

# 狭隘路におけるクローラロボットの走行制御

## Motion control of tracked vehicle in narrow passages

○ 小島 匠太郎 (東北大)                      正 大野 和則 (東北大)

正 鈴木 高宏 (東北大)                      正 田所 諭 (東北大)

Shotaro KOJIMA, Tohoku University, [kojima@rm.is.tohoku.ac.jp](mailto:kojima@rm.is.tohoku.ac.jp)

Kazunori OHNO, Tohoku University

Takahiro SUZUKI, Tohoku University

Satoshi TADOKORO, Tohoku University

In this paper, we propose an autonomous navigation method for tracked vehicles based on a contact force model, which enables navigation in narrow space though it collides surrounding environment. The model counts on the contact force, driving force and friction force with the floor on the vehicle body. Using the model, controllable range is derived in velocity space. Experimental results shows that the robot can move in target direction with motion control based on the model if it collides with the wall, despite the navigation often fails using conventional path following in same conditions.

**Key Words:** Tracked vehicle, Autonomous navigation, Narrow space

### 1. 緒言

著者らは、図 1(a)に示すクローラロボットを用いた工場内の巡回・点検の自動化に関する研究を行っている。点検を自動化することで、人員の不足やコストの制約、事故のリスクといった現状の点検方法の課題を解決できる。また、クローラロボットは移動能力が高く、工場内の凹凸のある通路を走行できる。

クローラロボットは点検通路を自動で走行する。点検通路は、設備の隙間や安全な壁際に設置される場合が多い。点検通路などの狭隘路を走行する場合は、経路が壁の近くなり、クローラの位置の推定誤差、周囲の障害物までの距離を測るセンサ誤差、制御の追従誤差などの影響で、壁との接触を避けることはできない。

自律移動ロボットの分野では、接触回避に関する研究(文献[2]-[6])が盛んに行われてきた。しかし、本研究で想定する環境では、上記の理由で接触を回避しきれないため、接触しても行動を制御できる新たな方法を開発する必要がある。

著者らは、工場内の環境では接触を考慮した動作の制御が必要になると考え、図 2 のように接触を利用した自律移動に関して研究を行ってきた(文献[1])。その中では、壁に接触するクローラロボットの力学モデルを構築と、これに基づく接触時のロボットの制御方法の提案と検証がなされた。

本稿では、接触時のクローラの行動制御の方法を利用して狭隘路での L 字カーブの走行や横方向の移動を含む経路の自律走行を行う。また、提案手法の有効性を実機実験で検証する。

### 2. クローラロボットが壁に接触する際の課題

著者らは、図 2 のように予め与えられた経路を走行し、必要に応じて壁に沿いながら自律移動する方法を提案する。点検のための通路には、落下の防止や設備の保護のための板が設置される。この板を利用して自律走行する。この方法では、図 1(b)のようにクローラ側面に摩擦を抑えるための機構を設置

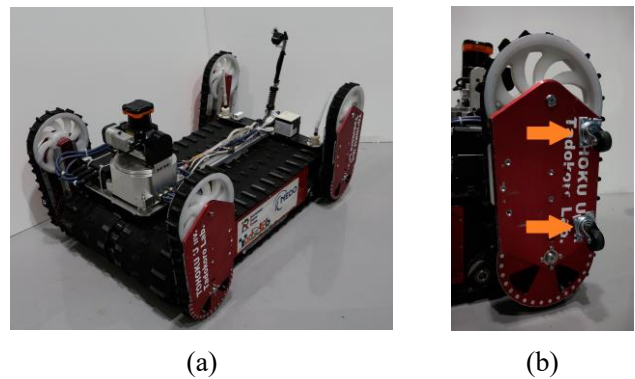


Fig. 1 Tracked vehicle “Quince”(a) and passive wheels attached on side surface of its flippers(b)

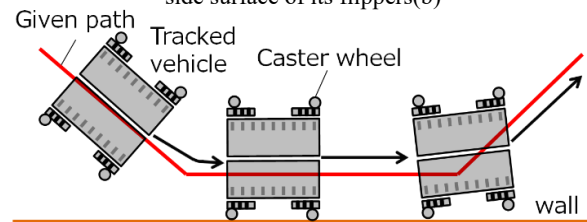


Fig. 2 Path following control based on contact force model which allows locomotion while contact with the wall and can leave from it.

する。これにより、接触点の摩擦が低減され、壁の損傷を防止できる。

しかし、壁と接触しながら走行すると、接触力の影響で目的とする動作ができず、走行不能に陥る場合がある。例えば、壁沿いに走行した後に壁から離れる方向に旋回しようとする時、接触力の影響で壁から離れることができず、走行不能に陥る。また、壁に沿う際の進入角が大きいと、クローラの駆動面が壁に接触し、壁に乗り上げる。これらは図 2 の動作を実現する上での課題である。

本稿では、壁と接触するクローラロボットの力学モデルに基づき動作を制御することで、上記の問題を解決する。

### 3. 壁と接触したクローラロボットの力学モデル

#### 3.1 モデルの構築

図3に壁と接触したクローラロボットの力学モデルを示す。以下では右後方のサブクローラの接触を考えるが、パラメータ $l_1, l_2$ の符号を変えることで、右前方、左後方および左前方のサブクローラの接触についても同様の手順で解析できる。力学モデルのパラメータを表1に示す。

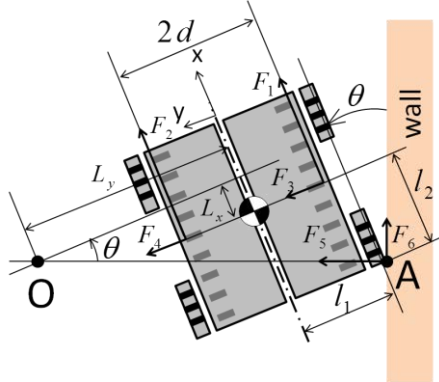


Fig.3 Dynamic model of a tracked vehicle colliding with a wall

Table.1 力学モデルのパラメータ

|            |  |
|------------|--|
| $F_1$      | driving force of right track                                     |
| $F_2$      | driving force of left track                                      |
| $F_3$      | slide friction force of right track                              |
| $F_4$      | slide friction force of left track                               |
| $F_5$      | normal force from a wall   |
| $F_6$      | friction force from a wall                                       |
| $2d$       | Tread  |
| $\theta$   | angle between wall and robot                                     |
| $l_1$      | distance between center of gravity and collision point in Y-axes |
| $l_2$      | distance between center of gravity and collision point in X-axes |
| $(Lx, Ly)$ | location of rotation center on robot coordinate system           |
| $\mu_g$    | maximum coefficient of static friction between track and ground  |
| $v_r$      | peripheral velocity of right track                               |
| $v_l$      | peripheral velocity of left track                                |
| $t$        | time for constant acceleration                                   |

ロボット正面を x 軸，左を y 軸とするロボット座標上において，x 軸，y 軸および旋回角  $\theta$  に関する運動方程式はそれぞれ式(1),式(2),式(3)となる。

$$M\ddot{x} = F_1 + F_2 + F_5 \sin\theta + F_6 \cos\theta \quad (1)$$

$$M\ddot{y} = -F_3 - F_4 + F_5 \cos\theta - F_6 \sin\theta \quad (2)$$

$$J\ddot{\theta} = F_1(L_y + d) + F_2(L_y - d) - (F_3 + F_4)L_x + F_6 \sqrt{(L_y + l_1)^2 + (L_x + l_2)^2} \quad (3)$$

図3のモデルを用いることで，サブクローラの側面および駆動面が接触した際のロボットの行動を解析できる。本章では側面の接触について解析し，クローラ駆動面の接触については4.2節で解析する。

#### 3.2 モデルに基づく筐体側面接触時の動作の解析

運動方程式を利用して筐体側面が接触した時の動作について解析する。車輪を設置したことによって，1.壁と接触しながら移動する場合の幾何学的拘束が生じ，2.筐体側面にキャスターを設置したことで壁との間の摩擦力 $F_6$ が微小くなる。また，3.対向二輪型移動機構の運動学(文献[8])が成り立つ。この条件は以下の式で表される。

$$\frac{l_2 + L_x}{l_1 + L_y} = \tan\theta \quad (4)$$

$$F_6 = 0 \quad (5)$$

$$L_y = \frac{(v_r + v_l)d}{v_r - v_l} \quad (6)$$

$$\dot{x} = \frac{v_r + v_l}{2} \quad (7)$$

次に，制御する際に，4.速度一定となるまでの加速度を一定で，5.動き始める瞬間に $F_3, F_4$ は最大静止摩擦係数と等価になると仮定する。これは以下の式で表される。

$$\left(\frac{v_r}{\dot{v}_r}\right) = \left(\frac{v_l}{\dot{v}_l}\right) = t \quad (8)$$

$$F_3 + F_4 = \mu_g Mg \quad (9)$$

式(3)に式(4)-(9)を代入し，式(10)を得る。

$$J\ddot{\theta} = \frac{Md}{t} \left(\frac{v_r^2 + v_l^2}{v_r - v_l}\right) + \mu_g Mg \{ (L_y + l_1) \tan\theta - l_2 \} \quad (10)$$

式(10)より，接触時の旋回運動は，クローラの駆動力の項と摩擦力の項によって記述されることを示している。摩擦力の項は，駆動力の項を阻害する方向に旋回中心まわりのモーメントを生じる。そのため，駆動力の項が摩擦力の項を上回るよう両駆動輪の速度 $v_r, v_l$ を指令することで，目的の方向に移動できる。式(10)の詳しい導出過程の説明は文献[1]に譲る。

図4に，式(10)に基づく接触時に指令可能な速度領域を示す。図中の(a)もしくは(b)の領域で速度を指令することで，目的の方向に移動できる。

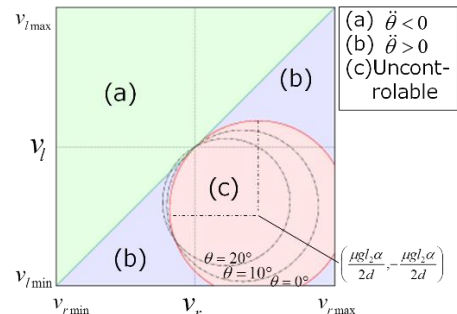


Fig.4 Relation between commanded velocity and motion. X-axis describes velocity of right track and y-axis shows that of left track.

## 4. 力学モデルに基づく経路追従制御方法

### 4.1 筐体側面接触時の制御

自律移動体の制御には、予め与えられた経路を追従しながら移動する、経路追従制御(文献[8])と呼ばれる方法が用いられる。この方法は、経路とロボットの距離と角度偏差に基づき速度指令値 $v$ と角速度指令値 $\omega$ を決定する。

本稿では、従来の経路追従制御を力学モデルに基づき拡張し、接触を考慮した経路追従制御を実現する。図4より、接触した際には $v$ の値を大きく指令し、 $\omega$ を小さく指令することで、制御可能な領域(a),(b)の速度を指令できる。

接触が生じる場合には、経路追従制御が指令した $v, \omega$ の値を式(11),式(12)に代入し、指令値を変更する。

$$\omega_{\text{ref}} = \begin{cases} \omega & (\text{if no collision}) \\ \omega & (\text{else if } |\omega| < \omega_{\text{max}}) \\ \text{sig}(\omega) \cdot \omega_{\text{max}} & (\text{else}) \end{cases} \quad (11)$$

$$v_{\text{ref}} = \begin{cases} v & (\text{if no collision}) \\ v + K_p(v - v_c) + K_i \int (v - v_c) dt & (\text{else}) \end{cases} \quad (12)$$

なお、 $\omega_{\text{max}}$ :角速度の上限値、 $\text{sig}()$ :入力値の符号を返す関数、 $v_c$ :現在の速度、 $K_p, K_i$ :制御定数を表している。

式(11)は、接触時のみ角速度の指令値に制限をかけ、値を小さく抑える。式(12)は速度の指令値と実際の速度の差分に応じて速度の指令値を瞬間的に増加させる効果がある。これにより、制御可能となる条件を満たす動作が指令される。

### 4.2 クローラ駆動面接触時の制御方法

狭隘路など周囲を壁で囲まれた場所を走行する際には、壁とクローラ面の接触し、摩擦による壁への乗上げが起こる。図3において、 $\theta$ が鈍角な場合にはクローラ面が壁に接触し、 $F_6$ が無視できなくなる

この状態で後退しようとする $F_6$ が旋回中心まわりにモーメントを生じ、壁に乗り上げる方向に旋回する。

モデルの図において、 $F_6$ が生じた際となるよう駆動力を指令することで、乗上げを防げる。

旋回中心周りのモーメントの式より、 $F_3, F_4$ は乗り上げを阻害する方向にはたらく。ここでは $F_3, F_4$ が0であっても乗上げないための駆動力の条件を考える。以上の条件を式(3)に代入すると、壁に乗り上げずに動作するための条件は式(13)となる。

$$0 < F_1(L_y + d) + F_2(L_y - d) + F_6 \sqrt{(L_y + l_1)^2 (1 + \tan^2 \theta)} \quad (13)$$

$L_y$  (旋回半径)は $F_6$ に応じて変わるため、ここでは「乗上げが生じる瞬間には $F_6$ が大きく、接触点まわりに旋回している」と仮定し、 $L_y = -l_1$ とする

これを代入すると、 $F_6$ は旋回中心からの距離が0であるため項がキャンセルされ、次式を得る。

$$0 > F_1(l_1 - d) + F_2(l_1 + d) \quad (14)$$

この式を満たすよう $F_1, F_2$ を指令すればよい。

今回は、前側のフリッパの接触したときに、右側が接触した

場合には反時計回りに超信地旋回、左側が接触した場合には時計回りに超信地旋回することで壁への乗上げを回避する。いずれの動作も $F_2 = -F_1$ となり、旋回速度に関係なく条件式を満たす。なお、後述の実験における接触時の旋回速度の指令値は、 $45^\circ/\text{s}$ とした。

## 5. 接触を含む経路の走行実験

4章まで述べた接触モデルに基づく経路追従制御の効果を検証するため、3種類の経路を用い自律走行の実験を行う。図5(a),(b)に実験に用いる走行経路を示す。それぞれ、狭隘路のL字カーブ、直線通路での横方向の移動を含む経路である。これらの経路では、壁に沿う動作と壁から離れる動作の両方が求められる。いずれの実験も接触を考慮しない経路追従と接触モデルに基づく経路追従で、それぞれ5回ずつ走行し、ロボットに搭載された測域センサで移動軌跡を記録する。

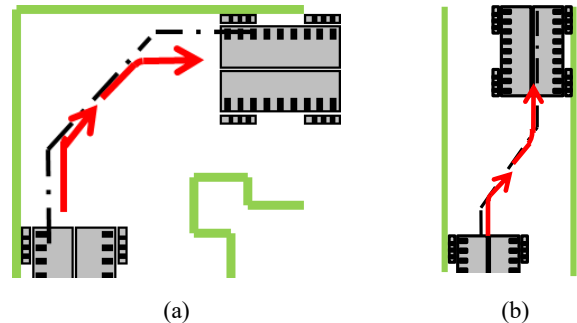


Fig.5 Experimental route for path following in narrow passage. (a):L-shaped curve. (b): crosswise motion in straight passage.

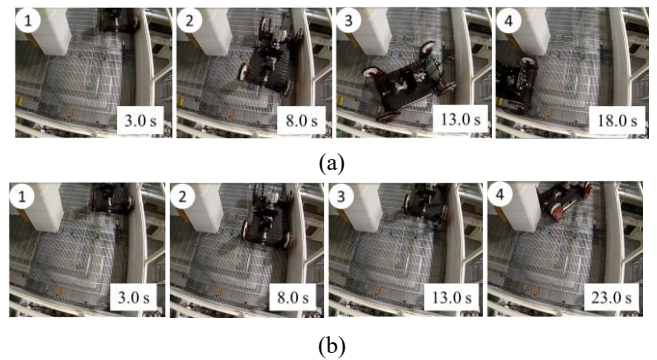


Fig.6 Motion of the robot in L-shaped curve. (a) Path following based on the contact force model. (b) Conventional path following.

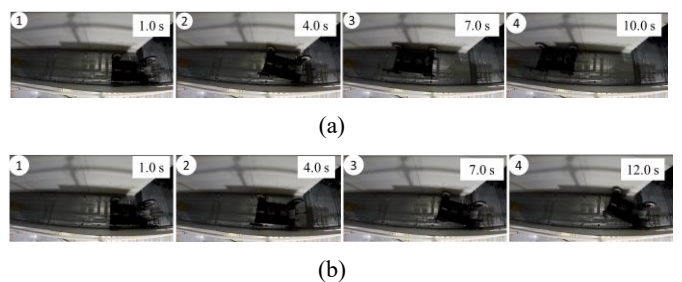


Fig.7 Motion of the robot in straight passage with crosswise locomotion. (a) Path following based on the contact force model. (b) Conventional path following.



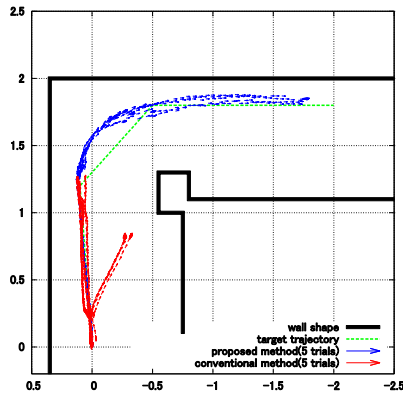


Fig.8 Trajectory of the tracked vehicle in L-shaped curve: Solid lines are the shape of walls, dashed lines are target path, red arrows are trajectory of conventional path following and blue arrows are trajectory of path following based on contact forcemodel.

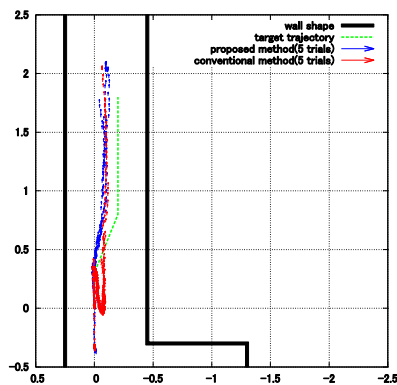


Fig.9 Trajectory of the tracked vehicle in L-shaped curve: Solid lines are the shape of walls, dashed lines are target path, red arrows are trajectory of conventional path following and blue arrows are trajectory of path following based on contact forcemodel.

図 6 に狭隘路の L 字カーブ走行時のクローラロボットの動作を示す。接触を考慮しない方法では、図 6(b)のように壁から離れる際に旋回できず、大きく後退している。その結果、経路から大きく逸脱し、カーブの内側の壁に接触し、走行不能となった。この実験では接触を考慮しない方法では全試行でロボットは同様の理由で経路を完走できなかった。これに対し、接触モデルに基づく経路追従では全試行でゴールに到達できた。図 8 に L 字カーブの走行時の軌跡を示す。

図 7 に直線通路で横方向への移動を含む経路を走行した場合のロボットの動作を示す。この実験では、接触を考慮しない経路追従では 5 回中 2 回のみ経路を完走できたのに対し、接触モデルに基づく経路追従では全試行でゴールに到達できた。図 9 に直線通路で横方向への移動を含む経路を走行した場合の移動軌跡を示す。L 字カーブの実験と同様に、接触を考慮しない方法では壁から離れる際に大きく後退し、大きく経路から逸脱した。

## 6. 考察

実験から、接触モデルに基づく経路追従を用いることで、壁との接触を含む経路で目的の経路に沿って移動できることが確認された。

壁と接触した際の挙動は、経路追従のゲインによって変わるものと考えられる。経路追従制御は、経路と車体中心の距離と角度偏差を小さくするよう角速度の指令値を決定する。そのため、これらに対するゲインが小さいほど、接触力による経路からのずれを補正する制御量は小さくなり、接触に及ぼす外力は小さくなる。経路追従ゲインと接触時の動作の関係を明らかにすることが、今後の課題である。

## 7. 結言

本稿では、壁と接触するクローラロボットのモデルに基づく経路追従制御の検証のため、接触を含む経路の自律走行実験を行った。狭い L 字カーブと直線通路での横移動を含む経路を走行し、いずれも接触モデルに基づく経路追従では滑らかに走行できた。また、接触を考慮しない従来の経路追従では、経路から大きく逸脱したり、走行不能に陥ったりする場合が見受けられた。

今後の課題としては、サブクローラ側面の摩擦を低減する機構の最適化と、不整地などでフリッパを使用した場合への本手法の拡張が考えられる。

## 参考文献

- [1] 小島匠太郎, 大野和則, 鈴木高宏, 田所 諭, “環境との接触力のモデルに基づくクローラロボットの軌跡追従制御”, ロボティクスシンポジウム, 2016.
- [2] B.Johann, and Y.Koren. "Obstacle avoidance with ultrasonic sensors." Robotics and Automation, IEEE Journal of 4.2 pp213-218,1988.99
- [3] J.Minguez and L.Montano, "Nearness Diagram (ND) Navigation:Collision Avoidance in Troublesome Scenarios", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.20, Iss.1, pp45-59,2004.
- [4] Koren, Yoram, and Johann Borenstein. "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation." Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation Sacramento, pp1398-1404, 1991.
- [5] D.Fox, W.Burgard and S.Thrun "The dynamic window approach to collision avoidance", IEEE Robotics and Automation Magazine 1997, Vol.4, Iss.1, pp23-33, 1997.
- [6] B.Johann, and Y.Koren. "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots." Robotics and Automation, IEEE Transactions on 7.3, pp278-288,1991.
- [7] Rude, M. "A flexible, shock-absorbing bumper system with touchsensing capability for autonomous vehicles." Intelligent Robots and Systems' 96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on. Vol. 2. IEEE, 1996.
- [8] 日本機械学会, "ROBOTICS ", 丸善出版, 2011.
- [9] 滝本昇, 高橋醇, "工科系の力学", 森北出版, 1987.