

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

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 (千葉工大),
油田 信一 (筑波大), 久武 経夫 (株式会社 インロッド・ネット)

Teleoperation Experiments of Tracked Vehicle Kenaf in Sakura-jima Island for Volcano Exploration

Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Naoki Tokunaga, Seiga Kiribayashi (Tohoku Univ.),
Eiji Koyanagi, Tomoaki Yoshida (Chiba Inst. of Tech),
Shin'ichi Yuta (Univ. of Tsukuba), and Tsuneo Hisatake (INROD-NET INC.)

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. To use a helicopter is one of the good options, however, it is difficult to stay long in the mid air. 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 (Level 3) with our all-terrain tracked vehicle "Kenaf". In this paper, we introduce our scenarios of exploration of volcanoes with small robots, and report our initial experimental results.

Key Words: Volcano exploration, all-terrain robot, tracked vehicle

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。また、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、定点観測には向かないという問題がある。

一方、著者が所属する研究グループでは、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。この研究開発プロジェクトでは、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いるが、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。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: Active volcano of Sakurajima mountain

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を紹介し、桜島で行った通信実験結果ならびに、不整地移動実験結果について紹介する。

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[1]が、いずれも重機を改造した大型のものであり、火山がアクティブに活動している場合、火口付近まで到達することは困難である。一方、遠隔操作型ヘリコプタを用いた観測も行われてきた[2]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。

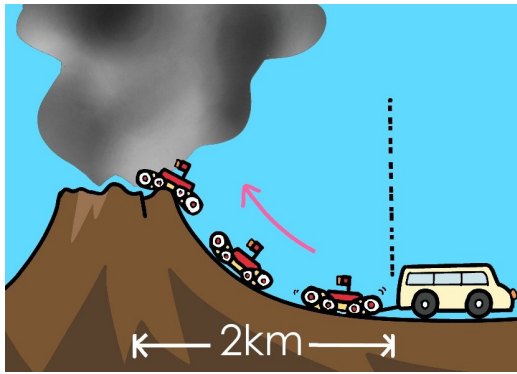


Fig. 2: An image of Scenario 1: surface locomotion

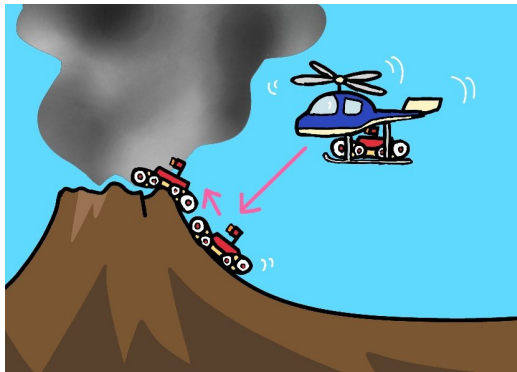


Fig. 3: An image of Scenario 2: approach with helicopter

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。

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（例えば 100 m 程度）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。



Fig. 4: Target robot platform “Kenaf”

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。

3.1 実験環境

対象とする環境は、現在活動中の桜島山の火口からおよそ3kmにある黒神川付近とした。2009年8月現在、この桜島山は、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、比較的平らで乾いており、ところどころ乾いた火山灰で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、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にその概観を示す。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。

このKenafは、地下街において天災、人災が発生した場合の探査ロボットとして、地下鉄の改札を通り抜けられること、階段や段差を乗り越えられること、といった制約の元で、NEDOのプロジェクトを通じて共同開発されたものであるが、このロボットの不整地走行性能は、世界的にも高く評価されている。

3.3 対象とする無線機器

本予備実験の一つの目的は、ロボットの遠隔操作を行うための、長距離遠隔通信技術の確認である。そこで、本実験では、Table.1に示す3つの市販の長距離通信機器を利用した遠隔操作実験を行った。

セット1,2では、Ethernet(100Base)のインターフェースを持つ無線機を使用し、ロボットと操作用PCをEthernetで接続した。ロボットには、ネットワークカメラが搭載されているため、遠隔操作の映像も、このネットワークを通じて送信が可能である。一方、セット3では、RS-232のインターフェースを持つ無線機をロボットの操作コマンド用として使用し、コンジットビデオ信号のインターフェースを持つ無線機を操作用カメラの映像転送用として使用した。

3.4 遠隔通信による長距離走行実験

現実的な環境において遠隔操作実験を行うため、当初の計画では、ロボットを遠隔操作することで、黒神川を横断させ、入山禁止区域付近まで走行させる予定であった。しかしながら、遠隔操作を開始して間もなく、柔ら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が、砂地かつ不整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。幸い、工事車両用の舗装道路が川沿いに延びていたため、遠距離通信機器の性能評価を行うための遠隔操作実験は、この舗装道路上で行うこととした。

Table 1: Wireless communication devices

セット1: 無線LAN 送受信機

メーカー	CONTEC
基地局側無線機	FX-DS540-LNKM
基地局側アンテナ	パッチアンテナ() 八木アンテナ(12dBi)
移動局側無線機	FX-DS540-LNKM
移動局側アンテナ	(本体付属)

セット2: 無線LAN 送受信機

メーカー	StrixSystems
基地局側無線機	Access/ONE IWS
基地局側アンテナ	パッチアンテナ(9.5dBi) 八木アンテナ(12dBi)
移動局側無線機	Access/ONE MWS100-RW
移動局側アンテナ	(本体付属)

セット3: 操作用無線機

メーカー	双葉電子工業
基地局側無線機	FDJ-03
基地局側アンテナ	(本体付属)
移動局側無線機	FDJ-03
移動局側アンテナ	(本体付属)

セット3: 映像用無線機

メーカー	IDEN
基地局側無線機	PRX24
基地局側アンテナ	パッチアンテナ(13dBi) パラボラアンテナ(20dBi)
移動局側無線機	CARRY24
移動局側アンテナ	スリープアンテナ(本体付属)

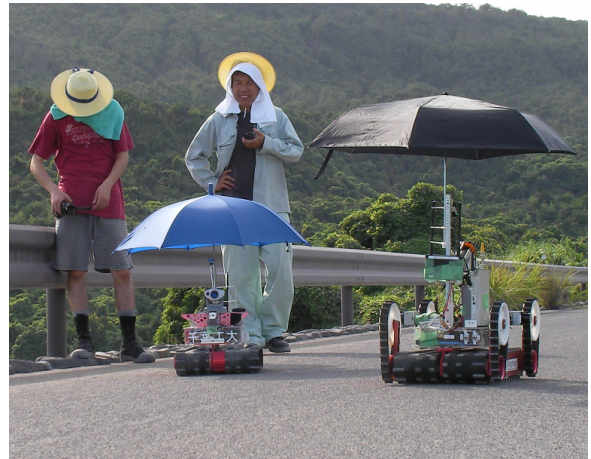


Fig. 5: Experimental scene of long distance tele-operation



Fig. 6: One of the results of long distance tele-operations

この舗装道路上での遠隔操作実験において、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、動作コマンド、具体的には、左右のクローラの目標回転速度を、ロボットに送信する。途中、通信状態が悪くなった場合には、一旦ロボットを停止させ、基地局側のアンテナの向きを調整した後に、操作を継続する。以上の操作を、Table.1に示す3種類の無線通信セット全てに対して行った。この実験の様子をFig.5に示す。なお、Fig.5中、各ロボット上に設置された傘は、ロボットに直射日光をできるだけ当てないようにす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離れた地点（以下、最遠点と呼ぶ）までの遠隔操作に成功した。Fig.6は、ロボットの一台に搭載したGPSロガーにより獲得した走行軌跡である。この図中、最遠点は、Fig.6中の左上に示された点であり、中央付近の赤い点付近が、オペレータ用のアンテナを設置した点である。なお、この最遠点からオペレータ用のアンテナは、目視することができない状況であった。この最遠点に到達後、セット1を利用したロボットは、再び黒神川の川沿いの舗装道路に沿って引き返し、長距離走行実験を行った。その結果、電池交換を行わずに走行した距離の合計は、およそ2,000 mとなった。Fig.6には、このロボットがバッテリー交換なしで走行した経路が表示されている。今回の遠隔操作実験は、不整地を含まないため、一概に比較できないが、この2,000 mという距離は、シナリオ1において想定される目標距離のオーダーとほぼ同じである。

この実験を通じて得られた長距離無線通信に関する知見として、以下のものが挙げられる。まず、この遠隔操作実験において、唯一、セット3の操作用無線機であるFDJ-03のみが、本体付属のスリーブアンテナを交換することなく、最後まで通信することができた。これは、この無線機が、他の無線機と比べ、通信帯域が非常に狭いことが要因であったと考えられる。また、セット1、セット2については、アンテナ間に人が入るだけで、通信状態が悪くなったが、セット3については、その影響が小さかった。

また、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、Kenaf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度程度で大きく減衰することが確認された。このことから、凹凸の少ない環境においては、パッチアンテナのみで対応できると考えられるが、岩場での走行時のように、ロボット本体が大きく傾く場合、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であると考えられる。

3.5 不整地走破実験

本予備実験のもう一つの目的は、ロボットに必要な不整地走破性能の検討である。そこで、岩場と火山灰斜面という、2つの環境に対して、走行実験を行った。

まず、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。これを制御することで、段差や不整地における走行性能を向上させることができるが、この制御には、センサを用いた自動制御で行う方法[3]と人の手による遠隔操作で行う方法がある。前者の自動制御による不整地走破については、直径20cm程度の石が存在する、比較的易しい路面について、特に問題なく走行することができたが、直径50cm程度の石が多くなると、走行不可能となった。これは、不安定な石の上での筐体の姿勢変化に、サブクローラの制御が間に合っていないという理由が挙げられる。一方、後者の遠隔操作では、熟練者による操作であったが、ロボットに搭載したカメラ情報を用いた遠隔操作では、走行不能であった。そこで、目視による遠隔操作に切り替えたところ、直径50cm程度の石の上でも、走行を行うことができた。このときの実験の様子をFig.7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、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。いずれの状況においても、対象とする岩場に対し、ロボットのサイズが小さいということが問題であり、ロボットのサイズを大きくすることで、走行性能を向上させることが可能であると考えている。

次に、表面に火山灰が積もった斜面上を走行させた。遠隔操作実験の最初に、柔らかい火山灰上での旋回動作により、クローラとブリーとの間に火山灰を詰まらせ、走行不能になったという経験があったため、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けた際に、メインクローラが滑り始め、これに



Fig. 7: Experimental scene of traversal on rough terrain

より、火山灰でできた路面を掘り始めた。最終的に、クローラとブ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。この結果より、対象とする環境においては、砂の進入に強いクローラ構造、ならびに、大きな牽引力を発生させる構造（例えばスパイク）が不可欠であることが、明らかとなった。

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、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、活動中の桜島山に、筆者らが有するクローラ型不整地移動ロボットKenafを持ち込み、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（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。一方、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。また、クローラ型ロボットを利用する場合、火山灰対策が必要不可欠であることが分かった。

今回の予備実験では、思うようにロボットは動かなかったが、この試験より、多数の貴重な知見が得られたと感じている。この、小型火山観測移動ロボットによる観測を目指した研究は、今年度始まったばかりであり、今後、研究開発ならびに、現場での実験を通じて、有用となる火山探査ロボットを構築していく予定である。

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] 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.
- [2] 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-大分県「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.
- [3] Y.Okada, K.Nagatani, and K.Yoshida. Semi-autonomous operation of tracked vehicles on rough terrain using autonomous control of active flippers. In *Proc. of IEEE/RSJ Int'l. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2009.