

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職	
	永谷圭司 (ながたに けいじ)		東北大学		准教授	
②研究テーマ	名称	浅間山噴火時の降灰調査を目的とした無人調査ロボットの研究開発				
	政策領域	[分野] 地域課題分野 (砂防)		融合技術	(リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学 等)	
		[公募課題]				
③研究経費 (単位: 万円)	平成26年度	平成27年度	平成 年度	総合計		
	248 万円	248 万円		496 万円		
④研究者氏名						
氏名		所属・役職 (※平成28年3月31日現在)				
油田 信一		芝浦工業大学 SIT 総合研究所・特任教授				
羽田 靖史		工学院大学 工学部機械システム工学科・准教授				
吉田 智章		千葉工業大学未来ロボット技術研究センター・上席研究員				
多田隈建二郎		東北大学 大学院 情報科学研究科・准教授				
山崎 公俊		信州大学 工学部 機械システム工学科・助教				
飯塚 浩二郎		信州大学 繊維学部 機械・ロボット学系・准教授				
伊豆 智幸		株式会社 エンルート・代表取締役				
島田 徹		国際航業株式会社・事業企画担当部長				
藤原 伸也		国際航業株式会社・技師				
⑤研究の目的・目標						
<p>活動中の火山に対し、火山灰の降灰量や性質の調査は、土石流や融雪型火山泥流の予測に関する重要な情報となる。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ため、立入禁止区域内の火山灰の調査については、これまで実施することができなかった。そこで、平成25年まで、電動マルチロータ機で運搬された後、遠隔操作にて火山環境を走行し、立入禁止区域内の火山灰の降灰量や性質の調査を近距離から行うことが可能な、地表移動ロボットの研究開発を進めてきた。この研究開発を通じて、要素技術の検証を行い、電動ヘリコプタならびに、小型移動ロボットを利用することで、浅間山の立ち入り禁止区域内における火山灰の無人調査の実用化に目処を立てることができた。</p> <p>本研究では、電動マルチロータ機ならびに、小型移動ロボットを利用した火山調査ロボットシステム全体の実証を実施する。具体的には、これまで研究開発してきた電動マルチロータ機運搬型の小型不整地ロボットCLOVERの改良を行い、浅間山でのフィールド実証試験を実施する。</p>						

⑥研究成果

研究の目的・目標に記したように、本研究では、電動マルチロータ機ならびに、小型移動ロボットを利用した火山調査ロボットのシステム全体の実証を実施した。具体的には、(1)フィールド試験によるシステム全体の実証、(2)火山斜面の画像情報から火山灰の降灰量を推定する手法の実証、(3)浅間山における通信環境の確認を目指して研究開発を行った。以下に、この3つの研究成果について報告する。

[システム全体の実証]

(1) 電動マルチロータ機

探査環境である活火山地域は、標高1,000m 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た電動マルチロータ機（株式会社エンルート社製 Zion 940）を利用することとした。この筐体の写真を図1に示す。



図1：電動マルチロータ機 Zion 940

この機体は、18インチプロペラが直径940mmのピッチ円上に6本取り付けられ、ペイロードは約5kgである。また、Arduinoマイクロコントローラで動作するArducopterという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。

(2) 小型移動ロボット

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厳しい環境である。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。そこで、本研究グループでは、転倒しても走行の継続が可能な活火山探査移動ロボット CLOVER (Compact and Lightweight teleOperation robot for Volcano ExploRation) を開発した。図2に、このロボットの概観をCAD図で示す。

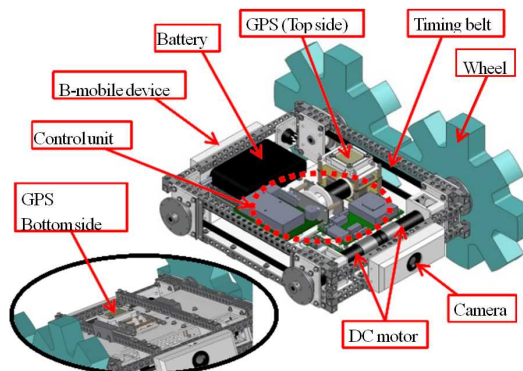


図2：CLOVERのCAD図

⑥研究成果（つづき）

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。

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。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。

また、ロボットの操作インターフェースとしては、FOMA通信を利用した操作インターフェースを構築した。操作画面には、画像情報だけでなく、GPSならびに方位計によるロボットの位置情報を表示すると共に、ロボットの走行には、ジャイロスコープを用いた追従制御を追加することで、操作性を向上させることができた。

(3) 移動ロボット投下装置

移動ロボットの投下装置として、マルチロータ機からメカニカルに分離可能な機構の設計／製作を行った。この分離機構のCAD図を図3に示す。

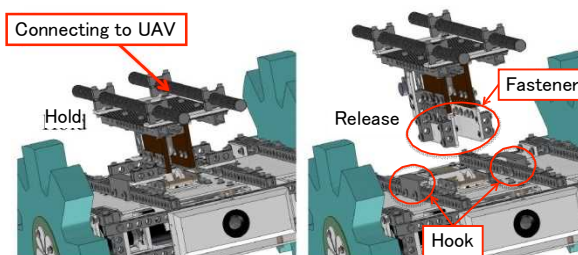


図3：CLOVERの分離メカニズム

(4) 活火山環境におけるフィールド試験

平成26年には、浅間山でのフィールド試験を行い、有用性の検証を行った。一方、平成27年には、浅間山での火山活動が活発化したため、平成27年6月11日に、浅間山の噴火警戒レベルが2に設定された。これにより、浅間山火口の半径2kmが立入制限区域に設定され、2014年まで実施を行っていたフィールド試験の半分が立入制限区域となった。さらに、火山性ガス発生の恐れも大きかったため、平成27年の浅間山でのフィールド試験を中止とした。



図4：三原山での移動ロボット降下試験

⑥研究成果（つづき）

この代替として、平成27年度のフィールド試験では、富士大沢扇状地ならびに、三原山を利用することとした。富士大沢扇状地でのフィールド試験は、平成27年10月5日から6日にかけて、三原山のフィールド試験は、平成27年11月2日から6日にかけて行った。三原山でのフィールド試験の様子を図4に示す。

上述のフィールド試験において、地表に降下したCLOVERは、いずれの場合も、搭載したカメラから得られた画像方法とロボットのGPS座標情報の提示手法を併用する遠隔操作により、目標経路を走行することができた。以上より、CLOVERは、提案手法を用いて、運搬・降下・遠隔操縦という一連の動作が有効であることを、確認することができた。

平成27年に三原山で実施したフィールド試験では、CLOVERの前方に取り付けたカメラを用いた、ランドマークの認識試験を行った。ランドマークとしては、図5に示すように、赤色の三脚と、その中心に火山噴出物の厚さを測るメモリを取り付けたものを製作した。なお、今回の試験では、国立公園内の試験であったため、地面固定ができない三脚を利用したが、火山噴火後は、三脚ではなく、地面固定式のものを利用する必要がある。



図5：火山噴出物厚を測定するためのランドマーク

CLOVERに搭載したカメラから得られた画像方法とGPS座標を用いた遠隔操作により、地表に降下したCLOVERをランドマークまで走行させた様子を図6に示す。ロボットのGPS座標情報の提示手法を併用することで、ロボットを目標となるランドマークまで走行させることができた。



図6：CLOVERがランドマークに接近した状況

オペレータが取得した画像情報を図7に示す。なお、図中の上と下の画像は、別の状況で取得したものである。図7（上）を見ると、低解像度（320x240）でも、目盛を読むことは十分に可能である。しかしながら、カメラの取り付け位置により、地表面の状況を得ることができていない。一方、図7（下）は、別の地点において得たランドマーク画像であるが、ロボットの姿勢が良かったため、数値目盛が書いてある面が見えていないが、どの程度目盛が埋まっているかどうかが見て取れる。

⑥研究成果 (つづき)

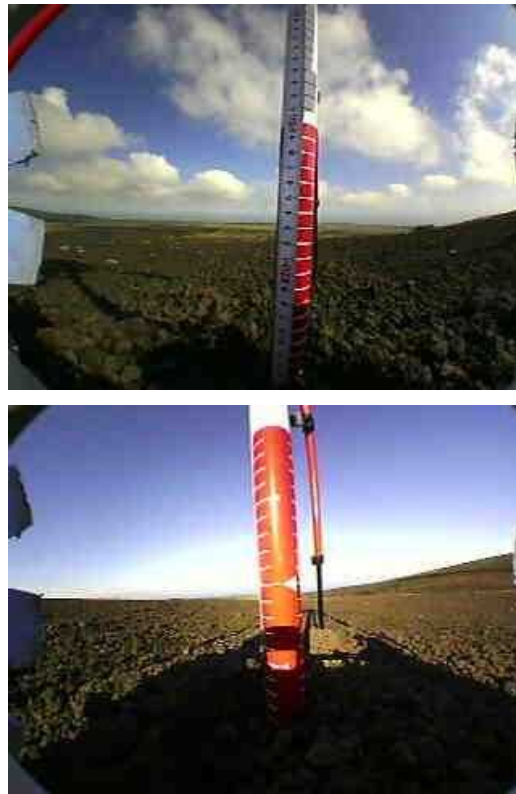


図7：CLOVERから得たランドマーク上の目盛

以上より、単純に目盛を読めば良い、という課題においても、いくつかの課題があることが分かった。何より、リアルタイムで得られる画像の解像度が低いため、より読み取り精度を上げるためには、高解像度のカメラが必要となる。一方で、高解像度のカメラ画像は、送信に時間がかかるため、解像度向上にも限界がある。これらが、トレードオフの関係となっており、今後、要検討課題であると考えられる。

さらに、CLOVER単独の長距離走行試験を行った。この試験では、CLOVERがどの程度の距離を走破できるかどうかを確かめることを目指した。スタート地点は、三原山と楡形山の間にある平地であり、その2つの山の谷間を伝って、斜面を登坂する走行する経路を設定した。この走行試験の結果、設定した経路に対し、1km程度の走行に成功した。ただし、試験中、ロボットの下面に石が入り、ロボットが走行できなくなることが、多々発生した。このような状況は、想定内であったが、下り走行ではなく、上り走行を行う際に頻発する症状であったため、今後、走行性能向上に関する研究開発が必要であることが考えられる。

[遠隔操作のための通信環境の確認]

上述の通り、高解像度カメラを用いた遠隔操作ならびに、目盛の読み取りが可能となれば、効率の良い探査活動を行うことが可能となる。しかしながら、現在、大容量の通信を行うことが可能な高周波数帯については、火山環境でどの程度利用可能かが分かっていない。そこで、本研究では、これまで、浅間山での通信状況を確認するためのシミュレーションを実施してきた。

平成26年度には、小浅間山における通信可能範囲シミュレーションと、実機を用いた通信試験を行ったが、その数値が合致しないという問題が生じた。このときの試験では、実際の通信可能領域は、期待していたものと比較し、大きくなかった。

そこで、平成27年は、その原因の特定を行うため、まず、土壌中の水分量が異なるシミュレーションを実施した。図8(左)が、導電率 0.0001s/m 、誘電率 4.0F/m とした、土中の水分量が少ない乾いた土の場合のシミュレーション、図8(右)が、導電率 0.002s/m 、誘電率 25F/m とした、土中水分量が多い場合のシミュレーションである。

⑥研究成果 (つづき)

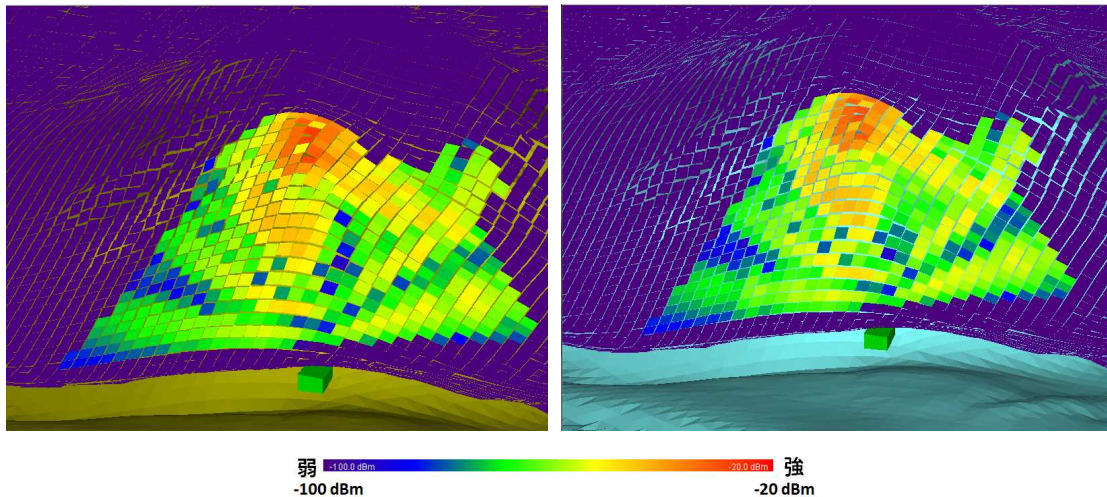


図8：水分が少ない場合のシミュレーション（左）と多い場合のシミュレーション（右）

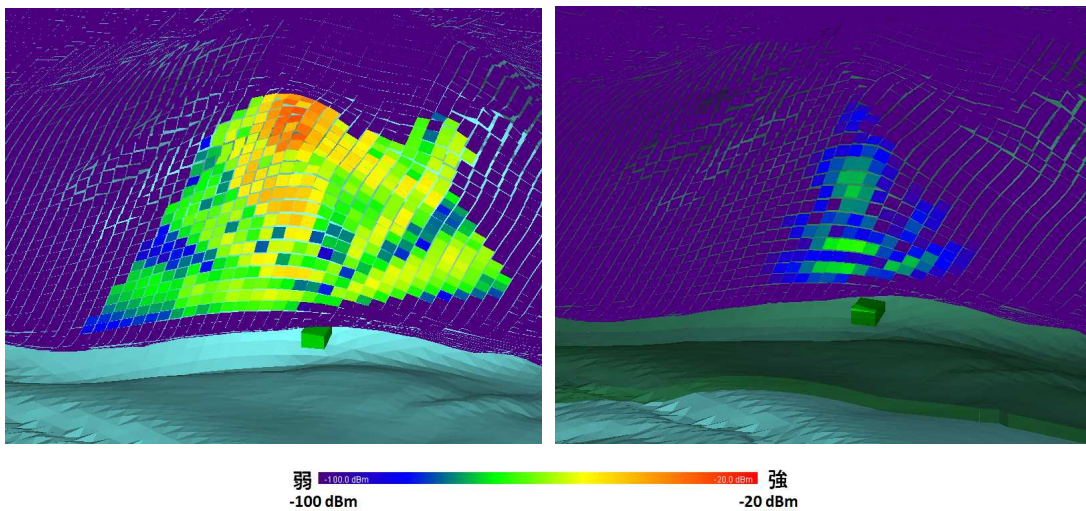


図9：植生が少ない場合のシミュレーション（上）と多い場合のシミュレーション（下）

この結果より、土中水分量の多寡による受信強度の差は最大で約10dBm、平均は約1 dBm、標準偏差は約3dBmとなった。以上より、土の状態による電波の影響は少なく、実測値との誤差の原因ではないことが判明した。

次に、植生の有無による電波伝搬シミュレーションを行い、これらの比較を行った。図9（左）が、植生が無い場合のシミュレーション結果、図9（右）が、落葉広葉樹林を山全体に高密度に生やした場合のシミュレーション結果である。なお、受信アンテナは地上50mの地点に設置されている。

この結果より、植生の設定を小浅間山の環境に近づけることで、実測値に近くなると考えられる。また、植生の多い環境における通信については、その植生を十分考慮した通信範囲の設定を行う必要があることが判明した。

⑦研究成果の発表状況

永谷 圭司, "活火山地域における遠隔調査を目的とした飛行ロボットシステム", システム/制御/情報, Volume 59, Issue 6, pp. 209-214, (2015)

永谷 圭司, 伊豆 智幸, 手束宗弘, "マルチコプタによる桜島昭和火口と周辺の撮影", 写真測量とリモートセンシング, Volume 54, Issue 3, pp. 116-117, (2015)

永谷圭司, 藤原伸也, 伊豆智幸, "NEDOインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト～東北大学コンソーシアムの2014年の取り組みと今後の課題～", 第33回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. RSJ2015AC1F3-02, (2015)

谷島諒丞, 久利美和, 永谷圭司, 吉田和哉, "UAV搭載型火山砕屑物採取装置の開発と評価", 日本地球惑星科学連合2015年大会, pp. S-VC45-16, (2015) [Link to this paper] [bib]

谷島諒丞, 永谷圭司, 吉田和哉, "回転ローラを用いたMUAV搭載型火山噴出物採取装置の開発とフィールド試験", 第15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. 309-314, (2014)

谷島諒丞, 永谷圭司, 吉田和哉, "無人電動マルチロータ機搭載型土砂採取機構の開発", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2014, pp. 1P1-H03, (2014)

都築遼平, 秋山健, 山内元貴, 永谷圭司, 吉田和哉, "通信が不安定な環境におけるハイブリッド通信を用いた複数台移動ロボットの協調探査", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2014, pp. 1P2-E05, (2014)

山内元貴, 秋山建, 谷島諒丞, 大塚光, 永谷圭司, 久利美和, 吉田和哉, "火山噴火の長期観測を目的としたポータブル無人観測デバイスの開発", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2014, pp. 1P2-E07, (2014)

⑧研究成果の社会への情報発信

[研究内容]

・ Webpage : <http://frl.niche.tohoku.ac.jp/research/>

[雑誌]

- ・ 永谷圭司 「火山防災の中でロボット技術ができること」, 東北大学広報誌 「まなびの杜」 71号 (2015年春号)
- ・ 「ひとが行けないところもOK!! 調査ドローン」, 子供の科学 2015年8月号

[新聞]

- ・ 「噴火現場へ観測ロボット」, 東京新聞, 2015年5月11日
- ・ 「火山灰や噴石、自動採取＝ドローンにつり下げる装置開発－東北大など」, 時事通信, Yahooニュース, 信濃毎日新聞他, 2015年6月6日
- ・ 仙台ひと模様 災害現場で活動するロボット研究開発, 河北新報, 2015年8月1日

[プレスリリース]

- ・ フィールド試験の報告会 2014年10月6日 (TBSテレビ, 日本テレビ, フジテレビ, テレビ東京)

⑨表彰、受領歴

特になし

⑩研究の今後の課題・展望等

平成27年度の研究開発により、ある条件下において、緊急時のロボットシステムの適用が可能であることが明らかとなった。この条件とは、風速が10m以下、FOMA通信が確保されていること、走行路面の状況がそれほど厳しくないことである。一方で、災害対応時には、大学が試作した研究開発途中のロボットを、学生のオペレーションで投入することは困難である。現実の災害に対応するためには、実用機を作成し、オペレーションが可能な体制を作ることが重要となる。また、通信シミュレーションにより、高周波数帯（2.4GHz）では、通信に植生が大きく影響することが分かった。今後、本研究を継続することで、実用に耐え得るロボットシステムの実現が可能となると期待できる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

現状で、本研究成果の実務への直接的な反映はまだない。なお、研究成果に関連し、浅間山噴火時の緊急対応ならびに、大涌谷噴火に関する観測シナリオに関する会議については、国土交通省 関東地方整備局にて、2015年7月に行った。