

火山環境走行用ロボットの開発とモーションシミュレーション

Development of a small-sized volcanic exploration robot and its motion simulation.

野寄 敬博 (東北大), 永谷 圭司 (東北大), 吉田 和哉 (東北大), 小柳 栄次 (千葉工大)

Takahiro NOYORI, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA, Tohoku University,
{noyori, keiji, yoshida}@astro.mech.tohoku.ac.jp
Eiji KOYANAGI, Chiba Institute of Technology, koyanagi@furo.org

In case of volcanic explosion, observation of its activity is very important to reduce second disasters. However, it is forbidden for human to approach an active volcanic area. Therefore, a visual observation by tele-operated mobile robots is one possibility instead of human. One key technology to realize the above observation is traversability on volcanic rough and weak terrains for mobile robots. However, no mobile robot have succeeded in traversing such challenging environments completely. So, in this research, we developed a small-sized robot to handle rough terrains, particularly, for volcanic environment. The robot has 11 D.O.F. actuators, and it is very important to use them appropriately for traversing rough terrains. Therefore, we developed a motion simulator for the robot to plan and to confirm its motion. In this paper, we introduce the mechanism of the robot and report the result of simulation of the robot.

Key Words : Tracked vehicle , Volcano exploration, Dynamic simulation

1 はじめに

活火山が多い日本では、火山の火口付近の状況を観察することは、火山による災害を防ぐ上で非常に重要である。しかしながら、火山の活動レベルが高い状況下で、人間が火口付近まで立ち寄り、観察することは非常に危険であるため、噴火警戒レベルが高い火山では、人間の立ち入りは禁止される。そこで、本研究グループでは、小型移動ロボットによる火山観察が有用と考え、地下街・不整地走行用ロボットQuince(図1)や、不整地・軟弱地盤走行用ロボットTrackWalker(図2)を、活火山である浅間山や鹿児島島の桜島山、伊豆大島の三原山に投入し、走行実験を行ってきた[1]。これら2つのロボットは、これまで研究開発されてきた小型の不整地走行用ロボットと比較し、高い走行性能を発揮したが、火山環境は、地盤が軟弱であり、また、凹凸も大きいいため、走破不可能、あるいは走行が困難となる地形も存在した。

そこで、本研究では、QuinceやTrackWalkerよりも高い走行性能を有する、新型の火山環境走行用ロボットを製作し、ロボットによる火山観察の実現を目指すこととした。このロボットは、軟弱地盤の横断や不整地地形に対応するため、合計11自由度を有する。そのため、地形に応じた走行モーションの生成が重要となる。そこで、本研究では、新型ロボットの設計製作を進めるのと平行し、ロボットのダイナミックシミュレータを構築し、不整地走行に有用なモーションパターンの検討を行うこととした。

本稿では、このロボットの概要を紹介し、ロボットの走行モーションのシミュレーション結果について述べる。

2 ロボットによる火山観察の現状と問題点

火山環境には、岩石が重なった凹凸の激しい地形とともに、火山灰や砂利の降り積もった、スリップのしやすい軟弱斜面などが存在する。このため、火山観察ロボットには、不整地ならびに軟弱地盤の斜面において、高い走行性能が求められる。これまでの火山観察を目的としたロボットとして、東北大学の谷口らが開発した火山探査



Fig. 1 Quince



Fig. 2 TrackWalker

機「MOVE」[2]が挙げられるが、このロボットは、重機を改造した大型のもので、高重量・高重心なため、火山の急斜面は走破困難と考えられる。

そこで、本研究グループでは、これまで研究開発を進めてきたQuinceやTrackWalkerといった小型の不整地移動ロボットを火山観察にも適用するため、改良を進めてきた。Quinceはメインクローラの他に、4つのサブクローラを持つ。このサブクローラを地形に合わせて適切に操作することで、高い不整地走行性能を発揮できることが検証されてきた[3]。一方、TrackWalkerは、センタークローラの両側に、幅の広い2つのサイドクローラを備える。このサイドクローラは、3クランクによる平行リンクによってセンタークローラと接続されている。このセンタークローラと両サイドクローラを交互に接地することで、1自由度による脚移動を実現し、軟弱地盤の斜面において、高い走行性能を発揮することが検証されてきた[4]。

以上のロボットで火山での走行試験を重ねるにつれ、これらのロボットの問題点も見えてきた。まず、斜面の横断走行時には、両ロボットとも大きな横滑りが発生した。また、斜面上にある段差や石の乗り越え時、局部的に斜度が増大するため、大きなスリップや、後方への転倒危険性が見られた。以上の経験から、斜面の横断走行時の横滑りを抑えること、さらに、斜面上の段差を、スリップを少なく、安定して乗り越えることが、新規開発を行う本研究のロボットにおける課題に設定された。

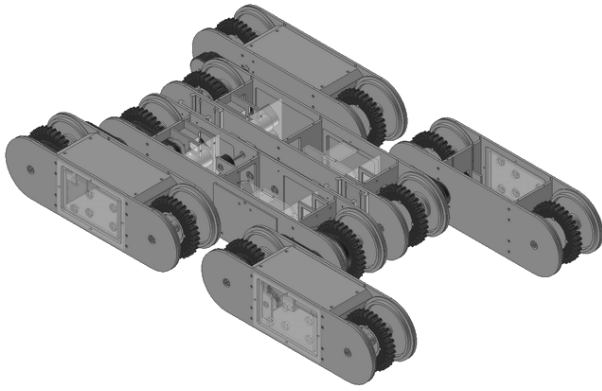


Fig. 3 A 3D CAD image of the robot

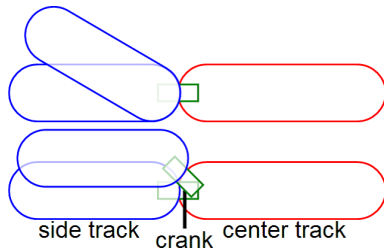


Fig. 4 Two motions

3 新型ロボットの製作

本研究で開発するロボットは、6本のクローラを有するクローラ型移動ロボットである。3D CAD図を図3に、諸元を表1に示す。内側の2本のクローラをセンタークローラ、外側の4本のクローラをサイドクローラと呼ぶ。センタークローラとサイドクローラは、1本のクランクを介して接続され、サイドクローラをクランクとの結合軸まわりに回転させる旋回機構（図4上）と、センタークローラとサイドクローラの相対角度を保ったままクランクを回転させる揺動機構（図4下）を持つ。また、2本のセンタークローラは、上下に相対位置を変化させる昇降機構を備えている。

揺動機構を4つのサイドクローラで同期して回転させることにより、TrackWalkerと同様、単純脚移動が可能である。また、揺動機構と昇降機構を用いて、斜面の横断走行時、図5に示すように、斜面に対してクローラのエッジを立てて走行することで、横滑りの軽減を期待できる。

各クローラは、ジョイントが回転構造で接続されているため、それぞれモータとバッテリー、コントローラが配置された独立したモジュールとなっており、電気的には接続されていない。そこで、モジュール間の通信は、ZigBeeによる無線通信によって実現することとした。センタークローラ内には、1つの走行用モータと、2つの揺動用モータ、進行方向右のセンタークローラには、これに加えて昇降用モータが配置されている。走行用モータは、セン

Table 1 Specification

Length	max 1325 mm
Width	616 mm
Height	136 mm
Center track module (L×W×H)	669 mm×120 mm×136 mm
Side track module (L×W×H)	452 mm×120 mm×136 mm

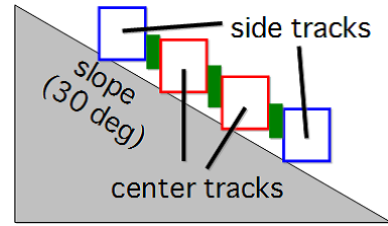


Fig. 5 Traversing a slope (front view)

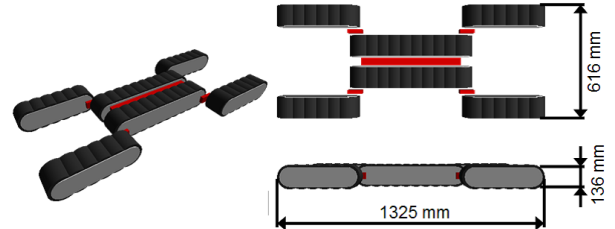


Fig. 6 Simulation model

タークローラとサイドクローラのクローラベルトを駆動させる。揺動用モータは、前後左右独立に動かすことができる。サイドクローラ内には、1つモータが配置され、サイドクローラの旋回動作を行う。

4 走行モーションのシミュレーション

本研究のロボットは、不整地や軟弱地盤の斜面といった火山環境の走行を目的としたロボットだが、このような地形を実験室内で模擬することは困難である。また、本研究のロボットは多くの自由度を持つため、操作が非常に複雑であり、地形に応じた走行モーションの生成が非常に重要となる。そこで、本研究では、動力学エンジンODE (Open Dynamics Engine) を用いてダイナミックシミュレータを構築し、ロボットの操作に慣れるとともに、ロボットの走行モーションをシミュレータ上で検討することにした。

4.1 シミュレーションモデル

ロボットのシミュレーションモデルは、ロボットの製作図をもとに図6に示すように作成した。実際のロボットは、クローラで移動を行うが、ODEでは、クローラベルトのような面で接触する機構の表現は困難である。そこで、図7に示すように、円柱の車輪を多数重ねることでクローラの代替とした。この際、車輪数が少ないと、円柱で表現したことによる底面の凹凸の影響が大きく、また、車輪数が多いと、シミュレーションの計算量が増え、実行速度が大幅に低下する。そこで、本研究では、センタークローラは車輪を10本、サイドクローラは車輪を6本で表現することとした。

各クローラは、すなわち、シミュレーション上で、各クローラを表現する車輪の速度指定は、ODEの関節角速度指令のAPIによって実現し、旋回機構と揺動機構の位置指定は、PI制御による位置制御系を組むことで実現した。

4.2 平面上の段差乗り越え

まず、本研究のロボットの基本的な性能評価として、平面上の段差乗り越え動作についてシミュレーションを

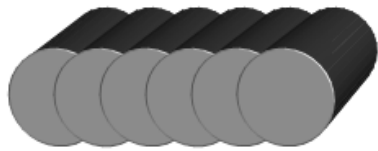


Fig. 7 Track model

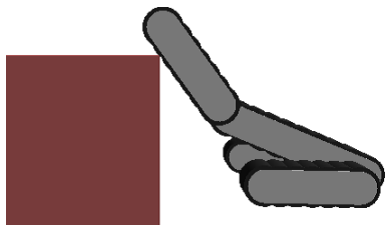


Fig. 8 Surmounting a step

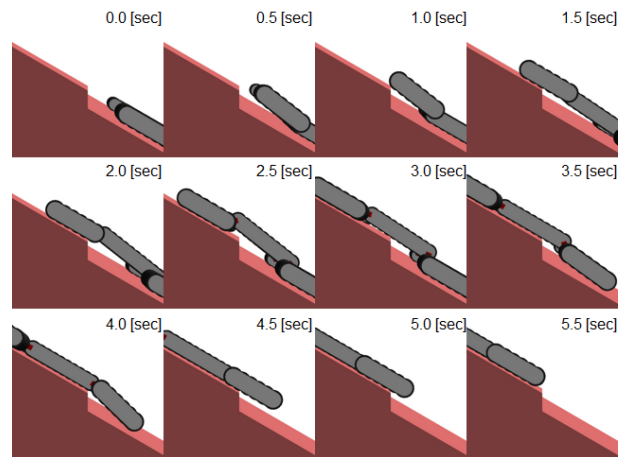


Fig. 9 Surmounting sequence (every 0.5 sec)

行った．ロボットのアクチュエータへの指令値の設定は，筆者のマニュアル操作で行った．

段差の高さを5 cmごとに増やしていったところ，50 cmまでの段差を乗り越えることができた．50 cmの段差の場合，センタークローラが完全に接地した状態では，前方のサイドクローラで段差のエッジを捉えることができないが，図8に示す通り，後方のサイドクローラを内側に倒し，センタークローラの前方を持ち上げることで，この段差の乗り越え動作が可能となる．

4.3 斜面上の段差乗り越え

次に，斜面上の段差を，低スリップで乗り越えるモーションに関する検討を行った．シミュレーション条件として，30度の斜面上に10cmの段差を設けた．ロボットの走行モーションは，低スリップを実現するため，接地面積を大きく取ること，段差のエッジで接地しないこと，センタークローラが段差の上に乗るまで，後方のサイドクローラで支えることを基本方針とし，以下のように設計した．なお，モーション間の切替タイミングは，オペレータが調整することで行った．

1. 前方のサイドクローラを，揺動機構と旋回機構を用いて段差の上に乗せる．
2. 前後のサイドクローラの揺動機構を下げ，センタークローラを持ち上げ，センタークローラを段差の上に乗せる．
3. センタークローラが段差の上に十分に乗った後，後方のサイドクローラを持ち上げる．

走行の様子を図9に示す．0.0秒後から1.0秒後では，センタークローラと後方のサイドクローラが，1.0秒後から3.0秒後では，前後のサイドクローラが，3.0秒後から4.0秒後では，前方のサイドクローラとセンタークローラがそれぞれ接地しており，全体として高い接地面積を保持して走行していることが見て取れる．2.5秒後（拡大図を図10に示す）付近の，前後のサイドクローラが完全に接地している姿勢をとることは，従来の揺動機構を持たないロボットでは不可能であり，本機構の有用性が確認できる．

次に，本走行モーションに対し，接地面積と安定性について，定量的な評価を行った．

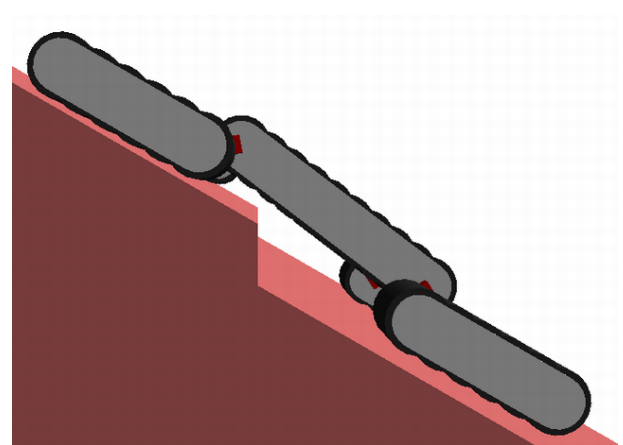


Fig. 10 An enlarged view of this motion

4.3.1 接地面積の評価

先述のとおり，シミュレータ上では，クローラを円柱の車輪で表現しているため，直接クローラの接触面積を出すことはできない．また，ODEでは，面接触や線接触は扱っていない．以上の理由から，本研究では，接地面積を簡易的に接地点数によって評価することとした．

図11に，走行時のクローラ全面接地時の接地点数（本研究のロボットでは88点）に対する接地点数の割合のグラフを示す．実線が本研究のロボットのもの，破線が比較対象としてシミュレーションを行ったQuinceのものである．Quinceの場合，段差乗り越え中，メインクローラの底面と後部のみ接地している瞬間に，接地点数が約20%に低下する．このとき，メインクローラの後部に荷重が集中するため，スリップの可能性が大きくなる．一方，本研究のロボットは，前方のサイドクローラが段差の上に乗った瞬間と，センタークローラが段差の上に乗った瞬間，接地点数が少なくなるが，概ね50%以上の接地点数を維持している．したがって，本機構により，軟弱地盤の斜面において，段差があってもスリップを抑えるモーションを生成することが可能であると言える．

4.3.2 安定性の評価

本研究では，このシミュレータを用いて，後方への転倒安定性についても検証を行った．安定性の指標は，正規

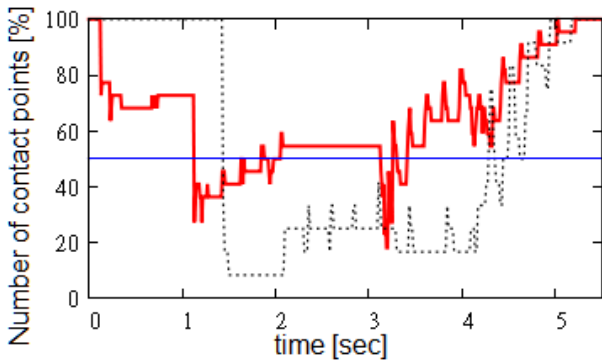


Fig. 11 Number of contact points

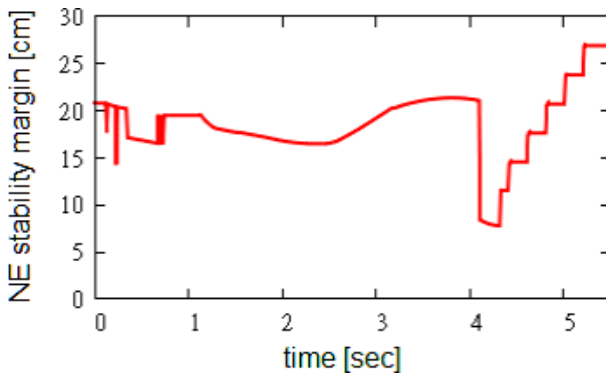


Fig. 12 NE stability margin

化エネルギー安定余裕[5]（以下NE安定余裕）を用いた．NE安定余裕とは，ロボットが転倒すると仮定した際の，ロボットの重心の移動軌跡の最高点と，重心の初期位置との高さの差である．NE安定余裕が大きいほど安定した姿勢となり，0となる時が，転倒する境目となる．図12は，後方転倒に関するNE安定余裕のグラフである．最もNE安定余裕が小さいときは，センタークローラが段差の上に乗る，後方のサイドクローラが斜面を離れた瞬間であった（図9中4.0 [sec]付近）．このときにも，センタークローラが完全に段差の上に乗る，かつ完全に接地しているため，NE安定余裕は10 cm近く確保している．したがって，提案するロボットは，斜面上の段差乗り越えについて，全体として安定な姿勢で行うことが可能であると言える．

5 おわりに

本研究では，新型の火山環境走行用ロボットの製作と平行し，ODEを用いたシミュレーションを行い，機構の有用性を検証した．その結果，現在構築中の本研究のロボットは，不整地や軟弱地盤の斜面において，高い走行性能を持つことが期待できる．

今後は，実機を用いて，ここで提案した走行モーションを実現できるかどうかを検証する．また，11自由度をすべて人の手で操作することは非常に困難なため，ロボットの操作を容易にできる遠隔操縦支援システムの研究開発を進める．

参考文献

[1] 永谷圭司，木下宏晃，西村健志，小柳栄次，油田信一，久武経夫，森山裕二．小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察- 浅間山での走行実験- ．

第11回（社）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（SI2010），555-558，2010

- [2] 谷口宏充，後藤章夫，市原美恵，菅原一宏，藤田健昇，大平修二．火山探査機「MOVE」の開発．日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2005講演論文集(ROBOMECH2005)，2A1-S-057，2005．
- [3] Yoshito Okada, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida. Semi-autonomous operation of tracked vehicles on rough terrain using autonomous control of active flippers. In Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 2815-2820, 2009.
- [4] K.Nagatani, H.Kinoshita, K.Yoshida, K.Tadakuma, E.Koyanagi . Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain . In Proceedings of the 2010 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics,(SSRR2010),July 26-30, 2010.
- [5] 広瀬茂男，塚越秀行，米田完．不整地における歩行機械の静的安定性評価基準．日本ロボット学会誌，16(8):48-54，1998