

小型移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察 - 浅間山における2012年フィールド試験 -

永谷 圭司 (東北大学), 西村 健志 (千葉工大), 吉田 智章 (千葉工大), 小柳 栄次 (千葉工大),
羽田 靖史 (工学院大), 油田 信一 (筑波大学), 多田 隈 建二郎 (大阪大学)

Tele-operated observation for small-sized mobile robots in activated volcano areas - Field test of tele-operated robots in Mt. Asama in 2012-

Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.), Takeshi NISHIMURA (Chiba Institute of Tech.), Tomoaki YOSHIDA (Chiba Institute of Tech.), Eiji KOYANAGI (Chiba Institute of Tech.), Yasushi HADA (Kogakuin Univ.), Shin'ichi YUTA (Univ. of Tsukuba), Kenjiro TADAKUMA (Osaka Univ.)

Abstract: An 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 too dangerous task for human to install cameras during eruptive activity. Therefore, we proposed a robotic observation in volcano area, and performed several field tests to realize a robotic observation system. In this paper, we report the last field test of mobile robot teleoperation and flying robot navigation in September 2012 in Mt. Asama.

Key Words: Volcano exploration, Tracked vehicle, Flying robot, Teleoperation

1 はじめに

活火山の活動開始から終息までは、非常に時間がかかる場合が多く、その間に、噴石、溶岩、火砕流、土石流などの現象により、近隣に大きな被害をもたらす可能性がある。したがって、火山活動中の火山の監視は、非常に重要である。

活火山の一つである浅間山は、1783年の噴火活動において、8月5日に起こった土石なだれが鎌原村を含む山下の村を飲み込み、大被害をもたらした。当時、山の反対側の活動の方が活発であり、村民は避難を全く考えていなかったと言われている。この際、火山監視を継続的に行うことができなければ、村民の避難も可能であったかもしれない。浅間山は、現在も活動中の活火山であり、首都圏にも近いため、その噴火は、首都圏への影響を及ぼす可能性が大きい。

現在、浅間山の活動はレベル1であり、人の立入禁止区域は、火口から半径500mと比較的小さい。また、火山活動の監視は、火口内カメラや火山周辺に設置された監視装置で実現できている。しかしながら、噴火活動が始まると、火砕流や土石流の予測を行うため、任意の場所からの定点観察や移動観察を行う必要性が生ずる可能性がある。しかしながら、火山の周囲には、人が進入することが禁止されるため、新たな観測/観察機器を人手で設置することができない(レベル3の状態では半径4km以内が進入禁止)。このような状況に対処するため、遠隔より、任意の場所からの火山の定点監視/移動監視を行う技術が求められる。さらに、東日本大震災後は、日本の火山活動が活発化していると言われており、この技術整備は、急務であると言える。

そこで、我々の研究グループでは、国土交通省 関東地方整備局からの委託研究の下で、浅間山でのフィールド試

験を行いつつ、活動中の火山の立ち入り禁止区域において移動監視を実現するための火山監視ロボットシステムの研究開発を進めてきた[1][2]。

本稿では、準備した現在想定している無人探査方法ならびに、2012年9月に行ったフィールド試験の様子について報告する。

2 探査シナリオ

本研究では、浅間山探査での調査項目を土石堆積状況の映像取得と堆積厚さの計測の2つとし、以下の前提条件の元で、これを実現するためのロボットを用いた探査シナリオを構成する。

1. 噴火前には有人探査可能地域であること。
2. 対象とする環境には、無線通信が不通となる不感地帯が存在しないこと。

これらの条件の下で、以下にシナリオを提示する。なお、これらのシナリオは単独でも機能するが、これらを組み合わせることで、火山灰の堆積に関する、より詳細なデータを獲得することが可能となる。

1. 災害発生前の写真と災害発生後写真の比較

定点観測でよく採られる手法で、災害発生前と後の写真を比較し、噴火や火砕流による土石の堆積状況などの現場変状を確認する。あらかじめ平常時に写真とその撮影地点の座標を取得しておき、ロボットをその地点までアプローチさせて写真を撮影する。なお、平常時に写真を撮影する際には、近辺の樹木、岩石

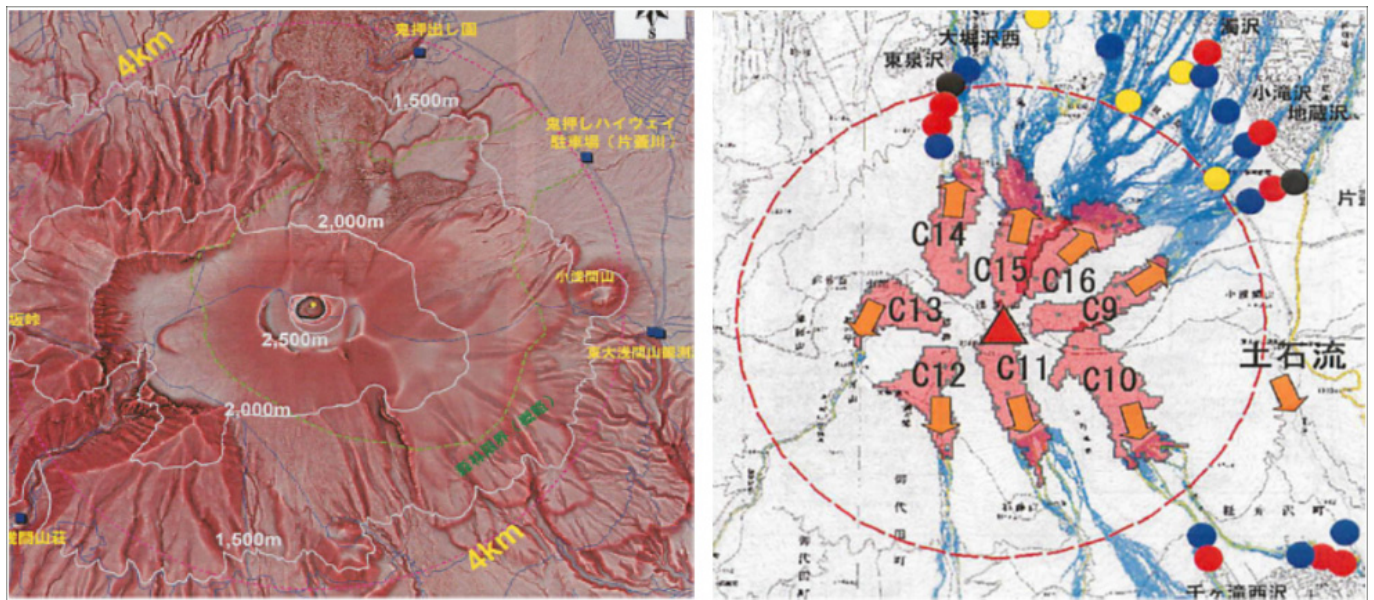


Fig. 1: 浅間山の地形図（左）と土石流の懸念箇所（右）

等の大きさも記録しておき、分析時に指標となるよう準備しておくことが大切である。

2. ポール等の土石の堆積厚さ確認施設の設置

施設が設置できるのであれば、厚さ確認用のポールなどの人工的なモノサシとなるものをあらかじめ設置しておき、災害発生時にロボットでその地点の厚さを確認する。ポール自体に被害がなければ、高い精度で現場における土石の堆積厚さを測定することができる。

3. ロボットに土石のサイズ/形状確認のための対象物を設置

ロボットには、カメラに映り込むモノサシを設置する。これにより、撮影した画像から、土石の大きさやサイズを確認することが可能となり、土石流発生予測の精度を上げることが可能となる。

浅間山の地形図を図1左に、浅間山における融雪型火山泥流発生の懸念箇所を図1右に示す。図中の矢印が、火山泥流の発生が懸念される領域である。本研究では、C9エリアを対象環境に設定した。

3 アプローチ方法

次に、現地までのロボットのアプローチ方法について示す。人が立ち入ることができない環境において、無人観測を行うために最も効果的な方法は、空中を移動して観測を行うことである。その中でも、ホバリングが可能なヘリコプタは、有力な観測手段であるが、観測時間をそれほど長くとることができない。そこで、本研究では、ヘリコプタと小型移動ロボットの複合手段で、火山の移動観測を行う



Fig. 2: 観察手法のイメージ

ことを考えることとした。この観察手法のイメージを図2に示す。

小型ロボットは、一般に不整地走行性能がそれほど高くないため、ヘリコプタによって、観察地域より高い標高の地点に投下され、無線通信による遠隔操作によって、移動観測を実行する。

このアプローチで問題となるは、ヘリコプタの飛行高度、ロボットとの通信、電源、ロボットの移動性能である。以下に、これらの技術課題に対する我々の解決手段を示す。

3.1 ヘリコプタの飛行高度の問題と解決法

農薬散布などに利用されるガソリンエンジンを搭載した無人ヘリコプタは、比較的大きなペイロードを有する

が、飛行高度については、一般に1,000メートル以上の高地で運用することが困難と言われている。浅間山の標高は、2,568mであり、レベル3の噴火で人が立ち入り禁止となる境界の火口から4km 地点も、標高1,400m程度であるため、農業用無人ヘリコプタを利用することができない。その主要原因は、エンジンに供給する空気の密度低下により、燃焼がうまく行われず、エンジンの推力が低下するためであるといわれている。これをモータ駆動に代替することで、燃焼環境の制限が無くなり、この問題が解決すると考えられる。そこで、本研究では、飛行ロボット（モータ駆動のマルチコプタ）を利用して小型ロボットを搬送することとした。

3.2 ロボットの移動性能と電源の問題と解決法

飛行ロボットで搬送可能なペイロードの重量やサイズは、それほど大きく取ることができないため、投下する小型ロボットは、東北大学で開発した小型移動ロボットGeoStarの利用を想定することとした。このロボットは、車輪型のロボットであり、急斜面の直登は困難であるが、斜面下方向に対する走行性能は比較的高い。また、全重量が現在2.5kg程度であるため、電動のヘリコプタによる搬送が可能であることが期待できる。なお、GeoStarの電源は、現状で2時間程度の運用が可能である。

3.3 通信に関する問題と解決法

非常時における移動ロボットの遠隔操作のための通信は、現在、200MHz帯の公共ブロードバンド帯の利用に大きな期待が寄せられているが、現状では、小型化まで至っていない。そこで本試験では、遅延も大きく、通信レートも低下するが、広範囲で通信が可能なDocomoのFOMAを用いた通信モデムをGeoStar1号機の通信に利用することとした。また、対象とする環境において見通しがきく環境では、2.4GHz帯の通信についても、利用可能であると考えているため、GeoStar2号機には、2.4GHzで長距離通信に実績のあるContec社製の長距離通信モデムを利用することとした。

4 フィールド試験

前節のアプローチ方法で示した飛行ロボットならびに、小型移動ロボットによる火山の遠隔監視ロボットシステムの研究開発を進めるため、2012年9月3日～5日、ならびに、9月22日～24日に、浅間山にてフィールド試験を行った。（10月22日～25日には、公開試験を実施する予定である。）以下に、実施した試験と結果の概略について紹介する。

4.1 飛行ロボットに関するフィールド試験

飛行ロボットに求められる機能は、目的地まで飛行し、小型移動ロボットを切り離し、出発地点まで戻ってくるこ



Fig. 3: 飛行ロボットのペイロード切り離し試験

とである。しかしながら、これを実現するためには、まず、標高が高く気圧が低い場所において、どの程度プロペラの推力低下が起こるかを確認する必要がある。そこで、本試験の最初に、標高の異なる地点におけるプロペラの推力試験を行った。結果の詳細については省くが、標高2,100m地点において、推力はおおよそ2割減となることが分かった。つまり、ペイロードに余裕を持たせることで、標高2,100m程度まで、小型移動ロボットを運搬することが可能であることが分かった。

次に、標高1,800m地点において、飛行ロボット「TOBI」を用いたペイロード切り離し試験を行った。TOBIは、バッテリーを含む総重量が5.6kg、バッテリーには、LiFe5セル2並列4600mAhを2組使用した。実験は、飛行ロボットをマニュアルで操作し、切り離し信号を送信することで、飛行ロボットに取り付けた930gのペイロードを切り離すものである。試験当日、風速5m以上と比較的風が強かったため、一度だけしか動作試験を実施することができなかったが、切り離し動作に成功した。図3に、その時の写真を示す。

上記の試験と平行して、飛行ロボットのGPSナビゲーションに関する試験を行った。この試験は、小型の飛行ロボット「YAMASEMI」を用いた。フィールド試験を実施する前に、仙台市内の広瀬川の河原で行った試験では、飛行ロボットは、GPSで指定された位置と高度を維持する飛行を行うことができていた。しかしながら、浅間山におけるフィールド試験では、試験当日に風が強く、目的地に停留することができなかった。今後、フィードバックパラメータを変更することで、この問題に対処する予定である。

4.2 小型移動ロボットに関するフィールド試験

小型移動ロボットに求められる機能は、飛行ロボットから切り離された後、予めGPS座標が既知であるランド



Fig. 4: 小型移動ロボットのナビゲーション試験の様子

マークまで遠隔操作で走行し、その画像を取得することである。対象とする環境は、浅間山北東の斜面（図1のC9エリア）の標高2,100mから標高1,900m地点である。オペレータは、鬼押しハイウェイのパーキングエリア（通称ブルーベリー駐車場）から遠隔制御を行う。なお、この位置は、火口から4km、ロボットから3km程度離れた地点である。通信については、DocomoのFOMAを用いた通信手段と、2.4GHz帯を用いた直接通信について試みることにした。前者は、通信帯域が狭いが、ロボットの姿勢によらず、通信を確立することができることが期待される。一方、後者は、通信帯域は広いが、ロボットの姿勢によっては、通信が途絶えてしまうという問題がある。本試験では、通信方式の違いによる遠隔操作の操作感を比較するため、両方の通信方式で同一タスクの実行を行った。

図4に試験の様子を、図5にロボットの走行軌跡ならびに、オペレータとの位置関係を示す。この走行実験中、ロボットが転倒し、人の手で姿勢を戻すといった事象が数回発生した。この転倒の原因には、搭載したカメラから確認できないクレータに車輪をとられたことと、バック走行の際に従動輪がひっくり返ってしまったことが挙げられる。この問題に対処するため、現在、転倒しても走行を継続できるように、GeoStarの設計変更を行っている。また、通信方式の比較については、無線LANを用いた通信では、ロボットが撮影した画像を操作用PC上で表示するまでに1秒程時間がかかり、FOMA-3G回線を用いた通信では、同作業に2.5秒程度かかることがわかった。しかしながら、遅延時間や画像の解像度が異なるにもかかわらず、転倒回数は4回ずつと同じで、オペレータからも「操作感は、それほど変わらない」との回答を得た。この点は、非常に興味深い結果である。一方、移動ロボットに搭載したGPSモジュールは、ロボットの上方が大きく開けていたにもかかわらず、位置計測に大きな誤差が生じたため、GPSを元にした走行は、困難であった。これは、GPSアンテナが地表近くにあり、山の斜面によって発生したマルチパスが原因であると考えられる。

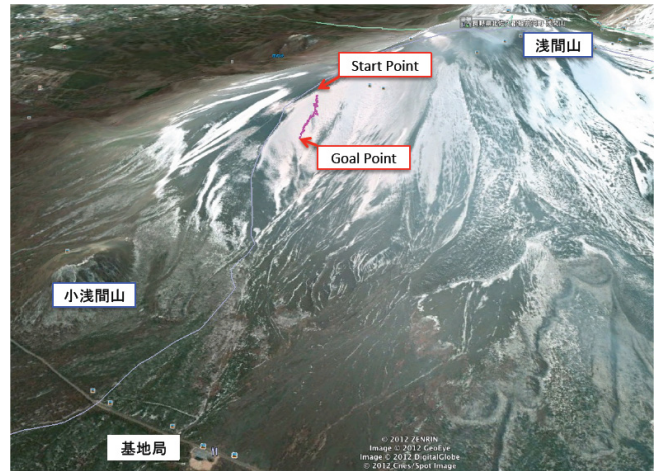


Fig. 5: 小型移動ロボットのナビゲーション結果

5 まとめと今後の課題

本研究では、人が立ち入るのが危険な火山の観察を行うことが可能な、小型火山観測移動ロボットの研究開発を目指し、浅間山にて、ロボットのフィールド試験を行ってきた。2012年の試験の結果、シナリオ全体の通しの試験はできていないが、飛行ロボットが小型移動ロボットを運搬できるということ、飛行ロボットがGPSナビゲーションできるということ、小型移動ロボットが対象環境を走行可能であることを実証することができた。

今後も、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, 木下宏晃, 西村健志, 小柳栄次, 油田信一, 久武経夫, 森山裕二. 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-. 第11回 計測自動制御学会 システムインテグレーション 部門 講演会論文集, pp. 555-558, 2010.
- [2] 永谷圭司, 桐林星河, 西村健志, 吉田智章, 小柳栄次, 羽田靖史, 油田信一, 中里邦子, 久武経夫, 森山裕二. 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-高出力の無線通信を用いた浅間山でのフィールド実験-. 第12回 計測自動制御学会 システムインテグレーション 部門 講演会論文集, pp. 54-57, 2011.