

火山噴気孔探査を目的とした遠隔操作型小型移動ロボットの開発

Development of Teleoperated Mobile Robot for Fumaroles Exploration

○ 多々納 壮 (東北大) 丸谷 恭平 (東北大) 小坂 岳文 (東北大)
正 永谷 圭司 (東北大) 久利 美和 (東北大)

Soh TATANO, Tohoku University, tatano@frl.mech.tohoku.ac.jp
Kyohei MARUYA, Tohoku University Takehumi KOSAKA, Tohoku University
Keiji NAGATANI, Tohoku University Miwa KURI, Tohoku University

Fumaroles exploration is effective investigation for prediction of volcanic eruption. However, until now, fumaroles observation is basically conducted by human, and it is very dangerous work, because of phreatic explosion and toxic gas. Therefore, we aim at developing a teleoperated mobile robot that observes fumaroles in a volcanic area, instead of human. In this paper, we propose a scenario of fumaroles observation by a robot, and introduce our prototype of teleoperated mobile robot for the observation. In addition, we report our initial test conducted in a real volcanic field in Izu-ohshima Island.

Key Words: Volcano, Observation, Mobile Robot, Field Robotics



Fig. 1 Fumarole investigation in Mt.Turumidake
(2014 11/12 大分合同新聞)



Fig. 2 CLOVER developed in previous research

1. 緒言

日本では 110 の火山が活火山として定められており、そのうち 47 の火山が「火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山」に選定されている。それらの火山では噴火の前兆を捉えるための観測施設が整備され、気象庁が 24 時間体制で火山活動の監視を行っている[1]。また、設置式の観測装置では確認できない情報を得るため、火山に人が直接立ち入って行う調査観測も行われている。特に現状では、火山の噴気孔から取得可能な火山ガスの化学組成や噴気温度などの詳細な情報は、人が立ち入る観測でしか得られない。この火山ガスの組成は、マグマの活動により含まれる化学物質が異なるため、噴火の先行現象として組成の変化を観測でき、噴火予測に有用である[2]。また、噴気温度を計測することで、火山の地中での水蒸気の状態を推定し、水蒸気爆発の予測に用いることができる。この水蒸気爆発は、マグマの移動が小さく、地震計などで観測できる火山性微動などから予測することが難しい。平成 26 年 9 月 27 日に発生した御嶽山噴火も水蒸気爆発によるものであり、この突発的に起こりうる噴火現象を予測するためにも、噴気の観測は非常に重要な意味を持つ。

一方で、噴気孔から排出される火山ガスには CO_2 、 HCl 、 SO_2 、 H_2S などの有毒ガスなどが含まれている。特に窪地などではこのガスが溜まりやすく、噴気孔調査を行う者にとって非常に危険である。また、高温の蒸気が噴出している噴気孔

では、接近が難しい上に、水蒸気が突沸する可能性もあり、人間が直接噴気孔を調査することは大きなリスクをはらんでいる。しかしながら、現状では、火山の専門的知識を持った研究者が危険な噴気孔調査を直接行っている(Fig. 1)。

このような調査を無人で行うことは、調査員の安全性の観点から期待されている。そこで本研究では、噴気孔の調査を行うことができる遠隔操作型の小型移動ロボットを開発し、実火山において動作試験を行った。

本稿では、噴気孔探査のシナリオについて検討すると共に、我々の研究グループで開発され、浅間山、三原山などでのフィールド試験において試験実績を持つ移動ロボット CLOVER[3][4](Fig. 2)をベースに開発した噴気孔探査ロボットについて説明する。また、火山環境でフィールド試験を行い、その有用性を検証したので、これを報告する。

2. 探査シナリオ

現在行われている噴気孔調査では、噴気の様子の確認と、噴気の温度計測、ガス組成の計測が行われている。噴気孔地帯は、山中の溪谷地帯や火口付近に多く存在するため、研究者は計測機器を携帯して噴気孔地帯まで山道を移動し、計測を行っている。これらと同様の探査をロボットで行うため、以下の 2 つの項目を探査目標として設定した。

- 1) 噴気孔周辺の詳細な画像を撮影する
- 2) 噴気孔の温度を測定する



Fig. 3 Exploration scenario

噴気孔周辺には、噴気に含まれる化学物質が結晶として付着しており、その結晶の色、形状を調べることで、その結晶がどの化学物質由来のものであるかを判別することができる。一方、噴気の温度情報は、火山の活動状況の把握に欠かせない情報である。また、噴気孔に直接計測器を挿入して温度を計測することが出来れば、今後、ガス組成計測器を用いた計測につなげることができる。

以上の探査項目を踏まえ、本研究では、ロボットによる探査シナリオを以下のとおりを設定した(Fig. 3)。

- 1) 人がロボットを携帯し、噴気孔地帯まで移動する
- 2) 探査目標の噴気孔を確認し、安全な場所を確保する
- 3) 遠隔操作でロボットを噴気孔に向けて走行させる
- 4) 遠隔操作で噴気孔の画像、温度情報を取得する
- 5) 遠隔操作でロボットを安全な場所まで走行させ、回収する

特にシナリオの(4)では、噴気孔からは高温蒸気が発生しているため、熱に弱い電子機器を搭載するロボットにとっては厳しい環境条件である。そのため、熱による探査機器への影響を抑えるため、噴気孔からある程度の距離を保って噴気孔の撮影、温度計測を行うことが求められる。本研究では、蒸気温度 80℃前後の噴気孔に対して 50~70cm 程度の距離から探査を行うこととした。

3. 開発したロボットシステム

前章で述べた探査シナリオを達成するために、本研究では、計測機器を搭載したロボットを開発し、安全な位置から人が操作することで噴気孔計測を行うことを目指す。そのため、移動ロボットには以下の3点が要求される。

- 1) 計測機器を搭載可能であること
- 2) 山中に携帯できるサイズ、重量であること
- 3) 火山で十分な移動性能を持つこと

本研究では、(2)と(3)の2点に関し条件を満たす CLOVER を移動ロボットのベースとして開発を行った。CLOVER は MUAV(Micro Unmanned Aerial Vehicle)に搭載可能な全長 450mm、全幅 360mm、全高 220mm、重量 2.5~3.0kg の車

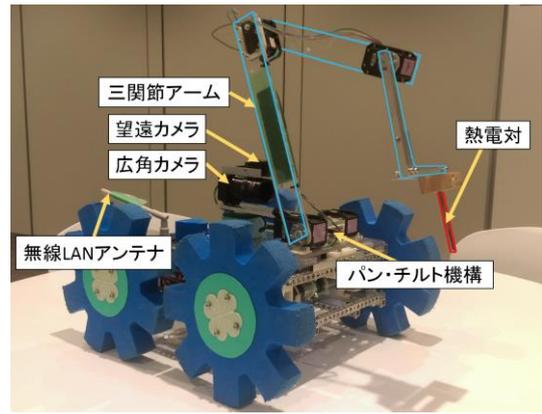


Fig. 4 Fumarole exploration CLOVER

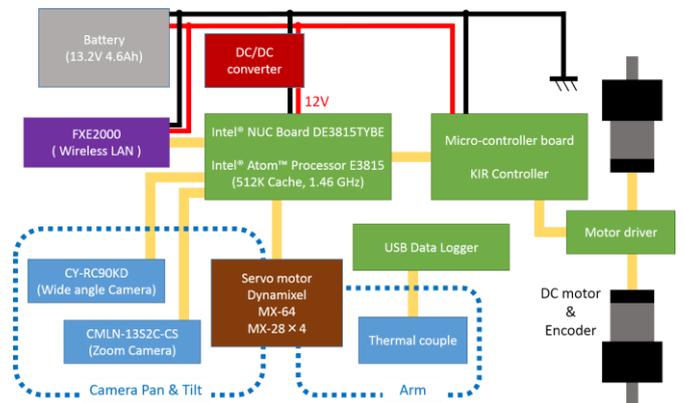


Fig. 5 Control system

輪型移動ロボットである、このロボットは、先行研究にて浅間山の山体斜面を 400m 移動し、目標地点への到達を果たしており、移動機構として十分な性能を有している。

また、搭載する計測機器として、探査シナリオで設定した噴気孔の様子の撮影を行う画像取得システムと、噴気温度の計測を行う温度計測システムを開発した。個々のシステムの詳細については 3.1 節と 3.2 節で述べる。

上述の開発したシステムを CLOVER の移動機構に搭載することで、噴気孔探査移動ロボットを製作した。Fig. 4 に製作したロボットの外観、Fig. 5 にその制御システムを示す。新たに計測機器を搭載したため、このロボットの車体重量は 4.6kg、全高は 270mm となった。システム全体の遠隔操作手法については 3.3 節で述べる。

3.1. 画像取得システム

噴気孔の画像取得を行うため、ここでは、噴気孔周辺の様子を高解像度で撮影し、周辺物質の形や色を確認できるシステムの開発を目標とする。本研究で採用する CLOVER には、遠隔操作用に広角カメラ CY-RC90KD (Panasonic 社製) が搭載されている。屋外での画像取得において、光源の位置に関わらず視認性の高い画像を取得するには、高いダイナミックレンジが必要である。また遠隔操作では、広範囲の環境を把握する必要があるため、広い画角が要求される。そのため、解像度よりもダイナミックレンジと画角を重視したカメラが選定されてきた。本研究においても、遠隔走行制御のため、このカメラを採用した。しかし、このカメラでは、広い視野を確保するために大きな曲率を持った魚眼レンズが用いられているため、取得できる画像は大きく歪むことから、噴気孔周辺の詳細な様子を把握するには不向きである。そこで、噴

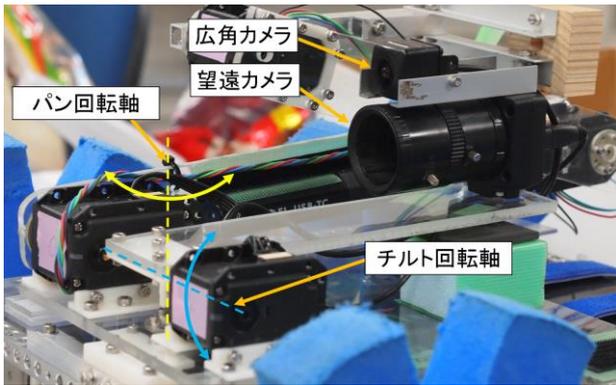


Fig. 6 Camera system

気孔周囲の様子を撮影するため、新たに歪みの少なく高解像度の望遠カメラ CMLN-13S2C-CS (Point Grey 社製) を採用した。

また、前章で述べたように、噴気孔に対し 50~70cm の距離を保って噴気孔の撮影を行うため、2.7-12mm の焦点距離を持った SPACE 社製のパフォーカルレンズ TAV2712M を使用することとした。

一方、噴気孔をカメラで正確に捉えるため、2つのサーボモータ Dynamixel MX-28T による 2 自由度のパン・チルト機構を開発し、その上にカメラを取り付けた。噴気孔に接近した後は、この機構を用いてカメラ視準の操作を行い、噴気孔の撮影を行う。

Fig. 6 に開発した画像取得システムを示す。広角カメラは、望遠カメラに固定されており、パン・チルト機構は 2 つのカメラに対し共通に働く。広角カメラと望遠カメラが常に同じ方向を向いていることで、広角カメラを用いたパン・チルト機構の遠隔操作で、望遠カメラの対象物への位置合わせが可能となる。また、広角カメラは、パン・チルト機構のチルト軸から約 100mm 離して設置されている。そのため、チルト動作時に、対象物を立体的に把握できる。そこで、次節で述べる温度計測システムの操作に利用することとした。

3.2. 温度計測システム

噴気孔の温度計測を行うため、ここでは、熱電対を噴気孔に挿入し、噴気の温度を計測できるシステムを開発することを目標とする。現在、人手で行われている噴気孔調査では、棒状のガス組成計測器を噴気孔内に挿入することによって、温度およびガス組成を計測している。そこで、温度計測デバイスとしては、将来的にガス組成計の搭載も見越し、直接噴気孔に挿入する熱電対を採用した。

噴気孔からは高温蒸気が発生しており、熱による探査機器への影響を抑えるため、噴気孔から一定の距離を保って温度計測を行う。また、正確な温度を計測するためには、噴気が大気と混ざり合っていない状態で計測することが求められる。そのため、デバイスを噴気孔内に正確に挿入することが重要である。以上より、離れた場所に正確に計測機器を近づけられる、多自由度関節のアーム機構を開発することとした。

Fig. 7 に開発したアーム機構を示す。移動時に CLOVER 本体からはみ出さないように折りたためる機能、ならびに、対象物に対して一定の距離を保ちつつ計測機器を接近させる機能を満たすため、三関節のアームを採用した。目標の噴気孔温度から考えて、最も熱の影響を受ける第 3 リンクの部材には、耐熱性を考慮してアルミを使用し、第 1 リンク、第 2 リンクの部材には加工性と軽量性からアクリルを使用した。軸

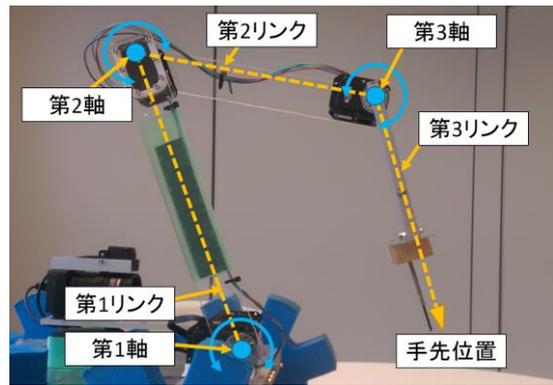


Fig. 7 Thermal measurement system

のアクチュエータには、根本の第 1 軸にサーボモータ Dynamixel MX-64T、第 2、第 3 軸には Dynamixel MX-28T を用いた。アームの根本は、画像取得システムのパン旋回を行う台に装着されており、アームはカメラの向いている方向に展開され、カメラの目線で奥行きと上下方向に操作が可能である。

アームは、ヤコビ行列を用いた手先の位置制御[5]を行い、モータへの入力値は、関節角度とした。また、熱電対を噴気孔に挿入することを想定し、手先角度を任意の角度で一定に保つ制御を行うこととした。

3.3. 通信と遠隔操作

通信モジュールには CONTEC 社製無線 LAN モジュール、FXE2000 を用い、無線通信を行う。このモジュールは、60m までの距離で約 10Mbps の通信速度を保つことができ[6]、遠隔操作時、広角カメラ映像は 1 秒間に約 3 フレーム、望遠カメラ映像は 1 枚の画像を 1~2 秒程度でオペレータに送信することが可能である。

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。この移動機構とパン・チルト機構、アーム機構については、一般的なジョイスティックを用いて遠隔操作を行う。

パン・チルト機構、アーム機構の現在の位置と指令値はオペレータの PC に視覚的に表示され、この情報と遠隔操作画像を組み合わせることで、移動探査を行う。

4. フィールド試験

4.1. 試験内容

開発した移動ロボットの有用性を評価するため、2015 年 11 月、噴気孔地帯が存在する伊豆大島の火山環境でフィールド試験を行った。

当噴気孔地帯は、谷あいの地形で、谷底と谷の壁面から噴気が噴出しており、谷の上から谷の中の様子が一望できる。今回、比較的平坦なルートで接近することのできる約 10mm 程度の径を持つ噴気孔をターゲットとして模擬探査活動を行った (Fig. 8)。

まず、噴気孔から約 40m 離れた地点をロボットの走行開始地点とする。そこから遠隔操作で噴気孔に接近して噴気孔の情報を取得した後、再度同じ地点まで帰還する目標動作を設定した。なお、対象フィールドの主な構成物は径 5~30mm 程度のスコリアであり、他に径 300mm 以上の岩石も点在していた。そこで、以下に示す 2 つの条件で目標動作を行う試験を行った。

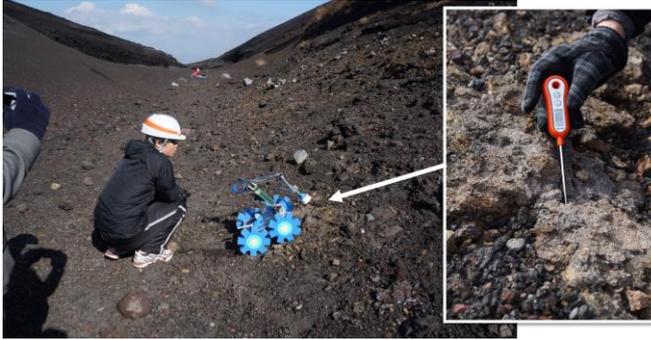


Fig8. The situation of field test

- 試験 1) 谷上から探査ルートを目視で確認しながらの探査
 試験 2) 通信で得られる情報のみを用いた探査

4.2. 試験結果

試験 1, 2 の両方で噴気孔の温度, 画像情報を取得し無事開始地点まで帰還することに成功した. 試験結果を Table. 1 に示す.

ロボットで取得した温度値と, 人が温度計で計測した温度値との差は約 2°C 前後であった. これは両方の計測器が ±1~2°C の誤差を持つことと, 挿入した熱電対の深さを考えると妥当な結果であり, 噴気孔探査において必要とされる温度情報の精度を満たしている.

また, 今回の試験では遠隔操作で 40m 移動し, 径 10mm の噴気孔に対して径 1mm の熱電対を挿入することに成功した. 以上より, アーム機構, 移動機構は今回の噴気孔に対して十分な操作性を持っていると言える.

4.3. Lessons learned

今回の試験では, 探査時間に関して大きな課題が残った. 目視で走行可能なルートを判別し, ロボットを移動させた試験 1 でも 17 分 22 秒の探査時間を要している. これは, 車体が乗り上げてスタックすることの無いように, フィールドに点在する岩石をすべて避けた結果であり, 移動機構の不整地走破性を向上することで時間短縮が望める.

一方, 探査作業の中で最も時間を要しているのはアーム操作である. 挿入後に温度値を安定させるため 2~3 分程度挿入状態を維持していることを考慮しても, かなり冗長な時間がかかっている. これはアーム操作時の環境認識の問題に起因していると考えられる. 実際の試験で用いた遠隔操作画像を Fig. 9 に示す. 通常, 噴気は, 白煙のように目視できる. しかしながら, 今回のターゲットは噴気の量が少なかったため, 光源や風の方向次第で噴気が全く認識できなくなることがあった. また, 角度によっては岩の凹凸によってできる影が噴

Table. 1 Result of field test

	試験1	試験2
噴気孔までの移動	4分40秒	6分38秒
アーム操作と温度計測	7分40秒	22分14秒
噴気孔からの移動	5分02秒	10分12秒
総探査時間	17分22秒	39分04秒
熱電対計測値	69.0°C	71.0°C
温度計計測値	71.1°C	72.3°C

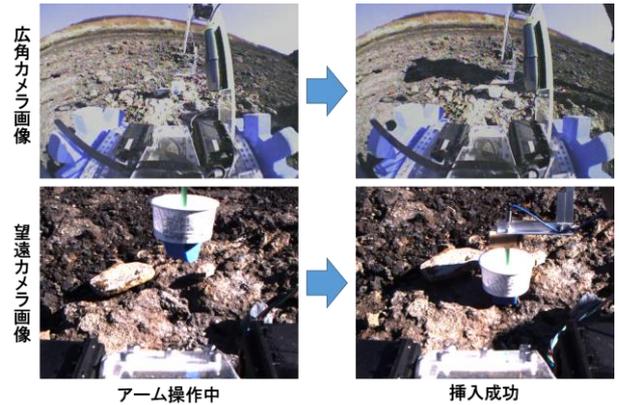


Fig9. Teleoperation pictures

気孔のように見えてしまい, 幾度かアーム操作を繰り返す場面があった. アーム操作の時間短縮のためには, 噴気孔の位置を明確に認識できるサーモカメラなどの搭載が有効であると考えられる.

今回開発したロボットシステムは, 人間の探査と比較して時間的なコストが大きいことがわかったが, 探査シナリオを達成することができた. 当システムは, 探査効率は高くないが, 地表の噴気孔を安全に探査することが可能なロボットシステムの実証を行うことができた.

5. 結言

本研究では, 噴気孔探査を安全に行うことを目的とし, 噴気孔に対して画像取得と温度計測を行うことができる遠隔操作型の小型移動ロボットを開発した. 同機について, 伊豆大島の実際の火山環境でフィールド試験を行い, 目標としていた探査を達成することができた.

一方で, 有用性については向上の余地が多数存在した. 本システムに必要な改善点として, 移動機構と環境認識の 2 点が主に挙げられる. 谷の壁面など, 人では調査自体が難しい場所を探査できる移動機構を備えることで, 探査の対象とできる噴気孔を増やし, システムの存在意義を高めることができる. 一方で, サーモカメラなど噴気孔を明確に認識できるセンサを搭載することで, より時間的効率を高めることが可能となると期待できる.

謝辞

本研究のフィールド試験は, 伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムのご協力により, 実施されました.

参考文献

- [1] 気象庁 HP 「活火山とは」 2016-2-29 閲覧
http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/katsukazan_toha/katsukazan_toha.html
- [2] 平林順一, “桜島における火山ガスの成分変化と火山活動”- 京都大学防災研究所年報,(1981)
- [3] 山内元貴, 秋山健, 高橋悠輔, 永谷圭司, 吉田和哉, 羽田靖史, “車輪型軽量火山探査ロボットの開発と遠隔操作試験”, 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.652-654 (2012-12)
- [4] 秋山健, 山内元貴, 永谷圭司, 吉田和哉, 伊豆智幸, “活火山探査を目的とした移動ロボットの開発とフィールド試験”, 第 18 回ロボティクス シンポジウム 予稿集 (2014-03)
- [5] 米田完, 坪内孝司, 大隅久, “はじめてのロボット創造設計”, 講談社(2001)
- [6] 都築遼平, 山内元貴, 永谷圭司, “電波強度を考慮した複数台移動ロボットのタンデム走行による「切れない」通信の実現”, 第 21 回 ロボティクス シンポジウム 予稿集 (2016-03)