

# 滑りを考慮したデッドレコニングによる クローラ型移動ロボットの推定位置精度の向上

遠藤大輔 永谷圭司(東北大) 吉田和哉(東北大)

## Improvement of Dead-Reckoning Accuracy of Crawler-Type Mobile Robot by Considering its Slippage

Daisuke ENDO, \*Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.), Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

**Abstract**— An advantage of crawler mechanism is a stable navigation on uneven terrain. So many of rescue robots adopt such a mechanism. However, the mechanism has a problem of slippage with the ground in case of circling motion of the robot. To achieve dead-reckoning of a crawler robot, it is necessary to consider its slippage. In this research, we proposed a method to improve an accuracy of localization of crawler robot by estimating slip-ratios. The proposed method was confirmed by an experiment using a crawler robot.

**Key Words:** Crawler-Type Mobil Robot, Dead-Reckoning, Slippage

### 1. 序論

無限軌道式とも呼ばれるクローラ式移動機構は、地表の凹凸に対して広い接地面で接触するため、不整地への適応性が高いという特性がある。このため、レスキューロボット等の不整地移動が必要なロボットの移動機構に、広く採用されている。しかしこの移動機構は、スキッドステアリングを採用しているため、旋回時に地面と覆帯との間に必ず滑りが生じ、単純な対向二輪型移動体の運動学に基づいたデッドレコニングを実現することができない。これを実現するためには、各クローラの滑りを定量的に推定する必要がある<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、クローラ型移動ロボット本体に搭載したセンサで検出した角速度情報から左右のクローラの滑り量を推定し、クローラ型ロボットのデッドレコニングによる推定位置精度を向上させる手法を考案した。また、実クローラロボットを用いた実験を行い、実際の移動軌跡と提案する手法に基づき推定した移動軌跡との比較を行うことで、本手法の妥当性を検証した。本稿では、この推定位置精度向上手法について紹介し、本手法に基づいておこなった検証実験とその結果について述べる。

### 2. クローラ型移動ロボットの運動学

#### 2.1 対向二輪型移動ロボットの移動特性

対向二輪型移動ロボットの二次元平面内での自己位置推定を行う一般的な手法にオドメトリがある。この運動学モデルを Fig.1 に示す。左右の車輪の円周速度をそれぞれ  $v_l, v_r$ 、車輪間隔を  $2d$ 、車体中心の速度、角速度をそれぞれ  $V_c, \omega_c$  とすると、車体中心座標  $(x, y)$  および方位角  $\theta$  には、次の (1) ~ (3) の関係式が成立する<sup>2)</sup>。

$$\dot{x} = V_c \cos \theta = \frac{v_r + v_l}{2} \cos \theta \quad (1)$$

$$\dot{y} = V_c \sin \theta = \frac{v_r + v_l}{2} \sin \theta \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \omega_c = \frac{v_r - v_l}{2d} \quad (3)$$

これら  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$  を時間積分することで、初期位置に対する現在の位置と姿勢を計測するという手法がオド

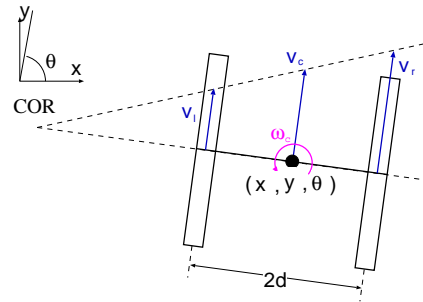


Fig.1 Kinematic model for dual-wheel-type mobile robot

メトリである。これは、車輪と地面の間に滑りが発生しないという条件のもとで、正確に位置計測を行うことができる手法である。しかし、移動機構としてクローラを用いた場合には、ロボットが旋回動作を行う際にクローラと地面との間に必ず生じる滑りのため、このモデルをそのまま適用した場合、推定位置には大きな誤差が生じる。

#### 2.2 滑りを考慮したデッドレコニングの定式化

前節の問題を解決するため、本研究では、本体の横方向の滑りと左右の覆帯の縦方向の滑りをそれぞれ独立に考慮した運動学モデルを提案する。左右のクローラの滑り率をそれぞれ  $a_l, a_r$  とし、滑り角を  $\alpha$  とする。この滑り角  $\alpha$  は、本体の方位と、実際に進む向きとがなす角度であり、横滑りが発生した場合に  $\alpha \neq 0$  となる。定常旋回を行っているとき、 $v_l, v_r$  をそれぞれ左右の覆帯の外周速度とすると、その運動学は次の (4) ~ (6) 式で表される。

$$\dot{x} = \frac{v_r(1 - a_r) + v_l(1 - a_l)}{2 \cos \alpha} \cos(\theta - \alpha) \quad (4)$$

$$\dot{y} = \frac{v_r(1 - a_r) + v_l(1 - a_l)}{2 \cos \alpha} \sin(\theta - \alpha) \quad (5)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_r(1 - a_r) - v_l(1 - a_l)}{2d} \quad (6)$$

この運動学モデルを Fig.2 に示す。

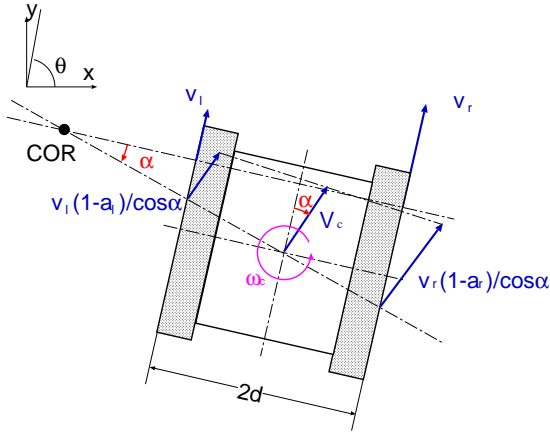


Fig.2 Kinematic model for crawler-type mobile robot

### 2.3 滑り量の推定

(4)~(6)式に基づき、クローラのデッドレコニングを正確に行うためには、滑りに関するパラメータ  $a_r, a_l, \alpha$  を逐次検出する必要がある。まず本研究では、クローラは車輪と比べて走行速度が十分に低く、なおかつ地面から働く横方向への摩擦力も十分に大きいと仮定し、遠心力によって横方向への滑りが発生しない ( $\alpha = 0$ ) とした。このとき、本体の速度と角速度はそれぞれ次の (7), (8) 式のように表される。

$$V_c = \frac{v_r(1-a_r) + v_l(1-a_l)}{2} \quad (7)$$

$$\omega_c = \frac{v_r(1-a_r) - v_l(1-a_l)}{2d} \quad (8)$$

また、本体の角速度は、ジャイロセンサを用いて直接計測可能であると仮定し、それによって検出した値を  $\tilde{\omega}_c$  とする。またロボットが定常旋回している時、滑り率  $a_r, a_l$  の関係は、地面とクローラ間の力とモーメントの釣合いから求めることができるが、摩擦係数や力を直接計測することは容易ではない。これについては 3.3 節で詳しく考察する。本研究では、最初の段階として、次のような単純な仮定をおくこととした。

$$a_r = -\text{sgn}(v_r \cdot v_l) a_l \quad (9)$$

ここで、 $\text{sgn}(\cdot)$  は符号関数を表す。この仮定に基づき、(8) 式を  $a_r, a_l$  について解くと、次の (10), (11) 式のようになる。

$$a_r = \frac{v_r - v_l - 2d\tilde{\omega}_c}{v_r + \text{sgn}(v_r \cdot v_l)v_l} \quad (10)$$

$$a_l = \frac{v_l - v_r + 2d\tilde{\omega}_c}{v_r + \text{sgn}(v_r \cdot v_l)v_l} \quad (11)$$

このようにして左右のクローラの滑り率が求まり、これらを (4)~(6) 式に代入することで、滑りを考慮したデッドレコニングを行うことが可能となる。

## 3. 実験による検証

### 3.1 実験装置

前節に示した手法によるデッドレコニングの妥当性を確認するため、Fig.3 に示すクローラ型移動ロボット(テクノクラフト社製レスキュークローラ CV-04) とモーションキャプチャ(サイヴァース社製ステレオラベリン

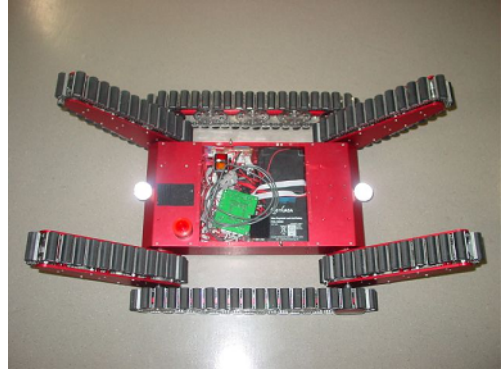


Fig.3 Crawler-type mobile robot used in the experiment

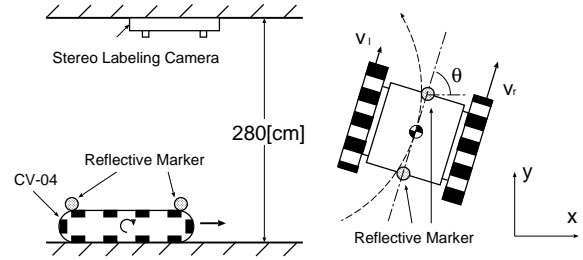


Fig.4 Experimental setup

Table 1 Specification of devices

| Crawler Robot                     |         | Motion Capture      |         |
|-----------------------------------|---------|---------------------|---------|
| Tread                             | 500[mm] | Fixed height        | 280[cm] |
| Length of contact area of crawler | 400[mm] | Horizontal accuracy | 9[mm]   |
| Total weight                      | 25[kg]  | Frame rate          | 30[fps] |
| Distance between markers          | 480[mm] | Base line           | 400[mm] |
| Control cycle                     | 5[msec] | Focal length        | 3.8[mm] |

グカメラ SLC-C02) を用いて検証実験を行った。Fig.4 に実験装置の概要を、Table 1 に主な実験装置の仕様をそれぞれ示す。ロボット本体には、クローラの回転数を計測するためのエンコーダとコントローラが搭載されており、左右のクローラを一定速度に制御することが可能である。また本体の中心線上の定点には、反射式マーカを前後に計 2 個取り付け付けた。この 2 つのマーカの位置は、高さ 280[cm] の位置に設置したステレオラベリングカメラを用いて 30[frame/sec] の頻度で計測することができるため、ロボットの位置、姿勢を逐次計測することが可能となる。

### 3.2 実験方法と各モデルに基づく計測結果の比較

前述の実験装置を用い、左右のクローラの回転速度を一定に制御して、水平面内での旋回動作を行わせた。また、その時の本体上マーカの移動軌跡はステレオラベリングカメラを用いて計測し、このデータを基に実際の本体中心の位置  $(x, y, \theta)$  と角速度を算出した。一方で、クローラの回転情報を利用し、対向二輪型移動体の運動学 (1)~(3) 式、ならびにクローラ型移動体の運動学 (4)~(6) 式で  $\alpha = 0$  として推定した移動軌跡をそれぞれ算出した。以上の実験を、クローラの左右輪の速度を変えて数回おこない、実際のロボットの移動軌跡と各運動学モデルに基づく推定移動軌跡とを比較した。

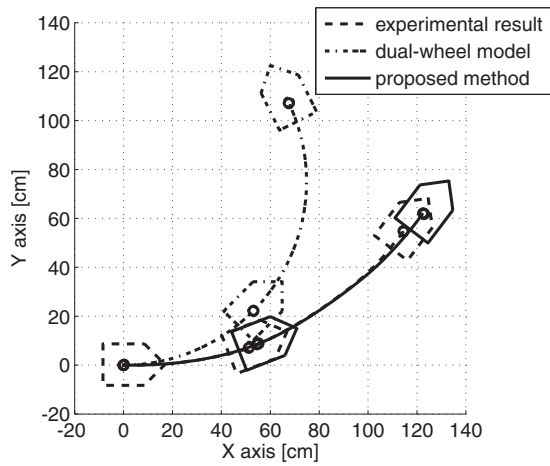


Fig.5 Trajectory of the robot( $v_r = 400$ [count/cycle],  $v_l = 200$ [count/cycle])

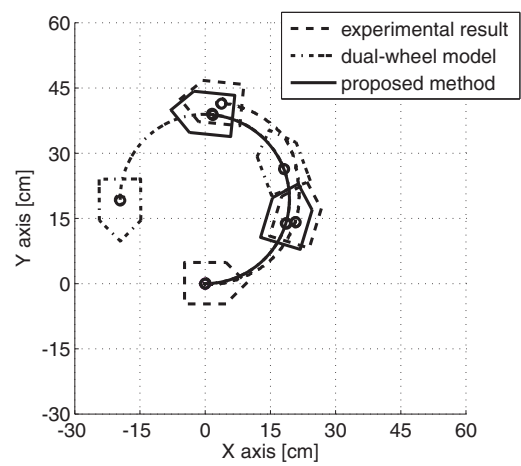


Fig.7 Trajectory of the robot( $v_r = 400$ [count/cycle],  $v_l = -50$ [count/cycle])

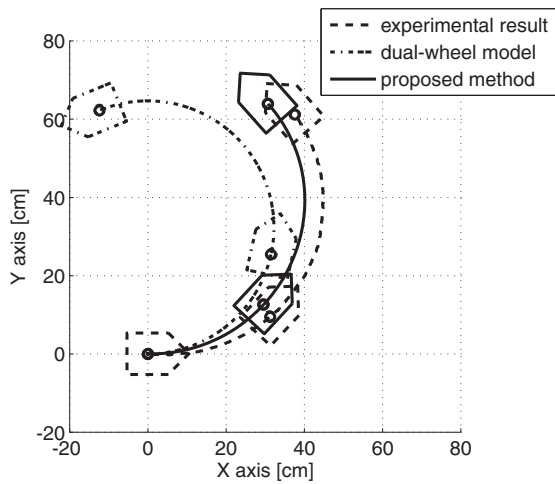


Fig.6 Trajectory of the robot( $v_r = 400$ [count/cycle],  $v_l = 50$ [count/cycle])

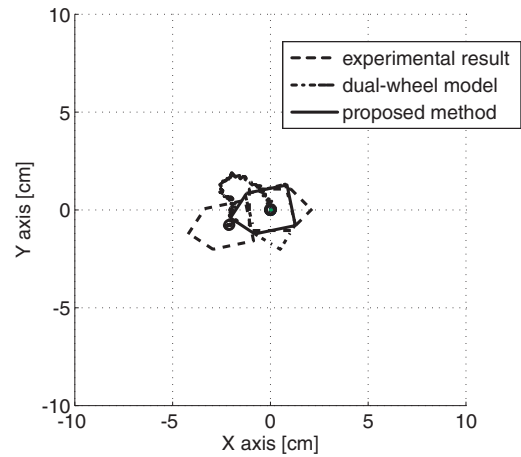


Fig.8 Trajectory of the robot( $v_r = 400$ [count/cycle],  $v_l = -400$ [count/cycle])

ロボットの初期位置を  $(x_0, y_0, \theta_0) = (0, 0, 0)$  として実際に移動した軌跡, および各モデルに基づく計測結果を Fig.5 ~ Fig.8 に示す. Fig.5 は  $v_r = 400$ [count/cycle],  $v_l = 200$ [count/cycle] ( $1$ [count/cycle] は  $1$  制御周期あたりにエンコーダカウントが  $1$  変化する速度であり, 対地速度では  $1$ [count/cycle] =  $0.013$ [cm/sec]) として走行させた時の結果である. 実際の移動軌跡を点線, 対向二輪型移動体の運動学モデルに基づいた推定移動軌跡を一点鎖線, 提案する手法によって求めた推定移動軌跡を実線でそれぞれ描いている. また, ロボットの方位は五角形の向きで表している. 以下, Fig.6 ~ Fig.8 についても同様である. なお, Fig.8 は  $v_r = 400$ [count/cycle],  $v_l = -400$ [count/cycle] としたため, その場での旋回を行うはずである. 動作の結果, デッドレコニングで計測した推定位置は, 理想的なものであり, 初期位置から動かない. しかしながら実際には, 地面の摩擦の不均一性やクローラ輪の制御誤差などによって  $x$  方向に  $-2.1$ [cm],  $y$  方向に  $-0.8$ [cm] ほど動いた.

### 3.3 結果の考察

いずれの結果からもわかるとおり, 対向二輪型の運動学から求めた軌跡は実際の移動軌跡から大きくかけはなれたが, 提案した縦滑りを考慮したクローラの運動学から求めた軌跡は, 実際の軌跡と比較的近いことがわかる. しかしながら, 位置  $(x, y)$  に関しては, 必ず一定値以上の誤差を伴っており,  $v_r, v_l$  の絶対値の差が大きくなるほど誤差も大きくなるのが定性的に言える. この原因として, 大きく以下の 2 つの理由が考えられる.

1. 横滑りによる誤差 ( $\alpha = 0$  としたことによる誤差)
2. 滑り率  $a_r, a_l$  の関係を単純化したことによる誤差

1. は, ロボットに大きな遠心力が働き, これが地面から受ける摩擦力を越えた場合において発生するものである. またクローラと地面との間に働く摩擦力が厳密に均一ではないことによっても発生すると考えられる. しかし, 実験中の観察からは, 横滑りはほとんど確認できず, さらに実用上重要性の高い方位角の誤差に影響を与えないため, ここでは無視できるとする.

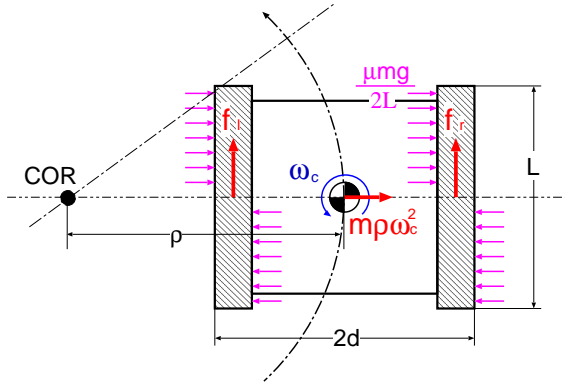


Fig.9 Affected force to a Crawler robot while it steers in the steady state

2.を議論するため、ここでは、横滑りなく定常旋回を行っているクローラに働く地面からの力とその釣合いに着目する．そのモデル図を Fig.9 に示す．なお、図中の記号  $f_r$ 、 $f_l$  はそれぞれ、地面から左右のクローラに作用する進行方向の力の総和、 $\rho$  は旋回半径、 $L$  はクローラの接地面の進行方向長さ、 $\mu$  は横方向のクローラ摩擦係数、 $m$  は車体質量、 $g$  は重力加速度である．<sup>3)</sup>

まず、クローラの前後方向の力の釣合いから、(12)式を得る．

$$f_r + f_l = 0 \quad (12)$$

また、横方向の力の釣合いから、(13)式を得る．

$$\mu mg - m\rho\omega_c^2 = \mu mg - \rho V_c\omega_c = 0 \quad (13)$$

(7)式および(8)式を用いて(14)式を得る．

$$\mu g - \frac{v_r^2(1-a_r)^2 - v_l^2(1-a_l)^2}{4d} = 0 \quad (14)$$

また、地面からクローラに対して作用する横方向の摩擦力は均一に分布していると仮定すると、ロボット中心回りのモーメントの釣合いは(15)式で表される．

$$df_r - df_l - \frac{\mu mg L}{4} = 0 \quad (15)$$

(12),(14),(15)式を  $f_r$ 、 $f_l$  について解くと、次の(16)、(17)式が導かれる．

$$f_r = \frac{v_r^2(1-a_r)^2 - v_l^2(1-a_l)^2}{32d^2} mL \quad (16)$$

$$f_l = \frac{v_l^2(1-a_l)^2 - v_r^2(1-a_r)^2}{32d^2} mL \quad (17)$$

これらを(8)式を用いて、 $a_r$ 、 $a_l$  について解くと、(18)、(19)式が導かれる．

$$a_r = 1 - \frac{8df_r}{mL\tilde{\omega}_c v_r} - \frac{d\tilde{\omega}_c}{v_r} \quad (18)$$

$$a_l = 1 + \frac{8df_l}{mL\tilde{\omega}_c v_l} + \frac{d\tilde{\omega}_c}{v_l} \quad (19)$$

すなわち、本体の角速度に加えて、片一方のクローラに作用する進行方向の力の総和を何らかの方法で計測

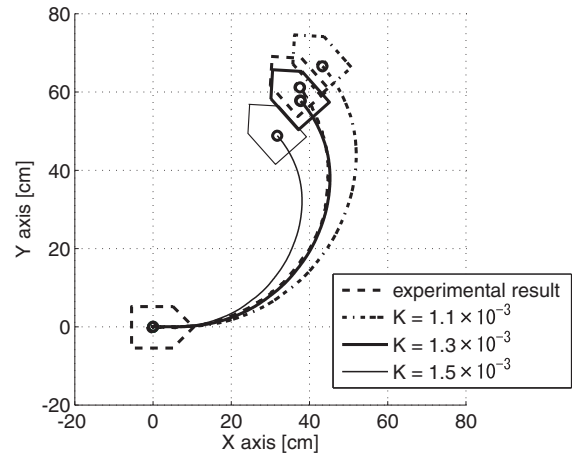


Fig.10 Trajectories calculated by varying value of K

することができれば  $a_r$ 、 $a_l$  をそれぞれ独立に求めることが可能となり、より精度よくデッドレコニングを行うことができると言える．この力の推定には、クローラ駆動用のモータに流れる電流値の測定による発生トルクの推定といった方法が考えられる．

定常旋回中は  $f_r (= -f_l)$  が一定であると仮定し、

$$\frac{8df_r}{mL} = -\frac{8df_l}{mL} = K \quad (20)$$

とにおいて、 $v_r = 400[\text{count/cycle}]$ 、 $v_l = 50[\text{count/cycle}]$  の場合に  $K$  を適当な値に設定して計算し直した移動軌跡を Fig.10 に示す．

このように、およそ  $K = 1.3 \times 10^{-3}$  の時に実際の軌跡にはほぼ一致し、2.3節で述べた仮定に基づいて計測した結果と比較して精度が向上することから、滑り率が(18)、(19)式で表すことができることの妥当性が確認できる．ゆえに、外力  $f_r (= -f_l)$  を正確に計測することができれば、クローラ型移動体のデッドレコニングによる推定位置精度はさらに向上することが期待できる．

#### 4. 結論

本稿では、二次元平面内を定常旋回するクローラ型移動ロボットの左右のクローラ輪の滑りを定量的に推定することで、クローラロボットのデッドレコニングを用いた自己位置推定を行う手法を提案した．特に、クローラは縦方向の滑りが大きく、支配的であると考え、本体が得る角速度情報から滑り率を推定し、デッドレコニングを計算することで、推定位置精度が向上することを実験で確認した．また、計測結果の誤差について考察し、車体の角速度情報に加えて、クローラに作用する進行方向の力の総和をセンシングすることで、推定位置精度の更なる向上が期待できることを示した．

#### 参考文献

- 1) 吉田、永谷、遠藤他：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-親子型複数ローバーを用いた被災環境探索システムの構築-、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、2P2-D07 (2006)
- 2) 中野、小森、米田、高橋：”高知能移動ロボティクス、”講談社、2004
- 3) 田中孝、筈田昭：”車両・機械と土系の力学-テラメカニクス、”学文社、1993