

# 急斜面に位置する火山噴気孔調査を目的とした テザー牽引型二輪移動ロボットの開発

Development of a tether-towing 2-wheeled robot for exploring fumaroles located on steep slopes

○ 揉井 雅紀 (東北大学) 正 永谷 圭司 (東北大学)  
久利 美和 (東北大学)

Masaki MOMII, Tohoku University, momii@frl.mech.tohoku.ac.jp

Keiji NAGATANI, Tohoku University

Miwa KURI, Tohoku University

Fumaroles investigation is an effective method for prediction of a volcanic eruption. However, some fumaroles are located in places where humans are not able to reach, such as steep slopes or depressions. In this research, we propose a tether-towing 2-wheeled robot to enable investigation of fumaroles located on steep slopes. To confirm the validity of the robot system, we conducted a field experiment in the real volcanic field in Izu-Oshima Island. According to the result, the proposed robot traversed a steep slope and returned to the basement. Also, we found some mechanical and operational problems for the robot system to improve. In this paper, we introduce our robot system, experiments, and lessons learned.

**Key Words:** Volcano, Observation, Tethered Robot, Fumarole, Field Robotics

## 1 緒言

日本国内には 111 の活火山が存在し、その内の 50 が“火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山”として選定されている。これらの火山には、地震計や GNSS 観測装置、監視カメラ等の設備が設置され、24 時間体制での監視が行われている。また、観測装置が設置できない場所には観測班が直接侵入し、各種調査を行っている。これらの中でも、火山から噴出するガスの温度・組成調査は、火山の活動を知るために不可欠な情報であり、例えば蔵王においても定期的な調査が行われている。火山ガスには、主に  $\text{CO}_2$ ・ $\text{H}_2\text{S}$ ・ $\text{HCl}$ ・ $\text{SO}_2$ ・ $\text{H}_2\text{O}$  などが含まれており、これらの組成は火山活動に伴って変化することが知られているため、火山ガスを調査することで噴火の兆候を捉えることができる [1]。しかし、これらのガスは高温・有毒であることが多く、人による直接の調査には危険が伴う。そのため、無人機による代替が期待されている。

そこで本研究グループでは、Fig.1 に示すような、人による調査が特に難しい火山急斜面に位置する噴気孔の調査を目的とし、これまでにテザー牽引型四輪移動ロボットを開発し、滑りと転倒に着目した走行制御手法の提案・実装を行ってきた [2]。しかし、一般に噴気孔の存在する斜面は起伏が激しいため、軽量四輪移動ロボットが全車輪を接地させた状態を常に維持することは難しく、基本的に平坦な斜面上で走行することを想定した提案手法では、実火山環境において、転倒や滑落などの問題が発生した。

そこで、本研究では、起伏の激しい急斜面に位置する火山噴気孔においても調査を遂行することが可能な移動ロボットの設計・開発および機能実証を目的とすることとした。本稿では、急斜面上における旋回動作を可能としたテザー牽引型二輪移動機構の提案ならびに開発を行った。また、開発した移動機構を搭載するロボットを製作し、伊豆大島裏砂漠にて動作試験を行ったので、これを報告する。

## 2 関連研究

起伏の激しい急斜面上に存在する噴気孔へ到達する手段として考えられる既存研究について以下に示す。

まず、地形の影響を受けずに移動ならびにホバリングが可能な垂直離着陸型飛行ロボットが挙げられる。しかし、噴出ガスが勢



Fig.1 Fumaroles located on steep slope

い良く吹き出している場合、飛行ロボットでは墜落の危険があり、さらに、ロボット自身が発生する気流によって噴出ガスを霧散させるため、噴気の観測という目的を達成することが困難である。したがって、本研究で対象とする目的のためには、地上を移動するロボットを噴気孔周辺で静止させる必要がある。

斜面上における地上移動ロボットの移動を可能とする手法の一つに、ワイヤやロープ等のテザーによる、ロボットの牽引がある。この手法により、単独では斜面を滑落してしまうロボットでも、斜面上での動作が可能となる。これまでに、テザー牽引を用いたロボットとしては、脚型と車輪型の移動ロボットが開発されてきた。テザー牽引型の脚移動ロボットとしては、カーネギーメロン大学の研究グループによる Dante および DanteII[3]、東京工業大学の研究グループによる TITAN-XI[4] などが挙げられる。これらの脚型ロボットは、斜面上において、優れた走行性能を示したが、脚機構を搭載するため機構が複雑になり、大型化、重量化につながるという問題点がある。

一方、テザー牽引型の車輪移動ロボットとしては、四輪移動ロ

ボットをテザーで牽引した TReX[5] がある。これは、斜面上を滑り落ちないテザー張力を与えることで、斜面上での走行を可能としたロボットであるが、質量が 92 kg と大きく、山中への持ち運びには適さない。また、一般に、車輪移動ロボットの質量は、車輪数とともに増加するため、同じ質量のロボットでは、車輪数が多いほど、1 つあたりの車輪径が小さくなる傾向にある。そのため、起伏の激しい急斜面での走行性能を向上させるためには、できるかぎり車輪数を減少させ、車輪径を大きくすることが望ましい。

車輪径が大きく、また、車輪数が少ない移動ロボットとして、NASA の研究グループによる Axel Rover, 東京工業大学の研究グループによる Tri-Star IV が挙げられる。Axel Rover は、筐体内にテザー牽引装置を内蔵した二輪移動ロボットであり、起伏の激しい斜面において優れた走行性能を示した [6]。また、Tri-Star IV は、前輪が 2 輪、後輪が 1 輪の三輪移動ロボットであり、後輪にテザー牽引装置を備える。このロボットも、70° までの斜面の走行に成功するなど、高い走行性能を示した [7]。しかしながら、これらのロボットは、構造上、斜面上において大きな旋回動作が困難であると考えられる。

### 3 急斜面移動機構の開発

#### 3.1 要求される条件

起伏の激しい急斜面上で、噴気孔調査を遂行可能な移動機構を備えるロボットシステムに要求される条件として、次の 2 つが挙げられる。

- 任意位置への移動

起伏の激しい急斜面上において正確な噴気孔調査を行うため、ロボットには急斜面上を任意の位置へ移動することが可能な、高い走行性能が求められる。本研究では、80° までの斜面を対象とすることとした。

- 小型軽量

噴気孔は火山の随所に存在するため、ロボットは、調査員の手によって運搬することのできるように、軽量であることが求められる。特に、噴気孔調査を行う際、調査員には、ロボット以外の装備も必要となるため、本研究では、ロボットの目標質量を 10 kg 以下と定めた。

#### 3.2 移動機構の提案

以上を踏まえ、本研究では、起伏の激しい急斜面上で任意の位置への移動を実現するための手法として、Axel Rover に代表されるテザー牽引型二輪移動ロボットをベースに、内蔵されているテザー牽引装置 (以下、ウィンチモジュールと称する) を車軸と独立して回転できるように設計することを提案する。これにより、従来のテザー牽引型二輪移動ロボットでは行うことができなかった、斜面上での大きな旋回動作が可能となることを期待できる。

Fig.2 に、提案機構の有無による旋回動作時の姿勢の変化を示す。提案機構を搭載しない場合、ロボットは、テザーの排出方向と車軸が垂直な姿勢において安定する。一方、斜面上での旋回動作を行う際、Fig.2(a) に示すように、テザーの排出方向と車軸が垂直でなくなるため、車輪にせん断応力が発生し、任意の方向への移動が困難となる。一方、提案機構を搭載することで、Fig.2(b) に示すように、テザーの排出方向に依存せず車軸方向を変化させることが可能となる。これにより、テザー張力による車輪へのせん断応力が発生しなくなるため、車輪とテザーが接触しない範囲内において、ロボットは自由に旋回動作を行うことができ、急斜面上において任意の位置への移動が可能となることを期待できる。

#### 3.3 テザー牽引型二輪移動ロボットの開発

以上を踏まえ、提案機構を搭載したテザー牽引型二輪移動ロボットの開発を行った。開発したロボットの外観を Fig.3 に示す。本ロボットのサイズは、奥行き・高さ 500 mm (テザーパイプを除く)、幅 790~890 mm (可変)、タイヤ直径 500 mm であり、人が運搬するロボットとしては比較的大型である。しかしながら、質量は、8.17 kg と軽量で、後述する動作試験においても、人の手で山中へ持ち込むことが可能であった。また、ロボットを牽引するテザーには、直径 1.0 mm のステンレスワイヤを使用した。

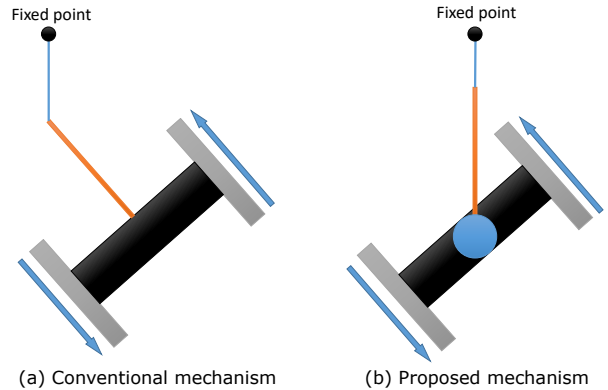


Fig.2 Turning motion

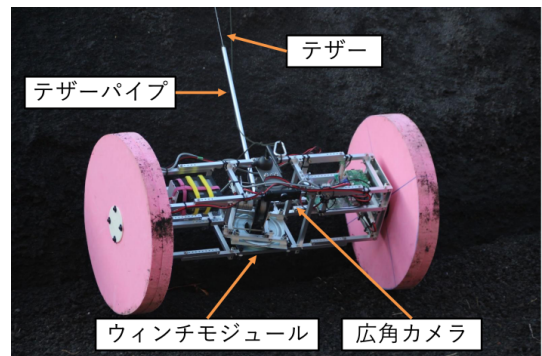


Fig.3 Appearance of the developed robot

次に、Fig.4 にロボットのシステム構成を示す。本ロボットは Raspberry Pi 3, 広角カメラを搭載し、無線 LAN を介してオペレータ PC から遠隔操縦を行うことが可能である。また、電源としてリチウムイオンバッテリー (定格 23.1 V 5.5 Ah) を搭載した。

### 4 動作試験

開発した移動機構の有用性を確認するため、2017 年 10 月に伊豆大島裏砂漠の急斜面にて動作試験を実施した。試験環境を Fig.5 に示す。試験を実施した斜面の斜度は、25° から 80° であった。

走行試験では、まず、試験を実施する斜面の上方へロボットを運搬し、テザーを固定する。次に、遠隔操縦にてロボットの走行を行い、目標地点まで降坂を行う。その後、元の位置まで登坂を行うこととした。なお、ロボットの遠隔操縦は、常にロボットを直接視認することが可能であれば斜面上方から、斜面に視界を遮られる場合は斜面下方から行った。

動作試験の結果、斜面降坂時には、急斜面上においても並進・旋回動作を行い、起伏を回避、あるいは乗り越えながら斜面を降坂し、目標位置へ到達できることを確認した。また、その後、元の位置まで登坂できることを確認した。しかしながら、一部の試行において、登坂時に、斜度が大きく変化している地点、すなわち段差を通過する際に、ロボットの筐体フレーム部分が、段差に乗り上げる事象が発生した (Fig.6)。このような場合、車輪による走行を行うことができなくなるため、テザーの巻取りのみで両輪が接地できる位置まで機体を移動させた後、再び登坂を行い、元の位置へ到達した。

### 5 Lessons learned

上述のフィールド試験では、提案した移動機構により、降坂時における並進・旋回動作を行い、急斜面上において目標位置への到達が可能であること、また、登坂が行えることを確認した。また、登坂時における幾つかの問題を確認した。一つ目の問題は、

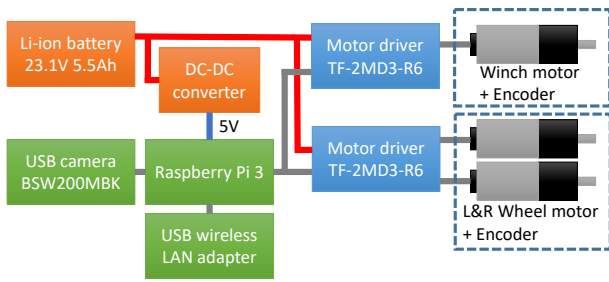


Fig.4 System diagram



Fig.5 Experiment field



Fig.6 Tipped robot

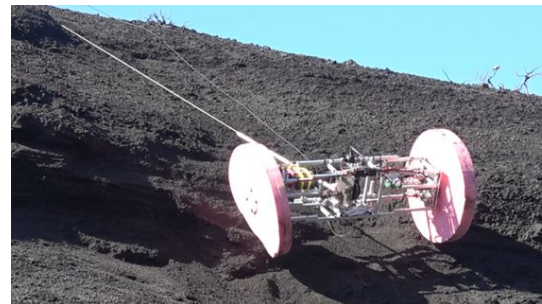


Fig.7 Deformed tire by shear stress

Fig.6 に示すような、段差への乗り上げである。これは、斜面上での旋回動作を可能とするために提案した、ウィンチモジュールの自由回転機構が起因していると考えられる。登坂時、ロボットは、常にテザー方向と垂直に車軸を維持し続けることで、車輪へのせん断応力や横滑りの発生を防止することができる。しかし、斜度の増加に従って、車輪が斜面から受ける垂直抗力が減少するため、車軸への回転力が容易に発生し、段差への乗り上げが起こると考えられる。また、登坂時、テザーの牽引方向と車軸が垂直でない場合には、車輪に車軸方向へのせん断応力が発生し、Fig.7 に示すような変形が生じる。これらの問題を抑止するためには、ウィンチモジュール-車軸間の角度を能動的に変化させる機構を搭載する必要がある。具体的には、車軸とウィンチモジュールを接続している回転軸にモータ、あるいは電磁ブレーキなどのアクチュエータを搭載することが挙げられる。

二つ目は、操作性の問題である。今回の試験では、ロボットの操縦は、斜面全体を見渡せる位置で行うことが可能だったが、実際の運用では、必ずしもそうでないことが予想される。火山ガスの多くは空気より重いため、斜面下方に滞留する。これらは有毒である可能性があるため、急斜面における噴気孔調査は必ず斜面上方から実施する必要がある。したがって、遠隔操縦時の視界を十分確保するための視覚センサのロボットへの搭載や、外部カメラの設置等を検討する必要があると考えられる。

三つ目は、車輪形状の問題である。今回は、車輪としてポリエチレンフォーム製の丸型タイヤを使用した。状況によって、地面との摩擦を稼ぐことができず、スリップする事象が見られた。今後、タイヤ形状や材質を変更することで、走破性が向上することが期待できる。

## 6 結言

本研究では、これまでに、急斜面における火山噴気孔調査を目的とし、急斜面上における旋回動作を可能とするテザー牽引型二輪移動機構を提案し、開発を行った。また、開発した移動機構を搭載するロボットを製作し、伊豆大島裏砂漠における実火山環境で走行試験を行った。

試験結果より、テザー牽引型二輪移動機構のウィンチモジュールを、車軸と独立して回転できるように設計することで、急斜面上での大きな旋回動作が可能となり、目標地点への降坂、および元の地点への登坂を行えることを確認した。また、登坂時に発生し

た現象より、提案機構を能動的に制御する必要がある事を明らかにした。

今後は、ウィンチモジュール-車軸間角度を能動的に制御することが可能なアクチュエータを搭載し、登坂時に発生した問題の解決を図る。その後、提案機構の走行性能を定量的に評価すると共に、状況に応じたロボットの斜面走行制御の開発を行う。また、計測機器を搭載し、急斜面に位置する火山噴気孔調査の実証実験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 平林順一, “桜島における火山ガスの成分変化と火山活動”, 京都大学防災研究所年報, Vol. 24, No. B-1, pp. 11-20, 1981
- [2] K. Nagatani, S. Tatano, K. Ikeda, A. Watanabe and M. Kuri, “Design and development of a tethered mobile robot to traverse on steep slope based on an analysis of its slippage and turnover”, IROS, pp. 2637-2642, 2017
- [3] John E Bares and David S Wettergreen, “Dante ii: Technical description, results, and lessons learned”, The International Journal of Robotics Research, Vol. 18, No. 7, pp. 621-649, 1999
- [4] 程島竜一, 土居隆宏, 福田靖, 広瀬茂男, 岡本俊仁, 森純一, “4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発—基本設計と脚機構の動作実験—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 7, pp. 847-857, 2005
- [5] P. McGarey, M. Polzin, T. D. Barfoot, “Falling in Line: Visual Route Following on Extreme Terrain for a Tethered Mobile Robot”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2027-2034, 2017
- [6] Issa AD Nesnas, Jaret B Matthews, Pablo AbadManterola, 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
- [7] T. Aoki, Y. Murayama, S. Hirose, “Development of a Transformable Three-wheeled Lunar Rover: Tri-Star IV”, Journal of Field Robotics, No. 1, Vol. 31, pp. 206-223, 2014