

# アクティブリンクを有する菱形車輪配置惑星探査車両の開発

## Development of a Planetary Exploration Vehicle with a Rhomboid Wheel Configuration and Active Link

知能機械工学コース

機械システム制御研究室 1275025 中村 響

### 1. 緒言

惑星探査において、車輪型ローバーはその構造の単純さと軽量性から広く採用されている。しかし、軟弱地盤や不整地での走行、スタック脱出には依然として課題が存在する。特に、火星や月のような不整地では、車輪が沈下したり障害物に引っかかることが多く、これが走行性能を大きく制約している。例えば、NASA の Opportunity ローバーは火星での砂地に沈下し、脱出に多くの時間を要した<sup>(1)</sup>。このような問題を解決するためには、従来の車輪型ローバーに能動的な機構を組み合わせたことが求められている。

本研究では、アクティブリンクを搭載した菱形車輪配置ローバーを提案する。アクティブリンクは、地形や環境に応じて自動的に角度を調整する機構を持ち、軟弱地盤や不整地でも安定した走行を可能にする。例えば、アポロ計画での月面探査では、車両が砂に沈む問題があったが、アクティブリンクを使用することで、スタック脱出能力の向上が期待される。

本研究の目的は、この新たなローバー設計を実際に製作し、軟弱地盤や不整地での走行性能を実験的に検証することである。これにより、惑星探査ミッションにおいて、より高い走破性とスタック脱出能力を実現することを目指す。

### 2. 提案するローバー

本研究で提案するローバーを図 1、仕様を表 1 に示す。本ローバーは、ベース部に固定された 3 つの車輪と、後方に配置されたアクティブリンクによって接続された 1 つの車輪を持つ、菱形配置の 4 輪独立駆動式ローバーである。菱形車輪配置は、構造が簡素で、軽量である点が特徴である。

アクティブリンク機構は、障害物や斜面などの地形に応じて車両の姿勢を調整する能動的な仕組みであり、リンクをピッチ方向に回転させることができる。このアクティブリンクは、車輪が遭遇する地形の変化に適応するために動作し、柔軟な走行を支援する。また、この機構の駆動は、1 つのサーボモータによって行われるため、消費電力が非常に低く、軽量でコンパクトな構造を保ちながら、柔軟な走行を実現することができる。

本実験機では、Arduino UNO を中心に制御システムを構築しており、主に 4 つの DC モータの駆動信号およびサーボモータの制御信号の送信を担当している。

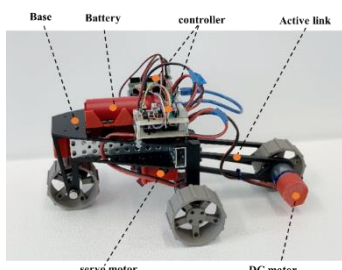


Fig.1 Prototype of Planetary Exploration Rover

Table.1 Dimension and Specification

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Weight              | 2.4 kg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Dimension           | 240.0(H)×484.0(L)×294.0(W)mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Material            | Aluminum, POM, ABS, NC nylon                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Sub-system          | Specification                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Running system      | Four wheel independent drive<br>Wheel diameter : 76 [mm]<br>Wheel width : 40 [mm]<br>Distance between wheels : 162 [mm]<br>Lug length : 8 [mm]<br>Lug Number : 8<br>Lug Thickness : 4 [mm]<br>Max speed : 0.08 [m/s]<br><b>Actuator</b><br>DC motor : TSUKASA TG-05R-SG-300-HA, 12V×4<br>Servo motor : KONDO KRS-6003HV<br>Max Active link speed : 0.44 [sec/60°]<br>Movable range of Active link : 13.5° min~67.5° ~ max~67.5° |
| Power supply system | <b>Battery</b><br>Li-po battery<br>Voltage:11.1[V] 3cells<br>Capacity : 1800 [mAh]<br>Mobile battery<br>Voltage : 5 [V]<br>Capacity : 6000 [mAh]                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Processing system   | Control board : Arduino UNO<br>Motor driver : TOSHIBA TB6612FNG                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Sensor              | 6-axis sensor : MPU-6050<br>Filter : Madgwick filter                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

### 3. 軟弱地盤における走行実験

#### 3.1 評価指標

本研究では、実験機の登坂性能を評価するためにスリップ率を用いた。軟弱地盤上での走行時には、車輪と地面との間で摩擦が発生し、その結果、車輪の周速度と車体の移動速度に差が生じる。この現象は、車両の走行において重要な要因であり、特に車輪の滑りや地盤の変形が走行性能に与える影響を評価するために、スリップ率を測定することが有効である。

スリップ率  $S$  は、車輪の周速度  $V_w$  と車体の移動速度  $V_v$  を用いて以下のように定義される。

$$S = \frac{V_w - V_v}{V_v} \quad (1)$$

ここで、 $V_w$  は車輪の周速度、 $V_v$  は車体の実際の移動速度である。走行中の車輪回転速度および車体移動速度はモーションキャプチャシステムを用いて測定した。

#### 3.2 実験概要

実験は、惑星環境を模擬した条件下で行われ、実験場のレイアウトを図 2 に示す。実験場は室内に設置され、寸法は 192[cm]×97[cm]の範囲で、表面には細かい砂を均等に敷き詰めた。使用した砂は珪砂 6 号（粒径 0.2[mm]~0.3[mm]）であり、この粒径範囲は惑星探査における軟弱地盤に類似した条

件を再現するために選定した。



Fig.2 Prototype of Planetary Exploration Rover

### 3.3 登坂実験

アクティブリンクを固定した状態で、平地、5度斜面、および10度斜面における登坂実験を実施した。各条件でローバーを一定の駆動力で走行させ、走行時間に対するスリップ率の変化を求めた。図3に、平地、5度斜面、および10度斜面におけるスリップ率の時間変化を示す。実験結果より、平地でのスリップ率は10%以内であり、5度斜面では、30%以内に収まっている。軟弱地盤でのスリップ率は20%~30%は許容範囲内であるため、アクティブリンクを用いたスタック回避動作が必要ないことが確認された。一方、10度斜面では、初動時のスリップ率が20%であり、最終的には60%を超え、車両の前進が著しく阻害される状態に至ることが確認された。この現象は、車両の摩擦力の低下や沈下による車輪の過度な圧力が原因であると考えられる。したがって、10度斜面では、アクティブリンクを用いたスタック回避動作が必要である。

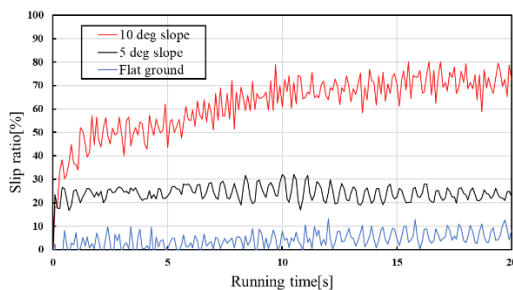


Fig.3 Transition of Slip Ratio in Flat and Inclined

#### Terrains

上記の実験では、10度の斜面を登坂する際に車両のスリップ率が初動から約20%に達し、最終的には60%を超えて車両の前進が著しく阻害されることが確認された。この課題を解決するために、アクティブリンクの指定角度を0°、2°、および10°に設定し、10度斜面における登坂時のスリップ率の時間変化を観察する実験を行った。

図4に、アクティブリンクの指定角度0°、2°および10°の時に、10度斜面の登坂時のスリップ率の時間変化を示す。実験結果を比較すると、指定角度0°および2°におけるスリップ率の変化は非常に類似しており、特にスリップ率の増加パターンが似ていることが確認された。ただし、全体的に見ると、指定角度2°の方がわずかにスリップ率が低い傾向にあり、16[s]~20[s]では0[deg]よりも若干安定した挙動を示している。これに対して、指定角度0°と10°を比較すると、10[deg]ではスリップ率が増加する傾向が見られ、特に、時刻0[s]~5[s]の間に約15%程度のスリップ率の上昇が観測された。これは、10°の角度設定によって車輪の地面との接触角度が大きくなり、摩擦特性に変化を及ぼした可能性が示唆される。

以上の結果より、10度斜面では、アクティブリンクを用い

た他のスタック回避動作が必要である。

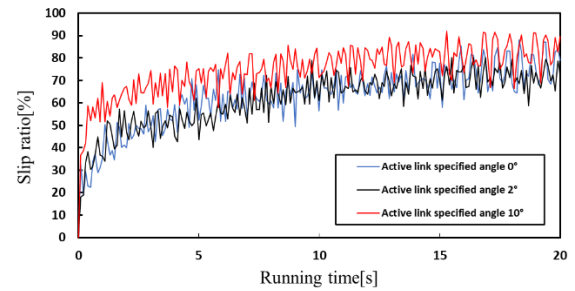


Fig.4 Time Evolution of Slip Ratio During Climbing

#### at Specified Angles of 0°, 2°, and 10°

次は、アクティブリンクを用いたオープンループ制御に基づくスリップ率の改善を目的とし、10度の傾斜面での登坂実験を実施した。実験においては、アクティブリンクを段階的に地面に押し付けることで、駆動輪の接地圧を調整し、スリップ率の低減を試みた。図5に、アクティブリンクを段階的に地面に押し付ける場合の走行時間に対するスリップ率を示している。アクティブリンクを段階的に地面に押し付ける操作を行った結果、予想に反してスリップ率が増加したことが観察された。具体的には、アクティブリンクを駆動することで、アクティブリンクを固定して走行する場合と比較してスリップ率が増加したことが図8により明らかとなった。30秒間の平均スリップ率は65.3%から68.7%に増加し、3.4%の増加を示した。この結果の原因として、アクティブリンク自体が軟弱地盤に沈下することにより走行抵抗が増加したことが挙げられる。沈下による地面との接触面積の増加が摩擦を引き起こし、その結果、駆動力の一部がスリップに変換されることが、スリップ率の増加を招いたと考えられる。

この結果を踏まえ、今後の実験では、アクティブリンクの駆動力の制御方法を改良し、地盤に対する沈下の影響を軽減するための対策を検討する必要がある。

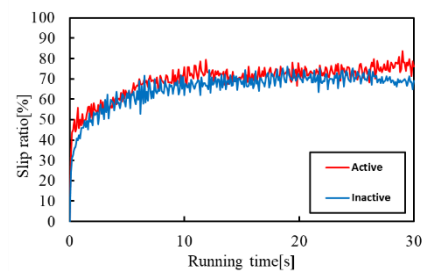


Fig.5 Transition of slip ratio (pattern1)

### 4. 結言

本研究では、アクティブリンクを用いた不整地走破機構を提案し、登坂実験を行った。今後は、段差乗り越えの実験的に評価し、本機構の有用性を検証する。

### 文献

- (1) Aravind Seeni, Bernd Schafer, Bernhard Revele, Nikolai Tolyarenko. "Robot Mobility Concepts for Extraterrestrial Surface Exploration". IEEE Aerospace Conference, 2008.
- (2) 村上遼 "アクティブサスペンションを有した菱形配置車輪型ローバーの不整地走破性能" 平成26年度 高知工科大学 修士論文