線の距離 η を 0 にするように車輪の速度を制御すればよいことが知られている。ロボットに実装する際には、走行を安定させるための方位角速度 Ω に関する減衰項を導入した式 (8) に基づいて目標方位角速度 Ω^{ref} を決定する [4]。

$$\frac{d\Omega^{ref}}{dt} = -k_\Omega \Omega - k_\varphi \varphi - k_\eta \eta \quad (8)$$

一方、目標並進速度 V^{ref} は任意に定めることが可能であるが、追従走行時には V^{ref} の値を中心に v_l^{ref} および v_r^{ref} を増減させ

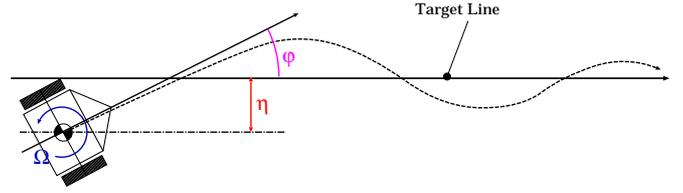


Fig. 2: Straight trajectory control

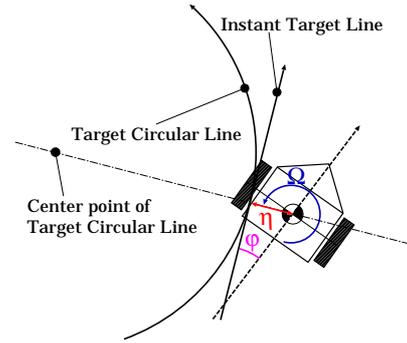


Fig. 3: Circular trajectory control

ることになるため、各クローラの最高外周速度等を勘案して定めることが望ましい。以上のようにして定めた Ω^{ref} および V^{ref} より、左右クローラの目標外周速度を式 (7) を用いて定めれば、直線追従制御を実現できる。

3.3 円弧追従制御の制御則

直線追従制御の応用として、以下の手順により円弧追従制御が実現できる。円弧追従制御の概念図を図 3 に示す。まずロボットと目標円弧の最近接点、すなわちロボットの現在地点と目標円弧の中心を通る直線と、目標円弧の交点を求める。そして求めた交点における目標円弧の接線に対して直線追従制御を行う。走行に伴い、この交点および接線を逐次更新しながら制御を行うことで、目標円弧への追従制御が実現できる。

4 実クローラロボットを用いた検証実験

先述した自己位置推定手法および軌跡追従制御を、本研究室で開発を行っている Technocraft 社製のクローラロボット CV-04 (図 4) に実装し、2 種類の検証実験を行った。なお、実験結果は最終ページにまとめて示した。

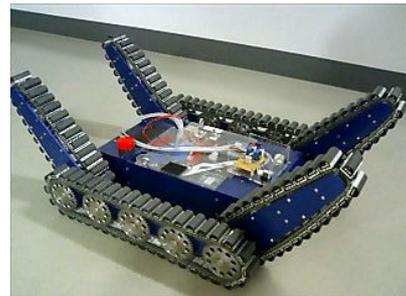


Fig. 4: CV-04

Table 2: Specifications of CV-04 and the gyroscope

CV-04	
トレッド長	500[mm]
クローラ縦方向接地長さ	400[mm]
本体重量	26.2[kg]
マーカボール間距離	480[mm]
制御・自己位置推定演算周期	5[msec]
ジャイロセンサ	
測定範囲	± 100 [deg/sec]
分解能	0.195[deg/sec]

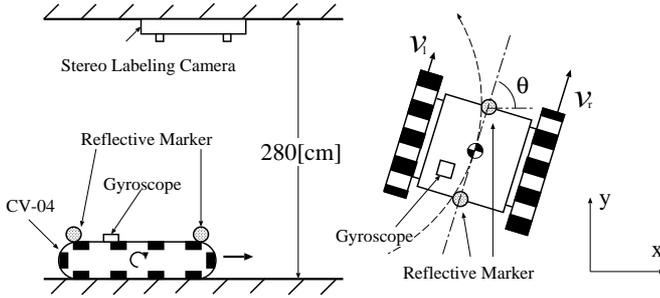


Fig. 5: Setup of the devices

4.1 実験装置の概要

CV-04 は本体左右に 1 つずつのクローラと本体前後に 1 対ずつのクローラアームを有するロボットである。クローラアームが走行に影響を与えないよう、本実験では図 4 に示すようにクローラアームを床から浮かせた状態で行った。また、CV-04 はエンコーダおよびジャイロを搭載しており、左右クローラの外周速度およびロボット自身の方位角速度情報を獲得できる。各センサからの出力をロボット内の制御ユニットにおいて処理し、自己位置推定演算および軌跡追従制御演算に利用する。CV-04 および搭載センサの諸元を表 2 に示す。

また、ロボットの走行履歴を計測するために、サイヴァース社製のステレオラベリングカメラ SLC-C02 を用いた。ステレオラベリングカメラは、赤外照明と 2 つのカメラを統合した 3 次元距離センサである。赤外光線に対する反射光を 2 つのカメラで観測することにより、複数の高反射性マーカボールの 3 次元空間内の位置を計測することができる。本実験では、ロボットの本体前後に 1 つずつマーカボールを取り付けた。

なお、いずれの実験においても、実験装置のセットアップは図 5 の通りである。走行路面は P タイル、目標前進速度 V^{ref} は CV-04 の標準的な速度である 11.4[cm/s]、走行開始地点を $(x, y, \theta) = (0, 0, 0)$ とした。

4.2 軌跡追従性能の検証

直線追従走行の検証としては、 x 軸 ($y = 0$) に 20[cm] 追従走行させた後、直線 $y = 30, 60, 90$ [cm] にそれぞれ追従走行させた。また、円弧追従走行の検証として、同じく x 軸に 20[cm] 追従走行させた後、直径 30, 60, 90[cm] の円にそれぞれ追従走行させた。なお、すべての追従走行において、ステレオラベリングカメラを用いて実際の走行軌跡を得た。

直線追従走行の実験結果を図 6 に、円弧追従走行の実験結果を図 7~9 に示す。いずれの走行においても、自己位置推定によって推定された軌跡が目標とする直線あるいは円弧に沿っていることから、追従制御が十分に効果をあげていることが分かる。また、実際の走行軌跡に着目すると、おおよそ推定軌跡と一致しているものの、ややオフセット誤差が見受けられる。この誤差は、自己

位置推定の際に用いている式 (6) の仮定が現実と完全には合致していないことによるものと考えられる。

4.3 スリップを考慮しない自己位置推定に基づいた軌跡追従制御との性能比較

式 (2)~(4) において $a_l = a_r = 0$ とすれば、すなわちスリップを考慮しなければ、既存の対向二輪型移動体の自己位置推定手法となる。この既存の手法と、2 章に示した手法に基づいた図 10 に示す軌跡への追従走行を行い、その追従性能を比較した。

実験結果を図 11 に示す。既存の自己位置推定手法を用いた場合は、円弧追従走行時に大幅に目標軌跡から外れてしまい、最終的にロボットは (22[cm], 188[cm]) に停止した。スリップが問題となるのはカーブ走行を行う際であるため、この結果は妥当なものであるといえる。

これに対し、2 章に示した手法を用いた場合は、目標軌跡と走行軌跡がほぼ一致しており、正確な軌跡追従走行が実現されたことがわかる。特に、円弧追従走行時にも目標軌跡を外れていないことから、スリップを考慮した効果が見てとれる。

5 まとめ

本研究では、クローラの外周速度およびロボット自身の方位角速度情報からスリップを推定するクローラ型移動ロボットの自己位置推定手法を利用する、クローラロボットの軌跡追従制御手法を提案した。さらに、検証実験によって、既存の自己位置推定手法に基づくものよりも格段に正確な軌跡追従走行が可能であることを実証した。

今後の課題としては、スプライン曲線等の複雑な軌跡への追従走行や、斜面上における正確な軌跡追従走行の実現等が挙げられる。

謝辞

本研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 SCOPE-R プロジェクトとして実施中のものである。

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, (to be appeared)2007/4
- [3] Wong J. Y.：“Theory of Ground Vehicles”，Wiley-Interscience, 2001
- [4] S.Iida, S.Yuta：“Vehicle Command System and Trajectory Control for Autonomous Mobile Robots”，Proceedings of International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.212-217, 1999

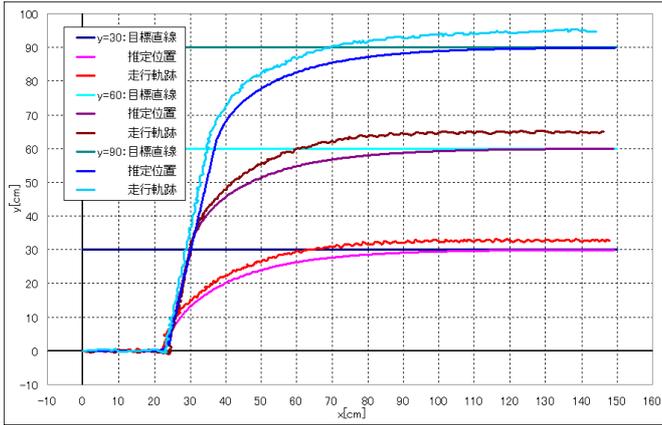


Fig. 6: Tracks by straight trajectory control

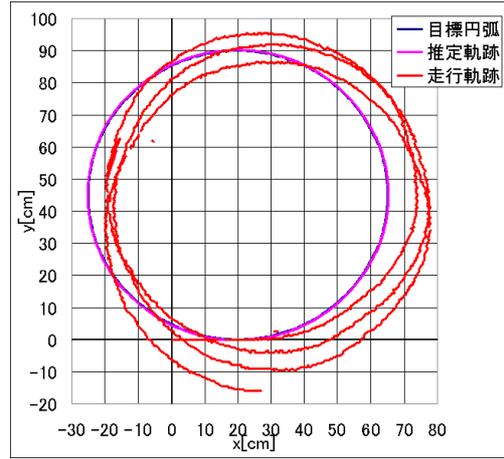


Fig. 9: Tracks by circular trajectory control(90[cm] in diameter)

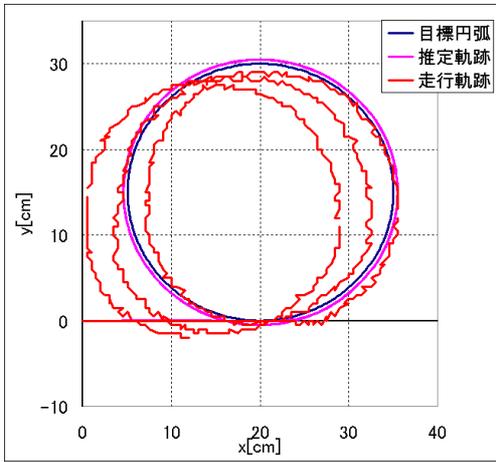


Fig. 7: Tracks by circular trajectory control(30[cm] in diameter)

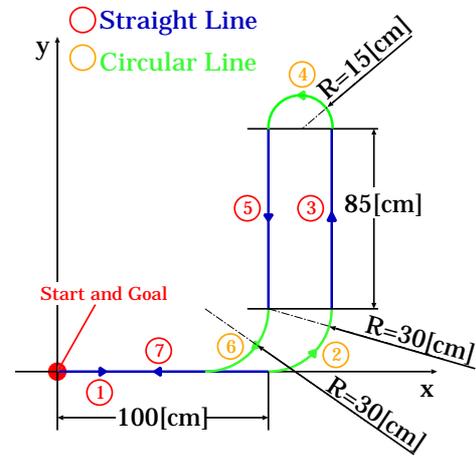


Fig. 10: Target trajectory for the comparative experiment

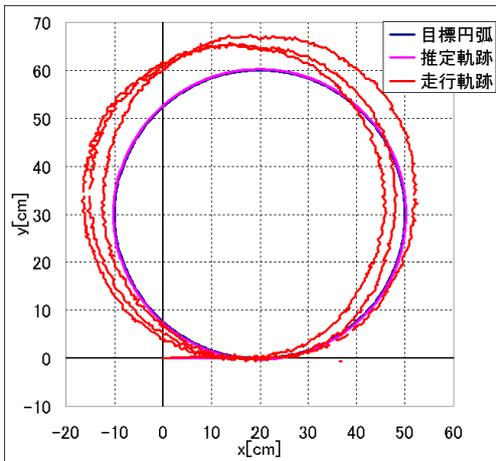


Fig. 8: Tracks by circular trajectory control(60[cm] in diameter)

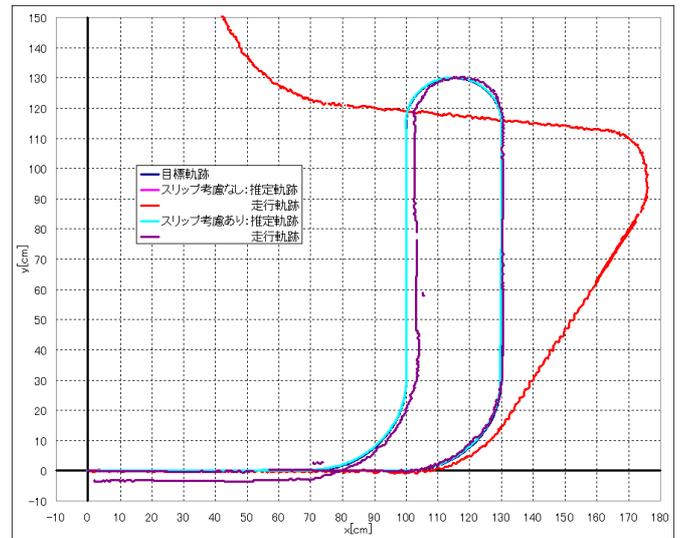


Fig. 11: Tracks on the comparative experiment