

# クローラ型移動ロボットの壁への斜め進入に関する研究

○松原和輝(東北大学) 永谷圭司(東北大学)

## 1. 緒言

近年、石油プラントに代表されるインフラ設備の老朽化が進み、点検の不備は重大な事故の原因となる可能性がある [1]. そこで、膨大な数の点検を効率よく行うため、設備の点検をロボットに行わせる動きが盛んになっている [2]. 中でも、クローラ型移動ロボットは高い移動能力や積載能力を備えているため、プラントの自動巡回点検や災害時の初期対応等が期待されており、開発が行われてきた。ロボットがプラント内で巡回点検をするには、自己位置を知ることが不可欠であるが、クローラ型移動ロボットは、その性質上、カーブ走行をする際に必ずクローラと地面との間に滑りが生じるため、クローラの回転数を用いたオドメトリと呼ばれる位置推定には、誤差が発生する [3]. この誤差の影響で、物理的に進入が可能な狭隘路でも、壁への接触を避けるために、進入ができなくなる場合がある。壁への接触を避けるのは、万が一側壁や幅木とロボットが接触した際に、それらに乗り上げてしまうことで、転倒や階下への滑落の恐れがあるためである。そのため、物理的に進入できる通路でも、自己位置推定の誤差を考慮すると、接触の可能性がある場合は、その通路への進入ができないと判断してしまう。もし、側壁や幅木に接触した際に、それらに乗り上げないことが分かっていたら、ロボットを壁に押し当てて進むことで、狭隘路への進入が可能となる。

クローラ型移動ロボットが壁に接触した際の挙動の予測は遠藤らにより行われてきた [4]. しかし、この研究では、ロボットが壁に対して垂直に進入した際の挙動に関する研究が主であった。一方で、狭隘路への進入の際には、ロボットが壁に対して斜めに当たるため、垂直に進入する場合とは異なる挙動になることが予想される。そこで本研究では、クローラ型移動ロボットの、壁への斜め進入時における挙動を分類し、それぞれの挙動についての物理モデルの構築ならびに条件式の導出を行う。さらに、実機を用いて導出した条件式の妥当性の検証を行う。

## 2. クローラ型移動ロボットが壁に進入した際の挙動分類および条件式の導出

### 2.1 挙動の分類

クローラ型移動ロボットが壁に斜めに進入するときの挙動は、表 1 ように分類することができる。そこで、それぞれの挙動に対し、その現象が起きる条件式を、運動方程式を解くことによって導出した。実際には、ロボットが壁に接触する際、これらの挙動が複数生じるが、ロボットと壁が接触した瞬間には、いずれかのひとつの挙動が生じると考えられるため、本研究で構築する物理モデルは、これらの挙動が単独で生じる際の静的なモデルと仮定した。運動方程式を立式するため

表 1 挙動の分類

現象 1	現象 2
壁から受ける反力による進行方向の変化	壁に平行になる方向へヨー方向回転
	ヨー方向回転しない
	壁に垂直になる方向へヨー方向回転
壁へのクローラ押し付けによる持ち上げ	ピッチ方向への持ち上げ ロール方向への持ち上げ
グローサが側壁上部に乗り上げ	/

に構築した物理モデルを図 1, 図 2 に示す。ロボットは、床と壁からそれぞれ、進行方向から  $\alpha$  と  $\delta$  だけ傾いた摩擦を反力として受ける。床から受ける摩擦力の傾き  $\delta$  に関しては、図 1 より、式 (1) のように表現できる。

$$\begin{aligned}\cos \delta &= \frac{N_w(\sin \varphi + \mu_w \sin \alpha \cos \varphi)}{\mu_f N_{all}} \\ \sin \delta &= \frac{N_w(\cos \varphi + \mu_w \sin \alpha \sin \varphi)}{\mu_f N_{all}}\end{aligned}\quad (1)$$

この中に現れる、 $N_w$  は壁から受ける垂直抗力であり、 $A = 1 + \mu_w^2 \sin^2 \alpha - \mu_f^2 \mu_w^2 \cos^2 \alpha$ 、 $B = \Sigma mg \mu_f^2 \mu_w \cos \alpha$ 、 $C = (\mu_f^f \Sigma mg)^2$  として式 (2) のように表現でき、 $N_{all}$  は床から受ける垂直抗力の和を表し、式 (3) のように表現できる。

$$N_w = \frac{-B + \sqrt{B^2 + AC}}{A}\quad (2)$$

$$N_{all} = \Sigma mg - \mu_f N_w \cos \alpha\quad (3)$$

また、壁から受ける反力の傾き  $\alpha$  に関しては、図 3 より、クローラの周速度とロボットの並進速度を  $V$  とすると、摩擦力はこれら 2 つの力の合力と反対の向きに発生すると考えられる。よって、ロボットが壁に対して  $V \cos \theta$  の速度で動いていることに注意すると、壁から受ける摩擦力の傾き  $\alpha$  は式 (4) となる。

$$\tan \alpha = \cos \varphi\quad (4)$$

本稿では主に、壁にクローラを押し付けた際に生じる挙動について扱い、グローサが側壁に乗り上げる挙動については扱わない。また、ロール方向への持ち上げに関しては、本研究で扱ったロボットでは、現象を確認することができなかったため割愛する。

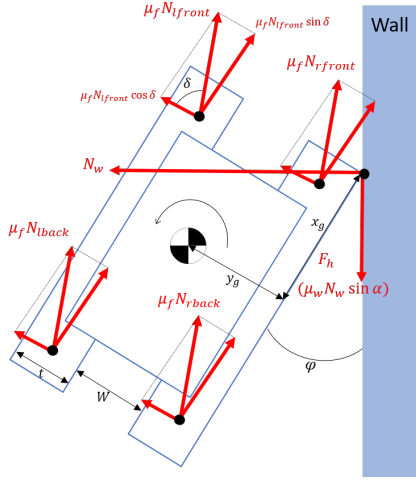


図1 クローラ型移動ロボットが壁に斜め進入する際のx-y平面の物理モデル

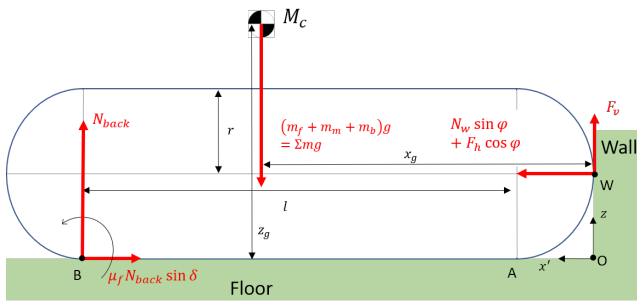


図2 クローラ型移動ロボットが壁に斜め進入するx'-z平面の際の物理モデル

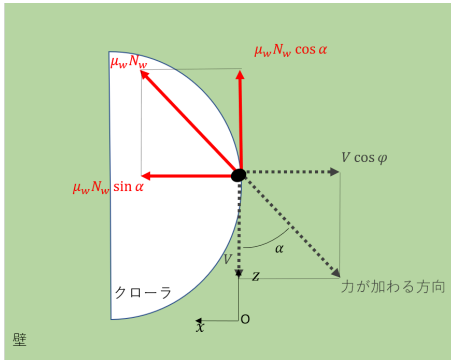


図3 クローラと壁との接触点における摩擦力の水平からの傾き導出モデル

## 2.2 ヨー方向の回転が起こる条件

ロボットが進入角度 $\varphi$ で壁に進入した際に、壁から受ける反力によって進行方向が変化する場合の物理モデルを考える。壁から受ける反力 $N_w$ によって進行方向が変化する挙動が発生する際には、ピッチ方向あるいはロール方向への持ち上げが発生していない状況であり、このときクローラは、床および壁に対して滑りが発生していると考えられる。この滑りを考慮して、運動方程式を解くと、ヨー方向の回転が起きる条件式(式

(5))を得る。

$$M_{yaw} = \mu'_f (N_{all} \cdot r + N_{back} \cdot l) \cos \delta - \mu'_f (N_{all} \cdot \frac{1}{2}t + N_{right} \cdot (W + t)) \sin \delta \quad (5)$$

ただし、 $N_{back}$ 、 $N_{right}$ はそれぞれ、クローラの接地点を図1のように近似したときの後ろ2点の垂直抗力の和と、右クローラ2点の垂直抗力の和であり、式(6)、式(7)のように表現できる。

$$N_{back} = (\mu_w r \cos \alpha + (\sin \varphi + \mu_w \sin \alpha \cos \varphi) z_w) \frac{N_w}{l} \quad (6)$$

$$N_{right} = (\mu_w \frac{t}{2} \cos \alpha + (\cos \varphi - \mu_w \sin \alpha \sin \varphi) z_w) \frac{N_w}{W + t} \quad (7)$$

式(5)の $M_{yaw}$ モーメントが正ならば、機体は壁に平行になる向きに、負ならば壁に垂直になる向きに回転する。なお、式(5)は図1に示すように壁に右側から当たった場合について解いたが、左側が当たった場合についても、式(5)と同様の方法で導出することができる。

## 2.3 ピッチ方向の持ち上げが起こる条件

ピッチ方向の持ち上げが起こる条件は、図2のB点まわりの回転運動方程式において、持ち上げに必要なモーメント $M_{pitch}$ と持ち上げる方向に発揮できる最大のモーメント $M_{pitchmax}$ の差が負であることである。そこで、 $M_{pitch}$ と $M_{pitchmax}$ の差を式で表すと式(8)のようになる。

$$M_{pitch} - M_{pitchmax} = \Sigma mg(l + r - x_g) - F_{max}(l + r + z_w \cos^2 \varphi + \frac{z_w}{\mu_w} \sin \varphi \sqrt{1 + \cos^2 \varphi}) \quad (8)$$

なお、 $M_{pitchmax}$ が発生するときの条件は、壁面との接触点(W点)における摩擦力が最大静止摩擦力( $F_{max}$ )となる場合である。

## 3. 実機による壁への斜め進入実験

第2節で導出した条件の検証を行うため、2種類のクローラロボットを用いた実機実験を行った。

### 3.1 実験内容

使用した実験器具、ロボット、およびロボットの主要パラメータを、それぞれ図4、図5および表2に示す。実験器具は、床・壁・ガイドプレートの3つから成り、ロボットをガイドプレートに沿わせて前進させることによって、ロボットを指定した角度で壁に進入させることができる。

実験はまず、図4に示したガイドプレートの角度を合わせ、ロボットをガイドプレートに設置し、一定速度で直進させる。その後ロボットが壁に接触した際に生じる挙動を観察する。この現象とモデルを用いて予想した現象を比較することで、導出した条件式の妥当性を検証する。



図4 実験器具

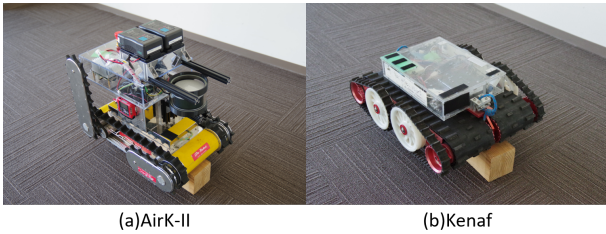


図5 使用したロボット (左:AirK-II, 右:Kenaf)

表2 ロボットの主要パラメータ

パラメータ名	AirK-II	Kenaf
質量 $\Sigma m$	34.5 kg	24.4 kg
重心 x 座標 $x_g$	318 mm	257 mm
重心 y 座標 $y_g$	208 mm	206 mm
重心 z 座標 $z_g$	152 mm	82 mm
メインクローラ平坦部長さ $l$	437 mm	470mm
メインクローラ円周部半径 $r$	66 mm	56 mm

上記の実験を、一つの条件につき5回ずつ行った。実験は本研究室で使用されているロボット2種類 (AirK-II・Kenaf) を用い、床および側壁として用意した材質は、高摩擦テープ (: high)・アルミニウム合金 (: middle)・低摩擦テープ (: low) の3種類とした。実験条件として、各ロボットにつき9通りの条件が考えられるが、挙動の変化を考慮し、各ロボットにつき4通りずつの摩擦係数の組み合わせで実験を行った。実験条件の詳細を表3に示す。

### 3.2 実験結果

まず、ヨー方向の回転に関する結果を図6に示す。グラフの縦軸はヨー方向の回転モーメント  $M_{yaw}$ 、横軸は壁への進入角度  $\varphi$  である。グラフの実線と破線は前述した、ロボットが壁に接触した際の挙動の予測結果であるが、実線は AirK-II、破線は Kenaf の予測結果を示している。一方、グラフの色は、床および壁の実験条件を示している。それぞれの予測結果に対して、 $M_{yaw}$  が0以下のとき、つまり図6の赤色の部分にグラフがある場合は、ロボットは壁に垂直になる方向に回転する。また、グラフのマークは、床と壁の材質、ロボットおよび進入角度を決めた時の、実際に生じた挙動を表している。+は壁に垂直になる方向に、=は壁と平行になる向きに、○はどちらにも回転しなかった場合

表3 壁へのクローラ押し付け実験における実験条件

変更条件	設定値
使用ロボット	AirK-II, Kenaf
進入角度 $\varphi$	30° ~ 80°
床・壁材質	(床) middle, (壁) high (床) middle, (壁) middle (床) high, (壁) middle (床) high, (壁) low

をそれぞれ示している。+と=が両方記されている条件は、5回の検証のうち、どちらの挙動も観測できた条件を表す。図6より、AirK-IIは予測と概ね一致した一方で、Kenafは予測したモデルよりも角度が壁と垂直に近い角度で平行になる向きの回転に遷移した。また、AirK-II, Kenafともに床の摩擦係数が大きい方が予測モデルとのずれが大きくなっていた。

次にピッチ方向の持ち上がりについての実験結果について、結果を図7に示す。グラフの縦軸は持ち上げるのに必要なモーメントと発揮できる最大のモーメントの差  $M_{pitch} - M_{pitchmax}$ 、横軸は壁への進入角度  $\varphi$  であり、グラフの種類はヨー方向の実験の結果と同じである。それぞれの予測結果に対して、 $M_{pitch} - M_{pitchmax}$  が0以下のとき、つまり図7の赤色の部分にグラフがある場合に、ロボットのピッチ方向の持ち上げが生じる。グラフのマークは、床と壁の材質、ロボットおよび進入角度を決めた時の、実際に生じた挙動を表しており、○は持ち上げが発生した場合、×は持ち上げが発生しなかった場合、△は微小な持ち上げが発生した場合、▽は機体が壁から離れる方向に押し戻されている場合を表す。△で表される微小持ち上げは、壁に機体が進入した際の振動のようなものであり、静的モデルでは考慮されていないため、本研究では持ち上げが発生していないと判断した。また、▽はグローサの弾性の影響で、機体が壁から離れる向きに考慮されていないグローサの弾性力を受けてしまっているため、本モデルの適用外と判断した。図7より、ピッチ方向の持ち上がりについては、AirK-II, Kenafともに概ね予測通りの挙動を示したといえる。しかし、進入角度  $\varphi$  が小さくなった際に、本来持ち上げが発生する条件であるにもかかわらず、実際の挙動では持ち上げが発生していないという条件が存在した。

### 3.3 考察

ヨー方向の回転の実験結果では、AirK-IIに関しては予測と結果が概ね一致していたのに対して、Kenafでは予測モデルと結果でずれが生じている条件が存在した。このずれは、グローサの変形による影響と考えられる。進入角度が小さくなると、グローサ端部が変形しやすくなり、実際の進入角度よりも小さな進入角度で壁に進入することになる。また、この変形により、グローサの復元力が生じ、この復元力が壁面との接触部分において滑りを発生させているのではないかと考えられる。本モデルでは、グローサの変形は考慮されていないため、予測と結果がずれたのではないかと考えられる。AirK-IIの予測と結果のずれが小さいのは、AirK-IIは

計算できるため、物理モデルへの適用は容易である。

#### 4. 結論

本研究では、クローラ型移動ロボットの壁への斜め進入時における挙動を分類し、それぞれの挙動についての物理モデルの構築および条件式の導出を行った。また、実機を用いて、導出した条件式の妥当性の検証を行った。この実験により、構築したモデルは、ピッチ方向に関しては、サイドプレートが当たる進入角度の存在を考慮に入れば、妥当であると判断できる。一方、ヨー方向に関しては、概ね予測と結果が一致したが、グローサの影響や、クローラと床との接地方法を考慮したモデルの修正が必要であると考えられる。

今後の課題として、精確な物理モデルを構築するため、グローサの変形の影響やクローラと床の面での接地、さらにはサブクローラが与える影響などについて調査し、物理モデルへ反映することが挙げられる。また、本稿では扱わなかったグローサの側壁への乗り上げに関しても、グローサの変形の影響を考慮したモデルを構築する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 総務省: “平成 28 年度中の石油コンビナート等特別防災区域内の特定事業所において発生した事故の概要の公表” [http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList4\\_16/pdf/h27/h27\\_jiko\\_shiryo.pdf](http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList4_16/pdf/h27/h27_jiko_shiryo.pdf)
- [2] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: “NEDO ロボット白書 2014”, <http://www.nedo.go.jp/content/100567345.pdf>
- [3] 遠藤大輔 永谷圭司 吉田和哉: “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”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 2 G17 2006.
- [4] Daisuke Endo and Atsushi Watanabe and Keiji Nagatani: “Stair Climbing Control for 4-DOF Tracked Vehicle Based on Internal Sensors”, Journal of Robotics. 2017.

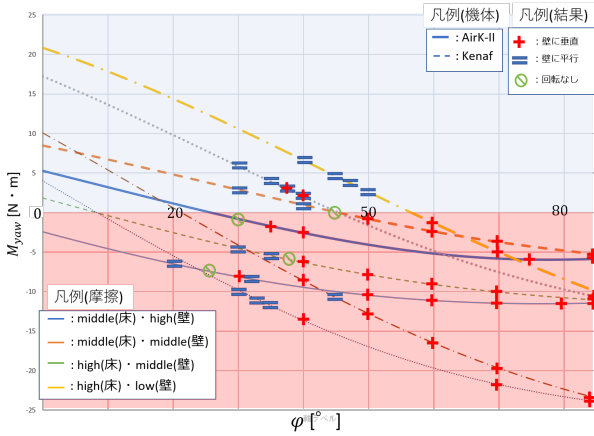


図 6 yaw 方向の挙動予測とその結果

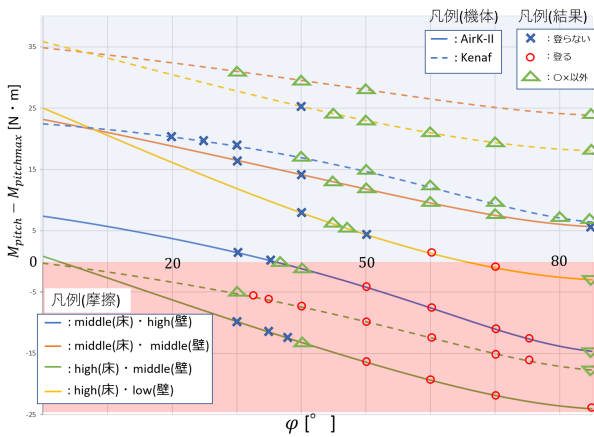


図 7 pitch 方向の挙動予測とその結果

グローサの剛性が低く、壁と接触した際にグローサの影響を無視できるほどグローサが変形したためであると考えられる。

また、Kenafの結果において、予測よりも進入角度が大きい条件で、ヨー方向の回転が起きない現象が発生した。これは、クローラと床との摩擦力が、モデルよりも大きいためであると考えられる。クローラは本来であれば面で床と接地しているため、床から受ける垂直抗力および摩擦力は面圧で考えなければならない。面圧で考えた場合は、点接地の場合と比較して、摩擦力は大きくなる。そのため、発生したヨー方向モーメントに対して、予測よりも静止摩擦力が大きいため、予測と実際の挙動がずれたのではないかと考えられる。

ピッチ方向の持ち上げの実験結果では、進入角度が40以上の場合、AirK-II, Kenafともに予測と結果が概ね一致した。しかし、40以下では、特にAirK-IIに関して予測と結果が大きくずれている。この原因として、サブクローラ側面のプレートが関係している。AirK-IIのサブクローラの外側には、クローラ保護用のプレートがついており、40以下になると、このプレート部がクローラよりも先に壁に当たってしまう。そのため、構築した物理モデルとは異なる状況になってしまい、予測と結果に乖離が生じている。なお、プレートが接触しない角度は、プレートの厚さとグローササイズから