

飛行ロボットで運搬する観測カメラの設置点計画と設置試験

永谷圭司^{*1}, 清水寛子^{*2}, 銭谷彰^{*3}, 金崎裕之^{*4}, 島田徹^{*4}, 皆川淳^{*4}, 森山裕二^{*4}
田村圭司^{*5}, 杵淵新一^{*5}, 篠原幸夫^{*5}, 高橋忍^{*5}, 栢木敏仁^{*6}, 小林拓也^{*6}, 金井啓通^{*6}

Installation position planning and Initial Experiments for Observation Camera Transported by an Unmanned Aerial Vehicle

Keiji Nagatani^{*1}, Hiroko Shimizu^{*2}, Akira Zeniya^{*3}, Hiroyuki Kanasaki^{*4},
Toru Shimada^{*4}, Jun Minagawa^{*4}, Yuji Moriyama^{*4}
Keiji Tamura^{*5}, Shinichi Kinebuchi^{*5}, Yukio Shinohara^{*5}, Shinobu Takahashi^{*5},
Toshihito Hashinoki^{*6}, Takuya Kobayashi^{*6}, Hiromichi Kanai^{*6}

^{*1} 東京大学, 大学院工学系研究科, The university of Tokyo, The graduate school of Engineering

^{*2} 東北大学, 大学院工学研究科, Tohoku University, The graduate school of Engineering

^{*3} 株式会社 イームズラボ, EAMS LAB CO., LTD.

^{*4} 国際航業 株式会社, KOKUSAI KOGYO CO., LTD.

^{*5} 国土交通省関東地方整備局利根川水系砂防事務所, Tonegawa-Sabo Office, Kanto Regional Bureau Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

^{*6} 一般財団法人 砂防・地すべり技術センター, SABO & LANDSLIDE TECHNICAL CENTER.

論文概要: 火山噴火時, 火口周辺には立入制限区域が設けられるため, 人が火口付近の調査を直接行うことは困難である. そこで, 本研究グループでは, 飛行ロボットで運搬設置可能な遠隔操作型の観測カメラの研究開発を進めてきた. 本稿では, このカメラの設置位置計画手法を紹介すると共に, 2018年11月, 浅間山片蓋川のフィールドにて, 開発した観測カメラの設置試験を実施したので, その結果を紹介する.

Key Words: 火山噴火, 飛行ロボット, 観測カメラ, 設置計画

1. はじめに

火山が噴火することで発生する火山災害は, 周辺地域に甚大な被害を及ぼすため, 噴火状況を把握するためには, 火口周辺の現地調査を行う必要がある. しかしながら, 火口周辺には, 噴火レベルに応じて立入制限区域が設けられるため, 人が直接調査を行うことは困難である. そこで, ロボットによる無人火山調査が期待されている⁽¹⁾⁽²⁾. 筆者らの研究グループでは, これまで, 飛行ロボットで運搬する火山調査用地表移動ロボットの提案を行い, 火山噴火時, 人に替って移動調査を行うシステムの開発と実証実験を進めてきた⁽³⁾.

一方, 火山現象の定点観測を考える場合, カメラの視線制御ができれば, カメラ自体の位置を移動させる要求は大きくない. そこで, 本研究では, 飛行ロボットで運搬するターゲットを遠隔操作型の観測カメラとし, この観測カメラによる火山や溪流の定点観測を実現することを目標と設定した. これを実現するため, 本研究では, 観測カメラの設置点計画手法に関する研究を行ったので, これを紹介する. また, 観測カメラのプロトタイプを開発し, 2018年11月にフィールドにて設置試験を実施したので, その結果も紹介する.

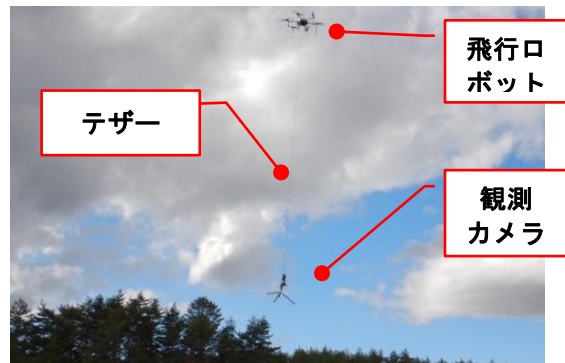


Fig. 1 Transportation scene of observation camera by an aerial vehicle

2. 観測カメラの設置可能領域の算出方法

観測カメラの設置方法については, 小型地表移動ロボットを運搬した場合と同様, 飛行ロボットに取り付けたテザーを利用する. Fig. 1に, 飛行ロボットによる観測カメラ運搬の様子を示す. まず, 飛行ロボットに取り付けたテザーで観測カメラを吊り下げて運搬し, 目標地点にて飛行ロボットの高度を下げて観測カメラのみを着地させ, テザーを切り離すことでカメラの設置を行う. なお, カ

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Fig. 3 Definition of mesh name

メラの設置地点については、事前に飛行ロボットによって取得した空撮情報を利用する。ただし、飛行ロボットの位置精度については、GNSS 単独測位の精度となるため、カメラの設置位置には、最大で 5m 程度の誤差が生ずる。そこで、本研究では、事前に取得した複数枚の空撮画像を元に、SfM (Structure from Motion) によって三次元地形図を生成し、ここから得た地形情報ならびに色情報から、GNSS の誤差を考慮して観測カメラの設置可能領域を算出する。以下に、三次元環境地図の作成と地形評価について述べる。続けて、設置可能領域の算出結果例も紹介する。

2.1 三次元環境地図の作成

飛行ロボットで取得した複数枚の空撮画像より生成した三次元地形データは、膨大な点群データであり、扱いが困難である。そこで、まず、三次元点群データを格子状に区切ったメッシュの三次元環境地図を作成する。ここで、三次元環境地図の座標は、 x, y 座標はメッシュの中心の座標とし、 z 座標はメッシュ内の点群の高さの平均とする。

2.2 地形の評価

各メッシュにおける斜度は、三次元環境地図の座標を利用して、平均最大法⁽⁴⁾を用いて算出する。平均最大法とは、隣接するメッシュの高さの変化率から斜度を算出する方法である。隣接する 9 個のメッシュを Fig. 2 のように定義すると、中心のメッシュ e の斜度 θ は、その周辺の高さ z とメッシュの大きさ L_{Mesh} を用いて次式で表される。

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(z_c + 2z_f + z_i) - (z_a + 2z_d + z_g)}{8 \times L_{Mesh}}$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(z_g + 2z_h + z_i) - (z_a + 2z_b + z_c)}{8 \times L_{Mesh}}$$

$$\theta = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}$$

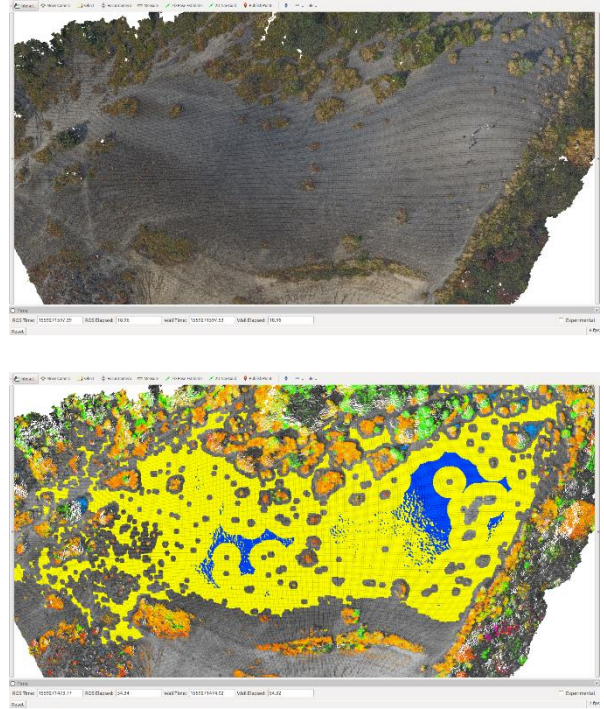


Fig. 2 Upper figure: colored point cloud data. Lower figure: installable area of the observation camera is painted in blue color. Target environment is Mt Ko-Asama in Nagano Pref..

また、地面の凹凸は、メッシュ R 内の点群高さの標準偏差を用いて、次式で表される。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_R (z(R) - \bar{z}(R))^2}$$

植生の有無については、三次元点群データの色情報から判断することとした。火山地表の色は、火成岩やスコリアで覆われているため無彩色である。そこで、三次元点群データの色情報を利用して、メッシュ内の全ての点の色が無彩色であるとき、そのメッシュは植生が無いという判定を行う。

2.3 設置可能領域の条件

設置可能領域は、地形の評価を行ったメッシュに対して、カメラの設置可能な条件を満たさないものを障害物と定義し、条件を満たすものを設置可能領域とする。なお、本研究における火山調査シナリオでは、飛行ロボットの現在地を GNSS で取得する。しかしながら、GNSS で得られるこのロボットの位置情報には誤差が含まれるため、設置可能領域は、GNSS に起因するこの位置誤差を考慮しなくてはならない。そこで、設置可能領域



Fig. 4 Autonomous flying robot

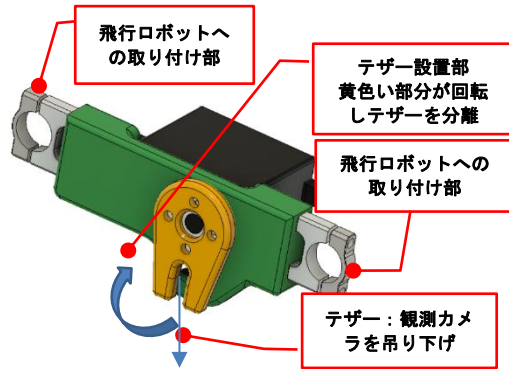


Fig. 5 Tether separation mechanism

の条件には、地形に加えて、障害物との距離を考慮することとした。設置可能領域は、観測カメラを確実に安全な場所に設置させるため、できるだけ平坦かつ広い場所が良い。そこで、斜度が10[deg]以下かつ障害物との距離が5.0[m]以上の場所とした。さらに、植生がない場所に設置する方が良く考え、メッシュ内の全ての色情報が無彩色であるメッシュを、設置可能領域の条件の一つとした。

2.4 カメラの設置可能領域の算出結果例

飛行ロボットを用いて小浅間山で取得した三次元点群データを利用し、カメラの設置可能領域の算出を行った。小浅間山の上空から取得した三次元点群データに対し、メッシュの大きさを0.25[m]として、設置可能領域を算出した。

三次元点群データと設置可能領域の算出結果をFig.3に示す。ただし、図中の青色は設置可能領域、黄色は障害物との距離が5[m]の領域を示している。また、メッシュの色については、無彩色領域に判別された場合にはグレースケール、それ以外に判別された場合には原色で表示した。本結果より、Fig.3の右側に存在する山頂付近に、設置可能である青色の領域が広がっていることが見てとれる。なお、実際の現場においても、ここで得られた青

色の領域であれば、観測カメラを設置することが容易であることを目視で確認することができた。一方、中央付近の領域は、障害物は存在しないが、青色の設置可能領域が存在しない。実際の現場においては、この付近は、斜度が大きいため、観測カメラの設置には不向きであることが確認できた。以上より、提案手法で得られたカメラの設置可能領域は、目視の確認でも、設置が容易であることを確かめることができた。

3. カメラ運搬・設置実験

本研究では、観測カメラの設置可能領域の検出と並行し、観測カメラの運搬・設置手法の検討を行うと共に、飛行ロボットを用いたカメラの運搬・設置試験を実施した。

立入規制区域内に対象物を運搬する手法として、筆者らはこれまで、テザーを用いて飛行ロボットから対象物を吊り下げて運搬し、目的地で飛行ロボットの高度を下げて対象物のみを着地させ、テザーを切り離して設置する手法を提案してきた。本研究においても、この手法を用いて、カメラを運搬することとした。

3.1 飛行ロボット

試験に使用した飛行ロボットは、イームズラボ製「LAB-6106」を使用した。この機体は、重量がバッテリー込みで5.4kg、最大ペイロードは6kg、耐風速は、10m/s、航続時間は約15分、航続距離は8kmである。

3.2 運搬するカメラと周辺機器

本実験では、カメラに対する要求仕様として、①飛行ロボットで運搬するため軽量であること、②現場に設置するため電源・通信機能を内蔵すること、という観点から、「HykeCam」を使用することとした。このカメラは、従来野生動物を無人で監視するために開発されたものであるが、上記2点の条件を満たしている。また、このカメラを安定して設置するための三脚ならびに、画角調整用のジンバルや通信モジュールを使用することとした。

3.3 対象とする環境




飛行ロボットの離着陸地点は、機体の監視がしやすく、周辺に高木や構造物などの支障物がない地点を選定した。また、カメラの運搬設置地点については、地盤勾配と地表性状が異なる（具体的には、ガリーの有無）地点を複数選定して、設置実験を実施した。

3.4 カメラ運搬・設置実験

カメラの運搬方法は、前出の通り、飛行ロボットからテザーを用いてカメラを吊り下げて目的地まで飛行・運搬し、飛行ロボットの高度を下げ、カメラが着地後に、飛行ロボット側に取り付けた切り離し装置を作動させ、テザーごと切り離す方式とした。切り離し機構のCAD図をFig.5に、条件を変更して実施した設置実験の結果をTable 1に示す。

三脚によるカメラ設置実験の結果は、30°の勾配までは可能であったが、ガリーに三脚の足を取られることでバランスを崩して転倒する場合(C)も存在した。また、草地(A)や、礫が点在する個所(D)では、飛行ロボットによる設置は成功したが、三脚の足が礫に乗ってしまうと、バランスを崩して転倒する場合も発生することを確認した。設置については、転倒の検知ならびに再設置動作が必要であると考えられる。

Table1 Experimental results

飛行方法	接地条件	実験状況
(A) 飛行距離 約 70m 目視飛行	勾配： 15° 草地 結果： 設置成功	
(B) 飛行距離 約 35m 目視飛行	勾配： 30° 盛土 (裸地) 結果： 設置成功	
(C) 飛行距離 約 35m 目視飛行	勾配： 30° 盛土 ガリー有 (幅 30 cm、 深さ 50 cm) 結果： 転倒	
(D) 飛行距離 約 200m 自律飛行	勾配：0° 草地 最大 70 cm程度の 礫が点在 結果：設 置成功	

3.5 カメラの画角調整機能の確認

飛行ロボットによってカメラを設置した場合、人手で設置した場合と比較して、細かい調整が難しく、目的の画角通りに設置ができない可能性が大きい。そこで、本カメラには、設置後に遠隔で画角を調整できる機能を付加することを検討した。

カメラの視線方向の調整は、遠隔で操作ができるジンバル雲台を使用することとした。この雲台は、パンチルト角を、それぞれ100°動かすことが可能である。また、ジンバルを操作する通信については、2.4GHz(特定小電力無線)を使用した。

実験の結果、ジンバルの遠隔操作により、カメラ画角を適切に調整可能であることを確認した。但し、現状での無線の到達距離は、現地状況により幅があるが概ね数100m程度であり、より遠方に設置した場合の操作に必要な無線通信については、今後の課題となる。また、今回用意したセットは、雲台と通信モジュールが受注生産品であり、緊急時の手配を考慮すると、市販品の組み合わせによるセット構成を構築することが望ましいと考えられる。

4. おわりに

本稿では、飛行ロボットを用いて火山環境に設置可能な観測カメラの、設置点計画手法を提案すると共に、この観測カメラのプロトタイプを用いたカメラ設置試験について報告した。各章の最後に述べた通り、まだ解決すべき事案は残っているが、本手法により、立入制限区域内に設置するカメラを用いた観測が実現すると期待できる。今後、更なるフィールド試験を通じて問題を解決し、火山噴火時の観測に貢献することを目指す。

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山口付近の観測”, ヤマハ発動機技報, 31, pp.44-47, 2001.
- (2) 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”, 日本惑星科学会誌, 21, pp.103-110, 2012.
- (3) 山内元貴, 秋山健, 永谷圭司, “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”, 日本ロボット学会誌, Volume 34, Issue 3, pp. 220-225, 2016.
- (4) Burrough P. A. and McDonell R. A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, 1998.