

# 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検討

## Proposal of Rhombus Four Wheel Type Rover with Active Link

知能機械工学コース

機械・航空システム制御研究室 1235080 加藤 草太

### 1. 緒言

現在までに、惑星表面探査を行ったローバーは、NASAの火星探査ミッションで使用された「Sojourner」、「Spirit」、「Opportunity」が挙げられる<sup>(1)</sup>。「Sojourner」は火星表面の移動探査の有用性を証明し、「Spirit」、「Opportunity」は土壌や岩石の組成分析、天体環境の観測等、様々な科学的成果を上げた。しかし、これらのローバーは火星を自由に走破することは出来ず、厳しい不整地を避けるための遠回りや、軟弱地盤に車輪をとられて脱出不能のために、ミッションの中止などがあった。今後のローバーには、厳しい不整地に普遍的に適用できる新しい走破機構や、スタック脱出能力が要求される。上記のローバーの走行部には、6つの独立駆動車輪の他、「Locker-bogie」と呼ばれる、路面の凸凹の衝撃を受動的に吸収し、車体の姿勢外乱を少なくするサスペンションシステムを有している<sup>(2)</sup>。この受動機構はエネルギー効率と、信頼性の観点から採用された。しかし近年では、太陽電池および原子力電池による電源系の強化、モータ、材料等の技術革新により、走破性の高い能動機構のサスペンションが積極的に研究されている。本研究では機体の簡素化と軽量化に着目し、アクティブリンクを用いた菱形車輪配置惑星探査車両を提案、製作し、不整地において走行可能であることを実験的に検証する。

### 2. 提案するローバー

#### 2.1 機体の特徴

図1に提案するローバーを示す。このローバーは、ベースに固定される3輪と、後方のアクティブリンクによって繋がる1輪から成る菱形に車輪を配置した4輪独立駆動ローバーである。菱形車輪配置は車軸を3つ有する車両の中で車輪数が最小で、構造が簡素かつ軽量である。アクティブリンクとは、障害物や斜面に応じてリンクをピッチ方向に回転させる能動的な機構である。アクティブリンクの駆動はサーボモータ1つで行う消費電力が少ない能動機構である。

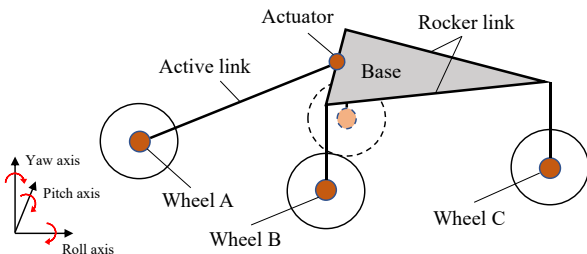


Fig.1 Model of Rover

#### 2.2 提案する走行機構

図2(a)(b)に、一様な斜面における2軸4輪車両と、アクティブリンクを有する菱形車輪配置車両の登坂を側面からみたモデルを示す。2軸4輪車両は負荷が左右対称となるため、2輪モデルとして考察する。

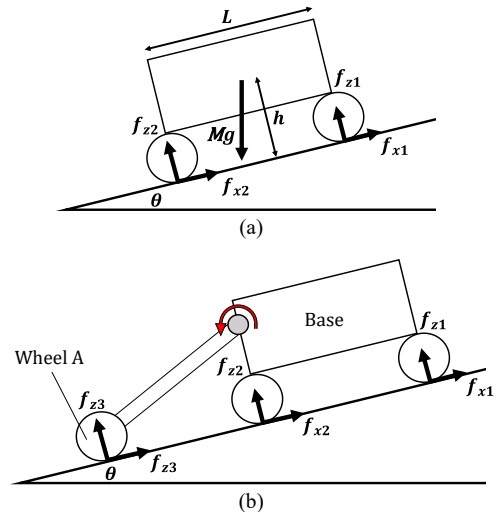


Fig.2 Force acting on rover

図2(a)より、2軸4輪車両の斜面登坂時における前輪接地荷重 $f_{z1}$ 、後輪接地荷重 $f_{z2}$ は以下のように表すことができる。

$$f_{z1} = \frac{MgL \cos \theta - 2Mgh \sin \theta}{2L} \quad (1.1)$$

$$f_{z2} = \frac{MgL \cos \theta + 2Mgh \sin \theta}{2L} \quad (1.2)$$

式(1.1), (1.2)より

$$f_{z1} \leq f_{z2} \quad (1.3)$$

上式から、後輪は前輪よりも接地荷重が大きいことが分かる。よって、軟弱地盤における登坂では、後輪が沈下することで走行抵抗が大きくなることや、前輪の接地荷重が小さくなることで駆動力が発揮できないという問題が生じる。対して、図2(b)に示す機構は、アクティブリンクで車輪Aを地面に押し付けることにより、車輪B、車輪Cの接地荷重を変化させることができる。これにより、前述した軟弱斜面における接地荷重移動の問題点を解決する。

#### 2.3 小型実験機の製作

本研究で製作した惑星探査ローバーの実験機を図3に示す。実験機の重量は2.4 kg、サイズは170.0 mm(H)×404.0 mm(L)×294.0 mm(W)、車輪直径は76 mm、幅36 mm(ラグ長さ2 mm、幅5 mm)である。アクティブリンクの駆動用サーボモータは軸保持力を設定することができる。図4に、サーボモータの指定角度に対する各軸保持力の後輪接地荷重を示す。図4より、指定角度が大きくなるにしたがって、接地荷重は比例的に増加していることが分かる。軸保持力はバネの弾性係数とみなすことができ、軸保持力を適切に設定することで、路面の凹凸による衝撃を吸収することが可能である。

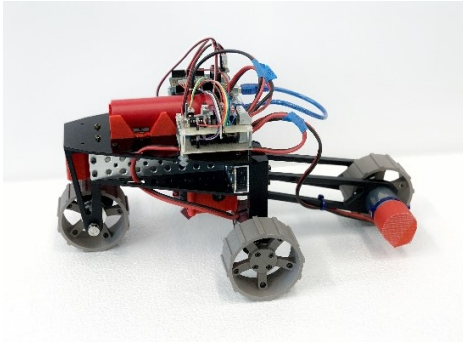


Fig.3 Prototype of Planetary Exploration Rover

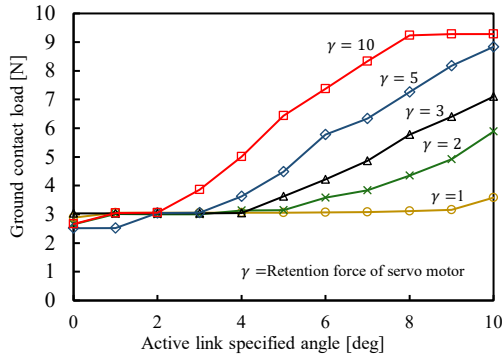


Fig.4 Effect of retention force on ground contact load (rear wheel)

### 3. 軟弱地盤における走行実験

#### 3.1 評価指標

実験機の登坂性能評価にはスリップ率を用いた。スリップ率 $S$ は車輪周速度 $V_w$ 、車体移動速度 $V_v$ を用いて

$$S = \frac{V_w - V_v}{V_w} \times 100 \quad (3.1)$$

で定義される。スリップ率が100%の場合、滑りや地盤の変形により推力が得られず車体が移動できないことを意味する。したがって、スリップ率が小さいほど走行性能が高いと考える。以下の実験では、車輪周速度および車体移動速度をモーションキャプチャで測定し、スリップ率を算出した。

#### 3.2 実験概要

走行実験は、惑星環境を模した細かい砂(粒径 0.2 mm ~ 0.3 mm, 珪砂 6 号)を敷き詰めた実験場を用いた。

始めに、走行性能を比較するため、アクティブリンクを固定した場合の平地走行実験および登坂実験を行った。全ての車輪が同一平面状に並ぶ状態を基準として、1 deg 毎に地面方向へアクティブリンク指定角度を変更し、各角度で5回ずつ20秒間のスリップ率を測定した。

次に、オープンループ制御により、アクティブリンクを周期的に上下させることで車体姿勢の修正を行い、30秒間のスリップ率を測定した。

#### 3.3 実験結果

図5に、平地におけるアクティブリンク指定角度に対する平均スリップ率を示す。図5より、平均スリップ率はアクティブリンク指定角度3 degで最も低い値となっている。このとき全ての車輪の駆動力が最もバランスよく発揮できていると考えられる。アクティブリンク指定角度5 deg以上では角度が大きくなるにしたがって平均スリップ率が増加していることから、接地荷重の偏りが大きいほどスリップ率が増加することが分かる。

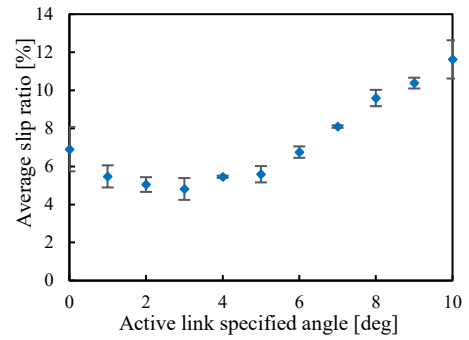


Fig.5 Average slip ratio at each active link angle (Flat ground)

図6に、平地、5度斜面、10度斜面における走行時間に対するスリップ率を示す。図6より、平地と5度斜面は12s以降でスリップ率の波形が類似していることが分かる。この波形の周期は、ラグが地面に貫入する間隔(0.5 s)と一致することから、ラグによる推力変化の影響だと考えられる。対して、10度斜面では波形が異なるため、同時に2つ以上のラグが地面に貫入し、車輪が大きく沈下していると考えられる。10度斜面では車輪が大きく沈下し、スリップ率が60%を超えることから、アクティブリンクによるスタック回避動作が必要である。

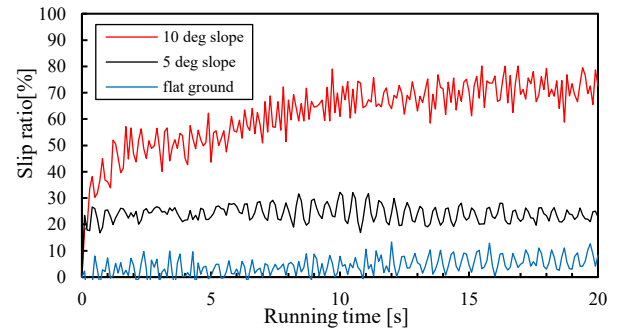


Fig.6 Transition of slip ratio

図7および図8、図9に、10度斜面登坂における、走行時間に対するピッチ方向の車体姿勢およびアクティブリンクの指定角度、スリップ率を示す。図7、図8に示すように、後方に傾く車体を押し上げるように、アクティブリンクを周期的に駆動させることで、車体姿勢の修正を行った。その結果、図9より、走行開始から30秒間の平均スリップ率は、アクティブリンク固定の場合で65.3%、アクティブリンクを駆動した場合で62.0%となり、3.3%のスリップ率の低減に成功した。また、18秒以降の定常状態では、70.2%から63.3%となり、6.9%の低スリップ走行を実現している。

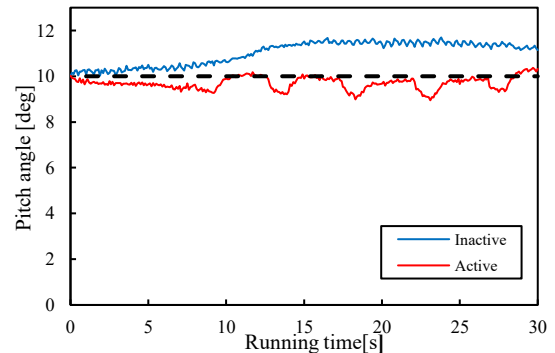


Fig.7 Transition of pitch angle

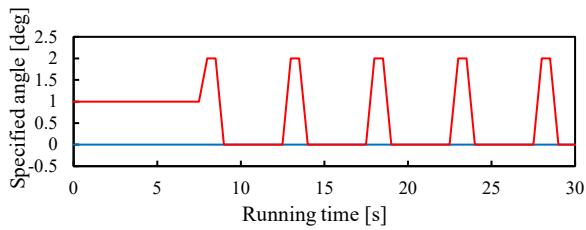


Fig.8 Specified angle of active link

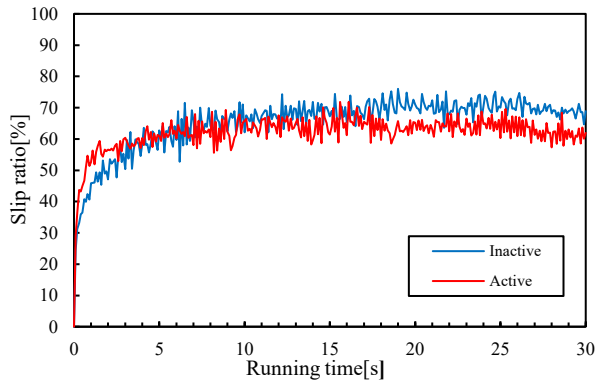


Fig.9 Transition of slip ratio (Active)

#### 4. 結言

本研究では、アクティブリンクを用いた菱形車輪配惑星探査車両を提案し、実験機の製作および平地走行実験、登坂実験を行った。接地荷重の偏りが大きくなるにしたがって、スリップ率が増加することを示した。また、アクティブリンクを駆動し、車体が斜面と平行になるように姿勢を修正することで低スリップ走行が可能であるという結果を得た。

#### 文献

- (1) Aravind Seeni, Bernd Schafer, Bernhard Revele, Nikolai Tolyarenko, Robot Mobility Concepts for Extraterrestrial Surface Exploration, IEEE Aerospace Conference, 2008.
- (2) Steven F.Peters, 惑星探査のための移動ロボット探査車, 電気学会誌 2000.12 Vol.120 p762
- (3) 石上玄也, 水内健祐, 吉田和哉, テラメカニクスに基づく車輪型移動ロボットの走行力学解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005
- (4) Guilin Wen, Chuanshuai Ma, Dong Cheng, Qiutan Jin, Zhewu Chen, Xingfa Yang, Hanfeng Yin and Jingyu Zhou, A Four-Wheel-Rhombus-Arranged Mobility System for a New Lunar Robotic Rover, International journal of Advanced Robotic Systems
- (5) 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の不整地走破性能, 平成 26 年度 高知工科大学修士論文