

斜面上におけるクローラ型移動ロボットの非固定障害物乗越え時の転倒に関する検証

○谷島諒丞 永谷圭司 (東北大学)

1. 緒言

火山環境や地震等の被害を受けた建物等は状況把握や被災者の捜索のため調査をする必要があるが、人が直接調査を行うと二次災害の危険があったり、そもそも立ち入りが制限されていたりする場合がある。そこで、ロボットによる無人での調査が必要とされており、研究開発が進められている [1][2]。広域を高速で調査する場合には UAV 等が有用であると考えられるが、地表を詳細に調査する必要がある場合や長期間にわたる調査には地表移動ロボット、特に山体斜面や瓦礫の上のような不整地での走行性能が高いクローラ型移動ロボットが有用であると考えられる [3][4]。

クローラ型移動ロボットがこれらの環境を走行する時、進路上の障害物の乗越えが必要な場合がある (図 1)。ここで乗越える障害物について考えると、下記の 2 種類に分けることができる。

- I. 地面の凹凸や階段、地面に埋まっている岩石等のように、地面に固定されており、ロボットが発揮する力では動かない障害物
- II. 地面から遊離した浮き石や地面に散乱した瓦礫等のように、地面に固定されておらず、ロボットが発揮する力で動く可能性がある障害物

本研究では、I を「固定障害物」、II を「非固定障害物」と定義する。この内、固定障害物、特に、段差や階段の乗越えについては、乗越え条件や乗越え時の制御方法等について研究が行われてきた [5][6]。一方で、非固定障害物を乗越える場合、障害物に力が加わって動くことにより、転倒や滑落等のミッションの破たんにつながる致命的な問題が発生するが、十分な研究がおこなわれておらず、非固定障害物の乗越えについて、現象の解明と問題の解決が必要であると言える。

そこで、本研究では、火山環境や地震等の被害を受けた建物等の固定障害物と非固定障害物が混在する環境におけるクローラ型移動ロボットによる確実な移動と調査の実現を目指し、非固定障害物の乗越え時に発生する問題の現象を解明することとその解決方法を提案することを目的とする。本稿では、基礎的な現象から考えるために、まず断面が円形の障害物を扱い、ロボットの幾何学的な転倒条件を導出し、固定障害物と非固定障害物の間での違いを考察した後、それらを実機による実験で検証したので、それについて述べる。

2. クローラ型移動ロボットの円形断面障害物の乗越えにおける転倒条件の導出

2.1 本研究で扱う範囲、条件

ロボットが障害物を乗越えるには、ロボットはロボットの重心が障害物を越えず、後側に倒れ込んで上下が



図 1 浮き石がある火山環境を走行するクローラ型移動ロボット

逆になる転倒とロボットが進行方向とは逆側（斜面下側）に滑落するのを回避する必要がある。本研究では、このうちの転倒に焦点を当て、どのような条件で転倒が生じるのか、固定障害物と非固定障害物でその条件に違いがあるのかを明らかにする。ただし、検証実験においては、滑落が発生し得るので、その様子も合わせて観察する。

対象とするロボットは、サブクローラを持たないメインクローラ（左右 2 本のクローラ）のみのクローラ型移動ロボットとする。

また、対象とする環境としては、将来的に火山環境をターゲットの 1 つとするため、平地の場合だけでなく、斜面も扱う。

対象とする障害物は、特に背景で述べた火山環境をターゲットとすると浮き石のように形が定まっていなものを扱うべきだが、まず最初の段階として、形が決まっている断面が円形の障害物を対象とする。円形の非固定障害物が斜面上にある場合、障害物はそのままでは斜面下側に転がり落ちるはずだが、ここでは乗り越えるまで、止まっていたものとして扱う。

本研究では、ロボットの障害物への乗り上げはできたものとし、ロボットの前端部が障害物に乗り上げて接した状態から扱う。ロボットが斜面を直登する場合のみを扱うものとし、ロボットを側面から見た二次元平面で条件やロボットと障害物の挙動を考える。また、ロボットと障害物（非固定障害物の場合）は、斜面上を滑りなく移動するものとする。

2.2 円形断面障害物の乗越えにおける幾何学的な転倒条件

本研究では、上述のように、メインローラのみクロウラ型移動ロボットが断面が円形の障害物を乗越える際の転倒条件を考える。ここでは、ロボットの重心位置とロボットと障害物の接触点の幾何学的な関係から、転倒するか否かの境界となる円形断面障害物の直径を導出する。

クロウラ型移動ロボットが平地の動かない単段の段差を乗越える際の幾何学的な転倒条件については、参考文献 [6] で述べられており、比較的高い精度で乗越えられる段差の高さが予測できることが示されている。この手法を斜面かつ円形断面障害物の場合に適用することを考える。

図2にクロウラ型移動ロボットが円形断面障害物を乗越えようとしている状況を示す。参考文献 [6] の手法は、ロボットの後側と地面の接触点からロボットの重心までの距離 d_G とロボットと障害物の接触点までの距離 d_O (参考文献中ではステップまでの距離なので d_S と示されている) が等しく、それらをロボットのピッチ角 θ で微分した値が等しくなること、つまり、

$$d_G = d_O \quad (1)$$

$$\frac{dd_G}{d\theta} = \frac{dd_O}{d\theta} \quad (2)$$

の2式を乗越えの条件としている。これは、ロボットの重心がロボットと障害物の接触点(参考文献の場合ステップの角)の直上に到達すると、ロボットは障害物を乗越えるという考えに基づいている。縦軸が距離 d_G と d_O 、横軸がロボットのピッチ角 θ のグラフを考えたとき、ロボットが障害物を乗越える場合には、 d_G と d_O のグラフは交差する。一方で、ロボットが障害物を乗越えない場合には、2つのグラフは交差しない。両者の境界では、2つのグラフは接する、つまり、接点においては、 d_G と d_O が等しくなり、かつ、それぞれの傾きが等しくなるため、式1と式2が成り立つ。 d_G と d_O が等しくならない場合、ロボットのピッチ角が上がっていくため、 d_G は減少し、最終的に $d_G = 0$ となると転倒が生じる。

斜面上では、ロボットの後側と地面の接触点がロボットのスプロケット軸の直下ではない。また、障害物が円形であるため、ロボットが前進していくと、ロボットのピッチ角の変化に伴い、ロボットと障害物の接触点が移動する。以上を考慮すると、ロボットの後側と地面の接触点からロボットの重心までの距離 d_G とロボットと障害物の接触点までの距離 d_O は、

$$d_G = X_G \cos(\theta + \phi) - Y_G \sin(\theta + \phi) - R \sin \phi \quad (3)$$

$$d_O = \left\{ R \tan \frac{\theta}{2} + \frac{d}{2} \frac{(1 + \cos \theta)}{\tan \theta} - \frac{d}{2} (1 + \cos \theta) \tan \phi \right\} \cos \phi \quad (4)$$

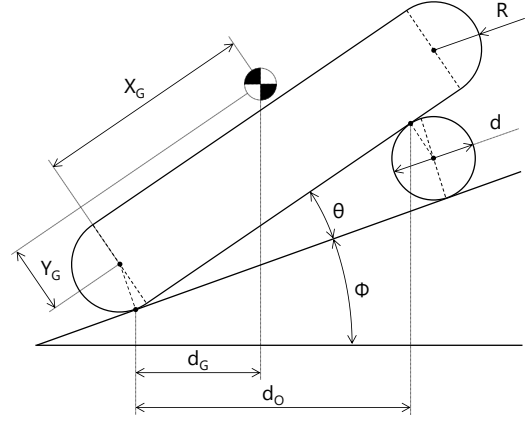


図2 斜面上の円形断面障害物を乗越えるクロウラ型移動ロボット

で表わされる。また、それぞれを θ で微分すると、

$$\frac{dd_G}{d\theta} = -X_G \sin(\theta + \phi) - Y_G \cos(\theta + \phi) \quad (5)$$

$$\frac{dd_O}{d\theta} = R \cos \phi \frac{1 - \cos \theta}{\sin^2 \theta} - \frac{d}{2} \cos \phi \frac{1 + \cos \theta}{\sin^2 \theta} - \frac{d}{2} \cos(\theta + \phi) \quad (6)$$

となる。それぞれを式1と式2に代入し、連立方程式を解くと、転倒するか否かの境界となる円形断面障害物の直径 d とその障害物の乗越えにおいてロボットの重心がロボットと障害物の接触点の直上に到達する際のロボットのピッチ角 θ が求まる。

なお、次節で述べるように、非固定円形断面障害物の場合、ロボットの重心がロボットと障害物の接触点の直上に到達しても、障害物が転がり、滑落が発生し、乗越えられない可能性があるため、ここでは乗越え条件とは呼ばず、転倒するか否かを判定する転倒条件と呼ぶ。

2.3 固定障害物と非固定障害物での違い

ロボットと障害物いずれも滑りが生じないのであれば、非固定障害物はクロウラの回転によって転がり、移動するので、重心がロボットと障害物の接触点の直上に到達する ($d_G = d_O$ になる)、または転倒が生じる ($d_G = 0$ になる) までの時間(ロボットの移動距離)が変わるはずである。非固定障害物の場合、障害物自体が転がってロボット側に接近してくるため、障害物との接触点までの距離 d_O やロボットのピッチ角 θ の変化が速くなる。したがって、転倒条件の障害物の直径は変わらず、固定障害物と比べ、重心の接触点直上への到達や転倒が早くなる、それらが起こるまでにロボットが移動する距離が短くなると考えられる。

次に、重心がロボットと障害物の接触点の直上に到達した後 ($d_G = d_O$ になった後) の挙動が異なると考えられる。固定障害物の場合、滑りが生じなければ、ロボットは重力に従って前側に倒れ込み、ロボットの後側は地面から離れ、ロボットの前側が地面と接触する、つまり、障害物を乗越えた状態に移行すると考えられ

る。非固定障害物の場合、同様にロボットが重力に従って前側に倒れ込み、ロボットの後側が地面から離れると、ロボットが障害物との接触点のみで支えられている状態になるため、障害物が転がり、滑落が発生し、ロボットの後側が地面に接触した元の状態に戻り、障害物を乗越えられない可能性がある。

しかし、現実には滑りが生じるため、転倒条件の障害物の直径や転倒や乗越えに至るまでのプロセスは上述の内容とは異なる可能性がある。固定障害物の場合には、摩擦が足りないこと、非固定障害物の場合には、摩擦が足りないことに加え、障害物が転がることによって滑落が生じるため、実機での結果は導出した転倒条件と一致しない可能性がある。

3. 実機による円形断面障害物の乗越え実験

3.1 実験内容

前節で述べた転倒条件となっている円形断面障害物の直径の推定が妥当であるかを検証するとともに、障害物が固定の場合と非固定の場合で乗越え時のロボットと障害物の挙動がどのように変わるかを調べるため、実機を使った円形断面障害物の乗越え実験を実施した。斜面上に設置した円形断面障害物をクローラ型移動ロボットに乗越えさせ、転倒するか否か（乗越えるか否か）とその際のロボットと障害物の挙動を確認した。実験では、斜面の傾斜角 ϕ と障害物の直径 d 、障害物の固定・非固定を変更し、各条件においてそれぞれ3回乗越えを実施した。

クローラ型移動ロボットは、図3に示すレスキューロボットの「Kenaf」を用いた。Kenafはサブクローラを有するロボットだが、本実験ではサブクローラを外し、メインクローラのみで実験を行った。表1に条件の導出に必要なKenafのパラメータを示す。なお、Kenafのクローラベルトの表面は、モデルのように平坦ではなく、高さ8mm、幅8mmの突起（ラグ）が40mm間隔で配置されている。

斜面は、図3に示す実験用模擬斜面を用いた。アルミフレームとベニヤ合板から構成されており、傾斜角を変更できる。本実験では、0~30°まで5刻みで傾斜角 ϕ を変えて実験を行った。ロボットが走行するベニヤ合板の表面には、ロボットと障害物の滑りを低減するため、高摩擦のウレタンシートを貼りつけた。また、固定障害物を再現するため、障害物の固定穴が開けられている。

円形断面障害物は、塩化ビニル管を用いた。本実験では、外径が18, 22, 26, 32, 38, 48, 60, 76, 89, 114, 140mmのものを用意した。障害物の長さは、実験用模擬斜面と同じ幅で、ロボットの幅より200mm長い。障害物の表面には、滑りを低減するため、鉍物粒子が塗布された滑り止めテープを貼りつけた。また、障害物の表面には、穴が5か所開けられており、上述の斜面の固定穴にねじ止めして、固定障害物を再現することとした。

3.2 固定障害物の場合

図4に固定円形断面障害物の場合の実験結果を示す。グラフの縦軸は障害物の直径 d 、横軸は斜面の傾斜角 ϕ である。グラフの実線と破線は、前節の手法を用いた

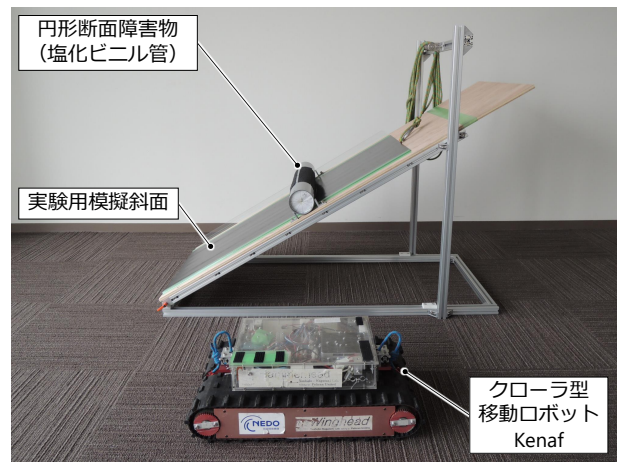


図3 実験装置

Kenafの転倒条件の推定結果であるが、実線はクローラの半径 R にラグの高さを含めた場合、破線はクローラ半径 R にラグの高さを含めなかった場合である。それぞれの曲線以下の直径の障害物であれば転倒には至らず、曲線より大きい直径の障害物であれば転倒すると考えられる。また、グラフのマークは、ある傾斜角 ϕ の斜面で、ある直径 d の障害物を乗越えた場合に、ロボットと障害物がどのような挙動をしたかを示している。○は滑落等が発生せずにロボットが障害物を乗越えた、□はロボットが障害物が転がって滑落したが障害物を乗越えた、△は摩擦が足りずロボットがその場で滑落を繰り返した、+は障害物が転がってロボットが滑落した、×はロボットが転倒したをそれぞれ示している。各条件の3回の実験で異なる結果が得られた場合、マークを左右に並べて示し、その下に発生回数を示している。

グラフより、実機でも、ほぼ推定結果の曲線以下の直径の障害物では乗越えられており、推定結果の曲線より大きい直径の障害物では転倒していることが分かる。したがって、固定円形断面障害物の場合には、前節で述べた転倒条件となっている円形断面障害物の直径の推定が妥当であることが分かる。ただし、斜面の傾斜角が高くなると、短い距離の滑落と登坂を繰り返す、乗越えも転倒もせず、その場に留まる現象が見られた。これは傾斜角 ϕ とロボットのピッチ角 θ が高くなったために、接触点での摩擦力が足りなくなり、ロボットを支えきれなくなったことが原因である。前節の手法は幾何学的な関係のみを扱っており、ロボットに働く力は考慮されていないので、より正確に推定するには力学的な関係を考慮し、摩擦力が足りなくなつて滑落が生じる条件も推定する必要がある。

表1 クローラ型移動ロボット「Kenaf」のパラメータ

重心の水平方向距離 X_G	222 [mm]
重心の垂直方向距離 Y_G	10 [mm]
クローラ両端の半径 R (ラグなし)	47.5 [mm]
クローラ両端の半径 R (ラグ込み)	55.5 [mm]

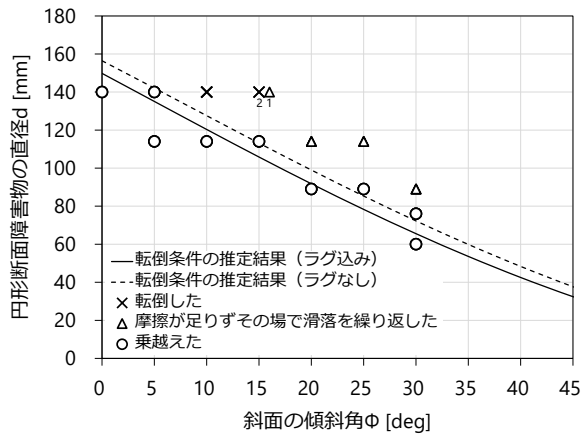


図4 転倒条件の推定曲線と固定障害物の場合の実験結果

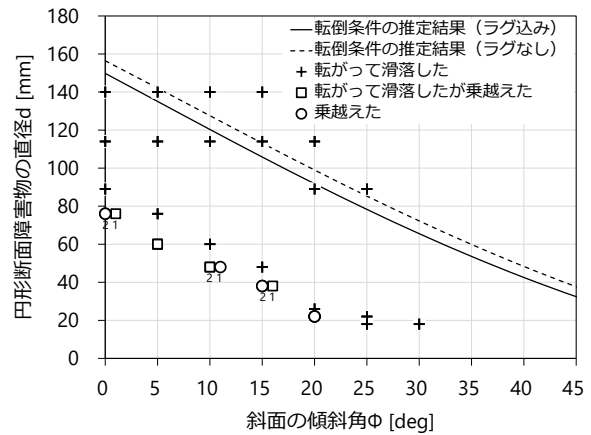


図5 転倒条件の推定曲線と非固定障害物の場合の実験結果

3.3 非固定障害物の場合

図5に非固定円形断面障害物の場合の実験結果を示す。グラフの軸、実践と破線、マークの意味は固定障害物の場合の実験結果と同様である。

グラフより、推定結果の曲線と実機の挙動が一致していないことが分かる。曲線より大きい直径の障害物でも小さい直径の障害物でも、障害物が転がる滑落が発生し、ロボットが転倒に至ることはなかった。これは、ロボットの後側と地面の接触点の摩擦力が足りなくなり、障害物がロボットの下でローラのような役割をしたためだと考えられる。障害物が転がる滑落が発生する場合、滑落が発生するまでの間、障害物はほとんど転がらず、その場に静止しており、ロボットがある位置に達すると、ロボットの後側と地面の接触点が滑り、それと同時に障害物がロボットと地面の間で転がる、というような挙動を示していた。障害物の直径が何mmになるとロボットは完全に乗り越えるかを併せて検証したところ、障害物が転がる滑落が発生しつつではあったが、グラフに示すように、推定曲線から約80mm下にオフセットした直径で乗り越えた。いずれの現象についても、固定障害物の場合と同様、力学的な関係を考慮し、転倒条件ではなく、障害物が転がって滑落が生じる条件を導出し、検証する必要があると考えられる。また、モデルではラグは考慮されていないため、現象と合わなかった可能性もある。モデルにラグを含める、もしくは、ラグのないクローラで実験を行うことも必要であると考えられる。なお、非固定障害物では、斜面の傾斜角が20deg以上になると、初期姿勢（ロボットの前端部が障害物に乗り上げて接した状態）で静止できず、滑落してしまう場合があったが、その場合は、クローラが回転し始めるまで支えて、実験を行っている。

4. 結言

本研究では、クローラ型移動ロボットによる非固定障害物の乗り越え時に発生する問題の現象を解明することとその解決方法を提案することを目的とし、ロボットが斜面上の円形断面障害物を乗り越える際の幾何学的な転倒条件を導出し、実機による実験を実施した。転倒条件の導出では、平地の段差に関する従来研究の手

法を斜面かつ円形断面障害物の場合に適用し、クローラ型移動ロボットの転倒条件を導出した。実験の結果、固定障害物の場合には、滑落が発生しなければ、導出した転倒条件通りに、転倒が発生することが確認できた。一方で、非固定障害物の場合には、導出した転倒条件の直径以上でも以下でも転倒はしないが、障害物が転がる滑落が発生し、完全に障害物を乗り越えるのは、導出した転倒条件から約80mm下にオフセットした直径であることが分かった。

今後の課題は、滑落条件を導出し、転倒条件と統合することで、より正確にロボットの障害物の挙動を予測できるようにすることである。また、本稿では円形断面の障害物を扱ったが、四角形断面などについても扱い、最終的には岩石のように形の定まっていない障害物について条件を導出する必要がある。さらに、導出した条件や実験を元に、より大きな障害物や不安定な障害物を乗り越えるためのロボットの設計や制御方法について、研究を進める必要がある。

参考文献

- [1] 松野文俊, 宇夫陽次朗: “レスキューロボットシステムの研究開発の現状”, 電気学会誌, vol.129, no.4, pp.232-236, 2009.
- [2] 永谷圭司: “大学を中心とした災害対応ロボットへの取り組み”, 建設マネジメント技術, 2013年6月号, pp.29-35, 2013.
- [3] 山下淳, 浅間一, 新井民夫, 太田順, 金子透: “ロボットの移動機構に関する研究動向”, 日本ロボット学会誌, vol.21, no.3, pp.282-292, 2003.
- [4] 小柳栄次: “サブクローラを持つレスキューロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.28 no.2, pp.147-150, 2010.
- [5] J. Liu, Y. Wang, S. Ma, and B. Li: “Analysis of stairs-climbing ability for a tracked reconfigurable modular robot”, 2005 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR 2005), pp.3641, 2005.
- [6] A. H. Rajabi, A. H. Soltanzadeh, A. Alizadeh, and G. Eftekhari: “Prediction of obstacle climbing capability for tracked vehicles”, 2011 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR 2011), pp.128133, 2011.