

テザー牽引を用いた小型移動ロボットの斜面走行に関する研究

転倒と滑りを同時に抑制する設計法と斜面模擬試験装置を用いた検証

多々納壮 (東北大学) 渡辺敦志 (東北大学) 永谷圭司 (東北大学)

Research for Slope Traveling by Tethered Mobile Robot Design to Preventing both Slip and Fall, and Verification by using Simulated Slope

Soh Tatano (Tohoku Univ.), Atsushi Watanabe (Tohoku Univ.),

and Keiji Nagatani (Tohoku Univ.)

Abstract : This paper proposes a slope traveling mobile robot design by using a tether based on an analysis of slip and fall. The observation of fumaroles is important for volcanic eruption forecasting. However, this is a dangerous for human because of volcanic gasses and high-temperature steams. The authors have been developing a teleoperated mobile robot that observes fumaroles in a volcanic area, instead of humans. For example in Izu-Oshima Island, there are some fumaroles on a steep cliff that typical mobile robot can not reach. In this paper, tethered mobile robot design for such environments based on the analysis of slip and fall is shown. Also, the evaluation result of the analysis is confirmed by the test on a simulated slope.

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の吸入や水蒸気による火傷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 4 輪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櫛形山において、動作試験を行った [2]。この試験では、実際の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、試験に用いた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。この提案手法の有用性を検証するため、これまでに、実機を用いた予備試験と、力学的な解析に基づくシステムのモデル化を行ってきた [3]。本稿では、この提案手法と力学的解析につ



Fig. 1: 伊豆大島 三原山噴気孔

いて説明する。また、実験装置を製作し、力学的解析の検証に基づき、転倒と滑りを同時に抑制する機体設計を行った結果を報告する。

2. テザー牽引による斜面走行

2.1 関連研究

筆者らの研究グループでは、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、転倒して上下が入れ替わっても走行可能な車輪移動ロボット CLOVER[4] や、斜面での転がり現象を積極的に利用して移動するロボット [5]、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 [6] 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。

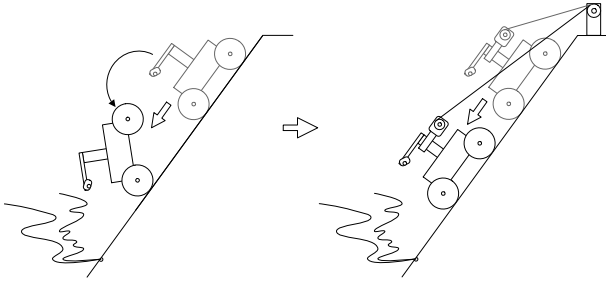


Fig. 2: テザー牽引による斜面走行

このような急斜面を探索するための一手法として、テザー牽引を用いた斜面走行が挙げられる。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[7], AxelRover[8] 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。

2.2 提案手法

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。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 の上部にテザー固定用の支柱を装着し、斜面走行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。支柱上部には、おもりを装着可能な台を設置し、機体重量や重心位置を変更して試験を行うことが可能な構成とした。このロボットを用いた走行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。人が山中に携帯できる小型軽量の設計とするため、Tethered CLOVER の重量は約4kg、寸法値は図3に示すように小型の設計とした。

3. 力学的解析

ロボットにテザー張力を与えると、斜面における機体の滑りと転倒を防止することが可能である。このテザー張力

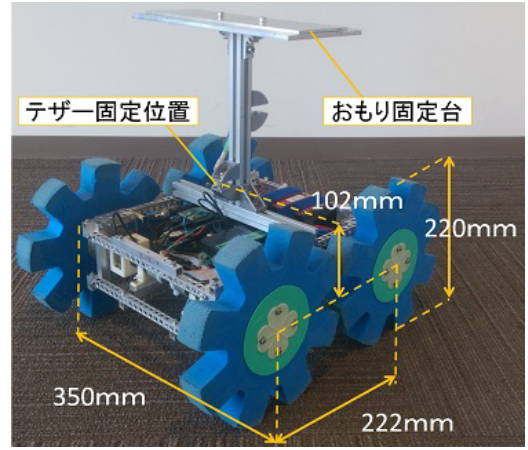


Fig. 3: Tethered CLOVER

には、滑りと転倒を防止するために必要な下限値と、逆に張力がそれらの現象を引き起こしてしまう上限値が存在する。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力学的解析より算出する。斜面上でのロボットの運動は、斜面上下方向への登坂、左右方向への横断、機体の姿勢を変化させる旋回の3つに分類できる。今回は、運動中にかかる力が2次元平面で完結する直登・直降坂について、モデル化を行い、解析を行った。

3.1 モデルの導入

モデルとして、図4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。今回、機体は十分に遅い速度で移動するものとし、加速度による慣性力は考慮しない。機体の移動時には、車輪駆動力から生じる前進力 F が機体に作用するものとした。ロボットの寸法は車輪軸の midpoint 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: w_G, h_G , 車輪接地点: w_r, h_r , テザー固定位置: w_l, h_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、静的状態で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に求めることができる。

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

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

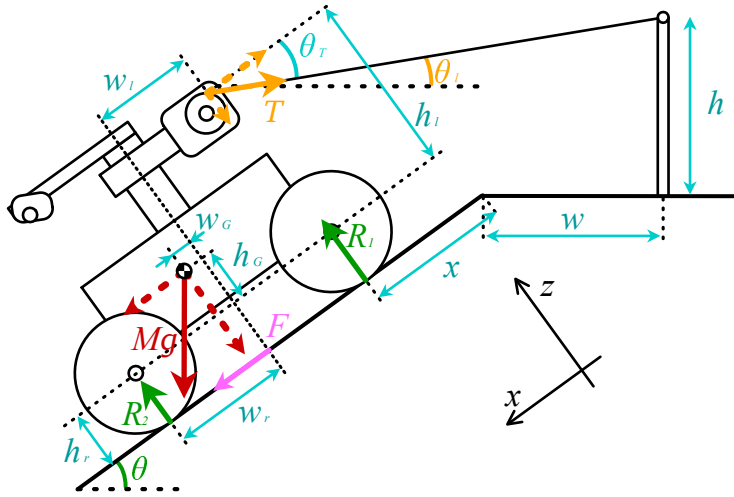


Fig. 4: ロボットのモデル

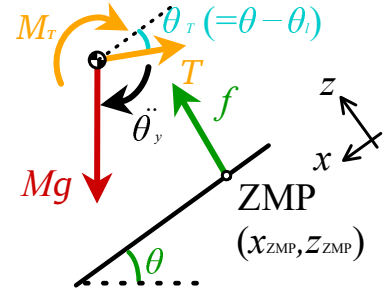


Fig. 5: ゼロモーメントポイント

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、 x 方向では重力を相殺する向きに、 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直な擬似重力として機体に与えることが可能になる．式 1 の左辺に式 2 を代入し、 T について整理することで、滑りを防止するテザー張力 T_{Slip} 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．

$$T_{\text{Slip max}} = \frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\cos \theta_T - \mu \sin \theta_T} Mg \quad (3)$$

$$T_{\text{Slip min}} = \frac{\sin \theta - \mu \cos \theta}{\cos \theta_T + \mu \sin \theta_T} Mg \quad (4)$$

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 5 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．

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

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、静的状態で転倒を防止するために必要なテザー張力の下限値 $T_{\text{Fall min}}$ と、転倒を誘発してしまうテザー張力の上限値 $T_{\text{Fall max}}$ を求めることができる．

機体が移動を行うときを考える．斜面上で機体が進むとき、機体は車輪の駆動力によって前進する．駆動力は地面に力を与え、その反作用として、機体に前進力 F が作用する． F は摩擦由来の力であるため、その最大値は地面との静止摩擦から機体の斜面に対する接地力 f_z に比例する F_{max} として以下のように定義できる．

$$F_{\text{max}} = \mu f_z \quad (8)$$

この F が機体に作用するとき、機体には重心の高さに応じたモーメントが作用する．今、斜面下り方向に F_{max} が作用するときを考えると、機体の重心周りのモーメントのつりあい式は以下のように表すことができる．

$$f_z(x_G - x_{ZMP}) - f_x z_G + M_T + \mu f_z z_G = 0 \quad (9)$$

$$f_z\{x_G - (x_{ZMP} - \mu z_G)\} - f_x z_G + M_T = 0 \quad (10)$$

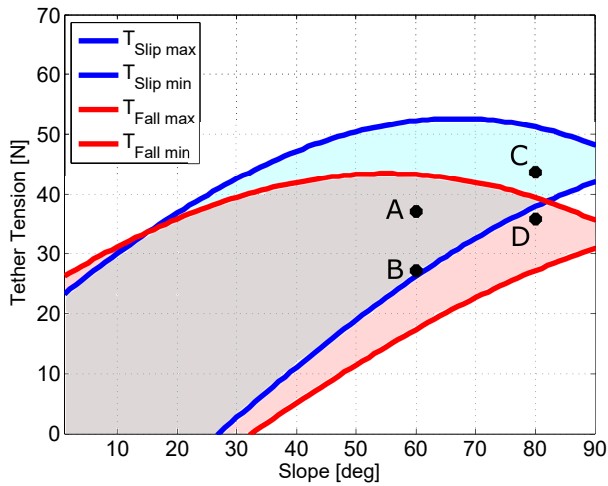


Fig. 6: 実機体寸法の安定性 静止状態

このように車輪駆動力は、転倒に関して、ZMPの x 軸方向の位置のオフセットと同じ働きをする。そのため、移動を行う際の張力の上下限値は、式7にこの結果を反映して用いる必要がある。Fの向きは上りと下りで反転するため、転倒に関する張力の上下限値は静止状態と上り、下りで異なる。

4. モデルに基づいた設計

4.1 モデルを用いた機体の安定性の評価

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。斜面上端から2m下った位置でのテザー張力の上下限値と斜面の傾斜角についての関係を、以下の図6に示す。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、後述する斜面模擬試験装置での実測値を用い、 $\mu = 0.505$ とした。このグラフで、 $T_{\text{Slip max}}$ と $T_{\text{Slip min}}$ で囲まれる領域内の張力を発生させることでその角度での滑りを防止することができ、同様に $T_{\text{Fall max}}$ と $T_{\text{Fall min}}$ で囲まれる領域内の張力を発生させることで転倒を防止させることができる。以下では、この上下限値で囲まれた、張力によって滑り、転倒を防止できる領域を安定領域と呼称する。

図6では、この2つの安定領域が重なり合っている80度前後までの傾斜角で、滑りと転倒を同時に防止するテザー張力が存在することがわかる。しかし、車輪駆動力を発生させた場合、下りの時には図7のように転倒に関する安定領域が下がり、斜面での姿勢維持が可能な傾斜角が70度前後まで下がっている。ここから、現在の機体寸法では、80度前後までの傾斜角でテザーを用いた静止状態での姿勢維持が可能であるが、70度を越える角度の斜面では駆動力を発生させて斜面を下ることができないことがわかる。

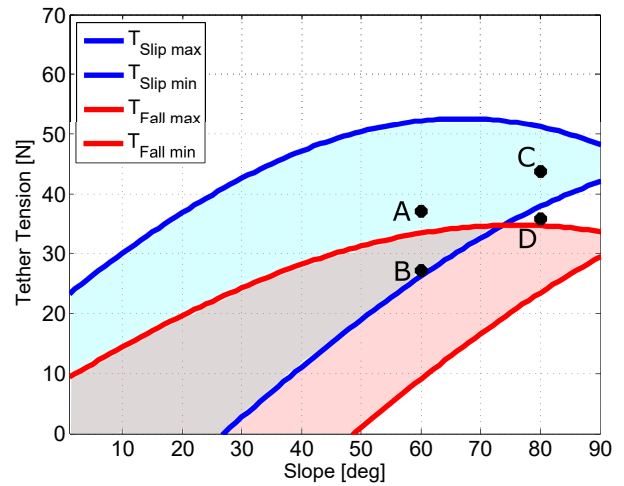


Fig. 7: 実機体寸法の安定性 下り

4.2 滑りと転倒を同時に防止する機体の設計

機体が移動可能な斜面傾斜角を広げるためには、先に述べた2つの安定領域が広い範囲で重なりを持つ必要がある。この2つの安定領域の重複部分が少ないのは、 T_{Slip} が力の釣り合いから算出され、フィールドに依存する張力であるのに対し、 T_{Fall} は寸法値が影響するモーメントから算出される機体寸法に依存する張力であることが原因である。モーメントの式6で固有に働いている集中モーメント M_T は、テザーの機体への固定位置と重心との間の寸法差によって生じるモーメントである。そこで、 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、2つの安定領域の重複部分を大きくする設計を行う。

機体の重心寸法位置 x_G をテザー固定位置 h_t と同じ高さに変化させることで M_T の影響を少なくするため、機体上部に1kgのおもりを装着した場合の安定性の計算結果を図8に示す。重量を増やし、重心を高くしたことにより、 T_{Fall} の値が上昇しているが、集中モーメントの影響が少なくなり、全ての傾斜角において、安定領域が重なっていることがわかる。車輪駆動力の影響を考慮した下りの時にも、図9に示すように安定領域の重なりを維持できている。また登坂時は、転倒に関する安定領域が上に移動するので、急斜面での上下動に関しては、登坂と降坂を区別して張力を発生させることで移動が可能になると考えられる。

以上のように、テザー固定位置と重心間の寸法差が小さ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することができる。

5. 斜面走行試験

第4章で滑りと転倒の安定領域の重複部分を広げた機体の安定性を検証するため、実機を用いた走行試験を行った。

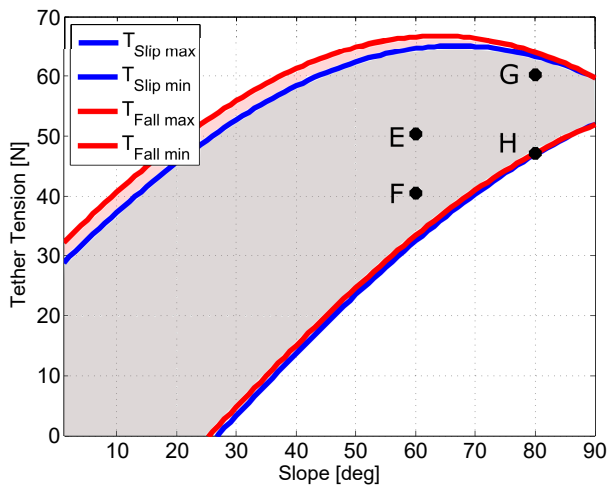


Fig. 8: 重心変化時の安定性 静止状態

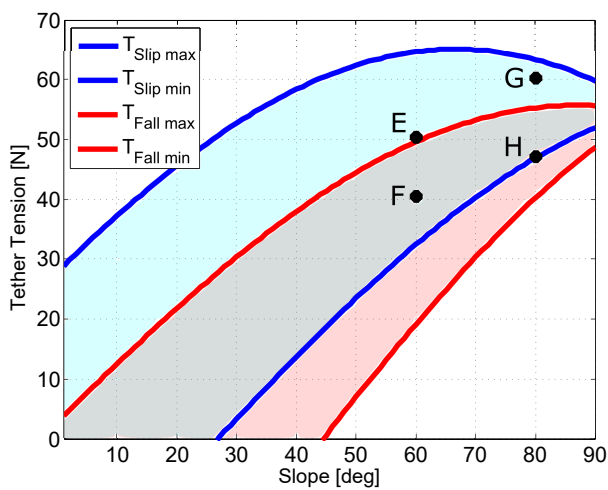


Fig. 9: 重心変化時の安定性 下り

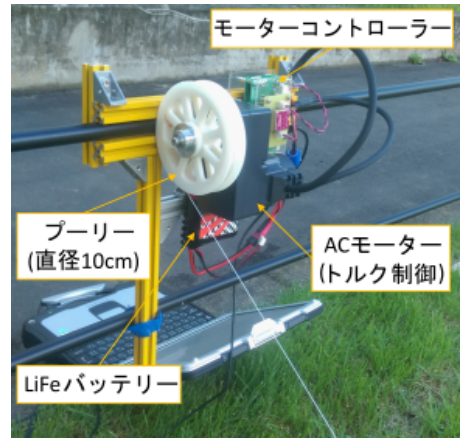


Fig. 10: テザー牽引装置

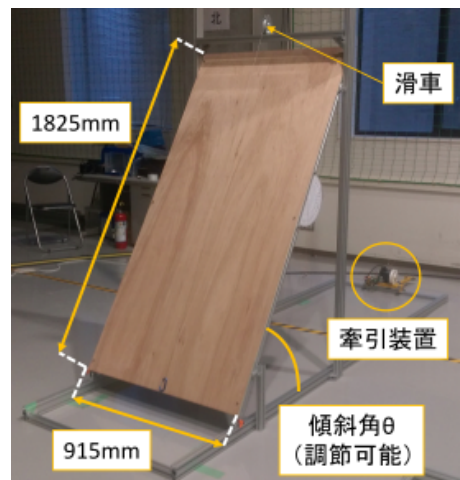


Fig. 11: 斜面模擬試験装置

方向へ繰り出し、斜面上部からの牽引を模擬できる構成とした。

5.1 試験装置

5.1.1 テザー牽引装置

力学的解析に基づいた張力で機体を牽引するために、任意のテザー張力を発生可能なテザー牽引装置を作製した。図 10 に装置の外観を示す。テザーが巻かれたブーリーにトルク制御が可能なモーターを装着することで、任意の張力をテザーに与えることができる。火山環境などの屋外での使用を想定しているため、電源は小型の LiFe バッテリーで動作可能な構成とした。

5.1.1 斜面模擬試験装置

屋内で、任意の傾斜角での走行試験を行うため、斜面を模擬した試験装置を作製した。図 11 に装置の外観と各部の寸法を示す。斜面上部には滑車が設置されており、土台フレームに固定された牽引装置から伸びたテザーを斜面

5.2 試験概要

作製したテザー牽引装置と斜面模擬試験装置を用いて、60度、80度の斜面で走行試験を行った。機体は、図 3 に示す、おもりを搭載しない状態と、車体上部に 1kg のおもりを装着した状態の 2 通りの構成で実験を行い、第 4 章で示した、モデルを用いた機体の安定性の評価と同じ条件を再現した。図 6~9 中の点 A~H での張力を牽引装置によって発生させ、その時の機体の挙動から力学的解析と安定性評価の検証を行う。

5.3 試験結果

結果を表 1 と図 12 に示す。各機体構成で、傾斜角によって静的状態での姿勢維持が可能か、車輪を駆動させての登坂、降坂が可能かをまとめた。目標動作を達成できた場合

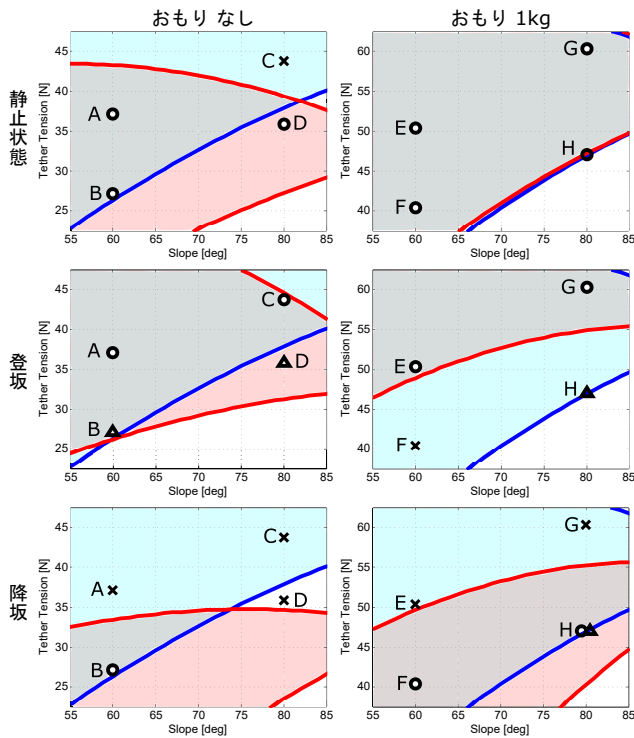


Fig. 12: 試験結果

は可能 (○), 転倒が発生した場合は転倒 (×), 滑りが生じた場合は滑り (△) と記した。

機体におもりを装着せず行った試験 A ~ D では, 傾斜角 60 度では登坂, 降坂が可能な張力がそれぞれ存在していたが, 80 度の降坂では滑りと転倒を同時に防ぐことができなかった。静的状態では姿勢を維持できていたことから, 車輪駆動力の影響で降坂時に張力が安定領域から外れたと考えることができ, 力学的解析に基づいた結果が得られている。

また, 機体におもりを装着し, 安定領域の重なりを増やして行った試験 E ~ H では, 傾斜角 60 度, 80 度の両方で登坂, 降坂が可能であった。この結果から, テザー固定位置と重心間の寸法差を小さくすることで, 元の機体では移動ができなかった急斜面での移動が可能になるという, 第 4 章のモデルを用いた安定性評価と同様の結果が得られた。

すべての試験を通して, モデルを用いた安定性評価と同

Table. 1: 試験結果

試験	おもり	傾斜角	姿勢維持	登坂	降坂
A	なし	60 度	可能	可能	転倒
B	なし	60 度	可能	滑り	可能
C	なし	80 度	転倒	可能	転倒
D	なし	80 度	可能	滑り	転倒
E	1kg	60 度	可能	可能	転倒
F	1kg	60 度	可能	転倒	可能
G	1kg	80 度	可能	可能	転倒
H	1kg	80 度	可能	滑り	可能・滑り

様の転倒, 滑りの現象が得られた。今回行った機体のモデル化と, 力学的解析, 安定性評価は, 実験でも成立する妥当なものであると言える。しかし, 試験 B, D, H など, 安定領域の境界付近では, 領域外側の現象が発生することがあり, モデルの精度がまだ十分でないことも確認できた。実用する際には, 安定領域を重ねる設計を行った上で, 運用時に境界近くの張力を用いないよう, ある程度の安全率を持って与える張力を決定する必要があると言える。

6. 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, 斜面登坂方向の機体のモデル化を行い, 解析を行うことで, 制御に用いるべき張力の上下限界を算出した。加えて, このモデルを用いた安定性の評価と, 実験での検証を行い, 急斜面探査に適した機体の設計指針を得た。

今後は, モデルを 3 次元に拡張し, 旋回, 斜面横断についても, 解析と評価を行う。また, ロボットを改良し, センサー値から張力を自動で算出し, 制御を行うシステムを目指す。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] 多々納壮, 渡辺敦志, 永谷圭司. 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. 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1D1-04, September 2016.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.