

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 - ミッションの提案と予備実験 -

永谷 圭司, 岡田 佳都, 徳永 直木, 桐林 星河 (東北大学)
小柳 栄次, 吉田 智章, 西村健志 (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 -Mission proposal and initial experiments-

Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Naoki Tokunaga, Seiga Kiribayashi (Tohoku University),
Eiji Koyanagi, Tomoaki Yoshida, Takeshi Nishimura (Chiba Institute of Technology),
Shin'ichi Yuta (University of Tsukuba), Tsuneo Hisatake (INROD-NET INC.),
and Yuji Moriyama (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism)

要約: 活火山の火口付近での定点観測は, 噴火予測や住民の避難計画の策定を行う上で, 非常に有用と考えられる. しかしながら, 火山の火口付近は非常に危険であり, 噴火後は, 人が立ち入ることができない. そこで, 本研究では, 火山の火口付近を近距離から観測することが可能な火山観測移動ロボットの研究開発を目指し, 2つのシナリオを設定した. 一つ目のシナリオは, 人が立ち入ることができる境界に基地局を設置し, そこからロボット自身が火口を目指すものである. 二つ目のシナリオは, 遠隔操縦ヘリコプタを用いて, 火山の火口付近まで移動ロボットを運搬し, 火口付近に不整地移動ロボットを降下させた後, 火口まで移動を行うものである. 以上のシナリオ実現の可能性を考えるため, 本研究では, 2009年8月19日から21日にかけて, 鹿児島県桜島山にて, 筆者らが有するクローラ型小型移動ロボットを利用した遠隔操作初期実験を行った. 本稿では, 火山観測シナリオ, 桜島で行った通信実験, 不整地移動実験の結果, ならびに, 今後の小型火山探査ロボットの開発指針について紹介する.

キーワード: 火山探査ロボット, 不整地移動ロボット, 遠隔操作

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. In this research, we consider to use teleoperated small tracked vehicles for fixed-point observation of an active volcano. Once the robot reaches a crater lip, it can send visual information of volcano activity to operators. Two key issues are wireless communication and traversability on uneven terrain. At the beginning of our challenge, we conducted an initial experiment at Sakura-jima island that has an active volcano with our all-terrain tracked vehicle. In this paper, we introduce our scenarios of exploration of volcanoes with small robots, report our initial experimental results, and discuss our future development of small-sized volcano exploration robots.

Key Words: Volcano exploration, Tracked vehicle, Teleoperation

勤務先: 東北大学 大学院 工学研究科
職名: 准教授
学位: 博士 (工学)

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、非常に有用と考えられる。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。無線操縦のヘリコプタによる観測も考えられるが、空中に滞在可能な時間は限られており、また、正確に同一位置に停止させることも困難であるため、比較的長時間における定点観測には向かないという問題がある。

一方、筆者らの研究グループでは、現在、NEDOの戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトにおいて「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」の研究を進めている。このプロジェクトでは、地震やテロなどが地下街で発生した際に、対象となる地下街環境を探査することを目的とした探査ロボット群の開発を進めており、このプロジェクトにおいて、高い不整地走行性能を有するクローラ型移動ロボット「Kenaf」が開発された[1]。このロボットは、地下街だけでなく、他の不整地環境においても、活用が期待されている。

以上の背景において、本研究では、不整地移動ロボット開発の経験を生かし、火山の火口付近を近距離から観測することが可能な、Kenafのような小型の火山観測移動ロボットの研究開発を目指すこととした。

火山に代表される屋外不整地環境における探査において大きな鍵となるのが、遠隔通信ならびに、不整地移動性能である。この2つについて、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Kenafを持ち込み、通信実験ならびに、不整地移動実験を行った。この桜島山は、2009年8月現在、噴火警戒レベルが3である。この警戒レベルでは、火山から概ね2km以内に噴石が飛散する、または火砕流が到達する可能性があるため、この範囲内において、入山規制が敷かれている。本実験は、火口からおよそ3km程度の黒神川付近で行われた。Fig. 1は、噴煙を上げる桜島山と、クローラ型移動ロボット（熱対策のために傘を搭載）である。

上記の実験に関する詳細に関する第一報は、計測自動制御学会システムインテグレーション部門で紹介した[2]。そこで、本稿では、不整地移動ロボットを用いた火山観測のシナリオならびに、桜島で行った通信実験結果と不整地移動実験結果の概略を再掲した後、小型火山探査ロボットの今後の開発指針に関する詳細を中心に紹介する。



Fig. 1: Active volcano of Sakurajima mountain

2 不整地走行ロボットを用いた火山探査シナリオ

本研究の目的は、火山の火口付近における定点観測（カメラ画像による観測）である。これまでに、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[3]。しかしながら、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、機動性について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[4]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、以下の2つのシナリオを設定し、小型軽量の火山観測移動ロボットの研究開発を行うこととした。

2.1 シナリオ1：地表面移動

このシナリオでは、火山の活動エリアにおいて、人が立ち入ることができる境界に基地局を設置し、そこから地表を移動することで、火口を目指す。この場合、ロボットの重量やサイズに制限は無いが、ワンボックス車での搬送を考慮すると、全長 1.5 m 以内、重量 80 kg 以内程度であることが望ましい。また、レベル3の活火山の場合、火口から半径2kmが立入禁止となる。つまり、火口を観測する場合、ロボットには、最低でも2km以上の不整地を走行する能力が必要となる。観測すべき点に到達した後、ロボットはその場に固定され、ロボットに搭載したカメラからの画像情報が基地局へ電送される。この際、ロボットの電源とカメラ系の電源は別系統とし、カメラ系には、大容量のバッテリーを利用する。これにより、ロボットの走行系の電力がダウンしても、引き続き画像情報を送ることが可能となる。Fig.2 に、このシナリオのイメージを示す。

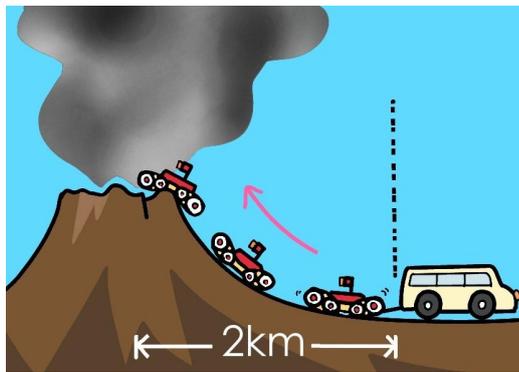


Fig. 2: Scenario 1: surface locomotion

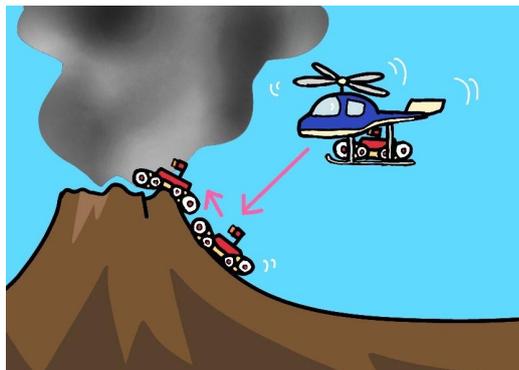


Fig. 3: Scenario 2: approach with helicopter

2.2 シナリオ2：ヘリコプタによる投下と移動

このシナリオでは、遠隔操縦ヘリコプタを用いて、火山の火口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火口付近までの不整地移動を行う。この場合、ロボットの走行可能距離は、短くて構わないが、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。なお、ロボットに搭載するカメラについては、シナリオ1と同様の機能を有するものとする。Fig.3 に、このシナリオのイメージを示す。

3 桜島における予備実験

上記のシナリオを実現するために必要となるキーテクノロジーは、遠隔通信技術と不整地走行技術であると考えられる。そこで、今回、市販の装置や我々が有するロボットの装備が、現場において、どの程度の性能を発揮できるかの確認と、今後開発して行くべきロボットの方向性を検討するため、現在活動中の桜島周辺をターゲットとした予備実験を行った。



Fig. 4: Target robot platform Kenaf

3.1 実験環境

対象とする環境は、現在活動中の桜島の火口からおよそ3kmにある黒神川および、その付近とした。2009年8月時点で、この桜島は、噴火警戒レベルが3であり、下記の予備実験中にも、比較的大きな規模の噴火が確認された。なお、レベル3の警戒レベルは、火山の火口から概ね2km以内に噴石が飛散する、または火砕流が到達する可能性がある、というものである。よって、今回の予備実験のための環境は、実際に火山観測を行うことが期待される現場付近でもある。この黒神川の東側には、川から3メートル程度の高さで、川に沿って工事車両用の道が整備されている。また、土石流を流すための川自体は、比較的平らで、乾いた火山灰に覆われた柔らかい土壌となっている。

3.2 対象とするロボット

本予備実験で利用する不整地移動ロボットとして、千葉工大、東北大学 田所研究室、筑波大学、岡山大学、情報通信研究機構（NICT）、産業総合技術研究所（AIST）らと共同で開発を進めている不整地移動ロボットKenafを利用することとした。Fig.4にその外観を示す。このロボットは、本体底面部分に駆動用クローラ、機体前後に2本ずつ独立駆動が可能なサブクローラを装備している。これにより、階段や瓦礫などの不整地においても、高い走破性能を有する。また、このロボットには、現在、俯瞰カメラとパンチルトズームカメラが搭載されており、無線通信を利用して、遠隔で操作することが可能である。

3.3 対象とする無線機器

本実験では、3種類の市販の長距離通信機器を利用した遠隔操作実験を行うこととした。

1つめの通信機として、CONTEC社製の送受信機（FX-DS540-LNKM）を準備した（以後、これをセット1と呼ぶ。）基地局のアンテナは、バッ



Fig. 5: Long distance tele-operation scene



Fig. 6: Long distance tele-operation (GPS log)

チアンテナ (XXdBi) と八木アンテナ (12dBi) の2種類を準備した。一方、移動局側のアンテナは、本体付属のものを利用した。2つめの通信機として、StrixSystems社製の装置 (Access ONE) を準備した (以後、これをセット2と呼ぶ。) こちらも、基地局アンテナとして、パッチアンテナ (9.5dBi) と八木アンテナ (12dBi) の2種類を準備した。一方、移動局側のアンテナは、本体付属のものを利用した。上記の2つの無線機は、Ethernet(100Base)のインターフェースを持つため、遠隔操作の画像送信も、この装置を利用する。3つめの通信機として、コマンド系に、双葉電子工業社製の通信機 (FDJ-0)，画像系にIDEN社製の装置 (PRX24, CARRY24) を準備した (以後、これをセット3と呼ぶ。) IDENの基地局アンテナは、パッチアンテナ(13dBi) とパラボラアンテナ(20dBi)の2種類を準備した。一方、双葉電子工業の通信機については、送受信機共に、本体付属のアンテナを使用した。

3.4 遠隔通信による長距離走行実験

本予備実験の一つの目的は、遠隔操作のための、市販の遠距離通信装置の性能評価である。そこでまず、遠隔操作による走行実験を、工事車両用の舗装道路上で行うこととした。

本実験における遠隔操作手順は、以下の通りである。まず、オペレータは、無線を通じて送られてくる画像情報を元にロボットの状況を推定し、左右のクローラの目標回転速度を、ジョイスティックを通じてロボットに送信する。通信状態が悪くなった場合、一旦ロボットを停止し、基地局側のアンテナの向きを調整した後に、通信状態を再度確認する。以上の操作を、前節に示した3種類の無線機器全てに対し、個別に行った。遠隔操作実験の様子をFig.5に示す。なお、Fig.5中、各ロボット上に設置された傘は、ロボット内部の温度上昇を抑えるための熱対策である。

遠隔操作実験の結果、全ての無線通信セットにおいて、無線基地局から約900m離れた工事車両用のゲートが存在する位置 (以下、最遠点と呼ぶ) までの遠隔操作に成功した。

Fig.6に、一台のロボットに搭載したGPSロガーにより獲得した走行軌跡を示す。この図中において、最遠点は、Fig.6中の左上に位置する走行軌跡の端点であり、中央付近に示した赤色の点が、オペレータ用のアンテナを設置した位置である。なお、この最遠点からオペレータ用のアンテナは、障害物のため、目視できない状況であった。なお、セット1を利用したロボットについては、電池交換を行わずに走行した合計距離は、およそ2,000 mとなった。

この遠隔操作実験において、セット1、セット2では、アンテナ間に人が入るだけで、通信状態が悪くなった。なお、セット3については、その影響が小さかった。

一方、アンテナから500m程度離れた場所において、ロボット本体をロール回転させることで、アンテナの傾きによる通信状態について調査したところ、基地局側がパッチアンテナの場合、Kenafを ± 30 度程度傾けても操作不能となることはなかった。しかし、八木アンテナの場合、 ± 10 度程度傾けただけで、操作不能状態となった。これは、パッチアンテナが円偏波であることに対して、八木アンテナが水平偏波であることが原因であると考えられる。また、ロボットのピッチ方向の傾きに関しては、どのアンテナの場合にも ± 15 度程度で、通信のクオリティが大きく低下することが確認された。

3.5 軟弱地盤・不整地の走行実験

本予備実験のもう一つの目的は、ロボットに必要な、軟弱地盤や不整地の走行性能の検討である。そこで、岩場と火山灰地盤という、2つの環境に対して、走行実験を行った。

まず、ロボットを遠隔操作することで、乾いた火山灰で覆われた黒神川を横断させる実験を行ったところ、遠隔操作を開始して間もなく、柔ら



Fig. 7: Experiment on sandy slope (Kenaf)



Fig. 8: Experiment on rough terrain (Kenaf)

かい火山灰の上で旋回動作を行った際に、走行用のメインクローラとプーリーとの間に火山灰が詰まり、動作継続が不可能となった。このロボットは、地下街における探査ロボットとして開発されたものであり、火山灰等の砂地への対応はこれまで考えていなかったため、予想範囲内の事態ではあったが、砂地におけるクローラ型ロボット実現の難しさを痛感した。

次に、表面に火山灰が積もった30度程度の斜面上を走行させた。上述の通り、火山灰上での旋回時には、クローラとプーリーとの間に火山灰を詰まらせて走行不能になるため、火山灰で覆われた斜面では、極力旋回動作を行わないように走行させた。しかしながら、ロボットが坂道に差しかかった際にメインクローラが滑り始め、これにより、火山灰でできた路面を削り始めた (Fig.7)。最終的に、クローラとプーリーとの間に火山灰が入り込み、やはり動作継続が不可能となった。

最後に、直径20~50cm程度の岩石が重なっている地形において、不整地走破実験を行った。このロボットは、能動的に取り付け角度を変更することが可能なサブクローラを前後に搭載している。このサブクローラを操作することで、直径50cm程度の石の上を走行を行うことができた。このときの実験の様子をFig.8に示す。しかしながら、熟練者の目視による遠隔操作においても、



Fig. 9: Experiment on rough terrain (Quince)

大きな石が重なっている隙間にサブクローラが入り込み、人手がなければ抜け出せない、といった状況も発生した。

4 予備実験を踏まえた改良項目

桜島における予備実験により、不整地走破性向上のためのロボットのサイズ拡大、クローラの砂地走行対策、無線通信環境の改善、が重要な課題であることが分かった。以上を受けて、現在ならびに、今後改良すべきと考えられる項目を以下に示す。

4.1 走破性向上のためのロボットのサイズ拡張

岩場の実験においては、ロボットのサイズならびに、サブクローラの設置面積を拡大することで、走破性能が向上すると考えた。しかしながら、特にシナリオ2「ヘリコプタによる投下と移動」を考慮すると、筐体をあまり大きくすることは、好ましくなく、そこには、サイズと走破性に関するトレードオフが生ずる。この状況は、NEDOの戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト内においても問題となっていたため、このプロジェクトにおいて、Kenafより少しサイズ拡張を行った、防水・防塵対策を施した不整地移動ロボット「Quince」が開発された。Quinceは、筐体のサイズアップが図られたため、メインクローラの接地面積がKenafの接地面積より増大し、走破性能が大きく向上した。Fig.9は、Quinceが、三木市の消防訓練学校内の不整地フィールドにおいて、不整地走行を行っている様子である。この実験より、定性的ではあるが、不整地における走破性の能力の大幅な向上を確認することができた。

4.2 クローラの砂地走行対策

軟弱地盤上で走行不能となる問題は、メインクローラとプーリーとの間に火山灰が詰まり、モータにかかる負荷が大きくなった点が原因である。この問題を回避するため、本研究では、プーリー



Fig. 10: Mechanism inside of tracks

の内部に、プーリーに入る砂の逃げ場を作成した (Fig.10参照)。この構造を実装したロボットを用いて、屋内に作成した砂場フィールド上で走行実験を行ったところ、砂をかみ込んだ場合でも、走行を継続可能であることが確認できた。

今後は、上述のサイズ拡張ならびに砂地走行対策を施した不整地移動ロボットQuinceを用いて、実環境における実験を実施する予定である。

4.3 無線通信環境の改善

通信については、本稿で紹介した予備実験により、市販の通信機を利用することでも、比較的遠距離の通信を行うことができることを確認したが、ロボットの姿勢が傾くことによって、通信のクオリティは大きく低下する。つまり、岩場での走行時のように、ロボットが大きく傾く場合、ロボットに搭載するアンテナには、アンテナを垂直に保持する機構が必要と考えられる。これを実現するための機構として、アンテナを垂直に保つためのパンチルト台は、必要不可欠である。Fig.11は、現在製作を進めている、アンテナを設置するパンチルト台のCAD図である。ここに示す二つのアクチュエータと傾斜センサにより、アンテナを地面と垂直に立てることが可能となる。今後、上記のアンテナ台をロボットに実装し、遠距離通信実験を行う予定である。

5 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、火山探査ロボットを実現する上で必要な知見を得るため、2009年8月19日から21日にかけて、筆者らが有するクローラ型不整地移動ロボットKenafを活動中の桜島山に持ち込み、遠隔操作実験ならびに、不整地移動実験を行った。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。また、不整地走

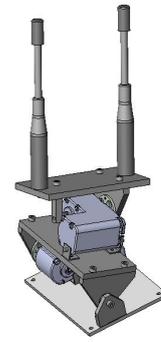


Fig. 11: Idea of antenna unit

行については、現在、筆者らが有するロボットの性能では、岩場などの走行ならびに、軟弱地盤上の走行が、非常に困難であることが分かった。最後に、現在進めているロボットの改良案について紹介した。

今後は、更なる研究開発ならびに、現場における実証実験を通じて、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

実験場所をご提供いただき、また、準備等にご協力いただいた、国交省砂防部保全課と大隅河川国道事務所の各位に感謝します。

参考文献

- [1] T.Yoshida, E.Koyanagi, S.Tadokoro, K.Yoshida, K.Nagatani, K.Ohno, T.Tsubouchi, S.Maeyama, I.Noda, O.Takizawa, and Y.Hada. A high mobility 6-crawler mobile robot 'kenaf'. In *Proc. 4th International Workshop on Synthetic Simulation and Robotics to Mitigate Earthquake Disaster (SRMED2007)*, pp. 38–43, 2007.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.