

軟弱地盤や急斜面の走行を可能とする面接触型移動ロボットの設計と開発

Design and development of Surface-contact-type mobile robot
to traverse on weak soils and steep slopes

正 吉田 和哉（東北大），正 永谷 圭司（東北大）
正 多田隈 健二郎（電通大），木下 宏晃（東北大）

Hiroaki KINOSHITA(Tohoku Univ.) , kinoshita@astro.mech.tohoku.ac.jp
Kazuya YOSHIDA(Tohoku Univ.) , Keiji NAGATANI(Tohoku Univ.) , Kenjiro TADAKUMA(Univ. of Electro-Comm.)

Explorations of planetary rovers in Mars and the moon are very significant to clarify the origin of the solar system and life on earth. However, the wheels of planetary rovers sometimes slip or lose contact with the ground while traversing a sandy terrain. In the worst case, wheels may get stuck in loose soil. With consideration of the above situations, the authors developed a new locomotion mechanism without wheels or tracks, called "Surface-contact-type locomotion". In this mechanism, wide plates alternately contact with the ground for its locomotion, and it does not corrupt the contact surface. Therefore, the mechanism has very high movability on weak soils and steep slopes with comparison of wheels or tracks. In this paper, we explain details of our locomotion system and report a validity of the mechanism through some experiments.

Key Words : Robot, Mobile mechanism, Surface-contact-type

1 緒言

月や惑星における地表面移動による科学探査は、太陽系の成り立ちや生命の起源などを解明するうえで非常に有意義である。しかし月や惑星の表面は、岩石や細かい砂に覆われており、さらにクレータの縁には、大きな斜面も多数存在する。このような環境で、車輪型移動ロボットを用いた探査を行う場合、車輪のスリップやスタックにより探査の続行が困難になる恐れがある。これらの問題に対処するため、これまで、1970年代に Bekker や Wong らにより体系化されたテラメカニクス（車輪と軟弱地盤との間の力学関係に関する学問）[1]をベースとした、車輪型移動ロボットの軟弱地盤上での走行性能に関する研究がいくつか行われてきた[2][3]。これらの研究により、車輪型移動ロボットによる軟弱地盤の斜面走行の性能向上と共に、その限界が明らかとなりつつある。

一方、車輪型よりも接地面積が広く、ロボットの沈下を抑えることが可能なクローラ機構を用いた移動ロボットを、惑星探査に適用することを目指した研究も進められている[4][5]。しかしながら、クローラ機構は構造が複雑であるため、車輪型移動ロボットと比較して信頼性・耐久性が低く、さらに重量も大きくなるといった問題点があり、現状において、惑星探査に適しているとはいえない。

そこで、本研究では、軟弱地盤や急斜面といった地形に対し、車輪移動機構よりも優れた走行性能を持ち、さらにクローラ機構より遙かに単純な構造を有する、面接触型移動機構を提案し、これを搭載する移動ロボットの設計・製作を進めてきた。本稿では、試作した面接触型移動ロボットの脚機構、旋回機構について紹介し、さらにこの機構の急斜面走行時の安定性について解析する。また、実機を用いた走行実験について報告し、軟弱地盤や急斜面の走行における実機の有用性を検証する。

2 面接触型移動ロボットの基本構成

移動ロボットが軟弱地盤上でスリップすることなく安定した走行を行うための重要な要素は、「接地面積を大きくすること」ならびに「走行中に土壌を崩壊させないこと」の2点である。さらに、実際の惑星探査を想定すると、信頼性・耐久性の点から、機構はできるだけ簡素であることが

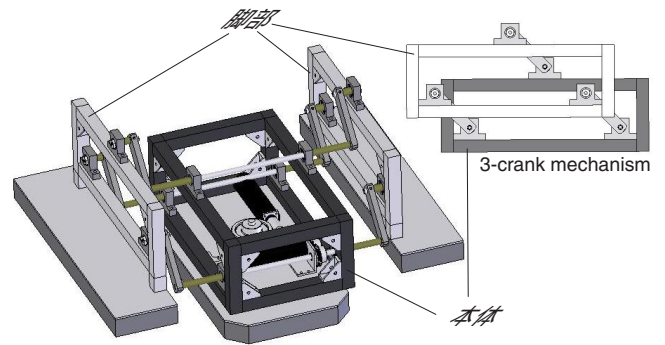


Fig. 1 Surface-contact-type mobile robot

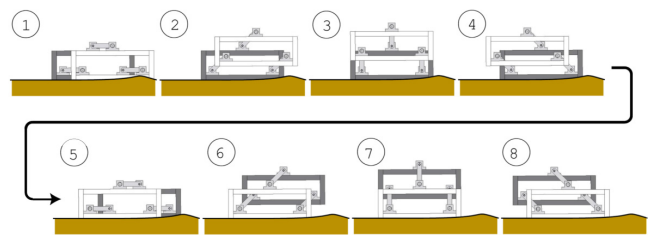


Fig. 2 Sequence of translation

望ましい。そこで、本研究では、簡単な構造で、接地面積を大きくとりつつ、土壌を削らずに走行可能な機構を考案した(図1)。以下に、考案した機構と、これを搭載した面接触型移動ロボットのシステム構成について説明する。

2.1 面接触型の並進移動機構

面接触型の並進移動機構には、図1の右に示すように、3-クランクによる平行クランク機構[6]を採用した。この機構では、能動クランクに接続された駆動軸を、平歯車を介してDCモータで回転させ、その他のクランクが受動的に回転することで、脚部全体が本体に対して常に平行な状態で回転運動を行う。

この機構を採用した移動ロボットの並進移動の動作シーケンスを図2に示す。この図に示すように、本ロボットは、

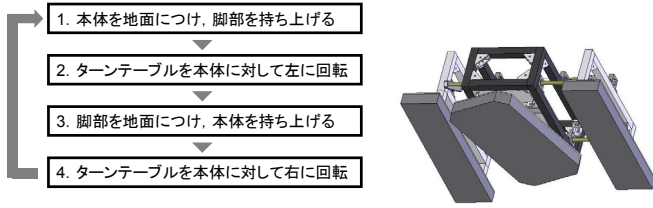


Fig. 3 Rotation process & shape of turn table

本体と脚部を交互に地面に接地させる．これにより，土壌を踏み固めるようにして前進することが可能であると期待される．

2.2 面接触型の巡回機構

本研究で試作する面接触型移動ロボットは，比較的広い面で地面に接触するため地面とロボット底面との間の摩擦が大きい．そのため，脚の左右独立駆動方式では，操舵が困難であると推測される．そこで，本研究では，本体下部にターンテーブルを設置することにより，本ロボットの操舵を実現することとした．

ターンテーブルの駆動は，ウォームギヤとウォームホイールにより行う．このギヤを使用することで，一段で大きな減速比が得られると共に，セルフロック機能によりバックドライブを防ぐことが可能となる．また，ターンテーブルの形状は，できる限り接地面積を大きくとるため，長方形を採用した（図 3 右）．その結果，ターンテーブルの回転角度に制限が発生するため（初期位置から左右 20[deg] 程度），巡回角度の大きな巡回動作は，図 3 左の手順を繰り返すことで実現する．なお，図 3 左の手順は右巡回時の動作であるが，左巡回についても同様の手順で行う．

2.3 コントロールシステム構成

現状の実装で，本ロボットは，無線による遠隔操作によって動作を行う．まず，PC に接続された Joystick により入力された並進速度指令信号ならびに，巡回速度指令信号は，ZigBee を用いた無線シリアル通信（ZIG-100B：ベストテクノロジー社製）により，本機体上のワンボードコントローラ（H8/3048F-ONE：イエローソフト社製）に送信される．並進速度指令信号は，直接 PWM 信号に変換された後，モータドライバ（1Axis DC power Module：HiBot 社製）へと送信され，モータ制御を行う．なお，並進移動用モータならびに，巡回用モータには，maxon 製 RE30，本体の電源には，IDX リチウムイオンバッテリー endura-7 を使用した．

3 安定性解析

移動ロボットが急斜面を走行する際に考慮しなければならないのは，後方への転倒である．そこで本研究では，塚越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）と呼ばれる評価基準 [7] を用いて，試作したロボットの斜面走行時における後方への転倒の安定性を評価することとした．

3.1 面接触型移動ロボットの安定性解析

NE 安定余裕による評価方法は，移動ロボットが転倒するときに描く重心の軌跡の最高点 h_{max} と重心の初期位置 h_0 との差 S_{NE} で表すというものである．本ロボットが斜度 θ の斜面上に位置するときの様子を図 4 に示すとき，幾

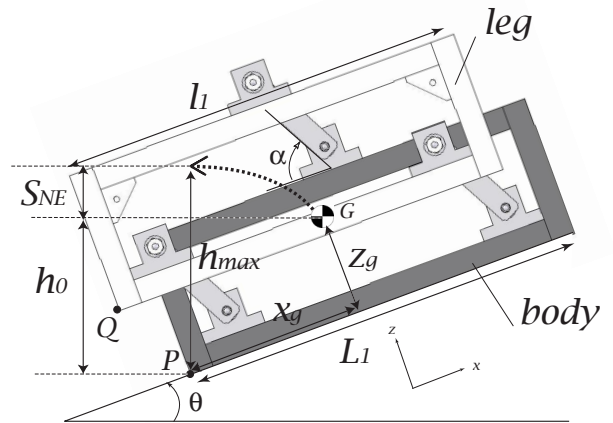


Fig. 4 Robot model on a slope

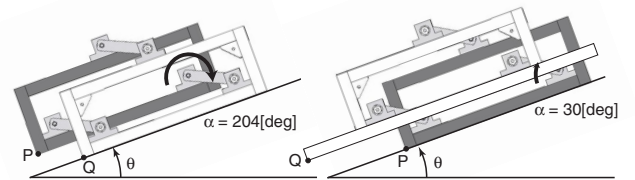


Fig. 5 Robot model on slope: $\alpha = 204$ [deg] & $\alpha = 30$ [deg]

何学的関係から S_{NE} の値は次式で求められる．

$$S_{NE} = h_{max} - h_0 \quad (1)$$

$$h_{max} = \sqrt{x_g^2 + z_g^2} \quad (2)$$

$$h_0 = x_g \sin \theta + z_g \cos \theta \quad (3)$$

ここで， S_{NE} の値は大きいほど安定であり， $S_{NE} = 0$ となる θ の値が踏破できる最大斜度である． α は本体とクランクとの角度を表しており， $0[\text{deg}] < \alpha \leq 180[\text{deg}]$ のときは脚部を持ち上げる姿勢であり， $180[\text{deg}] < \alpha \leq 360[\text{deg}]$ のときは本体を持ち上げる姿勢である．また， x_g, z_g の値は，図 4 においてロボットが転倒する際に支点となる点 ($0[\text{deg}] < \alpha \leq 180[\text{deg}]$ では点 P， $180[\text{deg}] < \alpha \leq 360[\text{deg}]$ では点 Q) を基準点としたときの重心 G の位置を表している．さらに，重心 G の位置は， α の値（ロボットの姿勢）によって変化するため， α の値によって斜度 θ に対する NE 安定余裕 S_{NE} の値が異なる．

以上より，斜度 θ ，クランク角 α ，NE 安定余裕 S_{NE} の関係を三次元グラフにプロットしたものを図 6 に示す．この図より， $l_1 = 340[\text{mm}]$ という脚の長さの条件下では， $\alpha = 204[\text{deg}]$ のときに S_{NE} の値が最小であり，最も不安定であることがわかる．このときのロボットの状態を図 5 の左に示す．また，斜度 θ と NE 安定余裕 S_{NE} の関係を図 7 に示す．この図において，一番下の赤い実線で強調された曲線が最も不安定な状態である $\alpha = 204[\text{deg}]$ のときの θ と S_{NE} の関係を表している．この曲線より， $\theta = 45[\text{deg}]$ 付近で $S_{NE} = 0[\text{mm}]$ となっていることがわかる．したがって， $L_1 = l_1 = 340[\text{mm}]$ の場合，踏破可能な最大斜度は，約 $45[\text{deg}]$ となる．

次に， $180[\text{deg}] < \alpha \leq 360[\text{deg}]$ の領域における安定性を向上させるため，脚部を長くすることを考える．図 8 に， $L_1 = 340[\text{mm}]$ ， $l_1 = 476[\text{mm}]$ ($l_1/L_1 = 1.4$) としたときの

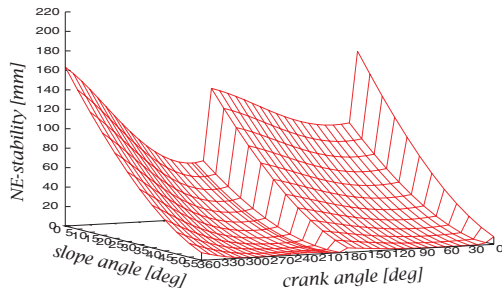


Fig. 6 Relationship among crank angle α , slope angle θ , and NE-stability, in the case of $l_1 = 340$ [mm]

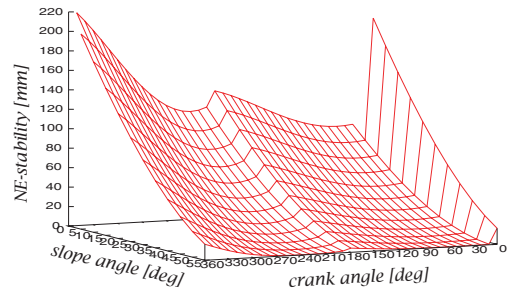


Fig. 8 Relationship among crank angle α , slope angle θ , and NE-stability, in the case of $l_1 = 476$ [mm]

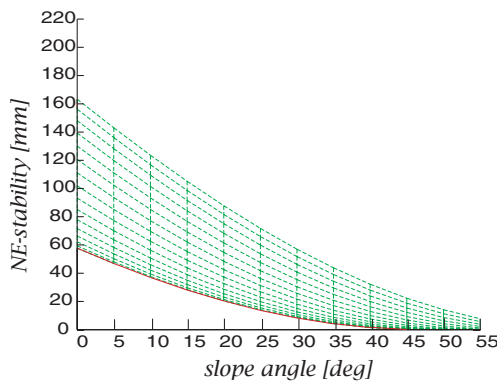


Fig. 7 Relationship between slope angle θ and NE-stability, in the case of $l_1 = 340$ [mm]

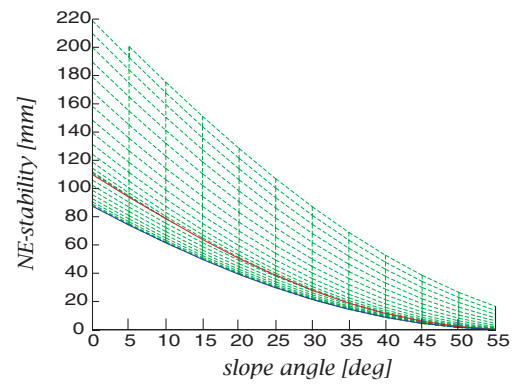


Fig. 9 Relationship between slope angle θ and NE-stability, in the case of $l_1 = 476$ [mm]

解析結果を示す．図 8 より， $\alpha = 30$ [deg] のときに S_{NE} の値が最小であり，最も不安定であることがわかる．このときのロボットの状態を図 5 の右に示す．また，斜度 θ と NE 安定余裕 S_{NE} の関係を図 9 に示す．図 9 において，一番下の青い実線で強調された曲線が $\alpha = 30$ [deg] のときの θ と S_{NE} の関係を表している．この曲線より， $\theta = 55$ [deg] 付近で $S_{NE} = 0$ [mm] となっていることがわかる．したがって， $L_1 = 340$ [mm]， $l_1 = 476$ [mm] の場合，踏破可能な最大斜度は，約 55 [deg] となる．

以上の解析結果より，脚部を本体よりも長くすることにより安定性が向上し，斜面踏破能力の向上につながる事がわかる．

3.2 安定性解析による最適化設計

図 6 と図 8 を比較すると，脚部を本体よりも長くすることにより， 180 [deg] $< \alpha \leq 360$ [deg] の姿勢（本体を持ち上げる姿勢）のときの安定性は向上するが， 0 [deg] $< \alpha \leq 180$ [deg] の姿勢（脚部を持ち上げる姿勢）のときの安定性は，ほとんど変化していないことがわかる．また，あまり脚部を長くしすぎると，旋回時に脚部が地面や障害物に接触するなど，走行性能の低下につながる恐れがあるため，脚部の長さはできるだけ短いほうが良いと言える．よって， 0 [deg] $< \alpha \leq 180$ [deg] における安定性の最小値 S_1 と 180 [deg] $< \alpha \leq 360$ [deg] における安定性の最小値 S_2 が一致するように脚部の長さ l_1 を決定すれば，コンパクトかつ高い安定性を持ったロボット

の設計が可能となる．

そこで， l_1 に対する S_1 ， S_2 を求め，その結果をグラフにしたものを図 10 に示す．ただし， S_1 ， S_2 の値は， $\theta = 20$ [deg] における α と S_{NE} の関係性から求めた．図 10 より， $l_1 = 425$ [mm] 付近で S_1 と S_2 の値が一致している．したがって，本ロボットにおける最適な脚部の長さは約 425 [mm] であるといえる．

4 走行実験

第 2 章で説明した機構と，第 3 章で行った安定性解析による最適化設計を取り入れることにより，面接触型移動ロボットを試作した．本節では，面接触型移動ロボットの基本動作実験ならびに屋外走行実験について述べる．

4.1 基本動作実験

まず面接触型移動ロボットの並進，旋回の動作実験を行った．並進移動に関しては，図 2 に示した動作手順に従って，本体と両サイドの脚部を交互に地面に接地させつつ，ロボット本体の並進移動が可能であることが確認できた．また，旋回動作についても，図 3 に示した動作手順に従ってターンテーブルを制御することで旋回が可能であることが確認できた．

次に，段差踏破実験を行った．本ロボットの段差踏破能力は，クランクの長さ由来するため，設計上は，最大で 80 [mm] の段差を乗り越えることが可能である．現実には，図 11 に示す程度の段差（ $40 \sim 60$ [mm]）であれば，問題な

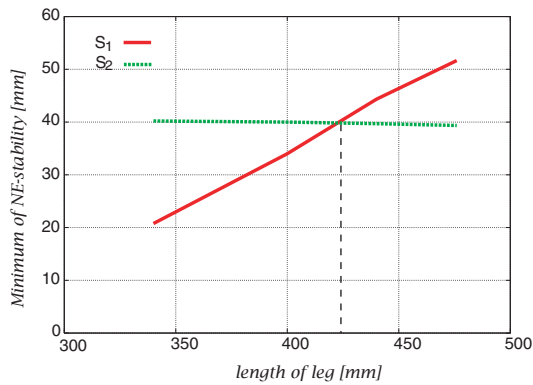


Fig. 10 Relationship between l_1 , S_1 and S_2

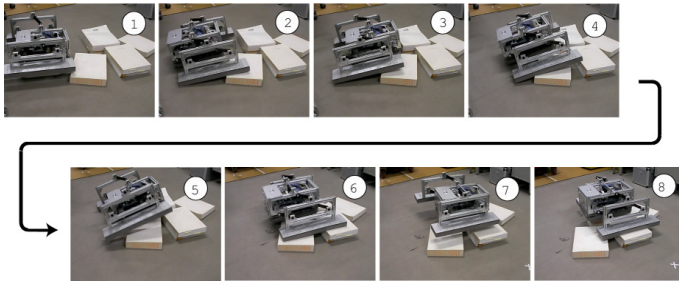


Fig. 11 Obstacle traverse

く踏破できることが確認された。

さらに、軟弱地盤の斜面走行実験を行った。この実験は、研究室にある豊浦砂（粒径の揃った粘性の低い砂）フィールドを $6[\text{deg}]$ 傾けたものを使用した。このフィールドにおいて、本ロボットは、全くスリップすることなく、安定した走行が可能であることが確認された。また、比較のため、本ロボットとほぼ同等のサイズ及び重量を持った車輪型移動ロボットとの、走行性能比較も行った。その結果、車輪型移動ロボットは、スリップの影響で、車輪径の約 $1/3$ の深さまで車輪が埋まり、走行が非常に困難となることが確認された。これにより、面接触型移動機構の有用性が、定性的に確認された。

4.2 屋外走行実験

実環境における提案機構の有用性を確認するため、雪斜面と砂山での走行実験を行った。ただし、このときの脚裏の接地面には、パドル形状を採用した。

雪斜面での実験の様子を図 12 左に示す。斜面の傾斜は $35\sim 40[\text{deg}]$ 程度であったが、転倒することなくこの斜面を踏破することができた。また、図 12 右に示すように、走行後の斜面にパドルの跡がはっきりと残っていることから、雪の斜面においては、ほとんどスリップせずに走行したことがわかる。

次に、砂山における走行実験の様子を図 13 左に示す。ここで用いた砂山の傾斜は約 $40[\text{deg}]$ であったが、雪斜面での実験と同様、転倒することなく踏破することができた。しかしながら、図 13 右に示すように、斜面上の砂が大きく崩壊してしまっていることから分かる通り、走行時、比較的大きなスリップを伴っていた。これより、軟弱地盤上で安定した走行を行うには、より牽引力を発揮する接地面形状の検討が必要であることがわかった。



Fig. 12 Traverse on snow-covered slope



Fig. 13 Traverse on sand dune

5 結言

本稿では、急斜面や軟弱地盤上の走行を目的とした、面接触型移動ロボットの設計・開発を行い、本ロボットの基本的な構成について紹介した。また、斜面走行時の安定性解析を行い、斜面踏破能力を検証すると同時に、脚部長さの最適なパラメータ設計を行った。さらに、実機を用いた走行実験を行い、急斜面や軟弱地盤において高い走行性能を有することを実証した。

今後は、実際の軟弱地盤上での探査活動を想定し、自己位置推定や周囲環境情報取得を目的としたセンサの搭載に加え、防塵・防水を施したロボットシステムの構築を行う予定である。また、テラメカニクスに基づいて、考案した機構と軟弱地盤との間に働く力学関係を考察し、牽引力モデルの構築及び接地面形状の検討を行う予定である。

文献

- [1] Wong, J.Y. : "Theory of Ground Vehicles", John Wiley & Sons, 1978
- [2] G.Ishigami, A.Miwa, K.Nagatani and K.Yoshida: "Terramechanics - Based Model for Steering Maneuver of Planetary Exploration Rovers on Loose Soil", The Journal of Field Robotics, Volume 24, Issue 3, pp.233-250, 2007
- [3] 飯塚浩二郎, 國井康晴, 久保田孝: "弾性特性を考慮した軟弱砂地盤走行のための月面探査車輪型ロボットの車輪形状検討" 日本機械学会論文集, vol.74, No.748, pp.136-141, 2008
- [4] S.Wakabayashi, H.Sato, S.Nishida : "Design and mobility evaluation of tracked lunar vehicle", Journal of Terramechanics, 2008
- [5] A.Schiele, J.Romstedt, C.Lee, H.Henkel, S.Klinkner, R.Bertrand, R.Rieder, R.Gellert, G.Klingelhofer, B.Bernhardt and H.Michaelis : "Nanokhod exploration rover - A rugged rover suited for small, low-cost, planetary lander mission", IEEE Robotics and Automation Magazine, Volume 15, Issue 2, Pages 96-107, June 2008
- [6] 芦葉清三郎: "機械運動機構", 技報堂出版株式会社, 1987
- [7] 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