

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ト型移動ロボットの開発

Development of a Leg-Track Hybrid Mobile Robot to traverse on weak and steep slopes

秋山 健, 学 木下 宏晃, 正 永谷 圭司, 正 吉田 和哉 (東北大),
正 多田 隈 建二郎 (大阪大), 正 西田 信一郎 (JAXA)

Ken AKIYAMA (Tohoku Univ.), akiyama@astro.mech.tohoku.ac.jp
Hiroaki KINOSHITA, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.),
Kenjiro TADAKUMA (Osaka Univ.), Shinichiro NISHIDA (JAXA)

In extreme environments, such as lunar surface or volcanic area in the earth, exploration by mobile robots instead of human is considered of value from the point of view of safety. However, such a natural environment is uneven, and usually, it is covered with rocks and/or loose soil. Thus, the mobile robot is required to obtain a high traversability. So, we have been developing a mobile robot that equips both a simple leg motion and tracked locomotion to traverse weak and rocky surfaces. To evaluate its performance, in this research, we conduct a stability analysis of the mechanism. In this paper, we introduce the mechanism of our developing mobile robot, explain a robot, and discuss the stability analysis.

Key Words : Movement mechanism, Track, Mobile robot

1 緒言

月面や惑星表面の科学的探査は、宇宙・生命の起源を解明するための有効な手段と考えられている。昨年は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発した小惑星探査機はやぶさが、小惑星イトカワから岩石の微粒子を地球に持ち帰り、ロボットによる月面や惑星表面の探査がさらに注目されるようになった。一方、地球上においても活動中の火山など、人の立ち入ることのできない区域では、ロボットによる探査が期待されている。

月面での地表探査に関して、クレータ付近には、月の太古の地層が表面に出てきている可能性があるため、ロボットが行う科学探査ミッションとして、クレータの岩石採取作業が考えられる。このようなミッションにおいて、ロボットは、月面の軟弱地盤やクレータの急斜面を走行する必要がある。また、火山地域の探査を想定した場合、ロボットによる探査シナリオとして、活動中の火口の観測、さらに土石流や火砕流を観測するための移動監視、および定点監視が考えられる。このとき、ロボットは火山灰に覆われた軟弱地盤、火口付近の急斜面、さらに岩石、小石、砂が混在する不整地を走行する必要がある。

したがって、月面探査、また、火山地域の探査を行うロボットには、軟弱地盤や急斜面での優れた不整地踏破性能が共通して求められる。そこで、筆者らの研究室では上述の不整地の走行を目的とした移動ロボットに関する研究開発を進めてきた。

一般的に、クローラ機構は高い不整地踏破性能を有するため、多くの移動ロボットに採用されている。本研究室でも、サブクローラを有したクローラ型移動ロボット Kenaf を用いて、活火山での不整地走行実験を行ったが、火山灰に覆われた斜面において、クローラと地面との間にスリップが生じ、走行不能となった [1]。

そこで、木下らは、軟弱地盤での走行に対応するために、大きな接地面積を持つクローラ型移動ロボット TrackWalker (図1)を開発した [2]。TrackWalker は、クローラ機構に加えて、サイドクローラの取付位置にもう一軸の自由度を有した単純脚機構を有しており、軟弱地盤では単純脚機構により、地面と大きな接地面積で接しながら走行する。また、サイドクローラの動作を組み合わせることで、段差を有



Fig. 1 TrackWalker traverses on Mt.Asama

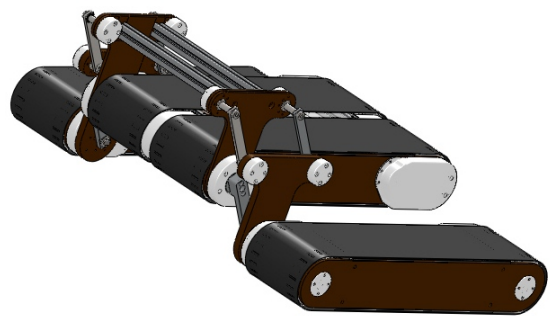


Fig. 2 Leg-Track Hybrid Robot TrackWalker-II

する地形、岩石、小石、砂が混在する地形において、高い不整地踏破性能を示した [3]。しかし、ロボットの重心が高いため、急斜面の走行中に後方に転倒する場面が見られた。

そこで、本研究では、TrackWalkerに見られた急斜面での転倒の問題を解消し、さらに不整地での安定した走行が可能なる、単純脚・クローラハイブリット型移動ロボット TrackWalker-II (図2)の開発を行うこととした。

本稿では、開発を進めている TrackWalker-II について紹介し、さらに、TrackWalker-II の安定性について考察する。

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

2.1 設計コンセプト

前述のように，TrackWalker は，不整地で高い踏破性能を示したが，重心が高く，急斜面の走行中に後方に転倒する場面が見られた．そこで，開発した TrackWalker-II の設計コンセプトとして以下の項目を設定した．

1. 単純脚・クローラハイブリット機構を採用

TrackWalker により，単純脚・クローラハイブリット機構の不整地での有用性が示されたため，TrackWalker-II にも同様の移動機構を採用した．

2. クローラの軸間距離を TrackWalker の 1.5 倍に設定 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，TrackWalker では，ロボット本体上部に搭載していたバッテリー，無線機等をロボット本体内部に収容でき，ロボットの低重心化が実現される．

3. 軽量・低重心

火山環境での探査を想定した場合，ロボットをヘリコプターにより探査区域まで搬送することが考えられる．ゆえに，ロボットは，できるだけ軽量であることが求められる．そこで，エンジニアリングプラスチックを多く使用，さらに，バッテリーとして eneloop を用いることで，軽量化を図ることとした．

この他に，TrackWalker にはモータの出力トルク不足，動力を伝達するタイミングベルトの破断などの問題があったので，TrackWalker-II は，この点も考慮し設計を行った．

図 3 に TrackWalker-II の外観，図 4 に TrackWalker，および TrackWalker-II のサイズの比較を示す．また，表 1 に TrackWalker，および TrackWalker-II の仕様を示す．

2.2 脚機構

TrackWalker-II に採用した脚機構は，3 個の平行クランクを利用した単純脚機構である．図 5 に示すように，本体に取り付けられた DC モータから平歯車，タイミングプーリ，およびタイミングベルトを介し，左右のクランク軸を回転させ，クランク軸に取り付けられたリンク（driver）が回転することで，他の 2 本のリンク（follower）がこれと平行に回転し，動力が伝達される．この単純脚機構により，本体と脚部を交互に接地させる並進運動を実現する．

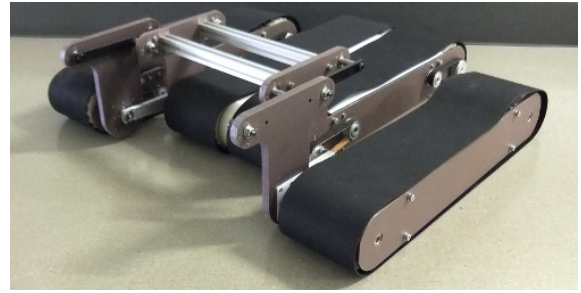


Fig. 3 Overview of TrackWalker-II



Fig. 4 Size-comparison between TrackWalker and TrackWalker-II

2.3 クローラ機構

クローラ機構は，本体に取り付けられたメインクローラと，左右のサイドクローラからなり，それぞれのクローラは，独立に駆動させることができる．メインクローラを駆動，あるいは左右のサイドクローラを同一方向に駆動させることで並進運動，また，前述の脚機構により本体を持ち上げ，左右のサイドクローラを互いに逆方向に駆動させることで超信地旋回が可能となる．図 5，6 に示すように，メインクローラは本体に取り付けられた DC モータから平歯車，タイミングプーリ，およびタイミングベルトを介して動力が伝達される．また，サイドクローラは脚部に取り付けられた DC モータからタイミングプーリ，およびタイミングベルトを介して動力が伝達される．

2.4 クローラアーム機構

左右の脚部は，それぞれクランク軸を中心に回転させることができる．脚機構，クローラ機構で踏破不可能な段差や，軟弱地盤においてスリップ，スタックが生じたとしても，このクローラアーム機構を利用し，本体を持ち上げ，踏破が可能となる．クローラアーム機構の駆動軸には，図 6 に示すように，脚部に取り付けられた DC モータからタイミングプーリ，およびタイミングベルトを介して動力が伝達される．

Table 1 Specification of TrackWalker and TrackWalker-II

	TrackWalker	TrackWalker-II
Total length	480~600[mm]	600~700[mm]
Total width	550[mm]	680[mm]
Total height	230~320[mm]	180~280[mm]
Body unit size L×W×H	420 × 190 × 120[mm]	580 × 260 × 180[mm]
Leg unit size L×W×H	420 × 90 × 120[mm]	580 × 120 × 180[mm]
Distance between link axis	90[mm]	100[mm]
Track wheel distance	295[mm]	442[mm]
Body unit weight	6.4[kg]	8.2[kg]
Leg unit weight	2.4[kg]	3.8[kg]
Total weight	12.0[kg]	16.0[kg]

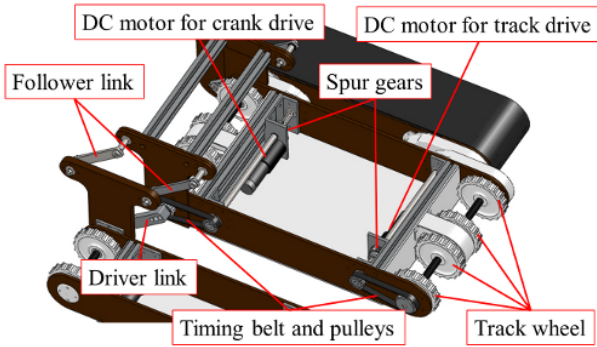


Fig. 5 Driving unit in the Body

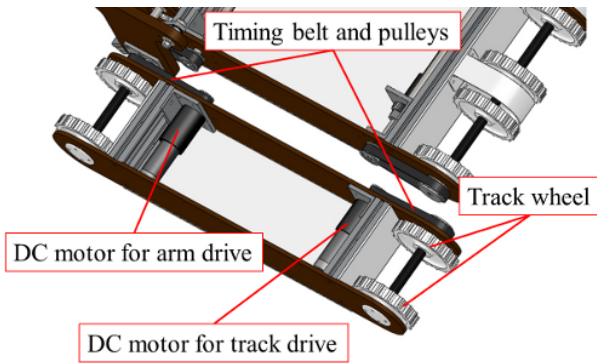


Fig. 6 Driving unit in the side-track module

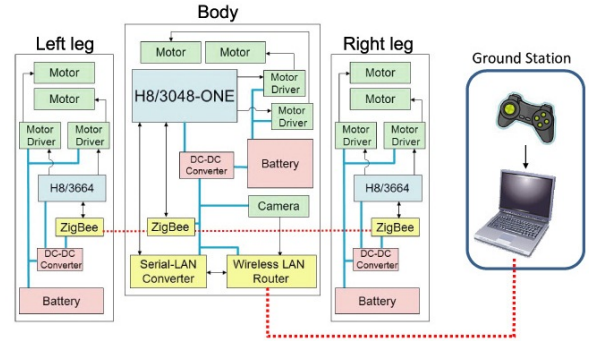


Fig. 7 System diagram of TrackWalker-II

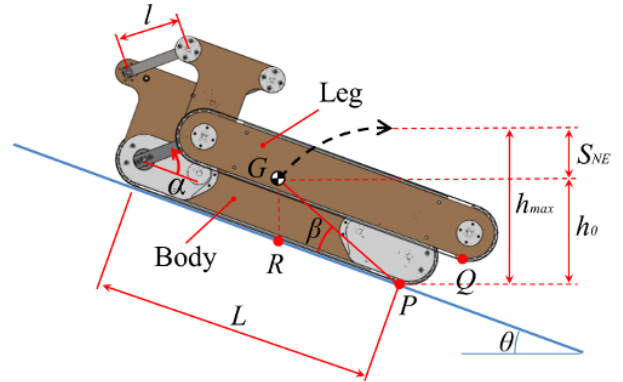


Fig. 8 S_{NE} for TrackWalker-II

2.5 コントロールシステム構成

TrackWalker-II は本体と左右の脚部間を平行クランク機構という無限回転機構で接続しているため、両者間をケーブルで接続することは困難である．そこで、各ユニットごとに、バッテリー、マイコン（H8/3048-ONE, H8/3664:ルネサス エレクトロニクス社製）、モータドライバ（1Axis DC power Module: HiBot 社製）を搭載し、ユニット間は ZigBee（ZIG-100B: ベストテクノロジー社製）による無線シリアル通信により接続する（図7）．

地上 PC からの指令信号は、無線 LAN 通信によりロボット本体に送信され、そのうち、脚部用の指令信号は本体から ZigBee により、脚部に送信される．また、ロボット本体にはネットワークカメラを取り付け、地上 PC への画像の送信を実現する予定である．

3 TrackWalker-II の安定性解析

移動ロボットが斜面を走行する際に考慮しなければならないのが、後方への転倒である．ここでは、広瀬らが提案した正規化エネルギー安定余裕（以下、NE 安定余裕）[4]を用いて、TrackWalker-II の安定性を解析する．

NE 安定余裕は、ロボットが転倒する際に、重心が描く軌跡の最大高さ h_{max} と、重心の初期高さ h_0 との差、 S_{NE} で与えられ、長さの次元を持つ．この S_{NE} の値が大きいほどロボットは安定であり、 S_{NE} が 0 となるとロボットは転倒する．

3.1 TrackWalker-II における NE 安定余裕

図8に示すように、脚機構におけるクランク軸の回転角を α 、斜面の傾斜角を θ とする．また、ロボットは、本体が接地している状態では P 点、脚部が接地している状態では Q 点を支点として転倒すると仮定する．

$0[\text{deg}] < \alpha \leq 180[\text{deg}]$ のときは、本体が接地し、脚部を持ち上げている状態となる．このとき、ロボットの重心を G とすると、ロボットが転倒する際に描く軌跡の最大高さ h_{max} は、線分 GP の長さで示される．また、 $180[\text{deg}] < \alpha \leq 360[\text{deg}]$ のときは、脚部が接地し、本体を持ち上げている状態となる．同様に、ロボットの重心を G とすると、ロボットが転倒する際に描く軌跡の最大高さ h_{max} は、線分 GQ の長さで示される．

両者の場合において、図8に示すように、接地点 P 、および Q から、ロボットの重心 G を見たときの仰角を β とすると、重心の初期高さ h_0 は次式で示される．

$$h_0 = h_{max} \sin(\theta + \beta) \quad (1)$$

したがって、NE 安定余裕 S_{NE} は次式となる．

$$\begin{aligned} S_{NE} &= h_{max} - h_0 \\ &= h_{max} \{1 - \sin(\theta + \beta)\} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $\theta + \beta > 90[\text{deg}]$ のとき、 $S_{NE} = 0$ とする．

なお、TrackWalkerMacro-II の重心は、脚機構によるクランク軸の回転角 α 、およびクローラアーム機構による脚部の回転角を考慮し、本体の重心と、脚部の重心の幾何学的関係から求める必要がある．

3.2 TrackWalker-II の走行における安定性

上記の方法より、不整地を走行する TrackWalker-II において、転倒する際の支点と重心の距離 h_{max} と、支点から重心を見たときの仰角 β を幾何的に求めることで、全ての姿勢における NE 安定余裕を求めることができる．

まず、脚移動における安定性について考える．脚移動は単純脚機構を用いて、本体と脚部が平行を保った状態で、交互に接地しながら並進運動を行う．したがって、このとき、クローラアームの回転角は $0[\text{deg}]$ である．

図9に、脚移動時のクランク軸の回転角 α [deg]、および斜面の傾斜角 θ [deg] に対する NE 安定余裕 S_{NE} [mm] を示す。図9より、 $\alpha = 30 \sim 40$ [deg]、 $210 \sim 220$ [deg] のときに、 S_{NE} の値が低くなるのが分かる。このとき、ロボットは本体、あるいは脚部を持ち上げ、 β の値が最大となる状態である。これは、(2) 式より、 β の値が大きいほど、 S_{NE} が小さくなることから確認できる。この図より、ロボットと地面との間にスリップが生じないとすれば、脚移動により転倒せずに踏破可能な最大傾斜角は 66 [deg] である。

次にクローラ走行の安定性について考える。図10に、 $S_{NE} > 0$ となる α 、および θ の領域を示す。ただし、境界は含まない。クローラ走行において、ロボットが図10に示す領域の姿勢、傾斜角であれば、ロボットは転倒せずに走行することができる。

3.3 軟弱地盤における TrackWalker-II の走行性能

次に、TrackWalker-II が軟弱地盤を走行する際の走行性能について考える。

脚移動では、本体、および脚部の大きな接地面が、地面と接しながら走行するため、土壌を崩壊させることなく、安定した走行が可能である。一方、クローラ走行では斜面を走行する際、重心がロボットの後方にあると、ロボット後方が沈下してしまい、十分な牽引力が得られなくなる。

そこで、クローラの効率を最大限に活かすには、ロボットの重心を鉛直方向に接地面まで降ろしたとき、その位置がクローラの接地部分の中心である必要がある。つまり、図8に示すように、ロボットの重心を鉛直方向に接地面まで降ろした点を R としたとき、線分 RP の長さは、クローラの接地長さの $1/2$ であることが求められる。したがって、クローラの接地長さを L としたとき、次式の関係となるように、ロボットの姿勢を制御すればよい。

$$\begin{aligned} L &= 2(h_{max} \cos \beta - h_{max} \sin \beta \tan \theta) \\ &= 2h_{max} (\cos \beta - \sin \beta \tan \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

例えば傾斜角が 30 [deg] のとき (3) 式の関係にあるのは、本体が接地しているときには $\alpha = 121$ [deg]、また、脚部が接地しているときには $\alpha = 301$ [deg] の姿勢である。このときの TrackWalker-II の姿勢を図11, 12に示す。

4 結言

本研究では、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ト型移動ロボット TrackWalker-II を開発した。本稿には、TrackWalker-II に採用した単純脚・クローラハイブリット機構を示し、また TrackWalker-II の安定性について考察した。その結果、TrackWalker-II により、従来では踏破不可能であった不整地においても、安定した走行が期待される。

今後、TrackWalker-II を用いて、砂地などの軟弱地盤や、不整地での走行試験を行い、その走行性能を評価する。また、実際の探査活動を想定して、TrackWalker-II を活火山に投入し、その有用性を検証する予定である。

文献

[1] 永谷圭司, 岡田佳都, 徳永直木, 桐林星河, 小柳栄次, 吉田智章, 油田信一, 久部経夫. 火山探査を目的としたクローラ型移動ロボット Kenaf による桜島での遠隔操作実験. 第10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 (SI2009), 1943-1946, 2009

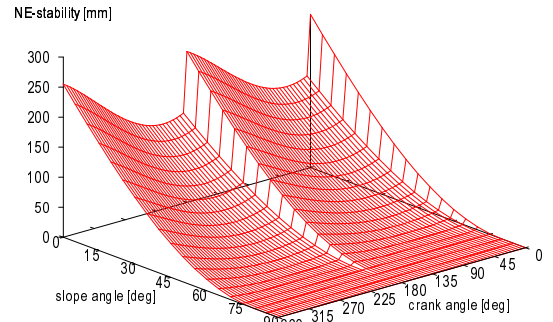


Fig. 9 Relationship among crank angle α , slope angle θ and NE-stability S_{NE}

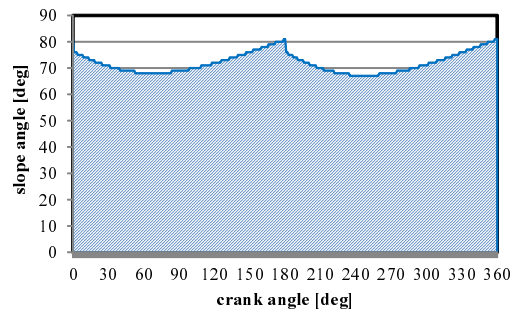


Fig. 10 Relationship among crank angle α and slope angle θ in the case of NE-stability $S_{NE} > 0$

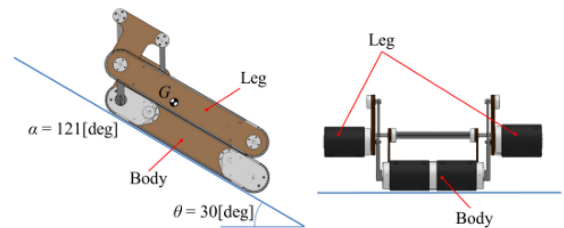


Fig. 11 TrackWalker-II pose in the case of slope angle $\theta = 30$ [deg] and crank angle $\alpha = 121$ [deg]

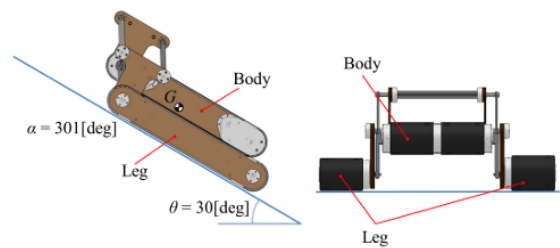


Fig. 12 TrackWalker-II pose in the case of slope angle $\theta = 30$ [deg] and crank angle $\alpha = 301$ [deg]

[2] Keiji Nagatani, Hiroaki Kinoshita, Kazuya Yoshida, Kenjiro Tadakuma, Eiji 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)*, 2010.

[3] 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ト型移動ロボット TrackWalker による浅間山での不整地走行実験. 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), 951-954, 2010

[4] 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 Vol.16, No.8, pp.48-54, 1998