

土石流予測を目的としたセンシング技術とリアルタイム災害データベースの開発 —2015年 雲仙普賢岳での現場検証の報告—

○永谷圭司 (東北大学) 伊豆智幸 (株式会社エンルート) 金井啓通 (国際航業株式会社)

1. はじめに

筆者らの研究グループでは、平成26年から27年にかけて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を開発進めている。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. 遠隔火山噴出物採取技術の研究開発
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している。

このシステムを実現するため、本研究では、「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. 火山噴出物採取技術の開発」「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つのサブテーマを設定した。このうち、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るという方針である [1][2]。

この種の研究開発では、実現場において開発した機器の動作試験を行い、機器の研究開発にフィードバックすると共に、実災害における運用方法の検討を行うことが必要不可欠である。そこで、筆者らは、2015年10月に富士大沢扇状地、11月に伊豆大島の三原山においてフィールド試験を行った。ここでは、マルチロータ機による地形情報収集や、火山噴出物採取装置の動作試験を行い、現状の技術で、火山噴火の際、遠隔より、立入制限区域内の情報収集が可能であることが確認できた。また、2015年11月24日から27日にかけて、雲仙普賢岳において、国土交通省が主催する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」の現場検証を受けた。その結果、「1. 強風、低温という厳しい気象条件において遠隔地(2)の状況を短時間で把握できることは有意義であり、取得した地形データにより火口周辺や立ち入り禁止区域内の状況の把握が可能技術である。」という評価を頂いた [3]。上述より、筆者らが開発を進めてきたロボット技術の一部は、すでに、実災害に適用可能であると考えられる。

本稿では、上述の雲仙普賢岳で実施した現場検証、特に、三次元地形データ収集技術ならびに、火山噴出物採取技術に関する試験結果の報告を行い、本プロジェクトの今後の課題について記述する。



図1 マルチロータ機 Zion QC730

2. マルチロータ機による三次元地形データ収集技術の検証

本研究では、これまでに、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ってきた。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している。

画像取得を行うマルチロータ機には、株式会社エンルート社製の、飛行航続距離の長いZionQC730という機体を利用した(図1)。この機体は、モータ軸間が730mmのクアッドロータ機で、18インチプロペラを4枚搭載している。環境条件にも左右されるが、最大飛行時間は、40分程度であり、最大飛行距離は30km、最高速度は72km/hである。この機体に、高解像度のカメラ(SONY α 6000:約2430万画素)を搭載し、490Whのリチウムポリマー電池を搭載している。

本検証における対象環境は、雲仙普賢岳の赤松谷地区の砂防堰堤である。ここでは、対象環境の三次元地形モデル取得の可否を確認するだけでなく、飛行高度を変化させた場合の三次元地形モデルの見え方の違いと、ソフトウェアの作業解析モードを変化させた場合の地形モデルの見え方の違いを検証することとした。なお、本検証では、これまでのフィールド試験の中で、地形や構造物の形状を最もよく再現してきた、Structure from Motion[4]手法を用いたContextCapture[5]を用いることとした。フライトプランについては、多様なコマンドをプログラムすることが可能な、MissionPlanner[6]というオープンソースソフトウェアを利用することとした。対象環境を撮影するため、高度150mでフライトさせた際のフライトプランを図2に示す。対象とす

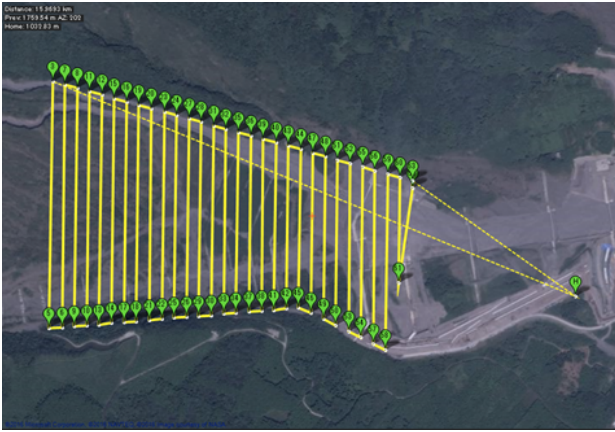


図2 高度150mで飛行させた際のフライトプラン

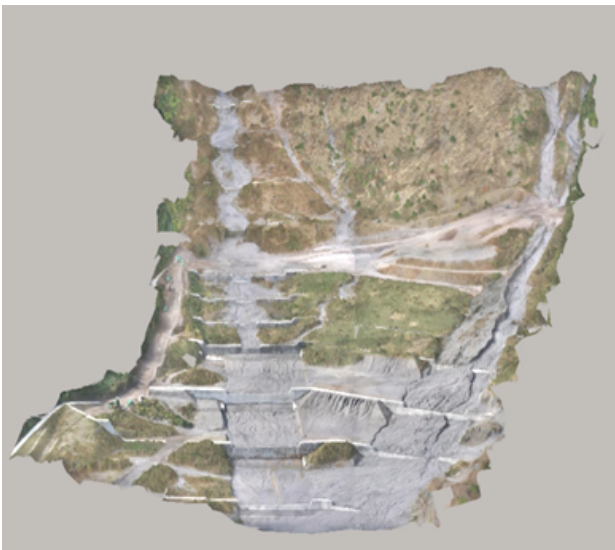


図3 雲仙普賢岳赤松谷地区の三次元地形モデル鳥瞰図

る領域の面積は、 $360,000m^2$ であり、フライトの結果、飛行高度150mでフライトさせた際の飛行時間は15分となった。なお、高度50mでフライトさせた際の飛行時間は、2回のフライト合計として50分となった。取得した三次元地形モデルの鳥瞰図を図3に示す。

図4に、飛行高度別・作業時間別の三次元地形モデルの比較結果を示す。ソフトウェアの作業時間に着目すると、速度重視で三次元地形を生成する解析モードで作業を行った場合、高度150mのデータについては約30分、高度50mのデータについては、約90分で三次元地形モデルが作成された。これに、飛行時間を加味すると、高度150mの場合に約45分、高度50mでは約140分の時間を要することとなる。目的が災害対応のため、できる限り早急に結果を出すという意味では、前者の組み合わせの方が利用価値が高い。一方、解像度比較を行うと、図4を見ても分かる通り、50m高度で得た三次元地形図は遙かに鮮明であり、礫の分布や侵食地形、亀裂の判断などにも十分活用できる。

本検証では、三次元地形モデル取得技術の実践的運用を想定し、画像データの取得から三次元データの作成まで一連の工程に費やす時間とその結果も検証した。

高度150mで飛行させたマルチロータ機により取得した画像データを、離着陸地点から約200m離れた本試験の拠点まで車で運搬し、三次元モデルを作成するというシナリオを想定した場合、最速で三次元モデルの作成が完了するまで約90分という結論が得られた。この時間には、画像データが保存されている記録メディアから処理用コンピュータにデータを移動させる時間や、三次元地形モデル作成時の、計算条件の設定ミスによる手戻りなども含まれている。この時間は、緊急時の対応では、概ね良好な結果といえる。なお、50m高度で得られるデータに対し、解像度重視で三次元地形を生成する解析モードで得られる鮮明な三次元地形図は、礫の分布や侵食地形、亀裂の判断などに利用可能であるが、生成に長時間を要する。

以上より、三次元地形モデルの取得と活用について、二段階で行う手法が提案できると考えられる。まず、対地高度150mならびに、対地高度50mでフライトさせ、対象環境情報を収集する。次に、対地高度150mのデータに対し、速度重視で三次元地形を生成する解析モードで解析を行う。その解析結果より、オペレータが詳細な情報が必要となる領域を限定し、対地高度50mのデータに対して、必要となる部分だけ、解像度重視で三次元地形を生成する解析モードで三次元地形生成を行う。これにより、情報取得開始からおよそ120分以内に、噴火地域の全体像ならびに、注視すべき領域の詳細な情報を手に入れることが可能となると期待できる。

3. 火山噴出物採取技術の検証

本研究では、マルチロータ機に吊り下げた装置を用いて、遠隔から火山噴出物採取を行う技術の研究開発を行ってきた。マルチロータ機の開発については、株式会社エンルートが中心となり担当し、火山噴出物採取装置の開発については、東北大学が担当している。

開発した火山噴出物採取システムは、以下の3つから構成される。

1. マルチロータ機：離陸地点と火山噴出物採取を行う立入制限区域内の目的地点の間の移動を行う（図5に示すZionCH940を利用）。
2. 火山噴出物採取装置：ローラ式の採取方式で火山噴出物の採取を行う。
3. テザー：上述の2つをつなぐ。

火山噴出物採取装置は、逆回転する2本のローラによって地面を崩し、巻き込んで土砂を採取する方式である[7]。この方式には、地面に大きな力を加える必要がないという点、さらに反力によるモータの回転やローラの走行等の回転による影響を考慮する必要がないという利点がある。ただし、サンプルが攪乱されるために不攪乱サンプルが採取できない、サンプルがローラに詰まり採取ができなくなる、モータでローラを回転させるため制御が必要である、といったデメリットもある。

火山噴出物採取システムを用いたサンプルリタンのシナリオは、以下の通りである（図6も参照）。

1. カメラを取り付けたマルチロータ機で、立入制限区域内の状況を把握する。
2. 得られた画像より、土石流の発生の危険がある場

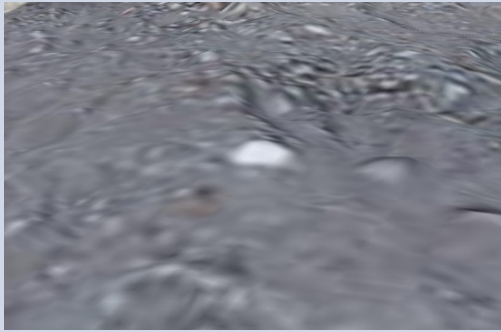



飛行高度	150m	150m
飛行時間	15分	15分
作業時間	30分	900分
地形モデル		
飛行高度	50m	50m
飛行時間	50分	50分
作業時間	90分	2300分
地形モデル		

図4 高度別・作業時間別三次元モデル比較



図5 マルチロータ機 ZionCH940

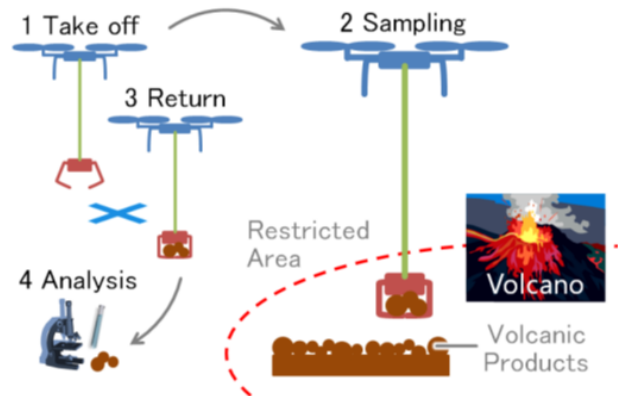


図6 火山噴出物採取シナリオ

- 所を調べ、火山噴出物採取を行う地点を決定する。
- 火山噴出物採取装置を釣り下げたマルチロータ機を立入制限区域外の安全な地点から離陸させる。
 - マルチロータ機が、目的地点の上空にたどり着いた後、火山噴出物採取装置を着地させ、堆積している火山噴出物の採取を行う。
 - 採取が完了したら火山噴出物採取装置を持ち上げ、離陸地点に戻る。
 - 採取サンプルを必要な分析にかけ、土石流予測に役立てる。

なお、2014年12月に実施した鹿児島桜島の黒神川における現場検証では、目的地点で装置が転倒するという問題が生じた。これは、装置が20mのテザーでマルチロータ機から吊されていたため、マルチロータ機の移動や風の影響を受けた装置が、着地時、大きく振動していたことが原因である。そこで、雲仙普賢岳における現場検証では、飛行中にテザーを巻いておくリールと、降下時に、降下スピードを低減する小型のロータリダンパを用いた降下システムを構築した。このシ



図7 降下型 火山噴出物採取システムの動作の様子

システムにより、目的地点上空でマルチロータ機がホバリング中、装置を低速で真下に降下させることができるため、装置の振動が発生する恐れが大きく低減する。これにより、転倒を防止することが可能となる。ただし、ロータリーダンパを用いたパッシブなシステムで実現を目指すため、火山噴出物回収後、テザーを巻き上げて装置を持ち上げることはできない。

この装置を用いた動作シナリオを以下に示す。

1. テザーをリールに巻きつけた状態で、装置をマルチロータ機の下に取り付ける。
2. 目的地点にたどり着くとマルチロータ機側のロックがはずれ、装置は低速で降下する。
3. 装置は着陸後、自動でサンプリングを始め、終了すると、リールをロックする。
4. マルチロータ機が上昇し、テザーが伸びたままの状態に戻す。

この装置を利用し、2015年10月には富士大沢扇状地、11月には三原山において動作試験を行い、雲仙普賢岳の指定場所（大野木場砂防みらい館前）において、現場検証に臨んだ。マルチロータ機は、降下型の火山噴出物採取装置を搭載して目標位置まで飛行し、装置を降下させ、土砂の採取に成功した。この装置については、雲仙普賢岳のみならず、伊豆大島三原山、富士大沢扇状地においてもフィールド試験を行ったが、全ての環境において、転倒せずに土砂を取得することができた。図7は、富士大沢扇状地における装置の動作の様子である。

4. まとめ

本研究では、最大飛行時間40分の4枚プロペラ型のマルチロータ機を用いて三次元地形モデルを生成する技術の開発ならびに、それを運用するためのシナリオについて検討を行い、雲仙普賢岳の現場検証において、その技術の有用性を検証した。また、マルチロータ機より吊り下げた降下型の火山噴出物採取装置を用いて、火山噴出物の採取動作試験を実施し、確実に火山噴出物を回収することに成功した。

我が国で起こる火山災害は、人の想定を超えた現象によって引き起こされる。そのためにも、今回のように、様々な場面や条件を設定して運用した実験は、非常に有用度の高いものであるといえる。なお、本研究は、平成27年までの2年間は、NEDOからの委託研究として実施されたが、平成28年より、NEDOからの研究助成として、平成29年度まで継続する。次の2年間では、フィールド試験を行いつつ、災害現場で利用可能な技術開発を進めると共に、土石流予測を行う

リアルタイムデータベースに、その成果を反映させる仕組みを構築していく予定である。

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たものです。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] "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～災害調査～", <http://www.nlit.go.jp/common/001125342.pdf>, 2016.
- [4] 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.
- [5] "Smart3DCapture", <http://www.acute3d.com/smart3dcapture/>, 2014.
- [6] "MissionPlanner", <http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>, 2016.
- [7] 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.