

# 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～

永谷圭司 (東北大学) 藤原伸也 (国際航業株式会社) 伊豆智幸 (株式会社エンルート)

## 1. はじめに

本研究は、NEDO の委託を受け、火山地域の災害調査を行うロボット技術の研究開発を行うものである。特に、火山地域の災害の中でも、発生確率が高く、小規模でも被害の拡大が予測される土石流災害に着目し、土石流予測を目的とした火山災害地域のリアルタイムデータベースを実現するためのセンシング技術の開発と実用化を行うことを目的としている。具体的には、

1. 複数台マルチロータ機による地形データの収集
2. 遠隔土砂サンプリング技術の研究開発
3. 遠隔含水率・透水性の計測技術の研究開発

を行い、上空からの離測と地上からの近傍観測による、土石流予測を目的とした火山災害リアルタイムデータベースシステムの構築を目指す。このプロジェクトの概要イメージを図 1 に示す。

この研究開発の各種製品が実用化され、数ある火山や土砂災害の災害危険箇所を抱える公共機関等に配備され災害発生時に活用されることにより、そこに住む人々の安心・安全に寄与できると考えている。

本研究開発は、「1. 画像データ・三次元地形データの収集技術の開発」「2. デバイスの運搬・設置・通信技術の開発」「3. 土砂サンプリング技術の開発」「4. 含水率・透水性計測技術の開発」「5. 火山災害地域のリアルタイムデータベースの構築」という、5つのサブテーマから成る。前半4つの技術開発を行い、5番目のリアルタイムデータベースにその成果を反映させていく方針である。本稿では、平成26年度に大きく前進した1番目と3番目のサブテーマについて紹介し、本プロジェクトの今後の課題について記述する。

## 2. 画像データ・三次元地形データの収集技術の開発

### 2.1 概要

これまでの、火山噴火時の立入禁止区域内における画像データ・三次元地形データの無人機での収集については、農業散布に用いられるガソリンエンジン搭載型無人ヘリコプタを用いた画像データ取得が挙げられる [1]。ただし、ガソリンエンジンは、標高の高いところでの運用ができないという問題が存在する [2]。一方、マルチロータ機を利用した画像データ・三次元地形データの収集は、近年、技術が大きく進歩している。そこで、本研究では、複数台のマルチロータ機を利用した画像列データ収集技術の研究開発を行うこととした。なお、マルチロータ機の開発と映像取得については、株式会社エンルートが中心となり担当し、得られた画像列より三次元地形情報を取得する部分については、国際航業株式会社が担当する。

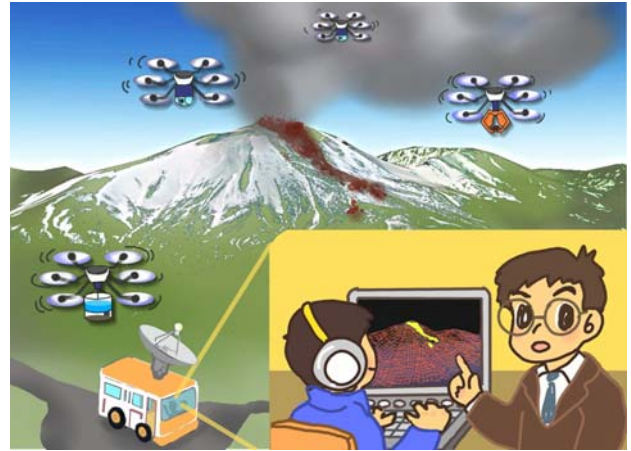


図 1 プロジェクト概要



図 2 マルチロータ機 Zion QC730

### 2.2 平成 26 年度の成果

本研究開発では、画像取得を行うマルチロータ機として、飛行航続距離の長い Zion QC730 という機体 (株式会社エンルート社製) を開発した。この機体には、高解像度のカメラ、490Wh のリチウムポリマー電池ならびに、18 インチプロペラを 4 枚搭載している。平成 26 年 12 月には、国土交通省の桜島の現場検証において、このマルチロータ機を利用し、約 20 分のフライトで、のべ 8km、高度差約 1,200m の飛行を行った。図 3 は、桜島の昭和火口を上空から撮影したものである。このときのフライトにおいて、バッテリーの残量がおおよそ 56% であった。また、飛行中、画像の無線伝送試験を実施した。1.2GHz 帯の X-Link 通信により、飛行中の全ての地点において、解像度は低いが、マルチロータ機が取得した映像をリアルタイムに確認することが



図3 桜島昭和火口



図4 桜島砂防堰堤

できた。以上より、火山環境において、マルチロータ機1台の長距離飛行による画像データの取得が可能であることが分かった。

また、複数画像から三次元地形図を構築する手法についても、桜島の現場検証において実施した。図4は、桜島の砂防堰堤で取得した画像を用いて構築した三次元地形図である。このときのマルチロータ機の飛行高度は、カメラの画角と解像度より、地上150mに設定した。なお、この三次元地形図は、複数枚の写真における地表面の特徴点を抽出し、各特徴点の位置とカメラ座標を同時に推定する「Structure From Motion (SFM)」[3]を利用した商用ソフトウェア「Smart3Dcapture」[4]を利用した。なお三次元地形図の生成に利用した写真は300枚である。以上により、平成26年度には、マルチロータ機の利用により、画像データならびに、三次元地形図の取得が可能となることを実証することができた。なお、上記2つの技術は、国土交通省の現場検証において、高い評価を得た[5]。

### 2.3 平成27年度以降の目標

平成27年度には、平成26年度に生じた課題を解決し、より高機能なシステムを構築することが目標となる。

一つ目の課題は、長距離無線通信である。今回は、マルチロータ機のテレメトリ(ロボットの内部情報)ならびに画像通信については、間に遮蔽物がなかったた

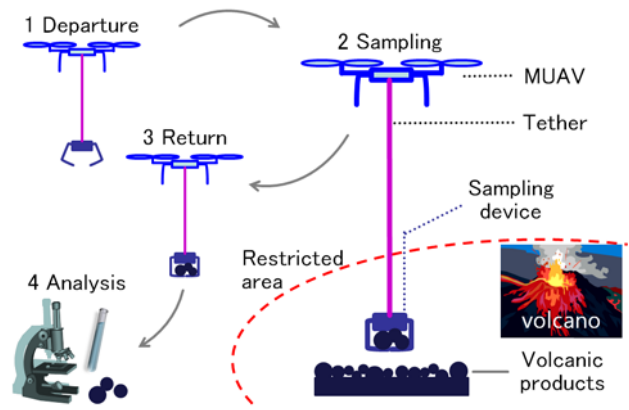


図5 マルチロータ機を用いた土砂サンプリングの概要

め、全域において、ほぼ通信を確保することができた。しかしながら、直接見通せない場所への飛行では、中継などでテレメトリ信号や画像信号の通信を確保する必要があると考えられる。

二つ目の課題は、取得した三次元地形の精度である。現状の技術で、立入制限区域内の状況を三次元的に取得することは十分可能となったが、降灰厚推定に利用するためには、精度向上のため、対空標識を利用することが望ましい。しかしながら、通常、火山噴火後の立入制限区域内は、人手で対空標識を設置することができない。そこで、今後、高精度なGPSを搭載した対空標識をマルチロータ機によって運搬/設置するシステムを開発する予定である。

三つ目の課題は、複数台同時フライトである。災害時の情報収集時間の短縮のためには、探査対象領域を分割し、複数台同時にフライトすることが望ましい。現状では、2台同時フライトは問題ないが、セットアップの手順をより簡素化し、複数台フライトを容易に実現するシステムを開発する予定である。

その他にも、緊急時に対応できる体制を整えると共に、リアルタイムデータベースとの連携を強固にし、情報収集から提示までの時間を可能な限り短くする、特殊技能を要しない簡易なユーザーインターフェースの開発を進めていく、といった点が、今後の目標となる。

## 3. 土砂サンプリング技術の開発

### 3.1 概要

土壌サンプリングは、土石流予測の精度を向上させる重要な技術であるが、これまで、火山噴火時の立入禁止区域内における火山噴出物のサンプリングは、限定された条件でしか、実現されたことがない。そこで、本研究開発では、土石流予測の精度向上を目的とした火山噴出物の採取を目指し、土砂サンプリングシステムの研究開発を行い、安定した土砂サンプリングの実現を目指す。図5にマルチロータ機を用いた立入制限区域内における土砂サンプリング実施の概要を示す。

### 3.2 平成26年度の成果

平成26年度には、マルチロータ機に吊り下げて運搬する土砂サンプリングデバイスを開発した[6]。図6に、デバイスの概観ならびに、そのデバイスがマルチロー





図6 土砂サンプリングデバイス

タ機にぶら下げられて運搬されている様子を示す。

このデバイスのサイズは、180 × 190 × 130mm であり、重量は 830g である。モータの回転は、ベルト・プリーによってローラーに伝えられ、ローラーが回転する。これにより、図7に示すとおり、ローラが地面を崩し、それを巻込むことで、採取を行う。ローラーの軸間距離は、平行リンクにより、ローラー間に入ってきた土砂のサイズに応じて、変化させることができる。この機構により、細かい粒子から最大で 6cm 程度までの火山噴出物が取得可能である。ローラーの動作は、デバイスが地面に着地すると同時に開始され、10 秒ほどで 50g 程度の砂または、30g 程度の砂利を取得することが可能である。また、デバイスは低重心であり、静的には、30 度の斜度でも転倒しないことを、屋内実験で確認した。上記のデバイスは、飛行ロボットの下部に 10m ~ 20m 程度のケーブルで吊され、飛行ロボットにより運搬される。飛行ロボットは、GPS 情報を元にした Waypoint Navigation により、立入制限区域内の目標地点の上空まで飛行し、そこから地上高 10m 付近まで降下して、デバイスを着地させる。デバイスが土砂を取得後、再び上昇し、決められた経路を自律的に飛行して帰還する。

平成 26 年度には、このデバイスを用いたフィールド試験を、2014 年 9 月 長野県の小浅間山、2014 年 11 月 6 日 伊豆大島の裏砂漠ならびに、2014 年 12 月 5 日 鹿児島桜島の黒神川にて実施した。いずれの環境においても、遠隔地より、土砂サンプリングを実施することができた。ただし、鹿児島桜島の黒神川における試験では、土砂サンプリングデバイスが転倒し、サンプリングに失敗する状況も発生した。

### 3.3 平成 27 年度以降の目標

平成 26 年のフィールド試験では、フィールド毎に環境が大きく異なり、更に、それぞれのフィールドにおいても、場所によって火山噴出物の種類や粒径は大きく異なるということが見て取れた。しかしながら、開発したデバイスは、それぞれの環境において、何らかのサンプルを取得することができた。ただし、鹿児島桜島の黒神川では、火山灰ならびに火山礫の十分な量を取得することができなかった。これは、試験前に降雨があり、細かい火山灰の上に降った水分が土壌を締め固めたため、火山礫も地面に固定されることとなっ

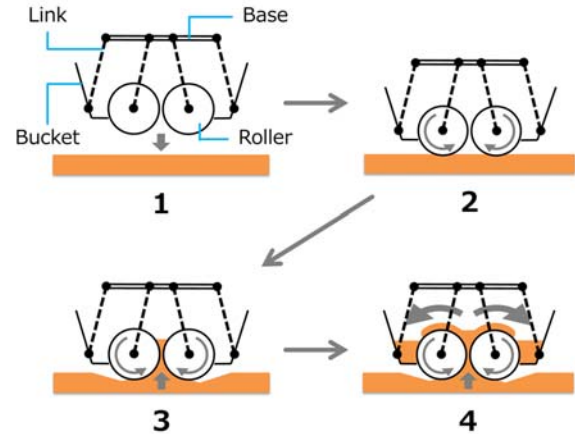


図7 土砂サンプリングデバイスの動作原理

たためである。現在開発を進めている土砂サンプリングデバイスは、火山礫も砂も回収できるように、ローラーが柔らかい素材で構成されているが、今後、環境に応じたローラーを採用することが重要となる。

一方、桜島の黒神川で行った土砂サンプリングでは、着地時にデバイスが跳ねて転倒するという事象が発生した。この原因は、飛行ロボットによるデバイス運搬時に、デバイスが振り子のように大きく振動したことが考えられる。現状の実装では、デバイスは 10m 程度の釣り糸で吊り下げられているため、飛行状況に応じて、大きな振幅で振動する。平成 27 年度以降、転倒の検知ならびに回復が、大きな課題となる。

さらに、平成 27 年度には、移動機構ならびに視覚センサを搭載して、指定したターゲットのサンプリングを行う技術の開発を並行して進める。これにより、指定した火山噴出物を獲得することが可能となる。

## 4. 今後のプロジェクトの開発項目

### 4.1 デバイスの運搬・設置・通信技術の開発

2 章に示した対空標識の遠隔設置や、3 章に示した土壌サンプリング、以下に示す遠隔透水性測定を実現するため、マルチロータ機とテザーを用いたペイロードの運搬・設置・通信技術の開発を行う。具体的には、マルチロータ機が目的地上空にてホバリング中、テザー（ケーブル）を利用してロボットや計測機器を安全に着地させる技術を応用し、デバイスを地表に降下させるシステムを実現する。これまで、筆者らは、テザーを用いた移動ロボットの運搬に関する研究開発を進めてきたため、この技術を応用する予定である [7]。一方、いくつかのデバイスについては、設置後、継続的にデータ通信を行う必要がある。そこで、本研究では、今後、マルチホップによるデータ通信技術の研究開発についても実施する。

### 4.2 含水率・透水性計測技術の開発

精度の高い土石流の発生予測や、危険範囲の特定を実現するためには、透水性の面的な分布を実測することが有効である。この透水性計測は、土石流予測の精度を向上させる重要な技術であるが、これまで、火山



図8 テザーを用いた小型移動ロボットの運搬(浅間山)

噴火時の立入禁止区域内における透水性計測は、人が立ち入れないために実施されることがなく、無人で実施可能な装置も存在しない。そこで、本研究開発では、人の立入が制限された不整地環境において、自動制御で透水試験を実施することが可能な簡易計測装置の開発を行う。これまで、このような装置の実現を試みた例は世界的にも例がないため、本研究開発において複数の手法について検討を行い、最適な装置を開発する。

#### 4.3 火山災害地域のリアルタイムデータベースの構築

国際航業株式会社では、平成26年度、国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所の委託を受け、富士山の噴火によって地形変化が生じた場合の土石流・火砕流等の氾濫シミュレーション計算を速やかに実施する「火山噴火リアルタイムハザードマップシステム」の構築を進めてきた。この経験ならびに、三次元地形データ、サンプリングした土砂データ、含水率・透水性データを基に、土石流予測精度の高い火山災害地域専用のリアルタイムデータベースの構築を目指す。

### 5. おわりに

本研究では、NEDOの委託を受け、火山地域の災害調査を行うロボット技術の研究開発を行ってきた。特に、火山地域の災害の中でも、発生確率が高く、小規模でも被害の拡大が予測される土石流の発生予測を行うリアルタイムデータベースの実現を目指し、これを実現するためのセンシング技術の開発と実用化を進めている。今後、第3章、第4章の章末ならびに、第5章に示した課題に関する研究開発を進め、プロジェクト終了時には、土石流予測精度の高い火山災害地域専用のリアルタイムデータベースの完成を目指す。

#### 謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「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」の委託により行われているものです。

#### 参考文献

[1] 佐藤彰, “自律飛行無人ヘリコプタによる有珠山火口付近の観測”, YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW, 2000.

[2] Hikaru Otsuka, Masaki Okochi, Keiji Nagatani, Keisuke Asai, Kazuya Yoshida, “Evaluation of Rotary wing Thrust of Small UAVs in High Altitude Flight Conditions”, The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, pp.784-787, 2014.

[3] C.Tomasi, T.Kanade, “Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method”, International Journal of Computer Vision, Volume 9, Issue 2, pp 137-154, 1992.

[4] “Smart3DCapture”, <http://www.acute3d.com/smart3dcapture/>, 2014.

[5] “次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進災害調査技術の現場検証・評価の結果”, <http://www.mlit.go.jp/common/001083017.pdf>, 2015.

[6] Ryosuke Yajima, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, “Development and Field Testing of UAV-based Sampling Devices for Obtaining Volcanic Products”, Proceedings of the 2014 IEEE Int’l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, #27, 2014.

[7] Keiji Nagatani, Ken Akiyama, Genki Yamauchi, Kazuya Yoshida, Yasushi Hada, Shin’ichi Yuta, Tomoyuki Izu, Randy Mackay, “Development and Field Test of Teleoperated Mobile Robots for Active Volcano Observation”, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.1932-1937, 2014.