

小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察 – 浅間山での走行試験 –

永谷 圭司（東北大学），木下 宏晃（東北大学），西村 健志（千葉工大），小柳 栄次（千葉工大），
油田 信一（筑波大学），久武 経夫（株式会社インロッド・ネット），森山 裕二（国土交通省）

Tele-operated observation for small-sized tracked vehicles in activated volcano areas – Initial field experiment in Mt. Asama –

Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.), hiroaki KINOSHITA (Tohoku Univ.), Takeshi NISHIMURA (Chiba Institute of Tech.), Eiji KOYANAGI (Chiba Institute of Tech.), Shin'ichi YUTA (Univ. of Tsukuba), Tsuneo HISATAKE (INROD-NET), Yuji MORIYAMA (Ministry of Land, Infra., Transport and Tourism)

Abstract: Fixed-point observation of an active volcano is very important to work out a strategy for estimation of eruptive activity and evacuation call to residents. However, it is a very dangerous task for human to install cameras close to a crater during eruptive activity. Therefore, we consider to use teleoperated small tracked vehicles for fixed-point observation of an active volcano. To execute such observations, the vehicle requires light weight and high mobility on rough terrains. Therefore, we have developed some types of tracked vehicles and have performed initial experiments at volcano areas in Mt. Asama. In this paper, we will introduce our observation scenarios and report the initial experimental results using small-sized volcano exploration tracked vehicles.

Key Words: Volcano exploration, Tracked vehicle, Teleoperation

1 はじめに

活動している火山を火口付近で定点観測することは，今後の噴火予測や住民の避難計画の策定を行う上で，非常に有用である．しかしながら，火山の火口付近は非常に危険であり，人が立ち入ることができない．そこで，本研究では，レスキュー探査ロボット用途に筆者らが開発してきた不整地移動ロボット研究の経験を生かし，火山の不整地を走行して，火山の火口付近を近距離から観測することが可能な，小型火山観測移動ロボットの研究開発を目指すこととした．

この種のロボットを開発するためには，まず，現場を良く理解することが重要である．そこで，現状で我々が有する機器がどの程度有用であるかを確かめるため，本研究では，2009年8月19日から21日にかけて，活発に活動中の鹿児島県 桜島山にクローラ型移動ロボットを持ち込み，通信実験ならびに，不整地移動実験を行った[1]．その結果，見通しの良い通信であれば，比較的長距離の走行（1km以上）が，現状の市販品のデバイスで可能であることが確認できた．しかしながら，不整地走行については，現在，筆者らが有するロボットのサイズでは，岩場などの走行は，非常に困難であることが分かった．特に，クローラ型ロボットを利用する場合，砂対策や斜面走行時のスリップ対策が必要不可欠であることが分かった．

この実験の後，筆者らは，クローラ型ロボットの砂対策やスリップ対策を施した不整地移動ロボットQuince改良型，ならびに，新たなリンク機構を搭載した不整地移動ロボットTrack Walkerを構築し，火山環境における不整地走



Fig. 1: Experiments in Mt. Asama: about 2,300 m

行性能向上の研究を進めてきた．また，2010年4月には，SICE SI部門の「活火山エリア向け遠隔ロボット技術調査研究会」を立ち上げ，遠隔操作による活火山エリアの観測ロボットに関する研究体制を整えてきた．

このような背景において，2010年10月に，国土交通省の協力の下，対象とする火山を桜島山から浅間山に移し，小型移動ロボットによる不整地走行実験を実施した (Fig.1 参照)．

この浅間山は，近隣に人家が多く，さらに首都圏に近いこともあり，ひとたび，活動が活発になれば，大きな被害が出るのが予想される．2010年10月現在は，噴火警戒レベルが1であり，この警戒レベルでは，火山から500m以内が立ち入り禁止であるが，ひとたび火山活動が活発とな

り、レベル3を超えると、半径4km以内が立ち入り禁止となる。そこで、本研究では、

1. 火山灰が積もり降雨によって土石流の発生が懸念される
2. 天然ダムが形成され土石流の発生が懸念される
3. 現在の観測機器がダメージを受けた

という状況を想定し、このような事態において、カメラを搭載した遠隔操作型の小型不整地移動ロボットが移動監視や定点監視を行う、というシナリオを設定した。

本稿では、不整地移動ロボットを用いた浅間山火山観測のシナリオならびに、浅間山で行った不整地移動実験の結果を紹介する。

2 不整地走行ロボットを用いた浅間山火山観測シナリオ

本研究の目的は、活動中の火山エリアにおける定点観測（カメラ画像による観測）である。これまで、火山を観測するための遠隔操作型移動ロボットは、幾つか構築されてきた[2]が、これらはいずれも重機を改造した大型のものであり、筐体が高重心、高重量であるため、火口付近まで到達することが困難となることが予想される。また、噴火現場への輸送コストも大きく、機動性も大きな問題となる。また、遠隔操作型ヘリコプタを用いた観測も行われてきた[3]が、噴煙による墜落の危険性や、滞空時間の制限などの問題がある。

そこで、本研究では、浅間山の斜面に降り積もった火山灰の移動探査ならびに、形成される天然ダムの状況の定点観測を実現するため、小型不整地移動ロボットを標高2,300m付近にある内輪山のふもと付近の東側斜面に移動させ、そこから遠隔操作での移動探査を行うというシナリオを設定した。なお、火山活動の想定レベルは3（半径4km以内には人の進入禁止）とする。

この地点までの小型移動ロボットの輸送手段には、以下の2つを想定している。

2.1 シナリオ1：ヘリコプタを利用

このシナリオでは、遠隔操縦ヘリコプタを用いて、目的地付近まで移動ロボットを運搬し、比較的安全に降ろせるところに不整地移動ロボットを降下させた後、移動ロボットによる移動探査を行う。移動距離としては、100m～300m程度を想定している。この場合、遠隔操縦ヘリコプタのペイロードを考慮すると、ロボットの重量は20kg以下に抑える必要がある。また、ロボットの筐体は、降下時の衝撃にも十分耐え得る頑強なものである必要もある。Fig.2に、このシナリオのイメージを示す。

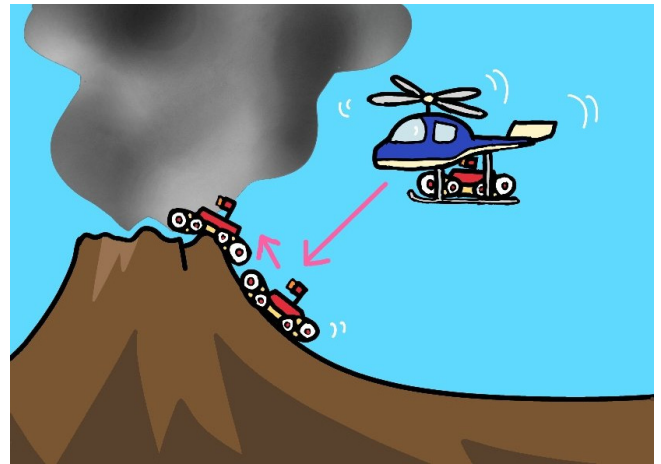


Fig. 2: Scenario 1: approach with helicopter

2.2 シナリオ2：クローラトラックを利用

このシナリオでは、登山道上を走行可能な遠隔操作型クローラトラックを用いて、目的地付近まで移動ロボットを運搬し、不整地移動ロボットを降下させた後、移動ロボットによる移動探査を行う。なお、クローラトラックは、基本的には登山道を走行するため、目的地までの距離は、無人ヘリコプタを利用した場合より、長くなる可能性が大きい。また、ロボットのサイズと重量は、クローラトラックに搭載可能範囲内に抑える必要がある。

3 不整地走行実験

前節のシナリオの実現に向けて、本研究では、2種類の火山探査用小型移動ロボットを開発し、国土交通省の支援を受け、浅間山の入山許可を得て、フィールド実験を行った。なお、昨年度の桜島での実験において、筆者らのロボットは、不整地走行に大きな問題を抱えていたため、今回は、特に不整地移動に焦点を絞り、オペレータが目視で操縦を行う走行実験を実施した。

3.1 実験環境

対象とする環境は、浅間山（標高2,568m）の斜面であり、急斜面走行の実験については、浅間山の中腹（標高2,300m付近）を利用した。この付近の平均斜度は、およそ25度である。土壌の表面は、比較的大きな岩や小石などで覆われており、非常に崩れやすく、人が歩く際にも足首までうまるため、歩行に大きな困難を感じる環境である。実験環境ならびに、実験の様子をFig.1に示す。一方、長距離走行実験については、浅間山の東大地震研究所前から小浅間山の分岐地点までを利用した。この間の平均斜度がおよそ8度、最大斜度がおよそ15度である。走行路面の状態は未舗装で、浅間山特有の火山灰・礫が踏み固まれ、所々に岩石が露出している。

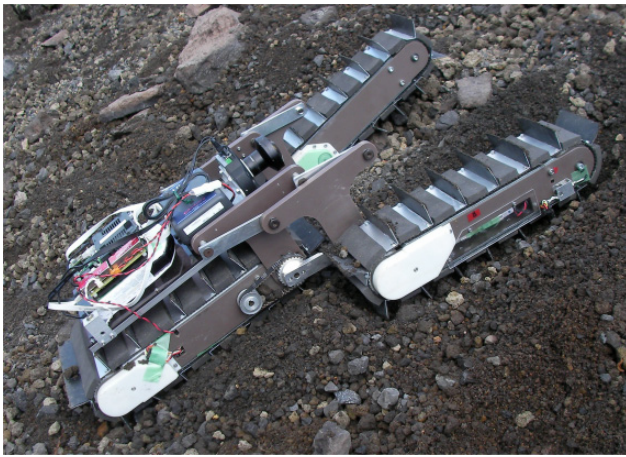


Fig. 3: An overview of Track Walker

3.2 対象とするロボット

本実験では、利用する不整地移動ロボットに、軽量型の不整地移動ロボット”Track Walker”ならびに、レスキューロボットを改良した”Quince(改)”を利用した。

Track Walkerの機能の詳細は、文献[4]で詳しく述べているが、このロボットの特徴としては、本体下部にメインクローラを搭載している他に、両側に可動式のサブクローラを搭載し、段差などの障害物乗り越える機能を有する点が挙げられる。また、メインボディとサブクローラの間、平行リンクを用いた揺動機構が挟まれており、これを利用することで、軟弱地盤でも地面を崩しにくい移動を実現した点のもう一つの特徴である。さらに、火山環境対応として、防塵やスリップ防止のための大きなラグ（高さ40mm）を取り付けた。Fig.3にTrack Walkerの概観を示す。このロボットの本体重量は、約12kgであり、前章で示したシナリオ1：ヘリコプタの利用を意識して、急斜面の走行実験を行った。

一方、Quince(改)は、文献[5]で詳細を示した不整地移動ロボット”Kenaf”の後継機”Quince”をベースに、防塵の強化やスリップ防止のためのラグの取付（高さ60mm）など、火山対応を行ったものである。このロボットの特徴は、前後左右に取り付けられたサブクローラを用いて、不整地にならった走行を実現することができる点である。Fig.4にQuince(改)の概観を示す。このロボットの本体重量は、約30kg以下であるため、前章で示したシナリオ2：クローラトラックの利用を意識して、急斜面の走行実験ならびに、長距離走行実験を行った。

3.3 不整地走行実験の結果

本体重量10kgのTrack Walkerは、軽量で走行速度が小さいため、平均25度の斜度を、およそ2時間程度かけて、100mの直登を行った。その間、幾つかの岩場やくぼみ等で斜面が崩れたため、クローラのみでの走行が不可能になる事態に



Fig. 4: An overview of Quince

陥ることが何度か発生した。しかしながら、サブクローラを用いた段差踏破動作や、単純脚の揺動動作を実行することで、機構的には、致命的に動けなくなる状況は発生しなかった。Fig.5に、サブクローラを用いた段差踏破動作の連続写真を示す。サブトラックを利用することで、前方の石を乗り越える様子が見て取れる。なお、この連続写真は、斜面と平行な状態で撮影しているため、水平面を動いているように見えるが、実際には、25度の斜度を走行している。そのため、前方の比較的小さな石でも、単純にクローラ機構のみで乗り越えようとする、転倒の恐れもあった。

一方、Quince(改)については、登山道に沿った長距離走行ならびに、平均25度の急斜面直登坂走行、平均30度の急斜面トラバース走行を行った。

登山道に沿った長距離走行では、およそ2時間13分ほどの時間で、浅間山の東大地震研究所前から小浅間山の分岐地点までの、約700mを走行した。走行の様子ならびに、登山道の環境をFig.6に、走行軌跡のGPSデータをFig.7に示す。この間、ロボットの直進安定性は良く、走行で問題になることは、ほとんどなかった。ただし、露出した岩石上において、クローラに取り付けたラグ（材質はポリカーボネイト）が滑りやすく、直進でも不安定になる場合があった。

次に、平均25度の急斜面直登坂走行では、およそ0.5 m/s程度の速度で、走行することができた。この間、高さ60mmのラグは、根本まで完全に埋まった状態であった。このため、握り拳くらいの大きさの岩石でも、ロボットの直進走行に大きな影響を与えることが分かった。

最後に、平均30度の急斜面トラバース走行では、斜面の最大傾斜線に対し、直角方向の移動を保つ走行を行った。この際、ラグのついたメインクローラは、常にクローラベルトを蛇行させる横方向の力が作用したため、30m以上の走行を行うことが困難であった。また、ロボット本体が、常に斜面下方向にスリップするため、この走行を維持するためには、約15度ほど登坂する方向で走行する必要があった。



Fig. 5: Sub-track motion of Track Walker

以上より、開発した2台のロボット共に、比較的安定した走行を実現できることが分かった。また、能動的に動作するサブクローラがない、単純なクローラ型のロボットでは、岩場やくぼみ等で走行できなくなるという問題が起こるが、サブクローラの動作を実行することで、このような状況を脱することも可能であることが確認できた。

4 まとめと今後の課題

本稿では、火山の火口付近を近距離から観測することが可能な、小型火山観測移動ロボットの研究開発を目指し、その観測シナリオを紹介した。また、2010年10月5日から8日にかけて、浅間山における不整地走行実験を実施し、2つのタイプの不整地移動ロボットが、比較的安定した走行を実現することを確認した。

今後は、不整地移動ロボットを用いた火山観察のための、遠隔操作に関する研究を進めると共に、現場での実証



Fig. 6: Quince long distance navigation

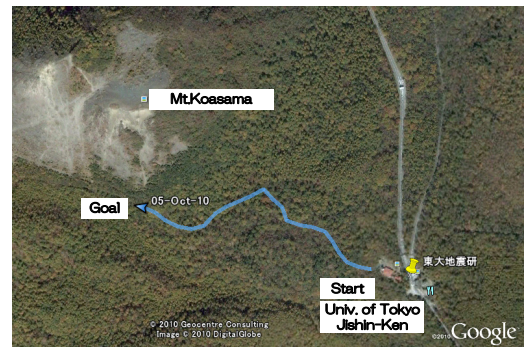


Fig. 7: Path of Quince : long distance navigation

実験を実施することで、火山噴火の際に現場で有用となる火山探査ロボットの構築を進める予定である。

謝辞

フィールド実験の準備や実施にご協力いただいた、国交省砂防部保全課、利根川水系砂防事務所、東京大学地震研研究所浅間火山観測所の各位に感謝します。

参考文献

- [1] 永谷圭司, 岡田佳都, 徳永直木, 桐林星河, 小柳栄次, 吉田智章, 油田信一, 久武経夫. 火山探査を目的としたクローラ型移動ロボットkenafによる桜島での遠隔操作実験. 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予稿集, pp. 1943–1946, 2009.
- [2] 谷口宏充, 後藤章夫, 市原美恵, 菅原一宏, 藤田健昇, 大平修二. 火山探査機「MOVE」の開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 2A1–S–057, 2005.
- [3] 中西弘明, 井上紘一, 佐藤彰. 被災地における空からの情報収集技術の確立-大大特「空中移動グループ」の研究紹介-. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 5, pp. 4–7, 2004.
- [4] Keiji Nagatani, Hiroaki Kinoshita, Kazuya Yoshida, Kenjiro Tadakuma, and Eiji Koyanagi. Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, 2010.
- [5] Tomoaki Yoshida, Keiji Nagatani, et al. Field experiment on multiple mobile robots conducted in an underground mall. In *Field and Service Robotics*, 2009.