

タイトル: 活火山地域における遠隔調査を目的とした移動探査ロボットシステムの研究開発

執筆者: 永谷圭司 (東北大学)

**Title: Development of Remote Observation system in Active Volcano Areas
using Aerial/Ground Mobile Robots**

Author: Keiji Nagatani (Tohoku University)

1. 研究目的

活動中の火山に対し、活動現場の付近で観測することは、後の噴火予測や住民の避難計画、砂防計画の策定を行う上で、非常に有用である。しかしながら、一般に、活動中の火山には、人が立ち入ることができない。そこで、筆者の研究グループでは、遠隔操作にて火山の不整地を走行し、火山噴火による緊急的な土砂災害対策に必要となる降灰等の調査を近距離から実施することが可能な、移動探査ロボットの研究開発を進めている。この種のロボットを実現するために必要となるキーテクノロジーの研究開発には、現場における試験とそれに基づく検討が必要不可欠である。そこで、筆者の研究グループでは、平成 23 年度より、河川砂防技術研究開発公募 (地域課題分野) を利用し、国土交通省 関東地方整備局の協力の下で、火山地域におけるフィールド試験を実施してきた。対象とするフィールドは、過去に何度も噴火を繰り返してきた浅間山 (平成 25 年 8 月 15 日現在で噴火警戒レベルは 1) である。本稿では、これまで筆者の研究グループで行ってきた移動探査ロボットの研究開発ならびに、主に浅間山で実施してきたフィールド試験について紹介する。

2. 探査シナリオと探査アプローチ

本研究における調査項目は、火山噴火時の立入禁止区域内における土石堆積状況の映像取得と堆積厚さの計測の 2 つと設定した。また、「噴火前には有人探査可能地域であること」、「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」という 2 つの前提条件の下で、これを実現するための探査シナリオを以下のように設定した。

1. 災害発生前の写真と災害発生後の写真の比較

定点観測でよく採用される手法で、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。そのため、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。

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。

上記の探査シナリオを実現する上で必須となるのが、人が立ち入ることができない環境でのロボットの遠隔操作であり、広域の立入禁止区域を移動する上で、最も効果的な方法は、空中移動である。中でもホバリングが可能なヘリコプタは、有力な調査手段であるが、現状の内燃機関型無人ヘリコプタは、1,000m以上の高度で飛行することができない。また、モータ駆動無人ヘリコプタは、高度1,000m以上での飛行が可能であるが、調査時間をそれほど長くとることができないという問題がある。一方、不整地走行を行うことが可能な移動ロボットは、比較的長い調査時間を確保することができるが、単独では、対象環境に到達するまで非常に時間がかかるため、移動調査を実施することが困難である。そこで本研究では、モータ駆動の無人ヘリコプタと小型移動ロボットの複合システムで、火山の移動調査を行うこととした。実現を目指す複合システムによる無人調査手法のイメージを図1に示す。



図1 無人ヘリコプタと小型移動ロボットの複合システムによる無人調査手法のイメージ

3. 複合システムによる無人調査実現のための課題と解決法

前節で示した複合システムによる無人調査を実現するためには、技術的には、飛行ロボットの飛行高度、ロボットとオペレータ間の通信、ロボットの電源ならびに移動性能が問題となる。そこで、これらの技術課題と、それに対する我々の解決手段を以下に示す。

3.1 飛行ロボットの飛行高度の問題と解決法

2章でも述べたが、農薬散布などに利用される内燃機関を利用する無人ヘリコプタは、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、現状の技術では、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。本研究で対象とする浅間山は、火口から4km地点においても、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、内燃機関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。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、モータ駆動のマルチロータ機を用いた飛行ロボットを利用して、小型移動ロボットを搬送することとした。

3.2 ロボットの電源と移動性能の問題と解決法

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。そこで、飛行ロボットに搭載する小型移動ロボットには、東北大学で開発した軽量小型移動ロボットの利用を想定することとした。これは、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。電源については、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

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、通信デバイスの小型化まで至っていない。そこで本研究では、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小型ロボットの遠隔操作の通信に利用することとした。

4. フィールド試験

無人ヘリコプタと小型移動ロボットの複合システムの実現を目指し、平成 24 年 9 月～10 月に浅間山にて、平成 25 年 3 月には、新燃岳にてフィールド試験を実施した。以下に、各フィールド試験の結果ならびに、得られた知見を紹介する。

4.1 小型移動ロボットに関するフィールド試験（平成 24 年 9 月）

災害発生前の写真と災害発生後の写真の比較を行うシナリオを実現するためには、発災後に、発災前に撮影した場所と同一地点で写真を撮影する必要がある。よって、小型移動ロボットに求められる機能は、GPS 座標が既知であるランドマークまで遠隔操作で走行し、その画像を取得することとなる。そこで、本フィールド試験の目標は、走行対象とする環境を浅間山北東の斜面の標高 2,100m から標高 1,900m までの約 600m とし、この間に複数のランドマークを設置し、飛行ロボットから切り離された小型移動ロボット GeoStar (三輪型移動ロボット) が、これらのランドマーク画像を取得することとした。なお、オペレータは、鬼押しハイウェイのパーキングエリアより、小型移動ロボットの遠隔制御を行う。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の 2 種類について試みることにした。前者は、通信帯域は狭いが、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できる。一方後者は、通信帯域は広いが、見通しの効かない環境や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 2 に平成 24 年 9 月 4 日に実施した小型移動ロボットの走行試験の様子を、図 3 には、そのときのロボットの走行軌跡ならびにオペレータとの位置関係、図 4 に、オペレータの操作画面(右上が、現在の GPS 座標と目標とするランドマークの相対位置関係、左上が、ロボットが獲得したカメラ画像、下が各種データならびに制御盤)を示す。

この走行実験中、ロボットが転倒し、人手で姿勢を戻すといった事象が数回発生した。この転倒原因には、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



図 2 小型移動ロボット GeoStar の標高 2100m における走行の様子

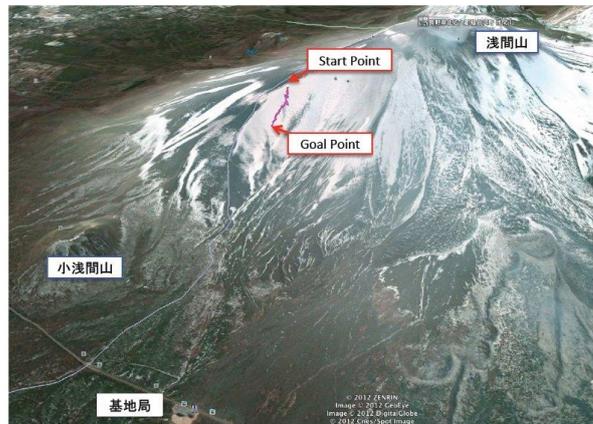


図 3 ロボットの走行軌跡とオペレータの位置

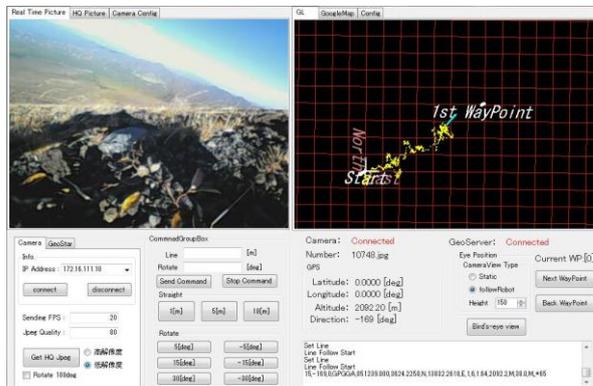


図 4 オペレータの操作画面

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、転倒しても走行を継続可能な小型移動ロボット GeoStar の設計変更を行い、9 月 22 日には、浅間山斜面において、その走行試験に成功した。ただし、2.4GHz 帯を用いた通信では、ロボットの上が入れ替わるとアンテナが隠され通信不能となるため、転倒しても走行可能な GeoStar には、FOMA による通信のみを実装した。

一方、通信方式の比較については、無線 LAN を用いた通信では、ほぼリアルタイムに高解像度の取得画像を表示することができたが、FOMA 回線を用いた通信では、同作業に 2.5 秒程度の遅延が発生することがわかった。この遅延は、遠隔操作の際の操作性に、大きな影響を与えることが分かった。また、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 を主とした走行は困難であった。この誤差は、使用した GPS が携帯電話用であったため、精度が低く、アンテナが高感度であったこと、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。

4.2 飛行ロボットによる移動ロボットの運搬試験（平成 24 年 10 月）

本アプローチ動作で最終的に目指すのは、飛行ロボットによる移動ロボットの運搬である。そこで、平成 24 年 10 月、GeoStar を軽量化した GeoStar-Mini と飛行ロボット TOBI を用いた移動ロボットの運搬ならびに切り離し試験を行った。GeoStar-Mini は、重量 1.5kg の小型軽量移動ロボットで、GeoStar よりも車輪径が小さく、またトレッドも小さいため、不整地の走行性能が少し劣るが、その他の機能は GeoStar と同一である。また、TOBI からの GeoStar-Mini の切り離しについては、テグスを熱で焼き切る機構で実現することとした。



図 5 飛行ロボット TOBI の移動ロボット運搬試験

10 月 24 日に実施した運搬試験では、GeoStar-Mini を搭載した飛行ロボット TOBI は、無事に離陸した。そのときのフライトの様子を図 5 に示す。残念ながら、この試験では、モータの治具の一部がフライト中に破損し、飛行ロボットが墜落したため、切り離し試験を実施することができなかったが、その翌日の飛行ロボットによる移動ロボットの運搬および切り離し試験には、成功した。

4.3 飛行ロボットによる移動ロボットの運搬試験（平成 25 年 3 月）

平成 24 年に実施したフィールド試験を経て、飛行ロボット、小型移動ロボットを改良し、平成 25 年 3 月、宮崎県 霧島連峰にて、飛行ロボットによる、小型移動ロボットの運搬、投下、遠隔操作の試験を実施した。この試験では、運搬する小型移動ロボットを、三輪型から四輪型に変更し、走行性能ならびに、旋回性能を向上させた。また、このロボットも、上下対称となるように設計を行ない、転倒した際にも、走行が可能な設定とした。さらに、飛行ロボットについては、空撮で実績のあるエンルート社製 Zion Pro 800 を採用した。切り離しについては、サーボモータを利用したメカニカルな切り離し機構を採用した。

図 6 に、平成 25 年 3 月 11 日に実施したフィールド試験の様子を示す。図 6(左)は、霧島連峰の高千穂峰をバックに、飛行ロボットが小型移動ロボットを運搬している様子、図 6(中)は、飛行ロボットが小型移動ロボットを中岳斜面に投下した瞬間、図 6(右)は、遠隔操作により、小型移動ロボットが中岳を下っている様子を示している。このフィールド試験により、シナリオ 2 として提案したアプローチ方法が実現可能であることが実証できた。



図 6 飛行ロボットによる小型移動ロボットの運搬(左)/投下(中)/遠隔走行試験(右)

5. 成果の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調査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、主に浅間山にて、ロボットのフィールド試験を行ってきた。平成 24 年 9 月から 10 月にかけて実施した試験では、シナリオ全体の通しの動作までには至らなかったが、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、小型移動ロボットが遠隔操作により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。また、平成 25 年 3 月の新燃岳における試験では、飛行ロボットについてはマニュアル操舵であったものの、小型移動ロボットの運搬、小型移動ロボットの投下、小型移動ロボットの遠隔操作を実施することができた。

今後も、不整地移動ロボットを用いた火山調査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繰り返し実施する予定である。これにより、火山噴火の際に現場で有用となる火山探査ロボットの開発を進めると共に、浅間山を含め実際に火山噴火が起きた際には、このロボットシステムの活用を図ってまいりたい。

参考文献

- 永谷 圭司, 安藤詳平, 飯野勝博, 西真佐人, “火山噴火後の遠隔調査システムの開発”, 砂防学会誌 Vol.65, No.6, pp.56-60 (2013-03)
- 永谷圭司, 西村健志, 吉田智章, 小柳栄次, 羽田靖史, 油田信一, 多田隈建二郎, “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--”, 第 13 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.648-651 (2012-12)
- 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 (2011-12)