

テザー牽引を用いた小型移動ロボットの斜面走行とその力学的解析

多々納壮 (東北大学) 渡辺敦志 (東北大学) ○ 永谷圭司 (東北大学)

1. 緒言

火山活動による災害を防ぐためには、火山の活動を正確に把握することが必要不可欠である。そのため、警戒を要する火山では、定期的な立ち入り調査が行われている [1]。中でも、火山の噴気孔のガス濃度や温度の調査は、山中のマグマや水蒸気の活動把握に直接繋がる情報を得られる重要な調査であり、噴火予測に欠かせない調査である。しかしながら、この噴気孔の調査は、現在、人手で行われており、噴気に含まれる有毒ガスや水蒸気の突沸などのリスクを伴う、非常に危険な作業である。このような調査を無人で行うことが、調査員の安全性の観点から期待されている。

そこで本研究グループでは、噴気孔の調査を行うことができる遠隔操作型の小型移動ロボットを開発し、2015年11月に、伊豆大島の三原山ならびに楯形山において、動作試験を行った [2]。この試験では、実噴気孔の調査を行うと共に、様々な環境を走行させることで、開発したロボットの有用性を検証した。その結果、探査対象である噴気孔の幾つかは、図1のような斜度の大きな崖に存在し、現在の4輪ロボットでは近づくことすらできないことが判明した。このような噴気孔の探査のため、急斜面を調査することが可能なロボットシステムを構築することが必要である。

そこで、本研究では、通常の走行では転倒してしまう急傾斜面を走行するため、ロボットにテザーを装着し、図2に示すように斜面の上から牽引することによって、急斜面での転倒を防止しつつ走行を行う手法を提案する。この提案手法を検証するため、これまでに、実機を用いた予備試験を行い、実機をモデル化することで力学的な解析を行ってきた。本稿では、提案手法を紹介すると共に、斜面における滑りと転倒に関し、実機の値を用いて評価を行ったので、これを報告する。

2. テザー牽引による斜面走行

2.1 斜面走行手法

火山環境は、表面が砂利で覆われているような軟弱地盤や、急斜面が多く存在し、転倒や滑りを引き起こす。移動ロボットは、この転倒と滑りという2つの課題を克服することで、火山においてより広い範囲の探査が可能となる。我々の所属する研究グループでは、火山の走行が困難な地形を移動ロボットで移動するため、転倒し、上下が入れ替わっても走行可能な車輪移動ロボット CLOVER [3] や、斜面での転がり現象自体を利用して移動するロボット [4]、軟弱地盤での滑りを抑えるため、クローラ接地角度を制御するロボット [5] など、火山環境に対して頑強なロボットの研究開発を行ってきた。しかしながら、噴気孔調査においては、噴気が噴出している噴気孔まで移動した後、センサーを穴



図1 伊豆大島 三原山噴気孔

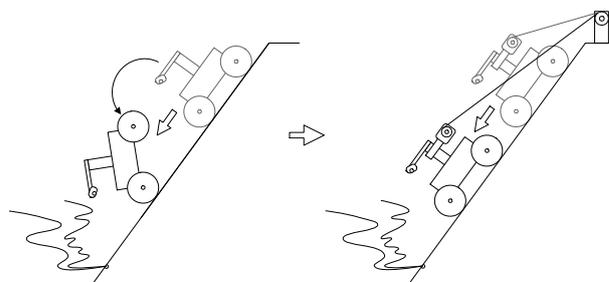


図2 テザー牽引による斜面走行

の内部に挿入する動作を、斜面で実行する必要がある。そのため、斜面での走行性能に加え、斜面の任意の位置で静止できる性能が要求される。斜面において、機体を静止させるためには、斜面での滑りと転倒を誘発するように作用する重力の影響を打ち消す必要がある。そこで、本研究では、テザーをロボットに装着し、テザーの張力によって重力の滑りと転倒を誘発する力を相殺し、斜面に対する接地力を増幅することで斜面で走行、静止できるシステムの実現を目指す。

図3に、噴気孔探査に用いた移動ロボット CLOVER にテザーを装着し、斜面での走行試験のために製作した小型対向4輪移動ロボット Tethered CLOVER を示す。このロボットを用いた予備試験の力学的解析から知見を得ることで、実際の火山での運用に適した移動ロボットを製作することを目指す。テザー牽引を用いた斜面走行に関する研究には、NASAの研究グループによる TRESSA [6]、AxelRover [7] などのロボットが挙げられる。しかしながら、4輪移動ロボットを単一のテザーで牽引し、斜面を走行させた際の力学的な解析は、これまでに、行われていない。また、噴気孔探査は、山中で行われるため、ロボットは、人が山中に携帯できる小型軽量の設計を満たす必要がある。そこで、

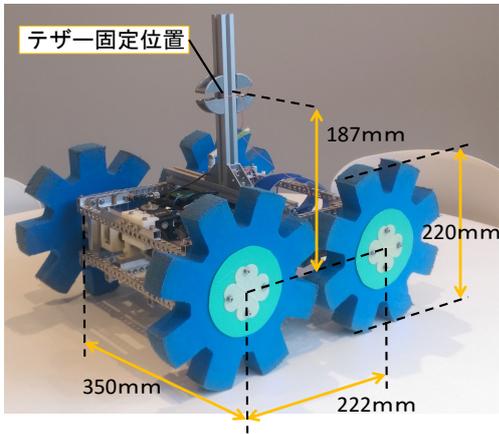


図3 Tethered CLOVER

Tethered CLOVERの重量は約4kgとなっており、寸法値も図3に示すように小型の設計になっている。これは、テザーで牽引を行う際に必要とされる張力を抑える結果にも繋がるため、本研究の目的に合致している。

2.2 斜面走行予備試験

テザー牽引を用いた斜面走行で、どのような問題が生じるのかを整理するため、前節のTethered CLOVERにテザーを装着し、実機を用いた予備試験を行った。

試験の様子を図4に示す。試験フィールドは、東北大学構内の、33度の傾斜角を持つ芝生の斜面である。まず、斜面上にある柵にロボットから伸びたテザーを固定し、斜面上にて、旋回、斜面横断、斜面登坂動作を行った。

その結果、旋回動作時は、4つの車輪が全て接地している時は任意の方向へ旋回可能だったが、テザーに引かれ、斜面谷側の車輪が浮く際には、旋回不能になる現象を確認した。次に、斜面横断動作時、一定距離を走行した後、テザーに引かれ斜面谷側の前輪が浮いてしまい、走行不能になる現象を確認した。最後に、斜面登坂動作時は、テザーがゆるむと、ロボットは斜面谷側に転倒する現象を確認した。

以上の結果から、本試験機は、この傾斜角の斜面を移動する際には、テザーによる張力がなければ斜面谷側に転倒してしまうが、テザー張力が過剰に働くと斜面山側に転倒し、指令通りの動作を行うことができないことが分かった。つまり、テザー牽引による斜面走行では、ロボットの状態に応じて、テザーにかける張力を適切に制御し、転倒を防ぐ必要があるといえる。

以上の結果を踏まえ、次に、斜面の上で人がテザーを持ち、ロボットの状態を目視しながら車輪が浮かないよう張力を調節し、同様の試験を行った。その結果、旋回、斜面横断、斜面登坂動作の全てを達成することができたが、ロボットの移動速度が人の張力を調整する速さを上回った状況では、転倒が生じた。

以上の結果より、テザー牽引による斜面走行においては、テザー張力を適切に制御し、車体の転倒と滑りを防いだ上で、目標の動作を実現させることが重要である。



図4 斜面走行試験

3. 静力学的解析

本研究では、予備試験の結果を踏まえ、Tethered CLOVERの静力学的解析を行った。

テザー張力は、斜面において、機体の滑りと転倒を防止するように働く。第2章で行った試験から、テザー牽引による斜面走行において、転倒を防止するテザー張力には、機体が谷側に転倒しないために必要な下限値と、山側への転倒を誘発してしまう上限値が存在することがわかった。この試験では、地面との摩擦力が十分に得られていたため、結果としては顕在化しなかったが、滑りを防止するテザー張力にも、上限値ならびに下限値が存在すると推測できる。このテザー張力に求められる適正範囲を、モデル化した移動ロボットの静力学的解析より算出する。今回は、運動中にかかる力が2次元平面で完結する斜面登坂方向について解析を行った。

3.1 モデルの導入

モデルとして、図5に示す傾斜角 θ の斜面を垂直に下る質量 M の移動ロボットを導入する。ロボットは、斜面の上に固定されたテザーから張力 T を θ_l の角度で受けている。車輪に働く地面からの垂直抗力は、後輪を R_1 、前輪を R_2 とする。ロボットの寸法は車輪軸の中心を原点として、機体座標の水平方向を w_i 、鉛直方向を h_i で表し、添字 i で各部の寸法を示す。(重心: $i = G$, 車輪接地点: $i = r$, テザー固定位置: $i = l$) 以下の計算では、機体の進行方向を x 軸とし、斜面に対し鉛直方向を z 軸とする。

3.2 滑りを防止するテザー張力の算出

まず最初に、機体に働く力について考える。ロボットとテザーのなす角を $\theta_T = \theta - \theta_l$ とおくと、機体に働く外力の釣り合いについて、静力学条件で以下のよう求めることができる。

$$x \text{ 方向} : |Mg \sin \theta - T \cos \theta_T| = \mu(R_1 + R_2) \quad (1)$$

$$z \text{ 方向} : Mg \cos \theta + T \sin \theta_T = R_1 + R_2 \quad (2)$$

ここで、 μ は、地面の静止摩擦係数である。テザーによる張力は、重力に対して x 方向では相殺する向きに、 z 方向では増幅する向きに働く。そのため、適正なテザー張力を加えることで重力の斜面滑り方向の成分を打ち消し、重力とテザー張力の合力を斜面に対して垂

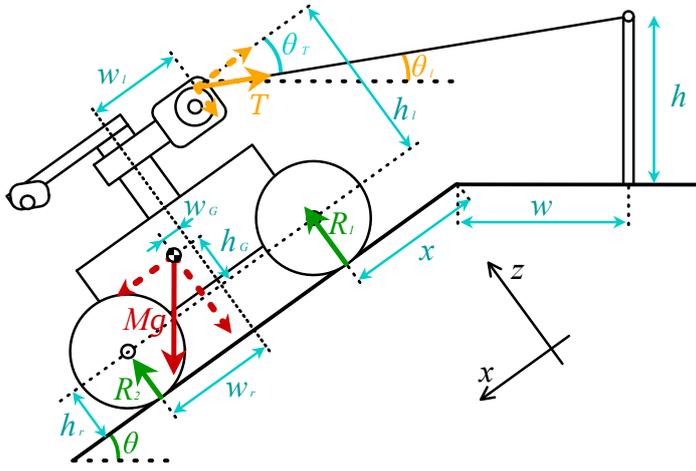


図5 ロボットのモデル

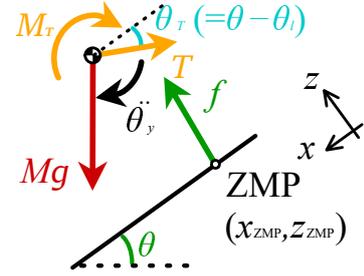


図6 ゼロモーメントポイント

直な擬似重力として機体に与えることが可能になる。テザー張力で重力の斜面滑り方向の成分を打ち消すとき、式1の左辺の絶対値が0になるので、この式を整理することで、機体に擬似重力を与えるテザー張力 T は、以下のように求まる。

$$T = \frac{\sin \theta}{\cos \theta_T} Mg \quad (3)$$

この式3を満たす T をテザー牽引装置で発生させることで、斜面で滑りを発生させることなく、機体の姿勢を維持することが可能となる。なお、 T は、機体の重量 M と斜面の傾斜角 θ ならびに、テザーの繰り出し角度 θ_l から計算できるため、 θ と θ_l の値をセンサによって取得し、これをフィードバックすることで、テザー牽引装置による斜面走行が実現できると考えられる。また、式1の左辺に式2を代入し、 T について整理することで、滑りを生じさせる T の上下限値を μ を用いて、以下のように表すことができる。

$$T = \frac{\sin \theta \pm \mu \cos \theta}{\cos \theta_T \mp \mu \sin \theta_T} Mg \quad (4)$$

この式4の μ に運用環境の静止摩擦係数を代入することで、滑りを起こさないテザー張力の適正範囲を算出できる。

3.3 転倒を防止するテザー張力の導出

次に、車体に働くモーメントについて考える。機体の重心回りのモーメントの釣り合いを考えるにあたり、ゼロモーメントポイント (ZMP) の概念を導入する。ZMP は、機体に働くモーメントを打ち消す地面からの反力を、ある一点からの合力とみなした時の作用点の座標である。図6に示すような力 f が ZMP に生じている時、重心回りの回転の運動方程式は、以下のように示すことができる。

$$f_z(x_G - x_{ZMP}) - f_x(z_G - z_{ZMP}) + M_T = I_y \ddot{\theta}_y \quad (5)$$

ここでの M_T は、テザー張力が重心に与える集中モーメントである。

モーメントが釣り合っており、回転が起きない状況を仮定すると、角加速度 $\ddot{\theta}_y = 0$ とおくことができる。

また、ZMP は斜面上に存在するため、 $z_{ZMP} = 0$ とおくと、式5は以下のように整理できる。

$$f_z(x_G - x_{ZMP}) - f_x z_G + M_T = 0 \quad (6)$$

この式6に、式1と式2より求められる f_x 、 f_z と、寸法値と T より求められる M_T を代入することで、テザー張力 T を以下のように x_{ZMP} を用いて表すことができる。

$$T = \frac{(h_r + h_G) \sin \theta + (x_{ZMP} + w_G) \cos \theta}{(w_l - x_{ZMP}) \sin \theta_T + (h_r + h_l) \cos \theta_T} Mg \quad (7)$$

機体が転倒しないためには、ZMP は、機体の接地点で囲まれた接地多角形内に存在する必要がある。そのため、 x_{ZMP} は $-w_r < x_{ZMP} < w_r$ の範囲に存在する必要がある、この範囲外の x_{ZMP} では、機体は転倒してしまう。ゆえに、式7に、この x_{ZMP} の上限と下限を代入することで、転倒を防止するために必要なテザー張力の下限値と、転倒を誘発してしまうテザー張力の上限値を求めることができる。この計算によって求めることのできるテザー張力の上下限値は、車輪接地点回りのモーメントの釣り合いから、 $R_1 = 0$ 、または $R_2 = 0$ となる条件のもと求められる T と同一である。

以上より、静力学的条件のもと、テザー張力に求められる適正範囲を算出することができた。

4. Tethered CLOVER の安定性の評価

4.1 安定性の評価

第3章で算出したテザー張力の適正範囲から、Tethered CLOVER の安定性を評価する。斜面走行試験で用いた移動ロボットについて、斜面上端から4m下った位置での滑り、転倒を防止するテザー張力 T の理論値、上下限値と斜面の傾斜角についての関係を、図7に示す。 T_{Slip} が滑りを防止するテザー張力の理論値であり、 T_{Fall} が転倒を防止するテザー張力の理論値である。 T_{Fall} の理論値は、 x_{ZMP} が上下限値の中央値を取るテザー張力を採用している。計算を行うにあたり、機体寸法は、図3の実寸法を使用した。また、静止摩擦係数は、テストフィールドと同程度の足の高さの芝生上で静止した機体を引っ張ることで計測し、3回の計測値の平均値をとって、 $\mu = 1.1637$ とした。

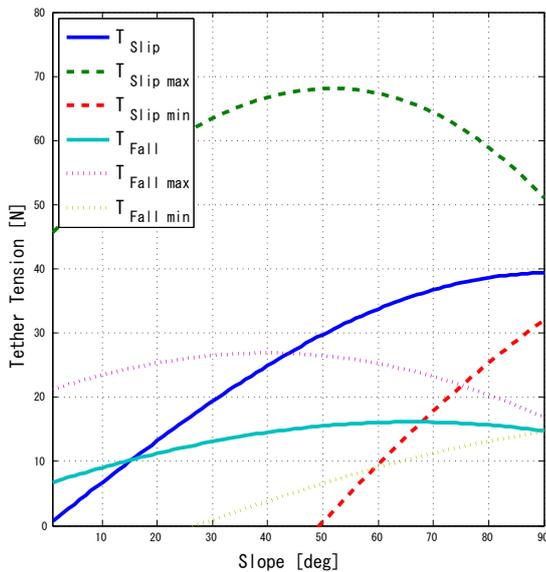


図7 斜面傾斜角とテザー張力の関係

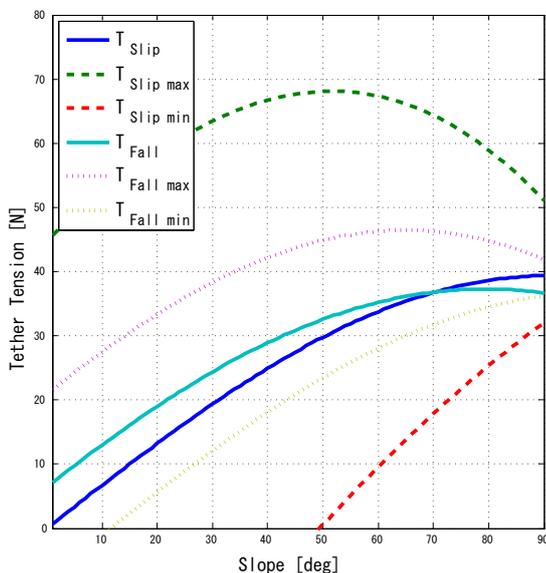


図8 重心位置を高くした際の変化

図7より、現在の機体寸法では、45度前後で T_{Slip} の理論値が、 T_{Fall} の上限値を超えてしまうことがわかる。しかし、芝生の静止摩擦係数が大きいため、 T_{Slip} の下限値が、 T_{Fall} の理論値を超える68度前後の傾斜角までは、斜面での姿勢維持が可能であると考えられる。

4.2 寸法値の影響の検証

図7において、 T_{Slip} と T_{Fall} の増減が異なるのは、 T_{Slip} が力の釣り合いから算出しているのに対し、 T_{Fall} は寸法値が影響するモーメントから算出していることが原因である。そのため、モーメントの式6で固有に働いているテザー張力による集中モーメント M_T の影響が少なくなるように、機体寸法を変更することで、 T_{Fall} の変化が T_{Slip} に沿ったものになるはずである。上述の仮定の下で、機体の重心寸法 h_G をテザー固定位置 h_l と同じ高さに変化させ、再度計算を行った。その結果を図8に示す。重心を高くしたことにより、 T_{Fall} の

下限値が高くなっているが、集中モーメントの影響が少なくなり、 T_{Fall} の上限値が大きくなっていることがわかる。さらに、 T_{Fall} の変化が T_{Slip} に沿ったものになったため、70度以上の急な傾斜角についても、滑りと転倒を生じない張力を発生することが可能となった。

以上より、寸法値の影響による T_{Slip} と T_{Fall} の乖離が確認できた。これを解消するため、テザー張力による集中モーメントの影響が少なくなるような機体の設計を行うことで、急斜面でも探査が可能な小型移動ロボットを実現できると考えられる。

5. 結言

本稿では、火山急斜面における噴気孔探査を実現させるための手法として、テザー牽引装置を用いた斜面走行法を提案した。また、この提案手法について、実機を用いた走行試験を行い、テザー張力に対する制御が必要であることを確認した。次に、機体のモデル化を行い、静力学条件で解析を行うことで、制御に用いるべき張力と機体の寸法値によって生じる張力の上下限値を算出した。加えて、このモデルを用いた安定性の評価から、張力の上下限値を向上させる設計方針を得た。

今後は、テザー張力を制御可能な装置を作製することで、今回の評価で得た仮説の検証を進め、静力学条件外の現象がどのように影響するかを検証すると共に、旋回、斜面横断についても、解析と評価を行う。また、不整地を意識し、より滑りが支配的になる条件でも評価を行う。最終的に、伊豆大島三原山において噴気孔調査の実証試験を行い、本提案の有用性を検証する。

参考文献

- [1] 気象庁 HP. 各種の火山観測. <http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/volmonita/volmonita.html>.
- [2] 多々納壮, 丸谷恭平, 小坂岳文, 永谷圭司, 久利美和. 火山噴気孔探査を目的とした遠隔操作型小型移動ロボットの開発. 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2016, pp. 2A1-18a5, June 2016.
- [3] 山内元貴, 秋山健, 永谷圭司. 飛行ロボットと小型地表移動ロボットの複合システムによる火山活動区域の無人調査. 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 3, pp. 220-225, April 2016.
- [4] 速水邦晃, 永谷圭司, 吉田和哉. 火山斜面転がりを利用した移動探査ロボットの操舵制御. 計測自動制御学会東北支部50周年記念学術講演会, p. B301, December 2014.
- [5] 山内元貴, 永谷圭司, 吉田和哉, 茂木正晴, 藤野健一. 能動接地角制御およびt型ラグの利用によるクローラ型移動ロボットの斜面横断走行性能の向上. 第18回ロボティクスシンポジウム 予稿集, March 2014.
- [6] Terry Huntsberger, Ashley Stroupe, Hrand Aghazarian, Mike Garrett, Paulo Younse, and Mark Powell. Tressa: Teamed robots for exploration and science on steep areas. *Journal of Field Robotics*, Vol. 24, No. 11-12, pp. 1015-1031, 2007.
- [7] Issa AD Nesnas, Jaret B Matthews, Pablo Abad-Manterola, Joel W Burdick, Jeffrey A Edlund, Jack C Morrison, Robert D Peters, Melissa M Tanner, Robert N Miyake, Benjamin S Solish, et al. Axel and duaxel rovers for the sustainable exploration of extreme terrains. *Journal of Field Robotics*, Vol. 29, No. 4, pp. 663-685, 2012.