

飛行ロボットと小型地表移動ロボットの複合システムによる 火山活動区域の無人調査 -浅間山における2013年フィールド試験-

永谷 圭司 (東北大学), 油田 信一 (芝浦工大), 吉田 智章 (千葉工大),
伊豆 智幸 ((株)エンルート), Randy Mackay (Japan Drones (株)), 多田隈建二郎 (大阪大学),
山崎 公俊 (信州大学), 羽田 靖史 (工学院大), 森山 裕二 (国際航業(株)),
島田 徹 (国際航業(株)), 藤原伸也 (国際航業(株)), 飯野 勝博 (国土交通省 関東地方整備局)

Development of Volcano Observation System that Consists of Unmanned Aerial Vehicle and Tele-operated Unmanned Ground Vehicle - Field test of tele-operated robots in Mt. Asama in 2013-

Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.), Shin'ichi YUTA (Shibaura Institute. of Technology),
Tomoaki YOSHIDA (Chiba Institute of Technology), Tomohisa IZU (EnRoute Co., Ltd.),
Randy MACKAY (Japan Drones Co., Ltd.), Kenjiro TADAKUMA (Osaka Univ.),
Kimitoshi YAMASAKI (Shinsyu Univ.), Yasushi HADA (Kogakuin Univ.),
Yuji MORIYAMA (Kokusai Kougyou Co., Ltd.), Toru SHIMADA (Kokusai Kougyou Co., Ltd.),
Shinya FUJIWARA (Kokusai Kougyou Co., Ltd.),
Katsuhiro IINO (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism)

Abstract: An observation in active volcano areas is very important to work out a strategy for estimation of eruptive activity and evacuation call to residents. However, it is a too dangerous task for human to observe in such areas. Therefore, we developed a tele-operated robotic observation system instead of human. In the system, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) carries a small-sized Unmanned Ground Vehicle (UGV) in a target point autonomously, and UGV observes the target area tele-operatively. To confirm our developing system, we performed several field tests in Kirishima and Mt. Asama, Japan. In this paper, we report recent field tests.

Key Words: Volcano exploration, Unmanned Aerial Vehicle, Unmanned Ground Vehicle, Teleoperation

1 はじめに

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、筆者の属する研究グループでは、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な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、2009年より進めてきた[1][2][3]。これまでの研究開発ならびにフィールド試験により、電動マルチコプタをベースとした飛行ロボットにより、小型軽量の地表移動ロボットを運搬し、地表移動ロボットの遠隔操作によって探査を行う、飛行ロボットと地表移動ロボットの複合システムが有効であることが分かってきた。そこで、本稿では、現在想定している無人探査シナリオと探査アプローチについて紹介し、2013年3月、8月、9月に行った、この複合システムによる遠隔探査のフィールド試験について報告する。

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



Fig. 1: Field Experiment in Shinmoe-dake in March, 2013

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地表移動ロボットは，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（飛行ロボット）と小型の地表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．

3 新燃岳でのフィールド試験

平成24年に実施したフィールド試験[3]を経て，飛行ロボット，小型の地表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，小型の地表移動ロボットの運搬，投下，遠隔操作の試験を実施した[4]．この試験では，運搬する地表移動ロボットを，それ

までに利用してきた三輪型のもの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，このロボットは，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[5]．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1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1（左）は，霧島連峰の高千穂峰をバックに，飛行ロボットが地表移動ロボットを運搬している様子，図1（中）は，飛行ロボットが地表移動ロボットを霧島連峰中岳斜面に投下した瞬間，図1（右）は，遠隔操作により，地表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，前章に示したシナリオ「飛行ロボットと地表移動ロボットの複合システムによる火山の移動調査」が実現可能であることが実証できた．

4 無人探査システムの改良

新燃岳でのフィールド試験におけるロボットシステムには，実用化に向けて，以下に示す3つの大きな問題点があった．

一つ目の問題が，飛行ロボットのフライトがマニュアル操作であったことである．飛行ロボットが目視できる範囲であれば，マニュアル操作で運搬することに問題は発生しないが，現実に火山が噴火し，地上走行ロボットを立入禁止区域に進入させるためには，飛行ロボットによる目的地までの自律飛行が不可欠である．そこで，本研究では，Arduinoの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することとした．図2に，GUIベースでフライト経路を入力するミッションプランナソフトウェアの画面を示す．

二つ目の問題が，地表移動ロボットの投下機構である．本研究で開発した小型の地表移動ロボットは，1～2 m程度



Fig. 2: Screenshot of GPS-based way point navigation based on ArduCopter software package. (<http://code.google.com/p/arducopter/>)

の自由落下の衝撃に耐えられる設計となっているが、GPSをベースとした地表高2m以内の高度制御は、非常に困難である。また、地表の凹凸が大きい屋外不整地環境においては、距離センサから得られる高度情報についても、信頼性が低いと考えられる。そこで、本研究では、距離センサ等を用いた、飛行ロボットの厳密な高度制御を行うのではなく、地表移動ロボットの投下方法を工夫することとした。具体的には、飛行ロボットは地表20m程度の位置にホバリングさせる。地表移動ロボットには、回転負荷がついたプーリーにワイヤを取り付け、先端を飛行ロボットに固定しておく。これにより、飛行ロボットが地表移動ロボットを切り離すと、地表移動ロボットは低速で地表に向けて落下する（スカイクレーン方式 [6]）。なお、ワイヤのロボット側の先端を固定しないことにより、地表移動ロボットが着地後、飛行ロボットが上昇することで、地表移動ロボットからワイヤが外れる仕組みとなっている。飛行ロボットと地表移動ロボットの切り離し機構の概観を図3に示す。左図は、地表移動ロボットを支えている状態の写真で、留め具が開いた状態である。右図は、ラジコンサーボモータが動作することで、支えが外れて留め具が回転し、地表移動ロボットを投下する状態の写真である。なお、この図では、下側が飛行ロボットの底面取付部となっており、実際には、上下が逆さとなる。

三つ目の問題が、無線通信の問題である。ロボットの遠隔操作に利用可能な無線通信については、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、地表移動ロボットの遠隔操作の通信に利用することとした。なお、新燃岳では、FOMAの通信状況が非常に良くなかったため、近距離から2.4GHzのWifi通信で制御した。浅間山では、対象となる山の斜面におい

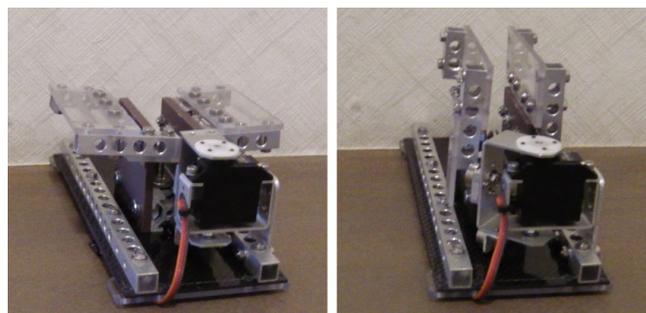


Fig. 3: Separation mechanism between UAV and UGV

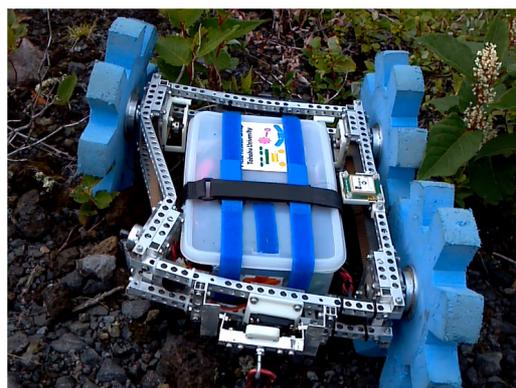


Fig. 4: Broken UGV caused by Free-fall, Aug. 2013

て、FOMA通信の電波状況が良いということが分かっているため、遠隔操作試験については、FOMA通信を利用することとした。

5 浅間山でのフィールド試験

前章に示した改良を加え、2013年8月20日～22日ならびに、9月28日～30日にかけて、浅間山でのフィールド試験を行った。このフィールド試験の最大の目標は、新燃岳で試験を行った際の問題点を解決し、火山災害が起こった際に実用となり得るロボットシステムの有用性を実証することである。具体的には、地表移動ロボットを搭載した飛行ロボットが目標地点までGPSをベースに自律的に飛行し、地表移動ロボットをスカイクレーン方式で着地させ、地表移動ロボットを遠隔操作ナビゲーションにより走行させる、という一連の動作を検証することを目指すこととした。対象環境は、浅間山の標高1,850m地点を離陸地点、標高2,050m地点を目標地点に設定した。この環境における平均斜度はおよそ30度であり、離陸地点から目標地点は、距離にして約600mである。

8月に実施した試験では、スカイクレーンに金属製のワイヤを利用していたため、落下中にワイヤが切断し、地表移動ロボットがフリーフォールするという事故が起こり、試験は失敗した（図4）。そこで、9月の試験においては、



Fig. 5: Field Experiment in Mt.Asama in Sep. 2013

スカイクレーンにナイロンワイヤを利用することとした。

9月29日に実施した試験の一連のシーケンスを図5に示す。図5-(1)は、離陸した瞬間、図5-(2)は、小浅間山を背景に、飛行ロボットが、地表移動ロボットを搭載しつつ、自律フライトを行っている写真である。なお、今回は、フィールドの使用許可申請の問題、試験の安全性確保の問題ならびに、ペイロードと飛行時間の問題から、実用化における目標である3kmのフライトを断念したが、ペイロードの軽量化ならびに、飛行ロボットの大型化によって、目標の3kmフライトの達成は、現状の技術でそれほど難しくないと考えている。図5-(3),(4)は、スカイクレーンにより、飛行ロボットが地表移動ロボットを降下させている写真である。地表移動ロボットは、飛行ロボットから切り離しが成功し、約20m上空から安全に着地した。図5-(5),(6)は、着地した小型の地表移動ロボットが、遠隔操作により走行を行っている様子である。なお、遠隔操作は、六里ヶ原駐車場より行った。これは、地表移動ロボットから、およそ3km離れた地点である。

以上より、目標とする動作が全て成功した。これにより、提案する飛行ロボット/地表移動ロボットの複合システムは、火山災害時にも利用可能なものであることが実証できたと言える。

6 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。2013年の試験の結果、GPSをベースに飛行ロボットが小型地表移動ロボットを自律的に目的地に運搬し、その地表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繰り返し実施することで、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：フィールド実験の実施にご協力いただいた、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.
- [3] 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.
- [4] 永谷圭司. 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. 河川, Vol. 25, No. 10, pp. 3-6, 2013.
- [5] 秋山健, 山内元貴, 永谷圭司, 吉田和哉, 伊豆智幸, Randy Mackay. 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2009 講演論文集IP1-P15 (1)-(4), 2013.
- [6] Jet Propulsion Laboratory. Sky crane. <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/mission/technology/insituexploration/edl/skycrane/>