

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630082

研究課題名(和文) 斜面の転がり現象を利用した火山観察用小型移動ロボットの開発

研究課題名(英文) Development of mobile robots for volcano exploration using a mechanism of roll downhill

研究代表者

永谷 圭司 (Nagatani, Keiji)

東北大学・未来科学技術共同研究センター・准教授

研究者番号：80314649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：活動中の火山において、火山の火口近辺に堆積した火山灰の厚さ分布や組成を観察するため、無人ヘリコプタ投下型の小型探査ロボットによる観察システムが有力視されている。そこで、本研究では、不整地斜面を効率的かつ高速に下ることが可能な、小型移動ロボットの研究開発を進めてきた。平成26年度までに、本体を転がす方式のロボットプロトタイプを製作し、フィールド試験を実施した。また、この試験結果を元に、平成27年度には、この試験で明らかとなった問題点を克服するための新たな小型移動ロボットに関する設計と製作を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to observe a thickness of the volcanic ash around an active volcanic area, small-sized mobile robot is effective. In this research, we developed mobile robots for volcano exploration using a mechanism of roll downhill. In 2013 and 2014, we developed a rolling type mobile robot, and conducted a field test based on the robot. Based on the problems we found in the test, in 2015, we redesigned the robot system and developed a novel mobile robot to overcome the problems. The features of it are: (1) the robot goes down a slope passively, and controls its break for steering and stopping, and (2) it can retrieve electric power based on the breaking system.

研究分野：ロボット工学

キーワード：火山探査ロボット 移動ロボット 不整地走行

## 1. 研究開始当初の背景

世界でも有数の火山大国である日本には、110もの活火山が分布しており、このうち47の活火山が「火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山」として選定されている。これらの活火山が噴火すると、その規模に応じて定められた範囲への人の立ち入りが制限される。例えば、浅間山では、噴火警戒レベルが3に達すると、火口から4km以内への人の立ち入りが禁止される。その一方で、噴火状況や火山灰の堆積状況の観察は、火山災害の予測や近隣住民の避難計画を策定する上で重要となる。そこで、筆者の研究グループでは、これまで、遠隔操作による無人ヘリコプタ投下型の小型探査ロボットの研究開発を進めてきた。しかしながら、これまで開発を進めてきた小型探査ロボットは、斜面における転倒を防止するために低重心の構造を採用したため、走行性能が低く、走行速度も遅いという問題があった。また、これまでに実施したフィールド試験において、ロボットが走行中に斜面下方向に転倒し、斜面を転がり落ちる問題があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、逆転の発想で、この斜面の転がりを積極的に利用し、効率的な探査を行う移動ロボットを開発することとした。これにより、低消費電力かつ、比較的高速に斜面下向きの移動を実現する小型軽量の移動探査ロボットの実現を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、斜面を転がる現象を制御することで斜面を効率的に高速移動することが可能な、小型移動ロボットの実現を目指す。提案するロボットは、図1のCAD図に示す通り円筒形状であり、左右に突き出したバーの形状を変更することで、操舵ならびに、停

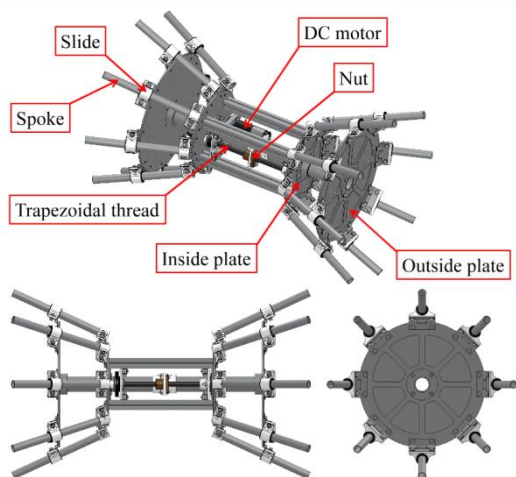


図1 提案するロボットのCAD図

止機能を実現する。これらの機能を実現するため、本研究では、提案機構の設計/試作を進めると共に、実際の火山フィールドにおいて走行試験を行い、機構の有用性を検証することとした。さらに、フィールド試験で確認された問題点を設計/試作にフィードバックし、提案機構の改良を進めることとした。

## 4. 研究成果

### 4.1 斜面転がり型移動ロボットの開発

図1に示すように、斜面転がり型移動ロボットは、円筒形をしており、左右にスポークが取り付けられている。このスポークは、本体と回転関節で接続されており、放射状に展開し、自由端側を直径として、斜面を転がることできる。また、本体内部の台形ねじがDCモータ (Maxson RE-max 24, 11W) によって回転することにより、ナットが左右に移動する。このナットの動作と同期して、ロボットの外側のプレートも左右に運動する。外側のプレートとスポークとはスライドを介して接続されているため、内側のプレートと外側のプレートの距離が変化することにより、スポーク先端の直径が変化し、ロボットは任意の方向に進行方向を変化させることが可能となる。この直径変化の様子を図2に示す。この機構により、ロボットは、斜面を下りつつ、操舵を行うことが可能となる。なお、本ロボットには、モータを駆動するた

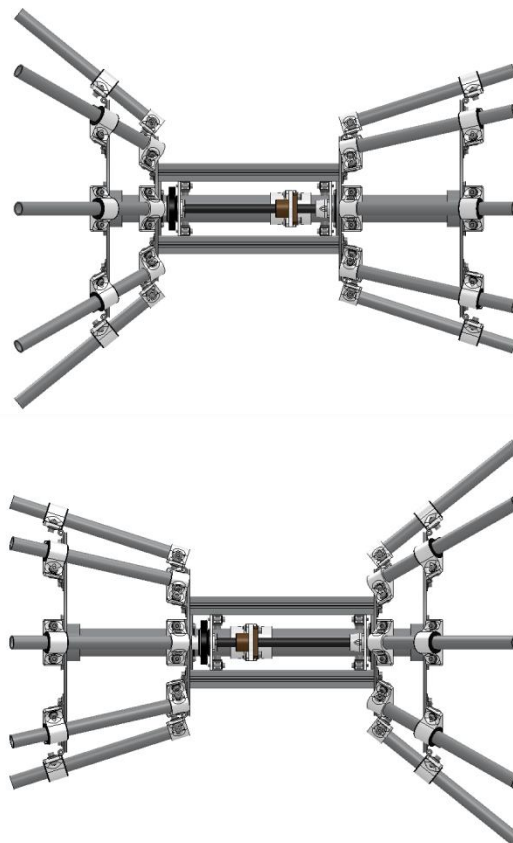


図2 ステアリングのための直径変化

めのモータドライバ (HiBot, 1-Axis DC Power Module), モータの制御とセンサ処理を行うマイコン (STM32F103VFT6, 72MHz) を搭載したマイコンボード, 無線通信を行う通信機 (XBee-PRO ZB / PCB アンテナ型) を搭載し, 遠隔または自律で左右のスポーク先端直径の比を変えることができる. 開発したロボットの外観を図 3 に示す.



図 3 開発したロボットの外観

#### 4. 2 活火山環境におけるフィールド試験

2014 年 9 月 7 日~11 日にかけて, 小浅間山にてロボットの走行性能評価に関するフィールド試験を実施した. フィールド試験では, 斜度が異なる斜面において, 目標地に向けての操作無しの走行と, 操縦者の操舵制御有りの走行との比較を行い, 移動機構の操舵有用性を検証した. 試験でのロボットの走行軌跡を図 4 に示す. 走行軌跡のうち, 黄色が操作なしで, 青色が操作ありを示している. なお, 操舵の制御については, 操縦者がロボットの走行を目視しながら, スポーク先端円の直径比を変えて制御を行った.

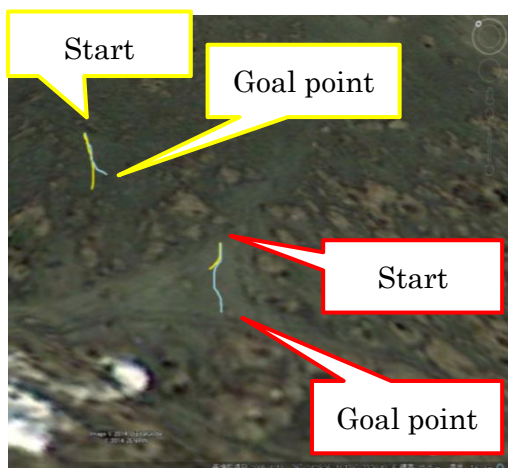


図 4 ロボットの走行軌跡

対象環境は, 斜度 15 度と斜度 25 度の 2 つで行った. なお, 走行距離は, およそ 10m 程度である.

斜度 15 度における操舵制御の実験では, 操作なしの場合, 斜面上の火山礫や植生などといった障害物によって走行経路が曲げられ, 下方まで転がらずに, 途中で止まってし

まった. 一方, 操作者による操作を加えた場合, 操縦者が適宜経路を修正することができ, 目的地まで走行することができた. 一方, 斜度 25 度の斜面における操舵制御の実験では, ロボットの転がり落ちる速度が非常に速かったため, スポーク先端円の直径を変更し, 走行経路が変更されたことは確認できたが, 操作者による操舵が間に合わなかったため, この機能を利用して, 目的の経路上を走行させることは困難であることが判明した.

#### 4. 3 提案手法の問題点の整理

斜面を転がる現象を制御することで斜面を効率的に高速移動するという考え方自体は, 斬新かつ有益な手法と考えられるが, ここで示した実装では, ブレーキをかける機能がないため, 斜度が大きくなるにつれて, 制御が困難となる. また, 斜度が小さい場所では, 小さな障害物により, ロボットが走行できなくなる状況も発生した. さらに, 提案時の停止機能も上手く働かなかったため, 目標となる観測位置で停止することができていない. また, 観測に関しては, 本体自身が回転してしまうため, カメラの取り付け位置の問題が解決できない.

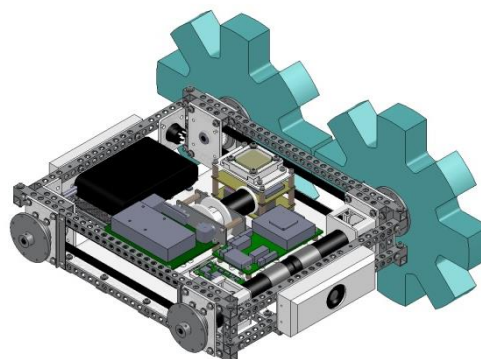


図 5 四輪型移動ロボット

以上より, 2014 年末には, この機構で研究を進めることを断念し, 斜面の位置エネルギーを利用しつつ, より現実的に, 高速斜面走行を行うロボットの開発を目指すこととした.

#### 4. 4 位置エネルギーを利用した高速斜面走行ロボット

斜面の位置エネルギーを利用しつつ, より現実的に高速斜面走行を行うためには, 車輪がフリーで回る前提が必要であると考えられる. そこで, ロボットは, 大きな位置エネルギーを用いて, 消費電力を抑えた四輪型移動ロボットを開発した. なお, ロボットのベースは, 筆者の研究室で開発を進めている 4 輪移動ロボット CLOVER である. ロボットの CAD を図 5 に示す.



このロボットは、筆者が火山探査の研究開発に利用している移動ロボット CLOVER と同一であるが、モータの減速比を非常に小さくしている。これにより、ロボットは、モータに電流をかけていない場合、車輪が空転し、山体斜面を駆け下りることが可能となる。このモータにかかる電流を制御し、適宜バッテリーに電力を回生しながら、ロボットの速度および、ステアリングを制御することを考える。

位置エネルギーを用いて移動ロボットを走行させるためには、ブレーキによる電力回生/消費と、制御系の電力消費の収支を常に計算しながら走行する必要がある。モータが電力を消費し続けると、バッテリーの電力が放電されてしまい、回生し続けるとバッテリーが過充電されてしまう。すなわち、電力収支が概ね0になるように制御することで、長距離の走行が可能になる。

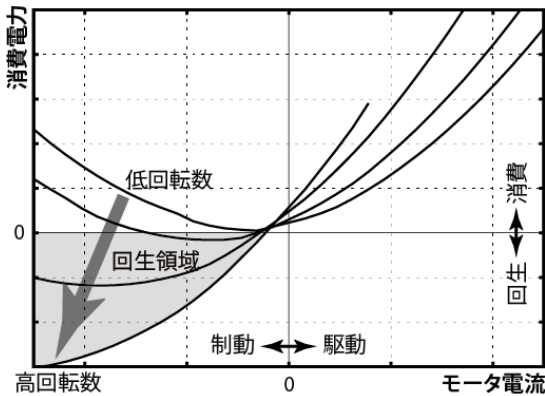


図 6 モータの電力回生領域

モータを用いたブレーキにおいては、図 6 に示すように、短絡ブレーキによって得られる最大電流以内のブレーキでは電力が回生され、それ以上の電流でのブレーキでは、電力を消費する。このときの電流は、モータの等価回路から容易に計算できる。また、ロボットが転がり落ちる際に必要な平均ブレーキ電流は、ロボットの質量、斜面の斜度、ギア等の摩擦パラメータから力学計算により求まる。斜面の斜度に応じて、ブレーキによる回生と、制御系の消費電力が釣り合うようなモータ回転数を求め、その回転数の周辺で制御することで、電力収支を維持しながら動作制御を実現できる。

本研究では、モータとして Maxon DCX22S12V を用い、ギア比 32:1、ロボット質量 2.0kg、制御系消費電力 3.0W と想定した。この場合、斜度に対して電力収支が 0 となるロボット並進速度は、図 7 のように求められる。制御の安定性や安全性からロボットの最大速度を、例えば 1.5m/s に制限する場合、斜度 7.5 度以下では十分な回生電力が不足するが、それ以上の斜度では、1.0m/s 前後の速度域で、電力収支を 0 付近に収められることが確認できた。

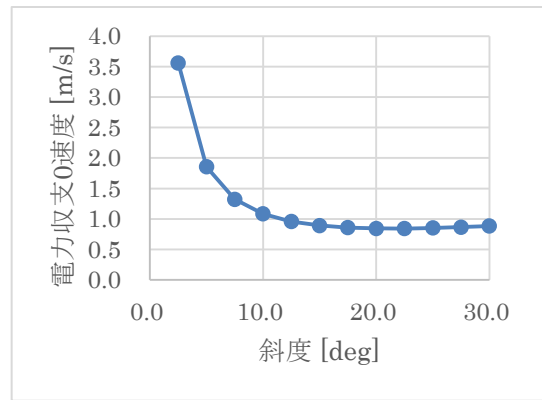


図 7 電力収支を 0 にする速度

上記のシステムをロボットに実装し、屋内にて予備試験を行った。ロボットは、屋内に設置した 10 度程度の比較的緩い斜面においても、パッシブに安定して走行することができた。また、トルクが小さいため、大きな斜面を登坂することは困難であったが、本システムを用いることで、平地においても自走することが可能であった。以上より、本提案によって、現実的に火山環境において高速斜面走行を行うロボットが実現できると期待できる。

## 5. まとめ

本稿では、低消費電力かつ、比較的高速に移動可能な小型軽量移動探査ロボットの実現を目指し、本体が回転するロボットの提案と実装、火山斜面における走行試験を行った。また、提案システムの問題点を解消し、火山環境において、より現実的に高速斜面走行を行うため、パッシブに走行可能な四輪型移動ロボットの提案・開発を行い、その適用可能性について検討を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

① 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, 査読有, Volume 34, Issue 3, pp. 220-225, 2016年  
[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jrsj/34/3/\\_contents/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jrsj/34/3/_contents/-char/ja/)

② 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, 査読有, Volume 59, Issue 6, pp. 209-214, 2015年  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009964414>

③ Keiji Nagatani, "Review: Recent Trends and Issues of Volcanic Disaster Response with Mobile Robots", Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Volume 26, Issue 4, pp. 436-441, 2014年, doi: 10.20965/jrm.2014.p0436

〔学会発表〕(計 5件)

① 鈴木大貴, 山内元貴, 永谷圭司, "移動ロボットの自己位置推定への利用を目的とした速度センサの性能の評価", 第16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, 2015年12月1日, 名古屋国際会議場 (名古屋)

② 速水邦晃, 永谷圭司, 吉田和哉, "火山斜面転がりを利用した移動探査ロボットの操舵制御", 計測自動制御学会東北支部50周年記念学術講演会, 2014年12月11日, 東北大学 青葉記念会館 (仙台)

③ 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), 2014年9月15日, シカゴ (米国)

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 シンポジア, 2014年3月13日, 有馬グランドホテル (神戸)

⑤ 秋山健, 多田隈建二郎, 永谷圭司, 吉田和哉, "火山斜面の転がりを利用した移動探査ロボットの開発", 第14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, 2013年12月18日, 神戸国際会議場 (神戸)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

〔その他〕

ホームページ:

Steering control of a mobile robot

<http://frl.niche.tohoku.ac.jp/research/?t=volcano-robots>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永谷 圭司 (NAGATANI, KEIJI)

東北大学・未来科学技術共同研究センター・准教授

研究者番号: 80314649

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: