

クローラロボットの階段における走行安定性

遠藤大輔(東北大学) 永谷圭司(東北大学) 吉田和哉(東北大学)

1. 序論

クローラ型移動機構は、車輪型と比較して不整地上における走行の安定性が高く、かつ脚型よりも駆動自由度が小さくて済むため、機構がシンプルにできるという利点がある。このため、近年、人間に代わって危険区域の探査活動を行う、レスキューロボット等の移動機構として広く採用されている。クローラ型移動機構を採用したロボット(以降、クローラロボット)の実用事例として、東京電力(株)福島第一原子力発電所の炉心溶融事故の建屋内探査のために、Quince[1]を代表とした多くのクローラロボットが、現在も継続的に活動を行っていることが挙げられる。これらのクローラロボットは、建屋内部の情報収集に一定の成果を上げて一方、不整地を移動中にスタック状態に陥り、走行および回収が不可能となる事態も発生している。探査ミッションの成功率向上と迅速化のためには、不整地へ進入する前に、客観的な指標に基づいた不整地走破の可否判別を行うことが必要である。この観点に立ち、本研究グループでは、クローラロボットが不整地へ進入する前に、その不整地を走破できるかどうかを自律判断するシステムの実現を目指している。そこで、研究の第一ステップとして、クローラロボットが階段上を走破するための物理的な条件を考案し、その妥当性について検証を行なった。本稿ではこの内容について報告する。

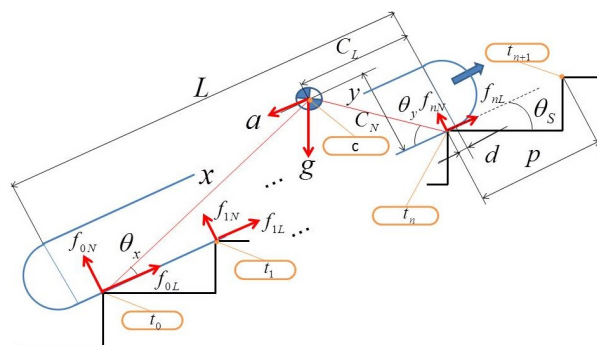


図1 階段上を走行するクローラの物理モデル

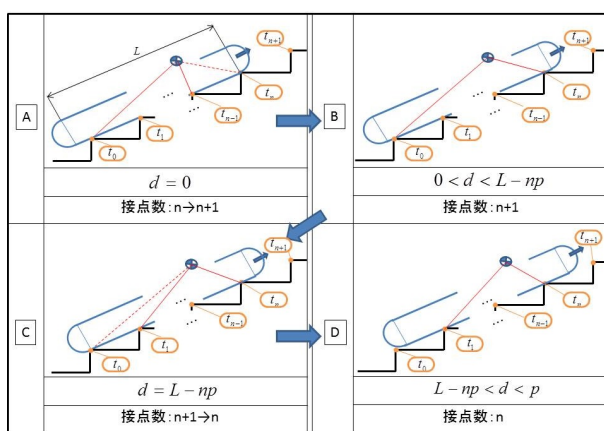


図2 階段を走破する時の推移

2. 階段を走破するための物理的条件

2.1 階段走破の失敗モード

前後方向の平坦部の長さが L のクローラロボットが、傾斜角度が θ_s 、1 段当たりのピッチが p である連続した階段上を、傾斜方向とロボットの前後方向とを一致させて走行する場合の二次元平面内の運動モデルを図1に示す。また、登坂時の状態の推移を図2に示す。図2において、 $np \leq L < (n+1)p$ (n は 2 以上の自然数) である。クローラロボットがこのように階段を走破するためには、下記の3種類の失敗モードを防止することが必要である。

1. 滑落:

クローラの駆動力が階段に伝わらず、空転する状態

2. 下方転倒:

図1上で点 t_0 を中心に反時計回りに回転する状態

3. 上方転倒:

図1上で点 t_n を中心に時計回りに回転する状態

本稿では、クローラと階段間の静止摩擦力は充分大きいとし、滑落を除く2つの失敗モードについて、防止するために必要な、物理的条件について記述する。

2.2 下方転倒

クローラロボットが転倒せずに階段を走破するためには、ロボットに作用するモーメントの総和が0に保

たれていることが必要である。階段に対し、 $n+1$ 個の接点を有するクローラ(図1)が回転せずに運動している時、 t_0 点回りのモーメントの釣り合いは、式(1)で記述される。

$$\sum_{k=1}^n k p f_{kN} + Max \sin \theta_x - M g x \cos (\theta_s + \theta_x) = 0 \quad (1)$$

ここで、 x は重心点 C と点 t_0 間の直線距離、 θ_x は $\angle t_n t_0 C$ のなす角度である。ロボットが t_0 点を中心に回転する時、点 t_0 以外でロボットを支えることはできないため、式(1)において、 $f_{kN} = 0$ (k は $1 \sim n$ の任意自然数) であり、左辺が0より大きくなる為、次の式(2)が得られる。

$$\begin{aligned} Max \sin \theta_x - M g x \cos (\theta_s + \theta_x) &> 0 \\ a &> \frac{\cos (\theta_s + \theta_x)}{\sin \theta_x} g \\ \therefore a &> \left(\frac{\cos \theta_s}{\tan \theta_x} - \sin \theta_s \right) g \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) の余事象が、ロボットが点 t_0 を中心に回転しないための条件である。即ち、次式 (3) を得る。

$$a \leq \left(\frac{\cos \theta_s}{\tan \theta_x} - \sin \theta_s \right) g \quad (3)$$

ここで、図 1 中の三角形 $t_0 t_n C$ に着目すると、 θ_x は次式 (4) ~ (6) を満足する。

$$\theta_x = \arccos \left(\frac{x^2 + n^2 p^2 - y^2}{2n x p} \right) \quad (4)$$

$$x = \sqrt{(d + n p - C_L)^2 + C_N^2} \quad (5)$$

$$y = \sqrt{(C_L - d)^2 + C_N^2} \quad (6)$$

ここで、 x は重心点 C と点 t_0 との距離、 y は重心点 C と点 t_n との距離、 d は図 2 の A の状態を 0 とした時の前進距離、 C_L は履帯平坦部の前端から重心点 C までの車体前後方向の距離、 C_N は履帯下面から重心点 C までの鉛直方向の距離をそれぞれ表す。

2.3 上方転倒

下方転倒と同様、階段に対し、 n 個の接点を有するクローラ (図 1) が回転せずに運動している時、点 t_n 回りのモーメントの釣り合いは式 (7) で記述される。

$$\sum_{k=0}^{n-1} (n-k) p f_{kN} - M a y \sin \theta_x - M g y \cos (\theta_s + \theta_y) = 0 \quad (7)$$

以降、下向きの場合と同様に考えることで、ロボットが点 t_n を中心に回転しないための条件 (8) が得られる。

$$a \geq - \left(\frac{\cos \theta_s}{\tan \theta_x} + \sin \theta_s \right) g \quad (8)$$

ここで、 θ_x は $\angle t_0 t_n C$ のなす角度である。三角形 $t_0 t_n C$ に着目すると、 θ_y は次式 (9) で表される。

$$\theta_y = \arccos \left(\frac{y^2 + n^2 p^2 - x^2}{2n y p} \right) \quad (9)$$

通常、ロボットが階段をゆっくり登坂している $x \times x \times x \times x \times x \times c f f d f d d d$ 場合には、点 t_n を中心とした転倒が発生することはあまりない。このような転倒が発生し得るのは、ロボットの重心点が、上層階段側に大きく偏っていたり、或いは急加速で階段を下る場合に発生し得る、稀有な現象である。

3. 安定性の判断と余裕度の指標

これまでに述べた、クローラロボットが階段を走破する時の状態推移と、各失敗モードが発生しないための加速度の条件について、走行距離に応じたプロファイルの模式図を図 3 に示す。この図 3 中の a_{r0} 、 a_{rn} は下記の式 (10)、(11) で定義する。

$$a_{r0} = \left(\frac{\cos \theta_s}{\tan \theta_x} - \sin \theta_s \right) g \quad (10)$$

$$a_{rn} = - \left(\frac{\cos \theta_s}{\tan \theta_x} + \sin \theta_s \right) g \quad (11)$$

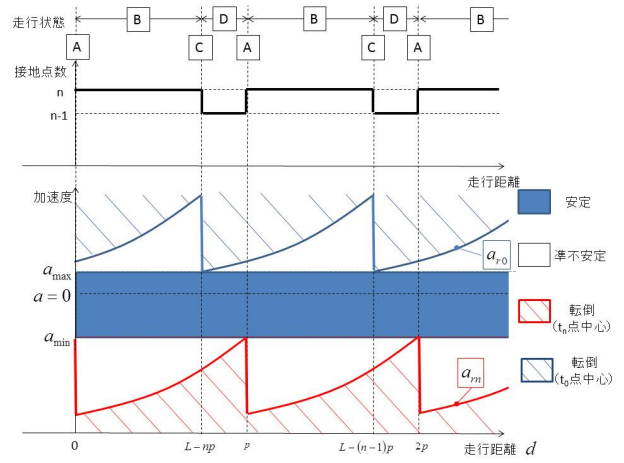


図 3 階段走破時の安定性のプロファイル

また、図 3 中の a_{max} は、 a_{r0} の最小値であり、 a_{min} は a_{rn} の最大値と定義し、次式 (12)、(13) で表現する。

$$a_{max} = \min(a_{r0}) \quad (12)$$

$$a_{min} = \max(a_{rn}) \quad (13)$$

図 3 の、走行距離 d -加速度 a の平面図より、クローラロボットの状態に応じ、安定性と発生する失敗モードの判断が可能である。即ち、 d - a 平面を下記の 4 つの領域に区分し、状態を判別できる。

1. 下方転倒領域：
加速度 a が式 (3) を満足しない場合に、モーメントの均衡が保てず、点 t_0 を中心に転倒が生じる。
2. 上方転倒領域：
加速度 a が式 (8) を満足しない場合に、モーメントの均衡が保てず、点 t_n を中心に転倒が生じる。
3. 安定領域：
 $a_{min} < a < a_{max}$ で表される領域。この加速度を維持する限り、階段を安定して走破できる。
4. 準不安定領域：
上記 1~3 のいずれの領域にも属さない領域。式 (3)、および (8) を満足するため、物理的には安定して走破できる。

準不安定領域内で動作させる為には、階段上のロボットの位置に応じて、加速度 a を制御することが必要である。このような制御を実現できるだけの、アクチュエータの応答性やロボット位置の推定精度がない限り、不安定とみなすべきである。

階段上を走行する場合、車体の走行加速度が安定領域に内在するよう制限することで、転倒を回避しながら走行することが可能となる。

4. 検証試験

これまでに述べた、クローラロボットが階段を走破するための物理条件について、妥当性を検証するため、クローラロボット実機を用いて、下方転倒を対象に検証試験を実施した。本節では、その内容と結果を記す。

4.1 試験装置

4.1.1 クローラロボット

検証には、本研究グループが有するクローラロボット Kenaf[2] を用いた。なお、Kenaf は本来、左右の対向する 2 つのメインクローラに加え、前後左右に 4 箇所の関節駆動部（サブクローラ）を有するロボットであるが、本試験では、サブクローラを取り外して用いた（図 4）。また、計算に用いたロボットの物理パラメータを表 1 に示す。

4.1.2 階段模擬装置

傾斜角度 θ_s およびピッチ p が変化した場合の、走破可否を試験により確認するため、 θ_s およびピッチ p を任意に変更可能な階段模擬装置（図 5）を製作した。本装置はスライド式のナットを用いており、固定用ボルトの締結位置を調整することで、傾斜角度が $0 \sim 60[\text{deg}]$ 、ピッチが $0 \sim 2400[\text{mm}]$ の範囲で任意に設定可能である。

4.2 試験要領

先述の階段模擬装置上に、クローラロボットを設置し、 $10[\text{cm}/\text{sec}]$ で、等速走行（加速度 $a = 0$ ）により階段を垂直登坂させ、クローラに下方転倒が生じるかどうかを観察した。階段模擬装置のピッチ p は、 $15.0, 18.0, 20.0, 22.0[\text{cm}]$ の 4 パターンを設定し、各条件において傾斜角度 θ_s を変化させ、繰り返し試験することで、各ピッチの条件でクローラロボットが下方へ転倒する限界角度を求めた。

なお、1 つの (θ_s, p) の条件に対し、繰り返し 3 回の評価を実施した。

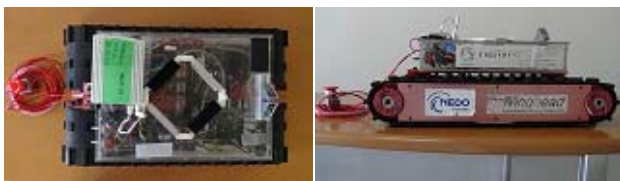
4.3 試験結果

試験結果を図 6 に示す。本グラフにおいて、種々のプロットは下記の結果を各々示す。

○：繰り返し 3 回全て、転倒を生じなかった

×：繰り返し 3 回全て、転倒を生じた

○×：転倒が生じた場合と生じない場合が混在した



(A) 上面視

(B) 側面視

図 4 試験用クローラロボット

表 1 ロボットの諸元

パラメータ	記号	数値
重心位置（横方向）	C_L	228[mm]
重心位置（縦方向）	C_H	48[mm]
平坦部長さ	L	470[mm]

また、同グラフ上の実線は、式 (3) ~ (6) において、 $a = 0$ として求めた、下記の式 (14) ~ (18) で記述される理論的限界線を示している。理論上は、この線を境界として、紙面右側の領域では転倒が生じ、左側の領域では転倒が生じないことを意味している。

$$\theta_s = \frac{\pi}{2} - \theta_{xC} \quad (14)$$

$$\theta_{xC} = \arccos\left(\frac{x_C^2 + (n-1)^2 p^2 - y_C^2}{2(n-1)x_C p}\right) \quad (15)$$

$$x_C = \sqrt{\{d_C + (n-1)p - C_L\}^2 + C_N^2} \quad (16)$$

$$y_C = \sqrt{(C_L - d_C)^2 + C_N^2} \quad (17)$$

$$d_C = L - np \quad (18)$$

4.4 結果の考察

図 6 より、傾斜角度 θ_s が比較的小さい領域では、実測結果と理論値が一致するのに対し、 θ_s が大きくなるにつれて、乖離が増大し、理論値よりも小さい傾斜角度で転倒が発生する傾向にあることが分かった。この主たる原因として、クローラ端部の円弧軌道部（以降、端部）と、駆動力向上を目的としてクローラ表面に成形されている凹凸形状（以降、リブ）を、モデル上考慮していないことが考えられる。図 7 に、 $\theta_s = 30[\text{deg}]$ 、 $p = 200[\text{mm}]$ の条件で登坂させた際のロボットの挙動を示す。この条件において転倒は発生しなかったが、端部が最下接地点から離れる直前の図 7-③および⑤において、既にロボットの重心投影点が最下接地点を除く接地多角形に内在する位置関係となっているにも拘らず、ロボット本体に仰角方向への揺動が生じていることが確認できる。これは、リブと端部の作用により、ロボット本体を浮き上がらせる力が生じるためと考えられる。この力が作用した時に、ロボットの安定性の余裕度が不十分な場合、図 8 に示すメカニズムにより、ロボット本体が浮き上がり、下方転倒に至るケースが発生し得る。以下の 1~4 にその転倒プロセスを記す。



図 5 可変式階段模擬試験装置

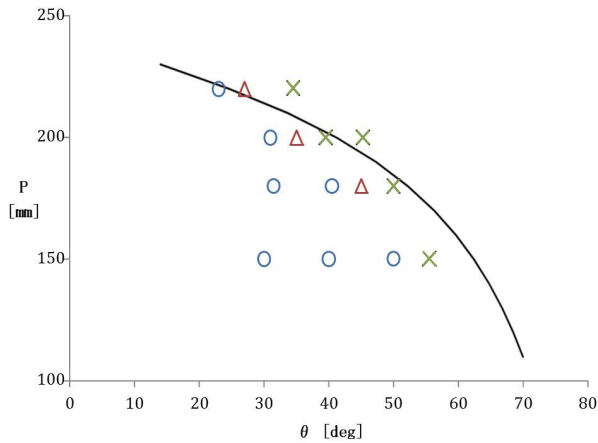


図 6 試験結果

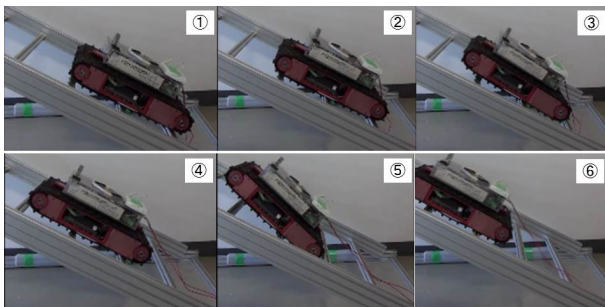


図 7 登坂時の挙動 ($\theta_s = 30[\text{deg}]$, $p = 200[\text{mm}]$)

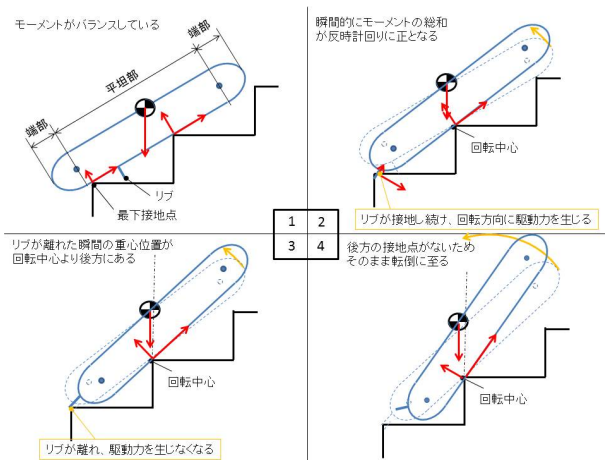


図 8 端部とリブの作用による転倒モード

1. 最下接地点がクローラ平坦部の直下にある時、クローラの進行方向にのみ駆動力が生じ、モーメントの総和は 0 を維持しながら、階段の傾斜に対して平行に移動する。
2. 最下接地点がクローラ後方に移動して端部に存在する時、円弧の接線方向に駆動力が作用する。この駆動力により、ロボットが反時計回りに転倒する向きのモーメントが、端部が階段から完全に離れるまで作用する。
3. 最下接地点が端部から離れた瞬間の、回転の慣性を加味して、重心位置が回転中心の鉛直線よりも

階段下方の領域に存在する。

4. 下方の支持点が存在しない（接地していない）為、そのまま下方へ転倒する。

図 8-3 において、仮に重心位置が回転中心の鉛直線よりも階段上方の領域に存在する場合、時計回りに回転が発生する。この為、クローラの上方に次の接地点を獲得して、再びモーメントの総和が 0 となる安定な状態（図 8-1）となる。これが、図 7 に示す挙動のメカニズムであると考えられる。最下接地点が離れるまでの過渡状態（図 8-2）の間に、駆動力によるモーメントのなす仕事量が、ロボットのエネルギー安定余裕 [3] を超過すると転倒に至る。傾斜角度が大きいほど、ロボットのエネルギー安定余裕は小さい。かつ、傾斜角度が大きいほど、最下接地点の荷重分担率が大きい為、駆動力によるモーメントのなす仕事量が大きくなる傾向にあると考えられる。

以上の理由により、傾斜角度の大きい領域では、理論値よりも小さい領域で転倒が生じやすいと考察する。このような現象を物理モデルへ反映し、モーメントのなす仕事量を定量的に予測することで、転倒限界の予測精度を向上できると考える。

5. まとめと今後の展望

本稿では、クローラロボットが階段上を転倒せずに走破するための物理的な条件を考案し、下方転倒の場合について、実機を用いた検証試験を実施した。その結果、ロボット自身の重心位置とクローラの長さ、および階段の傾斜角度とピッチの情報を用いることで、階段の傾斜角度が比較的小さい場合には、踏破の可否を判断できることを示した。一方で、傾斜角度が大きくなるのに伴い、考案した物理モデルにより予測される転倒の限界点よりも、小さい角度で転倒が生じる傾向があることが判明した。この原因を考察し、現状の物理モデルに反映することで、傾斜角度が大きい範囲においても、転倒の有無を精度よく判別することができるようになると期待できる。また、本稿では、傾斜角度とピッチが一定な、階段のような環境を対象に議論したが、考案した物理モデルを、傾斜角度とピッチが一定でない場合に拡張することで、不整地全般への応用が可能になると考える。

参考文献

- [1] Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Yasushi Hada, "Redesign of rescue mobile robot Quince -Toward emergency response to the nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011-", Proceedings of the 2011 IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.13-18 (2011-11)
- [2] 大野和則, 鈴木志穂子, 田所諭, 永谷圭司, 吉田智章, 小柳栄次, "Kenaf の半自律操縦支援システムと 3 次元操縦インタフェースの DisasterCity での実証実験", 第 10 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 論文集, 3M2-1 (2009-12)
- [3] S.hirose et al., "Normalized Energy Stability Margin: Generalized Stability Criterion for Walking Vehicles" In Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots, pages 71-76