

軟弱かつ急斜面の不整地走行を目的とした 揺動サイドクローラを有する移動ロボットの開発 - 浅間山で実施したフィールド試験から学んだこと -

秋山 健 (東北大学), 永谷 圭司 (東北大学),
吉田 和哉 (東北大学), 西田 信一郎 (JAXA)

Development of a Mobile Robot with Oscillating Side Tracks to traverse on weak and steep slopes - What we learned from traversal experiments on Mt.Asama -

Ken AKIYAMA (Tohoku Univ.), Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.),
Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.), Shinichiro NISHIDA (JAXA.)

Abstract : A robotic exploration on lunar or planet surfaces has a possibility to discover important science information. Particularly, it might exist great scientific discoveries at center hills of lunar craters where ancient geological layers are exposed. On the other hand, a robotic observation in dangerous areas, such as an active volcanic area on the earth, is required for plotting strategies of people's evacuation. In such environments, high traversability is required for mobile robots in weak and uneven slopes. Therefore, in this research, the authors developed a tracked vehicle, called TrackWalker-II. It has two actuated side tracks that enable oscillating motion. In this paper, we report a result of field test using the tracked vehicle in Mt.Asama.

1 緒言

月面や惑星表面の科学的探査は、理学的に重要な発見をもたらすと考えられており、特に月の太古の地層が表面に露出している可能性のあるクレータ内の中央丘は、移動ロボットによる探査が期待される[1]。このとき、ロボットは、レゴリスと呼ばれる細かい粒子で覆われた軟弱地盤、さらに、ロボットが避けられない程度に岩石が存在する不整地を走行する必要がある。一方、地球上においても、活火山など、人の立ち入りが制限される区域では、移動ロボットによる遠隔探査が期待されている[2]。このときロボットには、火山灰、軽石で覆われた軟弱地盤に10[cm]程度の礫(れき)が混在する不整地を走行する能力が求められる。

上述の環境において、ロボットには、軟弱かつ急斜面の不整地での優れた走破性能が求められる。そこで、筆者らの研究室では、軟弱地盤の走行に対応するための大きな接地面を持つクローラ機構に加え、不整地での走破性能を向上させるため、サイドクローラの取り付け位置に揺動機構を有する移動ロボットTrackWalker(図1)を開発し、小浅間山、および浅間山にてフィールド試験を行ってきた[3][4]。このTrackWalkerは、段差を有する地形、岩石、小石、砂が混在する火山地域において高い走破性能を示したが、ロボットの重心が高いため、急斜面の走行中、後方に転倒するという問題が見られた。そこで筆者らは、TrackWalkerに見られた急斜面での転倒の問題を解消し、不整地での安定した走行が可能な、単純脚・クローラ型移動ロボットTrackWalker-II(図2)を開発した[5]。

このTrackWalker-IIの走行性能を検証するため、2011年6月17日~18日にかけて小浅間山にてフィールド試験を行った[6]。このとき、傾斜が20~30度程度の斜面においても、TrackWalker-IIは、転倒の恐れを感じさせることなく、安定して走行したが、クローラベルト表面のラグの取り付けが甘く、走行中にラグが脱落する、また、サイドクローラの接続部位の剛性が弱く、サイドクローラでロボット本体の荷重を支えることができないといった問題が見られた。



Fig. 1: Overview of TrackWalker

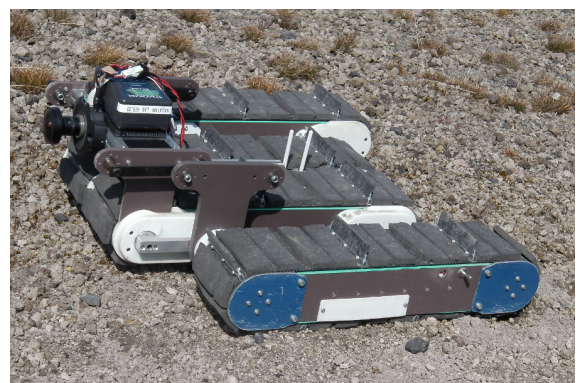


Fig. 2: Overview of TrackWalker-II

そこで、本研究では、更なるフィールド試験に向けて上述の問題点を解決するため、これまでにTrackWalker-IIの改良を進めてきた。本稿では、TrackWalker-IIの改良点ならびにTrackWalker-IIを用いて2011年10月11日~13日にかけて実施した小浅間山、浅間山でのフィールド試験の結果について報告し、提案機構の有用性や問題点を検証する。

2 単純脚・クローラハイブリッド型 移動ロボットTrackWalker-II

2.1 TrackWalker-IIのコンセプト

初号機であるTrackWalkerは、不整地で高い走破性能を示したが、ロボットの重心が高く急斜面の走行中に後方に転倒する問題があった。そこで、TrackWalker-IIでは、以下の項目を設計コンセプトとして設定した。

単純脚・クローラハイブリッド機構の採用

TrackWalkerにより、単純脚クローラハイブリッド機構の不整地での有用性が示されたため、TrackWalker-IIにおいても同様の機構を採用した。単純脚・クローラハイブリッド機構の詳細は、文献[3][5]に示した。

軽量・低重心

ロボットによる火山地域の探査を行う場合、ロボットは小型ヘリコプタから投下される可能性が高い。ヘリコプタのペイロードを考慮すると、ロボットの重量は20kg以下に抑える必要がある。また、急斜面での転倒を防ぐため、低重心であることが求められる。

クローラの軸間距離をTrackWalkerの1.5倍

TrackWalker-IIのサイズに関しては、より走行性能、安定性を向上させるため、クローラ部分の軸間距離をTrackWalkerの295[mm]から、約1.5倍の442[mm]に設定した。これにより、無線機等を本体内部に収納でき、ロボットの低重心化が実現される。

2.2 TrackWalker-IIの改良

TrackWalker-IIの走行性能を検証するため、2011年6月17日～18日にかけて、小浅間山の南西側斜面においてフィールド試験を行った。TrackWalker-IIは、図3に示す地点1から地点5まで、問題なく走行した。また、傾斜30度以上の斜面においても、後方への転倒の危険性は、見られなかった。しかし、地点5から地点6にかけて、図4に示すように、走行中、クローラベルト表面に取り付けたラグが多数脱落し、走行不能となった。

また、サイドクローラの揺動機構は、ロボットがスリップ、スタックした際に脱出するために使用する予定であったが、サイドクローラの接続部位の剛性が弱かったため、ロボット本体を支えることが難しく、サイドクローラの揺動機構を有効活用することは、不可能であった。また、揺動機構の駆動軸のバックラッシュが大きく、サイドクローラの「がたつき」が大きくなるという問題があった。

これらの問題を解決するため、本研究では、TrackWalker-IIに以下の改良を施した。

2.2.1 ラグの改良

小浅間山でのフィールド試験時にTrackWalker-IIに取り付けたラグは、アルミ製のL字アングル材にゴムシートを貼り付けたもの（図5（左）：幅118[mm]、高さ30[mm]、厚さ2[mm]）であった。このラグを用いて、比較的大きな礫上を走行する際には、ラグが礫の上に乗り上げるため、ラグが軟弱地盤に刺さらず、推進力を得ることができなくなった。また、ラグに大きな曲げ荷重が作用すると、ラグが塑性変形するという問題があった。

そこで、本研究では、図5（右）に示すようにな、硬質ゴム製のラグ（幅100[mm]、高さ30[mm]、厚さ5[mm]）を新たに製作した。これは、ラグに曲げ荷重が作用すると、ラグ

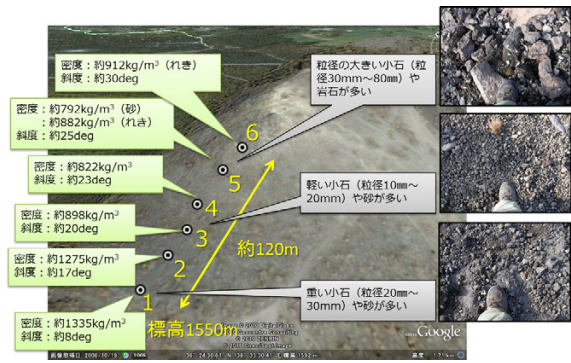


Fig. 3: Environmental information of Mt.Koasama



Fig. 4: Lugs come from TrackWalker-II

自身が弾性変形する「弾性ラグ」である。走行時にこの弾性ラグが変形することにより礫を地面に押しさえつける力が作用し、礫上を安定して走行することが可能と考えられる。

また、クローラベルトへの取り付けをより強固にし、走行中のラグの脱落を防止した。

2.2.2 揺動機構の改良

小浅間山でのフィールド試験時の揺動機構は、モータの動力をタイミングベルトで直接伝達していた。これにより、サイドクローラに働く外力が直接モータの出力軸に作用するため剛性が弱く、さらに、タイミングベルトのたわみにより、サイドクローラの「がたつき」が大きくなっていった。そこで、図6に示すように、サイドクローラの接続部位にハーモニックギアを組み込むことで、剛性を維持し、サイドクローラの「がたつき」を抑えている。

3 浅間山フィールド試験

2011年10月11日～13日にかけて、TrackWalker-IIを用いて小浅間山、および浅間山にてフィールド試験を行った。

TrackWalker-IIの本体前方には、図2に示すように、遠隔操作、および走行環境の情報取得のため、ネットワークカメラ（AXIS 212 PTZ）を搭載した。このカメラで撮影した動画、および画像は、ネットワークに接続されたPCに保存可能である。また、ロボットの電源には、本体にリチウムイオンバッテリー（IDX POWER CUBE - BLUE LABEL(STEADICAM)：14.8[V]、5.7[Ah]）を1本搭載し、左右のサイドクローラには、それぞれ単3形ニッケル水素乾電池（SANYO eneloop：1.2[V]、1900[mAh]）を10本

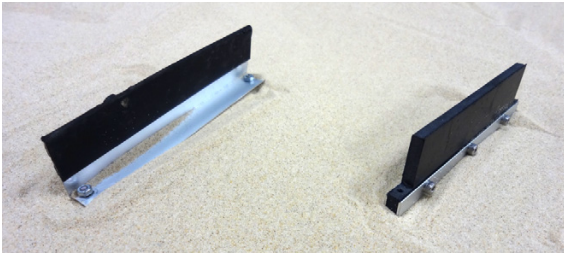


Fig. 5: Previous lug (left) and improved lug (right)

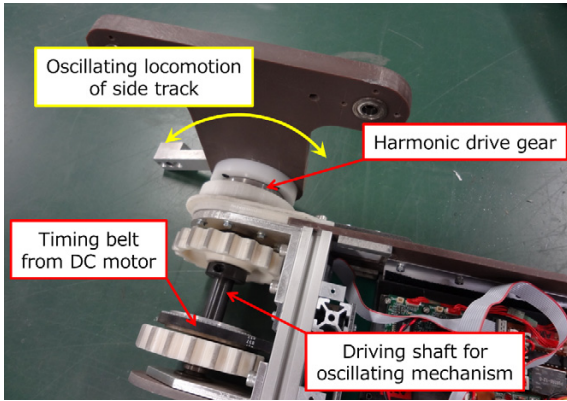


Fig. 6: Side track with harmonic drive gear

直列に接続 (12[V]) し搭載している。フィールド試験中は、TrackWalker-IIに搭載したContec製無線機と操作用PCとを無線LAN接続し、ロボット後方から目視により操作を行った。

以上のカメラ、電源、無線機を搭載したTrackWalker-IIのサイズは、全長700[mm]、全幅700[mm]、高さ300[mm]である。また重量は、20[kg]であり、これは、ロボットを運搬するヘリコプタに積載可能な重量である。

なお、フィールド試験の項目として、浅間山登山道での長距離走行試験、小浅間山の南西側斜面での不整地走行試験を行った。以下にフィールド試験結果を示す。

3.1 長距離走行試験

TrackWalker-IIの長距離走行試験は、図7に示す浅間山登山道にて行った。この登山道は傾斜15度～30度程度の連続する急斜面であり、さらに、軽石で覆われた軟弱地盤である。

走行試験の様子を図8に、TrackWalker-IIの走行軌跡を図9に示す。TrackWalker-IIは標高1655[m]のスタート地点から標高1815[m]のゴール地点まで、標高差160[m]、距離約700[m]を約3時間で走行した。なお、スタートから190[m]、標高1727[m]地点でロボットのバッテリーを交換した。上述のバッテリーセットにより、約2時間の連続運転を実現した。

この長距離走行の間、TrackWalker-IIは、ほとんどスリップすることなく走行した。また、TrackWalkerで見られたような急斜面での後方への転倒の危険性は、まったく見られなかった。TrackWalkerでは、約2時間で100[m]の走行が限界であったので、TrackWalker-IIの走行性能は、TrackWalkerと比較して大幅に向上していることが確認できた。

図10にTrackWalker-IIに搭載したカメラで取得した画像を示す。この画像より、ロボットの走行する環境、および前方の障害物が確認できるため、多少の時間遅れは生じるが、カメラ映像による遠隔操作が可能であると考えられる。



Fig. 7: Climbing route of Mt.Asama



Fig. 8: Field test of long traversal at Mt.Asama

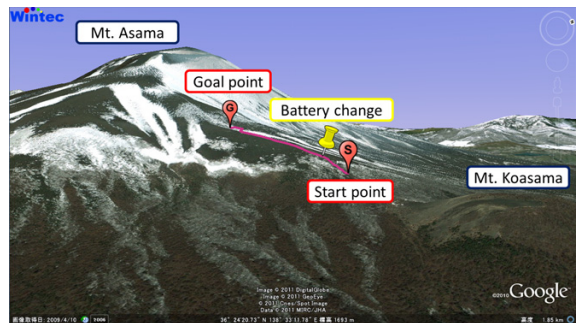


Fig. 9: GPS log of long traversal test



Fig. 10: Snapshot by on-board camera

3.2 不整地走行試験

TrackWalker-IIの不整地走行実験は、小浅間山の南西側斜面で行った。走行試験の様子を図11に示す。

小浅間山は軽石で覆われた軟弱地盤に、10[cm]～20[cm]程度の比較的大きな礫が散在する不整地である。図3に示す地点1から地点5まで走行する際、TrackWalker-II本体のメインクローラ、および左右のサイドクローラに礫が引っ掛かり、クローラ走行に支障をきたすことがあったが、単純脚機構により、本体、あるいはサイドクローラを持ち上げることで障害物である礫を回避し、クローラによる走行が継続可能となった。また、走行中にロボットが30度以上傾くことがあったが、後方への転倒の危険性は見られなかった。

軟弱地盤においてスリップが生じた場合は、単純脚機構で、本体と左右のサイドクローラを交互に接地させることで脱出可能であった。このスリップは、ロボットが斜面に対してロール軸まわりに傾いた状態で、頻発する傾向があった。したがって、クローラが走行面に接地する角度が、ロボットの走行性能に大きく影響すると考えられる。TrackWalker-IIは、揺動サイドクローラによりクローラの接地角度を調整することで、高い走行性能を発揮することができるが、目視で操作する際にも、操縦者には、非常に高いスキルが要求された。

地点5～地点6にかけての走行では、以前見られたようなラグの脱落は、生じなかった。スリップが生じた場合にも、図11のように、サイドクローラを前に倒し、重心を前方に移動させ、サイドクローラを前方の礫に引っ掛けることで推進力が得られた。このとき、クローラベルトに取り付けた弾性ラグが変形し、礫を斜面に押さえつけることで、土壌の崩壊を防いでいたと考えられる。また、弾性ラグに押さえつけられた礫は、弾性ラグと一体となって、クローラベルトの回転により、ロボット下面を通過していった。このとき、礫自身が大きなラグとなり、ロボットは、推進力を得ていたと考えられる。

また、地点6の付近の走行中に、単純脚機構のクランク軸を固定しているセットビスが破損し、クランク軸が受動関節となる現象が偶然現れた。これにより、TrackWalker-IIは単純脚機構により、礫を乗り越える機能を失ったため、走行不能になると思われたが、単純脚機構のクランク軸の制御を行わずとも、受動関節により、サイドクローラが斜面に対して最適な接地角を保つことができ、高い走破性能を発揮することができた。

以上のことより、サイドクローラのロール角、およびピッチ角（斜面方向に対するロボットの姿勢角）まわりに受動機構を組み込むことで、操縦者が操作しなくとも、クローラが走行面に対して最適な接地角を保ち、優れた走行性能を発揮すると考えられる。また、この受動関節を状況に応じて能動的に制御することで、不整地において高い走破性能を示すことが可能となると思われる。

4 結言

本稿では、軟弱かつ急斜面の不整地走行を目的とした単純脚・クローラハイブリッド型移動ロボットTrackWalker-IIを用いて、小浅間山、および浅間山で実施したフィールド試験について報告した。揺動機構を付加したサイドクローラを効果的に用いることで、不整地において高い走破性能を示し、軟弱地盤でスリップした際も脱出が可能となる。また、小浅間山、および浅間山の傾斜30度以上の斜面にお



Fig. 11: Field test of traversal on irregular terrains

いても、TrackWalker-IIには、後方への転倒の危険性が見られず、安定した走行が可能であった。

以上より、本研究で開発したTrackWalker-IIは、初号機であるTrackWalkerと比較して、走行性能、安定性が大幅に向上し、実際の火山環境においても十分に適用可能と考えられる。

また、軟弱な不整地では、クローラが走行面に接地する角度が、走行性能に大きく影響すると考えられる。よって今後、クローラを走行面に最適な角度で接地させるため、クローラの接地角をロール軸、およびピッチ軸まわりに受動的に調節可能、さらに、状況に応じて能動的に制御可能な機構を開発し、ロボットに搭載する予定である。

謝辞

フィールド試験にご協力いただいた、国土交通省砂防部保全課、東京大学地震研研究所浅間火山観測所の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] 西田 信一郎, 月面ロボットのミッションと作業シナリオ, 日本機械学会 2011年度年次大会, J192022
- [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 (ROBOMECH2005), 2A1-S-057
- [3] K.Nagatani, H.Kinoshita, K.Yoshida, T.Tadakuma, E.Koyanagi, Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain, Proc. of the 2010 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2010)
- [4] 木下 宏晃, 多田 隈 建二郎, 永谷 圭司, 吉田 和哉, 単純脚・クローラハイブリッド型移動ロボットTrackWalkerによる浅間山での不整地走行実験 (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 (SI2010), 951-954
- [5] 秋山 健, 木下 宏晃, 永谷 圭司, 吉田 和哉, 多田 隈 建二郎, 西田 信一郎, 軟弱かつ急斜面の不整地走行を目的とした単純脚・クローラハイブリッド型移動ロボットの開発, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス講演会 (ROBOMECH2011), 2A2-L14
- [6] 永谷 圭司, 秋山 健, 吉田 和哉, 西田 信一郎, 揺動サイドクローラを有する移動ロボットTrackWalker-IIによる火山環境での不整地走行実験, 日本機械学会 2011年度年次大会, J192022