

ラグの垂直貫入機構を有する軟弱地盤走行用車輪の開発

Development and Evaluation of a Wheel with Verticality-penetration-lug Mechanism

秋山 健, 正 永谷 圭司, 正 吉田 和哉 (東北大)

Ken AKIYAMA (Tohoku Univ.), akiyama@astro.mech.tohoku.ac.jp
Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

Robotic explorations on lunar or planet surfaces have a possibility to discover important science information. However, such surface is typically covered with loose soil, and it is very difficult for mobile robots to traverse in a wide area. To increase traction, a conventional wheel equips lugs. However, it deforms soil when lugs enter/exit the soil, and it causes sinkage of wheels that decreases traversability. Therefore, in this research, we have developed a verticality-penetration-lug mechanism to prevent wheel slippage. In this paper, we introduce the mechanism, and report the result of performance test using these wheels.

Key Words : Wheel robot, Loose soil, Verticality-penetration mechanism

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。特に移動ロボット(ローバー)による地表面の移動探査は、広範囲にわたる探査、地質サンプルの採取が可能となるため、多くの重要な発見が得られると期待されている。しかし、月面や惑星表面は非常に細かい粒子で覆われた軟弱地盤であると想定され、探査ミッションを行う上で、移動に関するハードルが非常に高い環境である。

そこで我々の研究室では、軟弱地盤走行を目的とした移動ロボットを開発するために、車輪型ロボットや、クローラ型ロボットを用いたフィールド試験を行ってきた [1-3]。これらのフィールド試験を通して、軟弱地盤を走行するロボットには、推進力を得るためにラグが有効であることが分かった。しかし、車輪表面に放射状に取り付けたラグは、図 1 に示すように、地面への挿入時、および脱出時に地盤を崩すという問題があった。これは、クローラ型移動ロボットにも共通して見られた問題であり、特に、ラグの挿入時に前方の地盤を崩すことで車輪が沈下し、スリップを誘発するという問題があった。

そこで、本研究では、ラグを地面に対して垂直に貫入し、地盤を崩さずに走行可能な車輪の開発を行った。本稿では、開発したラグの垂直貫入機構について紹介し、軟弱土壌を敷き詰めたフィールドにて行った評価試験について報告する。

2 垂直貫入機構

従来のラグ車輪は、図 1 に示すように、地面への挿入時、および脱出時に地盤を崩すという問題があった。地盤を崩さずに推進力を得る理想的なラグの運動は、図 2 に示すように、土壌に垂直に貫入する、土壌を押し除ける、土壌から垂直に引き抜く、の 3 つの連続した動作からなると考えられる。本研究では、この理想的なラグの運動を実現するために、車輪の回転と同期してラグの角度を一定に保ち、土壌への垂直な貫入を実現する機構を開発した。

この垂直貫入機構は、図 3(a) に示すような遊星歯車機構を原型としたものであり、太陽歯車、遊星歯車、外歯車から構成される。太陽歯車と外歯車の歯数は等しく、外歯車は、太陽歯車と等速回転する。また、図 3(b) の断面図に示すように、車輪の回転軸と、太陽歯車の回転軸はそれぞれ独立しており、太陽歯車は、車輪の回転によらず任意の運動を行うことができる。遊星歯車、外歯車は車輪側面に固

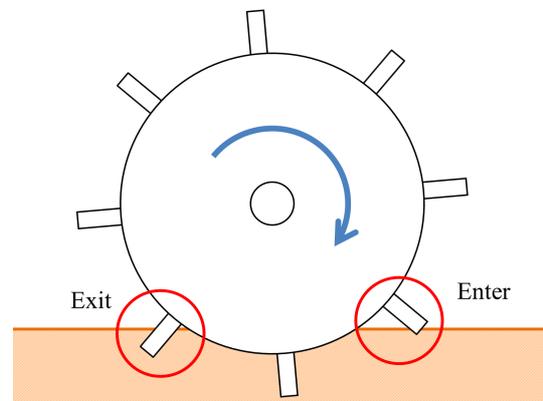


Fig. 1 Locomotion of lug wheel

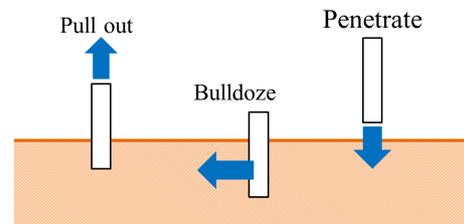
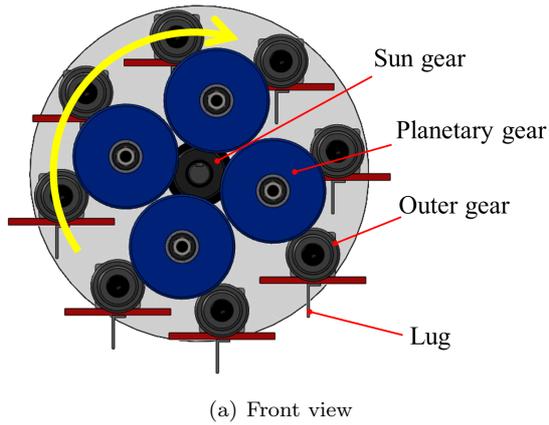


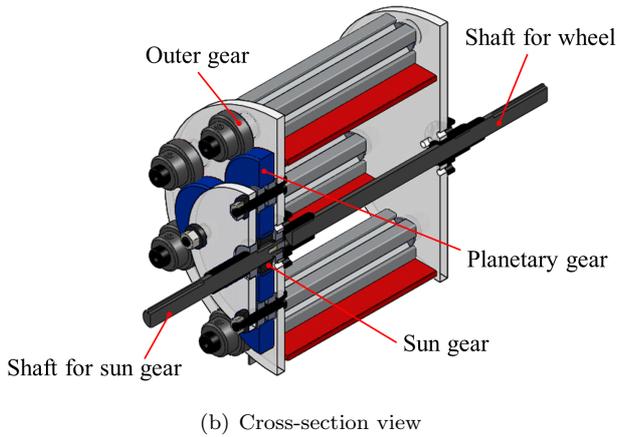
Fig. 2 Locomotion of verticality-penetration-lug

定され、外歯車にはラグが取り付けられている。したがって、車輪の回転に伴って、円周上に取り付けられた外歯車、遊星歯車は太陽歯車の周囲を公転運動する。このとき、太陽歯車が車輪の回転によらず一定位置を保つことにより、外歯車は自転せずに公転運動を行うため、外歯車に取り付けられたラグは、車輪の回転と同期して角度を一定に保つことができる。この機構により、ラグを土壌に垂直に貫入、ならびに引き抜くことが可能となり、図 2 に示すような、ラグの理想的な運動が実現される。

図 4 に、開発した垂直貫入ラグ車輪を示す。車輪の直径は 150[mm]、外歯車は円周 123.8[mm] の円周上に 45[deg] 毎に 8 個位置しており、それぞれに、長さ 15[mm]、幅 100[mm] のラグが取り付けられている。また、図 3 に示すように、ラグは 46×100[mm] の平板に取り付けてあり、軟弱地盤を走行する際には、この平板が地面に接地する。この平板も



(a) Front view



(b) Cross-section view

Fig. 3 Vertically-penetration-lug mechanism

外歯車に固定されているため、平板は地面と常に平行を保つことができる。なお、太陽歯車を $180[\text{deg}]$ 回転させるとラグが車輪内部に格納でき、ラグが平滑面を走行する際の妨げになることはない。

3 垂直貫入ラグ車輪の特性

3.1 移動速度

垂直貫入ラグ車輪は、遊星歯車機構を用いて車輪の回転運動を、ラグの平行移動に変換しているため、ラグの円周上の位置によって、その並進方向の速度は変化する。土壌と、平板との間にスリップが生じないとすると、車輪による移動速度は、ラグの並進方向の速度と一致する。

図 5 に示すように、ラグが車輪最下部にある位置を基準とし、車輪の回転角を ϕ 、車輪が回転し 2 枚の平板が接地するときの開き角を α 、遊星機構の外歯車の公転直径を $2R$ 、車輪の回転速度を ω とすると、車輪の移動速度 V_{vpl} は、

$$V_{vpl} = R \omega \cos \phi \quad \left(-\frac{\alpha}{2} \leq \phi \leq \frac{\alpha}{2} \right) \quad (1)$$

となる。したがって、垂直貫入ラグ車輪が十分な距離を走行したときの平均速度 $\overline{V_{vpl}}$ は次式で示される。

$$\overline{V_{vpl}} = \frac{1}{\alpha} \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} R \omega \cos \phi \, d\phi \quad (2)$$

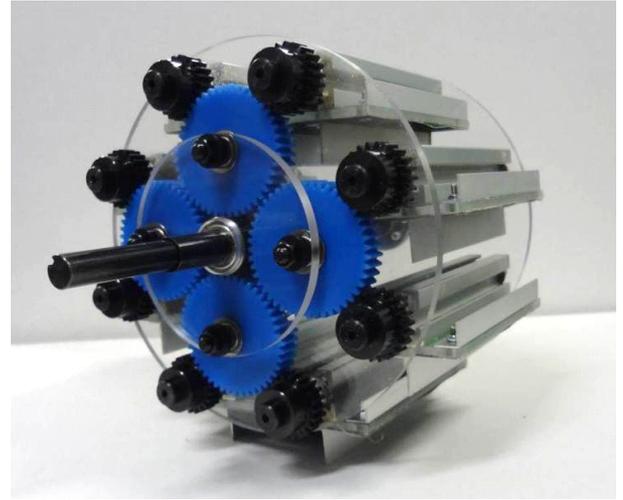


Fig. 4 An overview of vertically-penetration-lug wheel

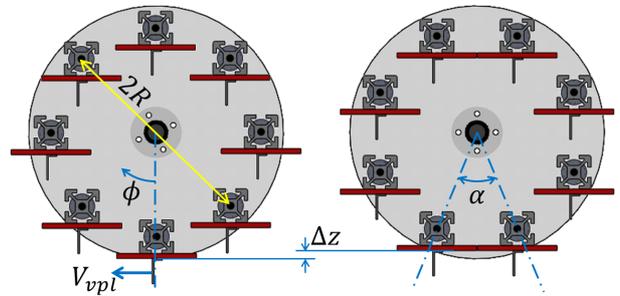


Fig. 5 Parameter of vertically-penetration-lug wheel

また、2 枚の平板が接地するときの開き角 α は、外歯車の個数を m とすると、 $360/m [\text{deg}]$ である。

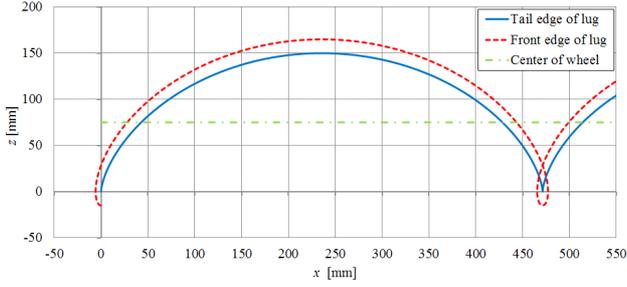
なお、今回開発したラグ車輪 ($2R=123.8[\text{mm}]$, $m=8$) において、車輪回転数を $2.5[\text{rpm}]$ としたときの平均速度 $\overline{V_{vpl}}$ は $1.61[\text{cm/s}]$ となる。

3.2 ラグ軌跡

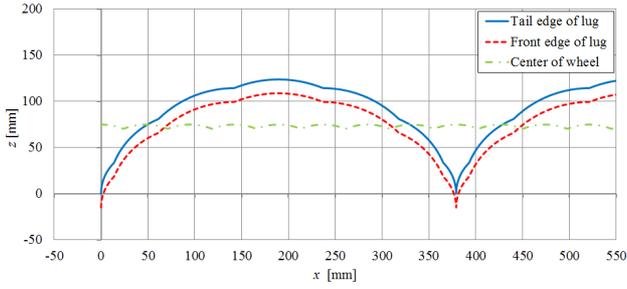
従来のラグ車輪 (図 1) と、開発した垂直貫入ラグ車輪 (図 4) とで決定的に異なるのがラグの軌跡である。図 6 に、従来のラグ車輪、ならびに垂直貫入ラグ車輪がスリップせずに走行する場合のラグ 1 本の軌跡を示す。なお、両者ともラグ長さ $15[\text{mm}]$ 、本数は 8 本であり、車輪直径は $150[\text{mm}]$ である。図 6 において、ラグが車輪最下部に位置するところを原点とし、 x 軸は移動変位、 z 軸は接地面からの距離を示している。また、実線はラグの根元、破線はラグ先端、一点鎖線は車輪中心を示している。

図 6(a) より、従来のラグ車輪では、ラグが土壌と接触している間に地面を掘る動作を行うことが分かる。これにより、地盤を崩壊させスリップが生じると考えられる。一方、垂直貫入ラグ車輪では図 6(b) に示すように、ラグは接地面に対してほぼ垂直に貫入し、引き抜かれていることが確認できる。

また、車輪が 1 回転するのに要する時間を T とし、1 本ラグが土壌と接触している時間 T_b の割合 T_b/T は、従来のラグ車輪は 0.013 なのに対し、垂直貫入ラグ車輪は 0.125 である。したがって、垂直貫入ラグ車輪のラグは、土壌を



(a) Conventional lug wheel



(b) Verticality-penetration-lug wheel

Fig. 6 Trajectory of lug's locomotion

押しのける力（ブルドーリングフォース）を効率的に発生させることができると考えられる。

また、図 6(b) に示すように、垂直貫入ラグ車輪では車輪の回転に伴って、その回転中心が上下動を繰り返していることが確認できる。これは、図 5 に示すように、車輪が回転するとともに、車輪中心から、地面に接している平板までの距離が変化するためであり、その最大変位 Δz は、

$$\Delta z = R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \quad (3)$$

となる。なお、今回開発した垂直貫入ラグ車輪では、 Δz は 4.7[mm] である。

4 走行性能評価

ここでは、開発した垂直貫入ラグ車輪の走行性能を評価するために、軟弱土壌を敷き詰めたフィールドにて行った評価試験について述べる。

4.1 評価指標

軟弱地盤を走行する車輪型ロボットに求められる能力として、斜面での低スリップな走行が挙げられる。そこで、本研究ではロボットが斜面を走行する際のスリップ率を評価指標として採用した。スリップ率 S は、

$$\begin{aligned} S &= \frac{v_{ref} - v}{v_{ref}} \\ &= 1 - \frac{v}{v_{ref}} \end{aligned} \quad (4)$$

で定義される [4]。(4) 式において、 v_{ref} はロボットの指定速度、 v はロボットの実際の走行速度である。ロボットがスリップせずに走行するときのスリップ率は 0 であり、完

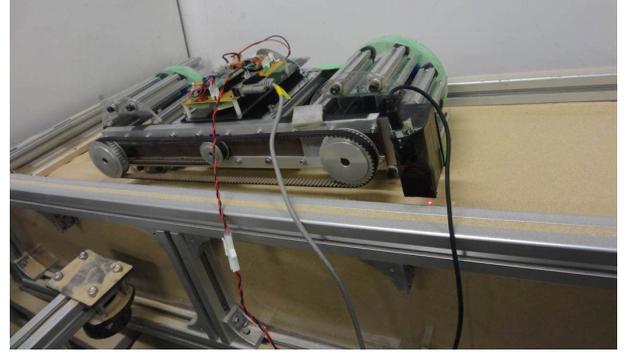


Fig. 7 Slope traveling test



Fig. 8 Two-wheeled rover testbed (8 lugs)

全にスリップして移動できない時のスリップ率は 1 である。したがって、スリップ率 S の値が小さいほど走行性能が優れていることを意味する。

4.2 試験条件

評価試験には、軟弱土壌である豊浦標準砂を敷き詰めた試験フィールドを用いた。この試験フィールドは手動で斜度を変更できる。今回の試験時には 0[deg] から、4[deg] 毎に斜度を変更し、それぞれの斜度で 3 回ずつテストベッドの直登走行試験を行った。

テストベッドには垂直貫入ラグ車輪を 2 つ取り付けた、2 輪型ローバーテストベッドを採用した。図 7 に試験フィールドとテストベッドを示す。このテストベッドの重量は 7[kg]、前後の車輪の軸間距離は 400[mm] であり、前後の車輪でラグの位相は揃えてある。また、テストベッドには、自己位置推定装置 [5] が搭載されており、テストベッドの移動速度をオンラインで測定可能である。これにより、(4) 式を用いてスリップ率が計算できる。なお、指定速度 v_{ref} は (2) 式で示される平均速度 \bar{V}_{vpl} を用いた。

また、走行性能を比較するために、従来のラグ車輪を取り付けたテストベッド (図 8) を用いて比較試験を行った。両テストベッドの重量は 7[kg] と等しく、ラグの大きさ (長さ 15[mm]、幅 100[m]、本数 (8 本) は統一した。また、車輪の回転数は 2.5[rpm] で一定とした。

4.3 試験結果

図 9 に、試験フィールドの斜度に対するテストベッドのスリップ率を示す。なお、垂直貫入ラグ車輪は 12[deg] から 16[deg] まで 1[deg] 毎に試験を行った。

図 9 より、垂直貫入ラグ車輪のスリップ率が、従来のラグ車輪と比べて小さいことが分かる。従来のラグ車輪では、

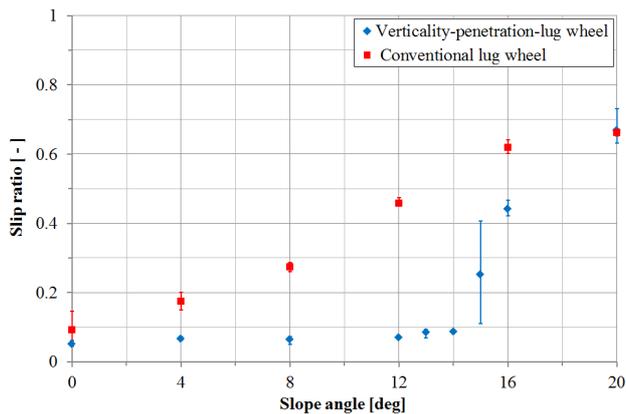


Fig. 9 Slope angle vs. slip ratio

斜度が大きくなるにしたがって、スリップ率は線形的に増加しているが、垂直貫入ラグ車輪では斜度 14[deg] まで、スリップ率 0.1 以下の低スリップ走行を実現している。垂直貫入ラグ車輪は、走行中も常に 1 本以上のラグが土壤に貫入している状態にあるため、接地する平板に働く摩擦力と、ラグのブルドーzingフォースによって、テストベッドの荷重を支えることのできる条件であれば、低スリップの走行が実現できると考えられる。斜度が 16[deg] 以上の場合には、増大した摩擦力とブルドーzingフォースにより土壤が破壊し、この破壊領域に次のラグが貫入するために十分な推進力を得ることができず、大きなスリップが生じたと思われる。この土壤の破壊が発生する限界は、斜度 15[deg] 付近に存在すると考えられ、テストベッドが斜度 15[deg] の斜面を走行する際には、低スリップ走行と高スリップ走行の両方の現象が見られた。

また、従来のラグ車輪は、ラグが地面と接する際に土壤を掘る動作を行うため、車輪前方を崩し、さらに車輪後方に土壤を積層させ、車輪が沈下しスリップが生じた。一方、垂直貫入ラグ車輪では、図 10 に示すテストベッドの走行軌跡より、ラグが貫入された跡がほぼ等間隔に並んでおり、テストベッドがほとんど沈下せず走行したことが確認できる。垂直貫入ラグ車輪では、ラグを土壤に垂直に貫入し、垂直に引き抜くことができるため、土壤の破壊を極力防ぎながらの走行が可能と考えられる。

以上のことより、垂直貫入ラグ車輪の走行性能は、従来のラグ車輪と比較して優れており、軟弱地盤において、ラグの垂直貫入機構は有効であることが分かる。

しかし、今回開発した垂直貫入ラグ車輪は機構の特性上、車輪の前後に、砂が侵入する空間が存在する。そのため、高斜度の走行において土壤を破壊した際に、その空間に砂が流れ込み、車輪が沈下するという問題が発生した。今後、この車輪の改良を行う際には、砂の侵入を防ぐ工夫が必要となる。

5 結言

本研究では、従来のラグ車輪で見られたようなラグの地面への挿入時、および脱出時に地盤を崩すといった問題を解消し、ラグの理想的な運動である土壤に垂直に貫入する、土壤を押しつける、土壤から垂直に引き抜く、といった 3 つの連続した動作を実現する、ラグの垂直貫入機構を開発した。

本稿では、遊星歯車機構を原型としたラグの垂直貫入機



Fig. 10 Trajectory of testbed (verticality-penetration-lug wheel, slope angle is 12[deg])

構について紹介し、垂直貫入ラグ車輪の特性について説明した。また、軟弱土壤を用いたフィールドを用いて走行試験を行い垂直貫入ラグ車輪の性能を評価した。評価試験より、垂直貫入ラグ車輪は、従来のラグ車輪と比較して低スリップの走行が可能であり、ラグの垂直貫入機構が有効であることを示した。

文献

- [1] 木下 宏晃, 多田 隼 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 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, 1O2-5, 2010-12
- [2] 伊藤 毅, 須藤 真琢, 永谷 圭司, 吉田 和哉, “ 軟弱地盤での大幅な走行性能向上を目指した大径車輪型ロボットの開発とフィールド実験 ”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2011, 1P1-K04, 2011-05
- [3] 秋山 健, 永谷 圭司, 吉田 和哉, 西田 信一郎, “ 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 ”, 第 12 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 SI2011, 1N1-1, 2011-12
- [4] Wong, J. Y., “ Theory of Ground Vehicles ”, John Wiley & Sons, 1978
- [5] Isaku Nagai, Keigo Watanabe, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, “ Noncontact Position Estimation Device with Optical Sensor and Laser Sources for Mobile Robots Traversing Slippery Terrains ”, 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3422-3427, 2010-10