

活火山探査を目的とした電動マルチロータ機搭載用小型軽量移動ロボットの開発

Development of Compact and Lightweight Mobile Robot
that is Mountable on Electric Multi-rotor UAV to Observe Active Volcanoes

秋山 健, 学 山内 元貴, 正 永谷 圭司, 正 吉田 和哉 (東北大)
伊豆 智幸 (エンルート), Randy Mackay (Japan Drones)

Ken AKIYAMA (Tohoku Univ.), akiyama@astro.mech.tohoku.ac.jp
Genki YAMAUCHI, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.),
Tomoyuki IZU (enRoute Co., Ltd.), Randy Mackay (Japan Drones Co., Ltd.)

When an active volcano erupts, typically, a restricted area is set, such as within a few kilo-meter radius of the crater, according to the eruption level. However, it is very important to observe inside the area, and to forecast a debris flood and/or a pyroclastic flow for inhabitants. Therefore, we proposed a robotic observation system in active volcanoes, which is composed of a mobile robot and a multi-rotor UAV. To realize the scenario, we developed a compact and lightweight mobile robot called CLOVER to mount on small-sized multi-rotor UAV. In this paper, we introduce a volcano observation scenario, field experiments and our new robot CLOVER, and report an operation test with a multi-rotor UAV.

Key Words : Volcano Observation, Mobile Robot, Field Robotics

1 緒言

日本は世界でも有数の火山大国であり、全国に110もの活火山が存在する。活火山が噴火すると、その規模に応じて定められた範囲への人の立ち入りが制限される。例えば浅間山(図1)では、噴火の規模がレベル3に達すると、火口から半径4kmの区域に人が立ち入ることができなくなる。その一方で、噴火の状況を把握することは、近隣住民の避難計画を策定する上で非常に重要となる。そこで、噴火中の火山に移動ロボットを投入し、遠隔からロボットを操作し、噴火状況の確認を行う「無人火山探査」の実現が期待されている。

火山探査を行う遠隔操作型の移動ロボットは、これまでもいくつか開発されてきた。カーネギーメロン大学は、不整地移動ロボット、DanteおよびDante IIを火山に投入し、クレータ探査を実施した[1]。またイタリアを中心とするROBOVOLC Projectでは車輪型の火山探査ロボットが開発され、火山環境において試験運用が行われた[2]。日本においても、東北大学の谷口らのグループが無人火山探査車MOVEを開発し、伊豆大島や阿蘇山にて走行試験が実施された[3]。また、2009年からは、伊豆大島にて「無人観測ロボットシンポジウム」が毎年開催され、全国のロボット研究者と火山研究者らが一堂に会し、火山噴火時に本当に役に立つロボットの開発を目指してフィールド試験を実施している[4]。

筆者が所属する研究グループにおいても、移動ロボットによる活火山探査を目的とし、国土交通省等の協力のもと、浅間山などの活火山環境においてフィールド試験を実施してきた[5-7]。本研究では、これまでに実施したフィールド試験を踏まえ、実際の活火山にて運用可能な監視システムの検討を行い、火山斜面を探索する移動ロボットCLOVER(Compact and Lightweight teleOperation robot for Volcano Exploration)を開発した。CLOVERは、電動マルチロータ機によって活火山に投入されることを想定した小型軽量の移動ロボットである。

本稿では、活火山の監視シナリオについて述べた後、これまでに開発した活火山探査移動ロボット、フィールド試験、ならびに新規開発した移動ロボットCLOVERについて紹介し、電動マルチロータ機に搭載して実施した動作試験について報告する。



Fig. 1 An active volcano Mt. Asama
© Japan Meteorological Agency

2 活火山監視システム

2.1 火山災害

火山災害の要因として、噴石・火山灰等の噴出物、火山ガス、溶岩流、火砕流、土石流などがある[8]。このうち火砕流は、高温の溶岩や火山灰、火山ガスの混合物が一体となり、山体斜面を高速で流下する現象である。また、土石流は、火山灰等の噴出物が堆積した山体斜面に雨が降り、泥流となって斜面を流れ下る現象である。積雪する地域の火山では、火砕流や溶岩など高温の噴出物が大量の雪を溶かし、斜面を流れ下る融雪型火山泥流が発生する恐れがある。これらの現象は、下流の地域に甚大な被害をもたらす恐れがあるため、火山噴火時には近隣住民の避難計画策定が重要となる。このとき、山体斜面に堆積した噴出物の種類と量(融雪型火山泥流の場合は積雪量)を調査することで、災害の発生時期と規模がある程度予測できるとされている。そこで、本研究では、活火山斜面に堆積した噴出物を、移動ロボットにより調査するシステムの構築を行った。

2.2 ロボットによる活火山監視シナリオ

移動ロボットによる活火山監視シナリオとして、

- 移動ロボットが立入制限区域外から山体斜面まで移動
- ヘリコプタにより移動ロボットを山体斜面に運搬



Fig. 2 A scenario of volcano observation



Fig. 3 A multi-rotor UAV “Zion Pro Hexacopter”
© enRoute Co., Ltd.,

の2つがあげられる．両者とも，立入禁止区域外からロボットの操作を行う必要があるため，長距離通信技術と遠隔操作技術が課題となる．また，前者の場合，山体斜面までは長距離の移動となるため，現場までのナビゲーション技術，長時間駆動するための電源確保が必要となる．さらに，ロボットが移動するための登山道が整備されているとは限らないため，ロボットには非常に高い走破性能が求められる．

そこで，本研究では，ヘリコプタにより移動ロボットを山体斜面に運搬する後者のシナリオを想定することとした．このシナリオのイメージを図2に示す．このとき，移動ロボットは山体斜面まで運搬され，投下された後，斜面を下りつつ，堆積した噴出物の調査を行う．

3 活火山探査移動ロボット

3.1 ロボットの要求仕様

移動ロボットによる活火山監視システムを構築するにあたり，移動ロボットの火山斜面への運搬には，電動マルチロータ機（図3）を用いることとした．電動マルチロータ機は，電動モータによりロータを回転させるため，ガソリンエンジンで飛行する無人ヘリコプタが得意とする火山地形のような高度1000mを超える環境においても飛行可能である．ただし，最大ペイロードは4kg程度であるため，搭載する移動ロボットは軽量である必要がある．

また，火山斜面は，火山灰等の噴出物で覆われた軟弱急斜面であり，かつ，火山礫が散在する不整地である．そのため，移動ロボットには，軟弱かつ急斜面の不整地での高い走破性能が求められる．一般的に，移動ロボットはサイズが大きい程，走破性能が向上する．しかし，本シナリオでは，電動マルチロータ機で運搬する必要があるため，移動ロボットは小型軽量であることが望ましい．

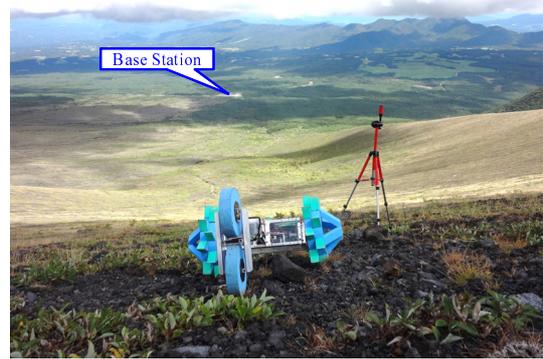


Fig. 4 A volcano exploration robot “GeoStar-II”



Fig. 5 A volcano exploration robot “GeoStar-III”

したがって，開発する移動ロボットは，電動マルチロータ機で運搬可能な重量を満たしつつ，高い走破性能を有するよう設計する必要がある．

3.2 活火山環境におけるロボットフィールド試験

筆者の所属する研究室では，1kg級の車輪型移動ロボットを用いてフィールド試験を実施した経験があるため [9]，まず，この超小型移動ロボットを基に，浅間山斜面を走行可能な車輪型移動ロボットを開発した [10]．図4に開発した活火山探査移動ロボット GeoStar-II と，ターゲットとした浅間山斜面を示す．

GeoStar-II は左右の車輪が独立に駆動する対向2輪型の移動ロボットで，後方にパッシブな補助輪を持つ構造となっている．全長800mm，全幅600mm，全高300mmで，重量はバッテリー（LiFePO₄，30Wh×1）を含めて2.7kgである．本体前方にはカメラが取り付けられており，このカメラ映像と，GPS座標を頼りに遠隔操作を行う．本体内部には，車輪を駆動するためのDCモータ（11W×2），モータを制御するためのマイコンとモータドライバ，GPSモジュール，IMU，地磁気センサ，遠隔操作を行うためのカメラ，カメラで取得した画像の処理を行うPC，ならびに基地局と通信を行う通信機を配置している．また，通信には，docomoのFOMAモジュールと，2.4GHz帯の無線LAN通信の2つの手法を想定し，それぞれの通信機を搭載した2台のGeoStar-IIを開発し，フィールド試験を実施した．

フィールド試験は，浅間山斜面の標高2100m付近にて実

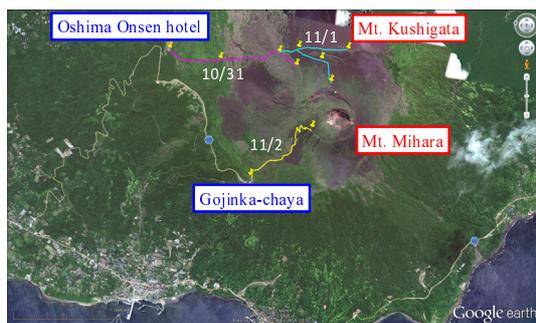


Fig. 6 The result of Izu-Oshima field test

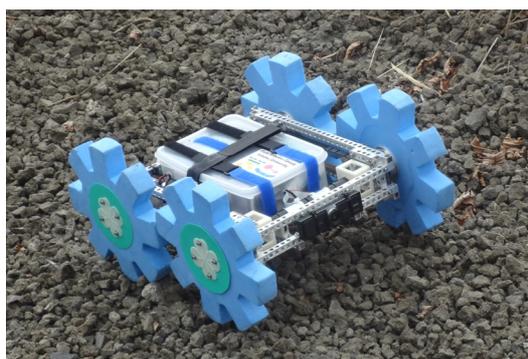


Fig. 8 A volcano exploration robot "CLOVER"

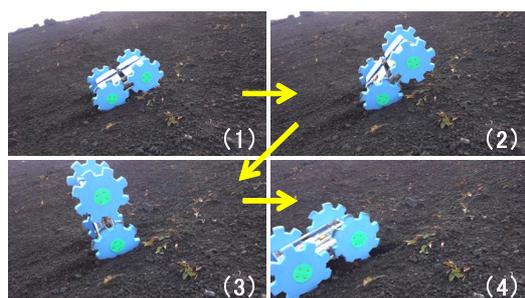


Fig. 7 A scene of tipping over "GeoStar-III"

施し、図 4 に示す浅間山火口から約 4km の地点より、遠隔操作を行った。また、図 4 中の三脚は、カメラ映像による遠隔操作を行う際の探査目標である。GeoStar-II は、標高 2100m 付近から標高 1900m 付近まで約 500m 走行したが、この間、急斜面において転倒することが何回もあった。操縦者の手元に送られてくるカメラ画像のみでは、ロボットが走行する地形の状況が正確に把握できず、転倒した際にも、ロボットが転倒する恐れがあるのか、操縦者は状況を理解できなかった。したがって、火山斜面を走行するロボットは、転倒したとしても走行が継続できる構造であることが望ましい。また、GeoStar-II の構造上、旋回動作時に、後方の補助輪が斜面上の礫に引っ掛かり、走行の妨げになることが多々あった。この状況は、操縦者側から確認することができなかつたため、操縦者の意図した通りにロボットを操作することが難しかった。

以上の浅間山にて実施した GeoStar-II のフィールド試験より、活火山探査を行う移動ロボットにおいて以下のことが明らかになった。

- 小型軽量ロボットは、火山斜面を遠隔操作により移動探査可能である。ただし、カメラの映像から斜面の形状を正確に把握することは難しい。
- ロボットは急斜面で必ず転倒する。そこで、転倒したとしても走行が継続可能な移動機構である必要がある。

これらを踏まえ、伊豆大島で実施するフィールド試験に向けて、改良型活火山探査移動ロボット GeoStar-III (図 5) を開発した。GeoStar-II では、ロボットの安定性向上を狙い、可能な限りサイズを大きくしたが、操作性が犠牲となり、操縦者の意図した通りにロボットを操作することが難しかった。そこで、GeoStar-III では 4 輪駆動を採用し、走破性、操作性の向上を狙った。GeoStar-III の左右の車輪はそれぞれ独立に駆動し、前後の車輪は歯形ベルトにより、動力が伝達されている。全長 560mm、全幅 420mm、全高

270mm で、重量はバッテリー (LiFePO₄, 30Wh×4) を含めて約 4kg である。伊豆大島は、三原山噴火時の立入制限区域外から三原山火口まで、移動ロボットが走行可能な登山道が整備されている。そのため、登山道の長距離走行も想定し、GeoStar-III には 30Wh のバッテリーを 4 本搭載した。

図 6 に、伊豆大島での GeoStar-III の走行軌跡を示す。GeoStar-III は 10 月 31 日～11 月 2 日の 3 日間で合計約 9km 走行した。なお、操作はロボット前方に搭載したカメラ映像を頼りに、ロボットの目視が不可能な遠隔から行った。

また、図 5 に示すように、GeoStar-III は、上下対称の構造であるため、図 7 のように斜面上で転倒した場合も走行が継続可能であった。なお、コントロールシステムは GeoStar-II と同様であり、通信には b-mobile を使用した。

3.3 活火山探査ロボット CLOVER の開発

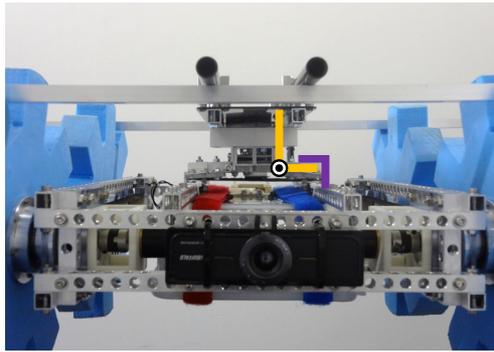
浅間山、ならびに伊豆大島において実施したフィールド試験より、活火山における小型軽量移動ロボットの有効性が示されたため、2013 年 3 月に実施予定の新燃岳フィールド試験に向けて、より実際の運用を意識し、電動マルチロータ搭載可能な活火山探査ロボット CLOVER (Compact and Lightweight teleOperation robot for Volcano ExploRation) を開発した。

図 8 に、開発した CLOVER の概観を示す。全長 450mm、全幅 360mm、全高 220mm で、重量はバッテリー (LiFePO₄, 30Wh ×1) を含めて 2.5kg である。GeoStar-III と同様の 4 輪駆動機構を持ち、転倒しても走行が継続可能な上下対称の構造である。また、通信には b-mobile を使用し、前方のカメラ映像と GPS 座標を頼りに遠隔操作を行う。なお、コントロールシステムの構成は GeoStar-III と同様であり、すべて本体中央部のケース内に配置し、簡易防水、防塵対策を施している。

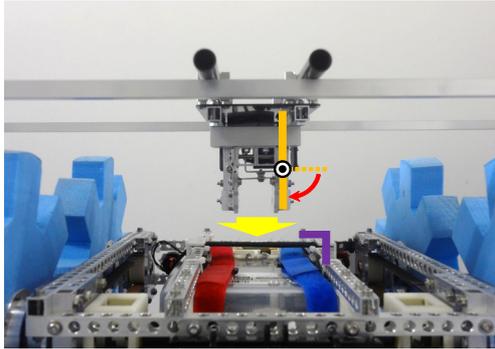
また、図 9(a) に示すように、CLOVER は電動マルチロータ機に機械的に拘束される。投下する際には、ラジコンサーボにより電動マルチロータ機の投下機構のロックが解除され (図 9(b))、CLOVER は電動マルチロータ機と分離する。

4 動作試験

2013 年 3 月の新燃岳フィールド試験に向けて、活火山探査移動ロボット CLOVER を電動マルチロータ機に搭載し、屋内にて飛行試験を実施した。電動マルチロータ機には、株式会社エンルートが開発した Zion Pro 800 を使用した。Zion Pro 800 のロータの軸間距離は 800mm であり、15 インチのカーボン製プロペラが 6 枚取り付けられている。図 10 に飛行試験中の様子を示す。重量 2.5kg の CLOVER を



(a) Loading



(b) Releasing

Fig. 9 The drop mechanism of multi-rotor UAV

搭載しても、電動マルチロータ機は問題なく飛行することを確認した。

次に、CLOVER の投下試験を行った。図 11 に CLOVER が電動マルチロータ機から投下される様子を示す。CLOVER が分離した瞬間、電動マルチロータ機の飛行重量が急激に減少したため、電動マルチロータ機は急上昇し、操縦者が慌てる場面が見られたが、電動マルチロータ機に、飛行高度を一定に保つ制御を組み込むことで、CLOVER を投下した後も安定した飛行が可能であった。

以上の動作試験より、実際の活火山環境においても、電動マルチロータ機と小型移動ロボット CLOVER による協調探査が可能であると期待できる。

5 結言

本研究では、活火山斜面の移動探査を目的とした小型軽量移動ロボット CLOVER を開発した。CLOVER は、電動マルチロータ機により火山斜面に運搬され、山体斜面に堆積する火山噴出物の種類と量を計測することが期待される。また、動作試験において、CLOVER を搭載した電動マルチロータ機は安定した飛行が可能であり、CLOVER の投下も問題なく行えることを確認した。

今後、活火山環境において、電動マルチロータ機と小型軽量移動ロボットを用いたフィールド試験を繰り返し実施し、実際に噴火が起きた際に運用可能な、移動ロボットによる活火山監視システムの構築を目指す。

文献

[1] John E. Bares, David S. Wettergreen, Dante II: Technical Description, Results, and Lessons Learned, The International Journal of Robotics Research 1999 18: 621, 1999-07



Fig. 10 An indoor flying experiment for multi-rotor UAV



Fig. 11 Separation of "CLOVER" from the multi-rotor UAV

- [2] Daniele Caltabiano, Danilo Ciancitto, Giovanni Muscato, Experimental results on a traction control algorithm for mobile robots in volcano environment, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA2004), 2004-04
- [3] 後藤章夫, 谷口宏充, 市原美恵, 無人火山探査車 MOVE の開発とその運用課題, 遊・星・人: 日本惑星科学会誌 Vol.21, No.2, 2012-06
- [4] 佐伯和人, 火山観測ロボット実証試験場の選定と実証試験運営の試み, 遊・星・人: 日本惑星科学会誌 Vol.21, No.2, 2012-06
- [5] 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 (SI2010), 2010-12
- [6] 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 (SI2011), 2011-12
- [7] 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 (SI2012), 2012-12
- [8] 永谷圭司, 火山噴火による災害と対応について, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2012), 2012-08
- [9] 野寄敬博, 高橋悠輔, 山内元貴, 永谷圭司, 吉田和哉, 広域屋外環境の探査を目的とした超小型移動ロボットの開発とフィールド実験, 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 (SI2011), 2011-12
- [10] 山内元貴, 秋山健, 高橋悠輔, 永谷圭司, 吉田和哉, 羽田靖史, 車輪型軽量火山探査ロボットの開発と遠隔操作試験, 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 (SI2012), 2012-12