

# 活火山探査を目的とした移動ロボットの開発とフィールド試験

秋山 健<sup>\*1</sup>, 山内 元貴<sup>\*1</sup>, 永谷 圭司<sup>\*1</sup>,  
吉田 和哉<sup>\*1</sup>, 伊豆 智幸<sup>\*2</sup>, Randy Mackay<sup>\*3</sup>

## Development and Field Test of Teleoperated Mobile Robots for Active Volcano Observation

Ken AKIYAMA<sup>\*1</sup>, Genki YAMAUCHI<sup>\*1</sup>, Keiji NAGATANI<sup>\*1</sup>,  
Kazuya Yoshida<sup>\*1</sup>, Tomoyuki IZU<sup>\*2</sup> and Randy MACKAY<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> The graduate school of Engineering, Tohoku University  
6-6-01, Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

<sup>\*2</sup> enRoute Co., Ltd.

1-3-29 Ureshino, Fujimino, Saitama 356-0056, Japan

<sup>\*3</sup> Japan Drones Co., Ltd.

1019-396, Karuizawa, Karuizawa-cho, Kita-Saku-gun, Nagano 389-0102, Japan

When an active volcano erupts, typically, a restricted area is set according to the eruption level. However, it is very important to observe inside of the area for prediction timing of the appearance and scale of volcanic disasters. Therefore, we proposed a robotic observation system in active volcanoes, which is composed of a multi-rotor UAV and a mobile robot. To realize this system, we developed a compact and lightweight mobile robot for volcano exploration. In this paper, we introduce our volcano observation scenario and mobile robots, and report a field test in Mt. Asama.

**Key Words** : Volcano Observation, Mobile Robot, Field Robotics

## 1. 諸 言

日本は、全国に110もの活火山が存在する火山大国であり、気象庁は、このうち47の活火山を「火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山」として指定している<sup>(1)</sup>。これらの活火山が噴火すると、その規模に応じて立入禁止区域が設定される。その一方で、火山災害の発生時期や規模を予測し、近隣住民への被害を防ぐためには、噴火状況や噴出物の堆積状況の確認が重要となる。そこで、活火山に移動ロボットを投入し、遠隔から探査を行う「活火山無人監視システム」の実現が求められている。

活火山探査を目的とした移動ロボットの研究開発は、これまでいくつか行われてきたが<sup>(2)~(4)</sup>、実用化には至っていない。また、次の大噴火が迫っていると言われている伊豆大島では、2009年から「無人観測ロボットシンポジウム」が開催され、全国のロボット

研究者と火山研究者らが一堂に会してフィールド試験を実施し、実際の噴火時に運用可能な火山探査ロボットの研究開発が行われている<sup>(5)</sup>。

筆者の所属する研究グループにおいても、「浅間山噴火時における無人調査ロボットシステム」の構築を目指し、フィールド試験を通して、活火山探査ロボットの研究開発を進めてきた<sup>(6)~(8)</sup>。本研究では、これまでのフィールド試験を通して得られた知見をもとに、無人航空機と小型移動ロボットの協調探査による活火山監視システムを提案すると共に、火山斜面を走行する小型移動ロボットを開発した。

本稿では、提案する活火山監視システムを紹介し、開発した移動ロボットについて述べた後、浅間山にて実施したフィールド試験について報告する。

## 2. 活火山監視シナリオ

活火山監視システムにおいて、移動ロボットに期待される調査項目は以下の通りである。

1. 噴出物の採取 山体斜面のどこに、どのような噴出物が堆積しているか(粒径、量)を調査する。
2. 噴出物の堆積状況の確認 噴出物の堆積状況(積雪のある場合は積雪量)がどのように変化しているかを調査する。

<sup>\*1</sup> 東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻  
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)  
{akiyama, yamauchi, keiji, yoshida}@astro.mech.tohoku.ac.jp

<sup>\*2</sup> 株式会社エンルート  
(〒356-0056 埼玉県ふじみ野市うれし野 1-3-29)  
izu@enroute.co.jp

<sup>\*3</sup> Japan Drones 株式会社  
(〒389-0102 長野県北佐久郡軽井沢町大字軽井沢 1019-396)  
rmackay9@japandrones.com



Fig. 1 Scenario of volcano exploration using a UAV and a mobile robot

3. 噴出物の浸透能試験 堆積した噴出物が、どのくらい水を通しにくいかを調査する。
4. 山体斜面の状態確認 泥流が発生、流下する恐れのあるリル（雨水が集まることによって洗掘された浅い溝）やガリー（リルが発達したもの）の発達状況を調査する。

以上の調査を行うことで、土石流や（融雪型）火山泥流といった、噴出物が起因となる火山災害の発生時期や規模を予測することが可能となる。しかし、これらの調査の全てを実施することは、多くの技術的課題があるため難しい。

そこで、本研究では、まず山体斜面の視覚情報を取得することを目的とし、活火山監視システムの実現を目指すこととした。このシステムのイメージ図を図1に示す。移動ロボットは無人航空機によって活火山の山体斜面に運搬され、投下された後、斜面を下りながら探査を行う。なお、移動ロボットの操作は、立入禁止区域外に設置した基地局から行う。

### 3. 活火山探査移動ロボットの開発

**3.1 無人航空機による運搬** 探査環境である活火山地域は、標高 1000m を超えることが多い。このような環境では、農薬散布等に多く用いられているレシプロエンジンを搭載する無人ヘリコプタの利用が、燃焼空気の濃度の問題から難しい。そこで、本研究では、電動モータにより回転するプロペラを複数取り付けられた電動マルチロータ機を採用することとした。図2に、株式会社エンルートが開発した電動マルチロータ機 ZionPro800 を示す。この機体は、15 インチのプロペラが直径 800mm のピッチ円上に 6 本取り付けられており、ペイロードは 4~5kg である。また、Arduino マイクロコントローラで動作する Arducopter と呼ばれる GPL ソフトウェアを利用し、GPS 座標を利用した自動航行が可能である。



Fig. 2 Multi-rotor UAV “ZionPro800”

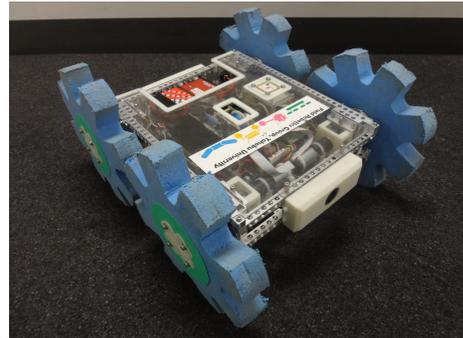


Fig. 3 Overview of volcano exploration robot “CLOVER”

**3.2 小型移動ロボットの開発** 山体斜面は、噴出物で覆われた軟弱地盤、火山礫が散在する不整地、斜度が 30 度を超える急斜面という、移動ロボットにとって非常にチャレンジングな環境である。そのため、移動ロボットには、高い走破性能が要求される一方、電動マルチロータ機に搭載するために小型、軽量である必要がある。これまでに実施したフィールド試験では、カメラ映像と GPS 座標を用いた小型移動ロボットの遠隔操作が可能であったが、急斜面においてロボットが転倒し、走行不能になる現象が見られた<sup>(9)(10)</sup>。限られた視野のカメラ映像と、数秒の時間遅れのある通信状況では、操縦者がロボットの転倒の危険性を把握することは難しく、山体斜面における小型移動ロボットの転倒は、避けることができない問題と思われる。

そこで、本研究では、転倒しても走行の継続が可能な小型移動ロボットを開発した。図3は、本研究で開発した活火山探査移動ロボット CLOVER (Compact and Lightweight teleOperation robot for Volcano ExploRation) である<sup>(11)</sup>。CLOVER の仕様を表1に、3D

Table 1 Specification of a CLOVER

L × W × H	450 mm × 360 mm × 220 mm
Weight	2.5 ~ 3.0 kg
Wheel	φ220 mm × W30 mm
PWR	LiFePO <sub>4</sub> (13.2 V, 2300 mAh)

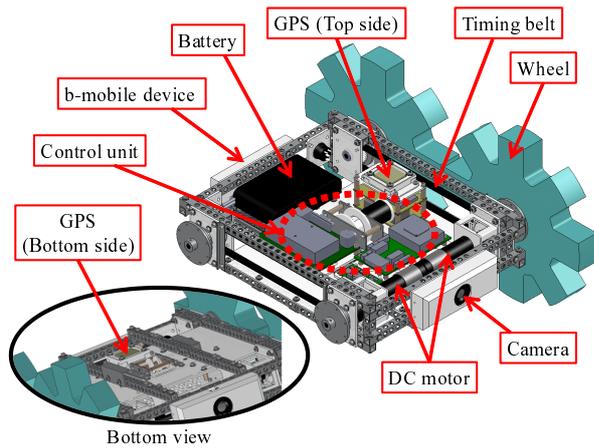


Fig. 4 3D model of CLOVER

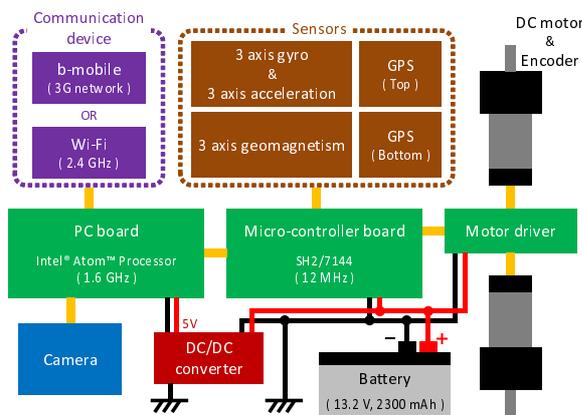


Fig. 5 Control system of CLOVER

モデルを図4に示す。全長450mm、全幅360mm、全高220mm、重量2.5~3.0kgと、電動マルチロータ機のペイロード要件を満たしている。

CLOVERの左右の車輪は、それぞれ独立にDCモータ(Maxon RE-max24, 11W)によって駆動し、前後の車輪はタイミングベルトにより動力が伝達されている。また、前方には、遠隔操作に用いるためのカメラが取り付けられており、一般的なジョイスティックを用いた遠隔操作が可能である。

CLOVERのコントロールシステムを図5に示す。コントロールユニットは、モータを駆動するためのモータドライバ(HiBot, 3-Axes DC Power Module)、モータの制御とセンサ処理を行うマイコン(SH7144, 12MHz)を搭載したマイコンボード、カメラの画像処理を行うPC(Intel®Atom™ Processor, 1.6GHz)、および通信機からなる。センサに関しては、3軸ジャイロ/3軸加速度センサ、地磁気センサ、GPSモジュールを搭載している。図4に示すように、GPSモジュールは、CLOVERの上下両面に取り付けられているため、ロボットが転倒し上下が逆となる場合においても、GPS座標を用いたナビゲーションが可能となる。ま

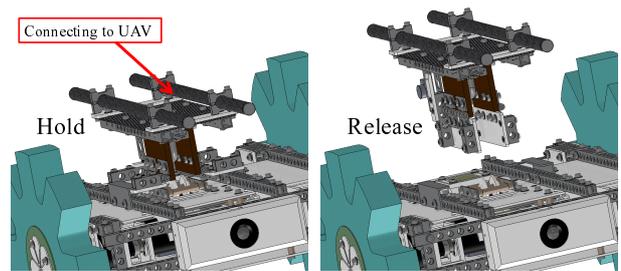


Fig. 6 Separation mechanism between UAV and CLOVER

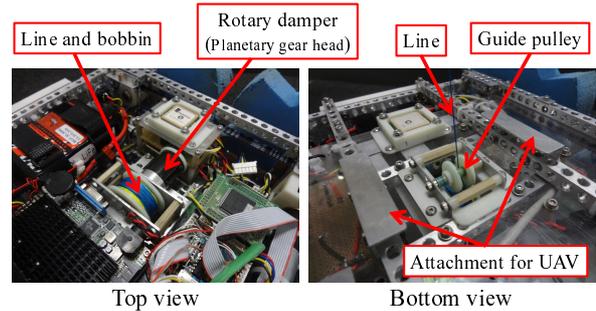


Fig. 7 Drop mechanism of CLOVER

た、通信機はFOMAの3Gネットワークを使用するb-mobile端末、もしくは2.4GHzの無線LAN端末を搭載することができる。なお、図3, 4はb-mobile端末を搭載したCLOVERである。

3.3 移動ロボット投下装置の開発 移動ロボットは、電動マルチロータ機と機械的に接続し運搬され、指定された場所で投下される必要がある。そこで、電動マルチロータ機から移動ロボットを投下するための分離機構を開発した。図6左は、電動マルチロータ機側の分離機構の留め具が、CLOVER裏面のフック(図7右)にはまり、ロボットを保持している状態である。投下時には、分離機構に取り付けたラジコンサーボモータが稼働し、分離機構の留め具が開くことで、CLOVERが電動マルチロータ機から投下される(図6右)。なお、CLOVERは運搬時、および投下時に上下が逆となっているが、上下対称構造であるため、問題はない。

2013年3月に実施したフィールド試験では、電動マルチロータ機をマニュアル操作で飛行させ、地表から2m程度の高さでCLOVERを投下させることに成功した<sup>(12)</sup>。しかし、実際の運用を考えると、飛行距離が長距離となるため電動マルチロータ機のマニュアル操作は難しい。また、斜面における電動マルチロータ機の高度制御も簡単ではなく、機体を地表付近まで降下させると、墜落の危険性が生じる。そこで、電動マルチロータ機を地表から20~30mの高さでホバリングさせ、小型移動ロボットをワイヤを用いてゆっくりと降

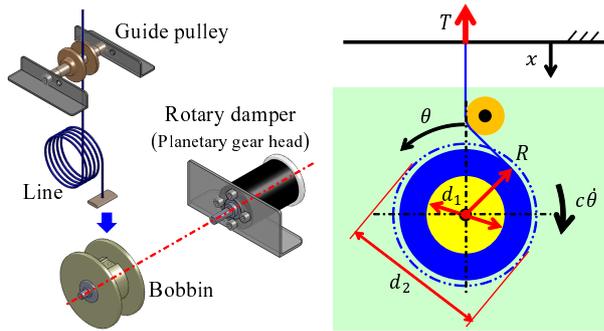


Fig. 8 Model of a drop mechanism

下させるスカイクレーン方式を用いることにした。

図7に、スカイクレーン方式による投下装置の概観を示す。CLOVERの中央部のボビンに、先端を固定せずにテグス（ポリエチレン製10号、直径0.540mm、最大張力65.0kgf）を巻き付け、他端は、CLOVERの下面からガイドプリーを介して電動マルチロータ機に固定する。なお、ボビンにはロータリダンパとしてグリスを封入した遊星歯車のギアボックス（減衰係数4.0Nmm/(rad/s)相当）を接続した。分離機構によって投下されたCLOVERは、ロータリダンパにより十分に減速された状態で山体斜面に着地し、着地後は電動マルチロータ機が上昇することにより、テグスがCLOVERから完全に抜ける仕組みとなっている。

ここで、CLOVERが降下する際の運動について解析する。図8にCLOVERの投下機構のモデルを示す。電動マルチロータ機から鉛直下向きに $x$ 軸をとり、CLOVERが電動マルチロータ機に保持されている状態を $x=0$ とする。テグスに働く張力を $T$ とすると、CLOVERが降下するときの運動方程式は、

$$m\ddot{x} = mg - T \quad (1)$$

と示される。ここで、 $m$ はCLOVERの重量、 $g$ は重力加速度である。なお、テグスの重量、および空気抵抗は無視する。

また、ボビンの回転角を $\theta$ 、ロータリダンパの減衰係数を $c$ 、ボビンの回転軸から張力の作用点までの距離（テグスの排出半径）を $R$ とすると、張力 $T$ は次式で表される。

$$T = \frac{c}{R} \dot{\theta} \quad (2)$$

なお、ボビンはABS樹脂製で軽量であり、低速で回転するため、慣性モーメントは無視し、ガイドプリーでの損失もないものと仮定した。

ここで、CLOVERの降下速度は

$$\dot{x} = R \dot{\theta} \quad (3)$$

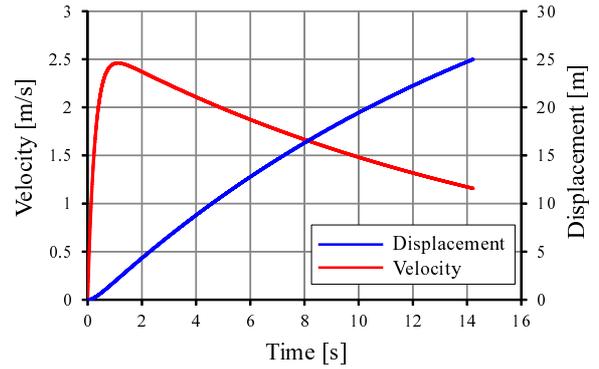


Fig. 9 Result of numerical calculation

であるから、式(2)、ならびに式(1)は、次のように表すことができる。

$$T = \frac{c}{R(x)^2} \dot{x} \quad (4)$$

$$\ddot{x} + \frac{1}{R(x)^2} \frac{c}{m} \dot{x} = g \quad (5)$$

なお、上式において $R$ を $R(x)$ と表現したのは、テグスの排出半径はCLOVERの降下に伴い変化するためである。

次にテグスの排出について考える。テグスを $x$ （=CLOVERの降下距離）だけ排出したとき、ボビンに残るテグスの体積 $V$ は次式で示される。

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 (L - x) \quad (6)$$

上式において、 $d$ はテグス直径、 $L$ はテグスの全長である。また、ボビンに残るテグスの体積は、ボビンの幾何学的関係から次式でも表される。

$$V = \frac{\pi}{4} k_w \{4R(x)^2 - d_1^2\} B \quad (7)$$

上式において、 $d_1$ はボビンの内径、 $B$ はボビン幅である。また、 $k_w$ はテグスの体積充填率であり、テグスがボビンに隙間なく巻き付けられているときは $k_w = 1$ となる。初期状態を考え、 $x=0$ 、 $R(x)$ を初期巻きつけ直径 $d_2$ で表し、式(6)、(7)を連立させると、体積充填率 $k_w$ が求まる。

$$k_w = \frac{d^2}{d_2^2 - d_1^2} \frac{L}{B} \quad (8)$$

Table 2 Parameters of numerical calculation

$m$	$c$	$d$	$L$
3.0 kg	4.0 Nmm/(rad/s)	0.54 mm	25 m
$d_1$	$d_2$	$B$	$k_w$
25 mm	37.5 mm	15 mm	0.622

また、式 (6), (7) より、テグスの排出半径  $R(x)$  は次式で表される。

$$R(x) = \frac{d_1}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{k_w} \frac{L-x}{B} \left(\frac{d}{d_1}\right)^2} \quad (9)$$

よって、式 (5) の微分方程式より、CLOVER の降下する際の降下距離と速度の関係を求めることができる。

図 9 に計算結果を示す。なお、数値計算のパラメータは表 2 のものを用いた。図 9 に示す通り、CLOVER は電動マルチロータ機と分離した後、約 14 秒で 25m の高さを降下する。地上に到達するときの降下速度は 1.16m/s となり、十分に減速されていることが分かる。また、式 (4) より、最大張力は 29.8N となり、テグスの許容張力を十分に下回ることを確認した。

#### 4. 活火山環境におけるフィールド試験

2013 年 9 月 28 日～30 日にかけて、浅間山にてフィールド試験を実施した。フィールド試験では、電動マルチロータ機による小型移動ロボットの投下試験、ならびに長距離無線通信による小型移動ロボットの遠隔操作試験を行った。両試験での、ロボットの走行軌跡を図 10 に示す。

まず、電動マルチロータ機による小型移動ロボットの投下試験について報告する。なお、電動マルチロータ機には ZionPro800、小型移動ロボットには b-mobile 端末を搭載した CLOVER を使用した。本試験では、浅間山登山道の標高 1850m 地点を離陸地点とし、浅間山斜面の標高 2000m 地点を CLOVER の投下地点に設定した。離陸地点と投下地点の距離は約 600m で、投下地点の斜度は約 30 度である。

ZionPro800 は、マニュアル操作により離陸した後、自動航行に切り替え CLOVER を運搬した (図 11 (1))。その後、投下地点上空でホバリングを行い、CLOVER を投下した (図 11 (2))。図 11 (3), (4) は、CLOVER が降下し、浅間山斜面に着地する様子である。CLOVER は投下装置によって十分に減速し、安全に着地することに成功した。なお、CLOVER は、地表から約 20m の高さで投下された。投下されてから地上に到達するのに要した時間は約 10 秒であり、これは図 9 の結果とほぼ一致している。CLOVER の着地後、六里ヶ原駐車場からの遠隔操作によって、CLOVER は浅間山斜面を走行した (図 11 (5))。また、図 11 (6) は、CLOVER に搭載したカメラによって撮影した画像である。なお、今回の試験では、安全性の問題から浅間山中腹を離陸地点としたが、実際の運用では、立入禁止区域の外側に離陸地点を設定することになる。

次に、長距離無線通信による小型移動ロボットの遠

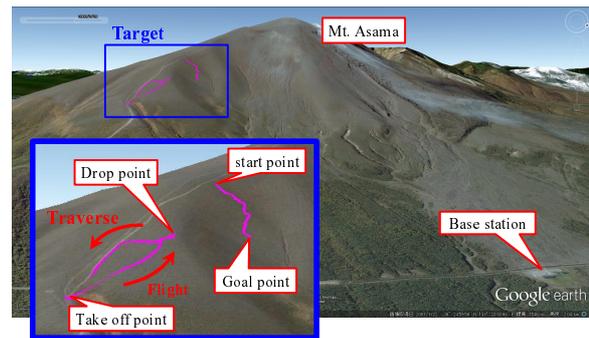


Fig. 10 Result of Asama field test

隔操作試験について報告する。立入禁止区域外である六里ヶ原駐車場に基地局を設置し、2.4GHz の無線 LAN 通信を利用した遠隔操作を行った。小型移動ロボットには、無線 LAN 端末を搭載した CLOVER を使用し、浅間山斜面の標高 2150m 付近をスタート地点とした。なお、CLOVER と基地局は見通し 3km 程度の距離である。

浅間山斜面の様子を図 12 左に示す。斜面には、あらかじめ目印となる三脚 (GPS 座標が既知) を設置しておく (図 12 中)、CLOVER に搭載したカメラの画像と、三脚の GPS 座標を頼りに遠隔操作を行った。CLOVER は標高 2150m のスタート地点から、標高 1900m まで約 400m 走行した。図 12 右は操作用の GUI であり、画面左側にカメラ画像、右側には Way Point (三脚) の位置とロボットの走行軌跡を表示している。本試験では、目印として三脚を使用した。目盛を表示したポール等を予め設置しておくことにより、カメラ画像から噴出物の堆積量を求めることが可能となる。

#### 5. 結 言

本研究では、活火山探査を目的とした小型移動ロボット CLOVER を開発した。浅間山において実施したフィールド試験では、小型移動ロボットを搭載した電動マルチロータ機の自動航行、電動マルチロータ機からの小型移動ロボットの投下、ならびに 3G ネットワーク/無線 LAN 通信による小型移動ロボットの遠隔操作に成功した。以上より、提案する電動マルチロータ機と小型移動ロボットによる活火山監視システムの実用化が近付いたと言える。

今後も、活火山環境でのフィールド試験を繰り返し実施し、小型移動ロボットの研究開発を進め、実際の噴火時に運用可能な活火山監視システムの構築を目指す。

謝 辞

フィールド試験に御協力いただきました関係者のみなさまに感謝いたします。

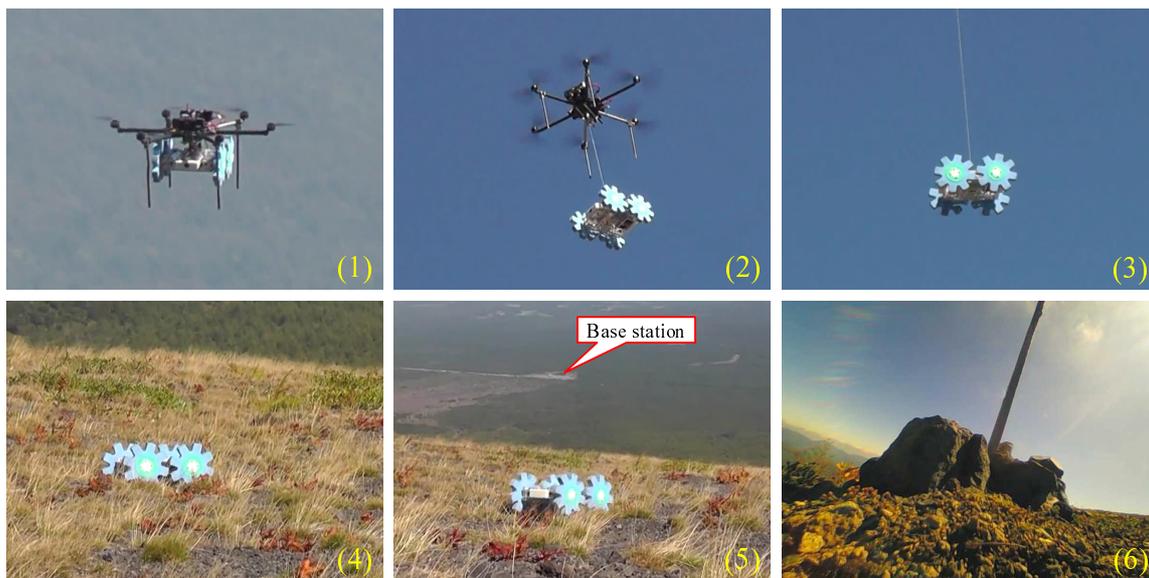


Fig. 11 Cooperated exploration of ZionPro800 and CLOVER

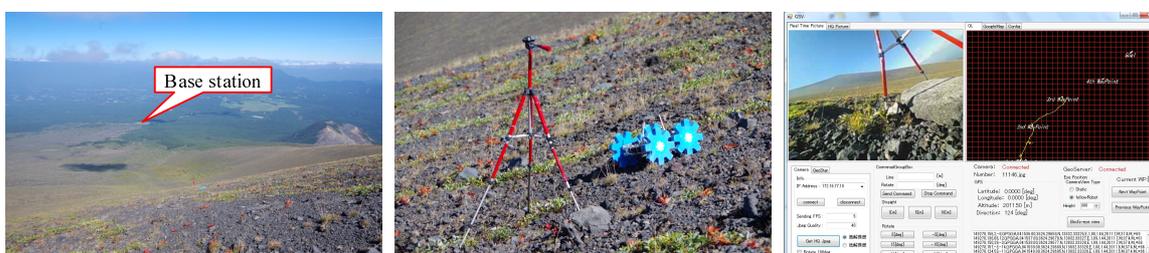


Fig. 12 Teleoperated exploration of CLOVER

### 参考文献

- (1) 気象庁 火山噴火予知連絡会, “中長期的な噴火の可能性の評価について”, 火山活動評価検討会, (2009-06)
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 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, pp.103-110, (2012-06)
- (5) 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, pp.94-102, (2012-06)
- (6) 永谷 圭司, 他, “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, (2010-10)
- (7) 永谷 圭司, 他, “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, (2011-11)
- (8) 永谷 圭司, 他, “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)
- (9) Keiji Nagatani, Hiroaki Kinoshita, et al., “Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain”, Journal of Field Robotics, Volume 28, Issue 6, pp.950-960, (2011-11)
- (10) 山内 元貴, 秋山 健, 他, “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 論文集, pp.652-654, (2012-12)
- (11) 秋山 健, 山内 元貴, 他, “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”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2013, 1P1-P15, (2013-05)
- (12) Keiji Nagatani, Ken Akiyama, Genki Yamauchi, et al., “Volcanic Ash Observation in Active Volcano Areas using Teleoperated Mobile Robots – Introduction to Our Robotic-Volcano-Observation Project and Field Experiments –”, Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Safety Security and Rescue Robotics, (2013-10)