

惑星探査を目的とした球体ローバー

システム工学群

機械システム制御研究室 桐山 峻也

1. 緒論

1.1 研究背景

近年、月や火星を対象とした惑星探査が世界各国で進められており、探査ローバーは地形調査や環境データ取得を担う重要な探査機として用いられている。惑星表面には岩石や砂地、段差などの不整地が広く分布しており、ローバーには高い走破性と走行中の姿勢安定性が求められる。

現在までに実用化されてきた探査ローバーの多くは、多輪型やクローラ型の移動機構を採用している。これらは高い走行実績を有する一方で、機構が複雑化しやすく、質量増加や設計自由度の制約といった課題を抱えている。

これに対して、球体ローバーは外殻が球形であることから転倒の概念を持たず、全方向移動が可能であるという特徴を有する。また、内部機構を球殻内部に収めることができるため、外部環境からの衝撃や粉塵の影響を受けにくい構造とすることが可能であり、惑星探査用移動機構の一形態として注目されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

一方で、球体ローバーは内部機構の運動によって移動および姿勢制御を行う特性上、不整地走行時に外乱を受けると内部機構の姿勢が変化しやすく、走行安定性が低下する可能性がある。特に、内部車輪駆動を用いる球体ローバーでは、左右方向の外乱によるロール方向の姿勢変化が支配的になると考えられる。

1.2 研究目的

本研究の目的は、内部車輪駆動を有する球体ローバーにリアクションホイール(RW)を組み合わせた構成を対象とし、走行中に外乱を受けた際の姿勢安定性を数値シミュレーションにより評価することである。

本研究では球体ローバーの実機製作を行ったが、製作期間や部品調達、機構調整の制約により、姿勢制御機構を含めた十分な走行実験を行うには至らなかった。そこで、実機実験に代えて数値モデルを構築し、設計初期段階においてRW導入の有効性を評価する手法を採用した。

なお、本研究は制御系の高度化や最適化を目的とするものではなく、構造検討および姿勢安定機構導入の有効性を初期設計段階で検討することを主眼としている。

2. 球体ローバーの構造とモデル化方針

2.1 球体ローバーの構造概要

本研究で対象とする球体ローバーは、球形外殻の内部に車輪駆動機構および姿勢制御機構を搭載した内部フレームを配置する構成である。球体外殻の直径は約 250 mm とし、内部には左右独立駆動の車輪機構を配置することで、前進・後退および旋回動作を実現する。

姿勢安定化機構としては、内部フレーム上部にリアクションホイールを配置し、ロール方向の姿勢変化に対して制御トルクを発生させる構成を想定した。

図 1 に、本研究で想定した球体ローバーの構造および数値モデル化の概念図を示す。



Fig.1 Structure model of the spherical rover

2.2 モデル化の前提条件

数値シミュレーションでは、球体ローバーを剛体として扱い、球殻および内部機構の弾性変形は考慮しないものとした。また、球体は水平面上を転がりながら移動するものとし、鉛直方向の運動や跳躍は無視した。

姿勢評価においては、走行安定性に対して支配的であると考えられるロール方向の姿勢変化に着目し、ロール方向 1 自由度の簡略化モデルを採用した。ピッチ方向およびヨー方向の姿勢変化、地面との接触状態の変化、滑りや衝突といった要素は、本モデルでは考慮していない。

3. 数値モデルとシミュレーション条件

3.1 姿勢ダイナミクスモデル

球体ローバーのロール方向の姿勢角を ϕ とし、ロール方向の回転運動を以下の運動方程式で表現した。

$$I \ddot{\phi} = \tau_{ext} + \tau_{rw} - c \dot{\phi} \quad (1)$$

ここで、 I はロール軸回りの等価慣性モーメント、 τ_{ext} は不整地走行を模擬した外乱トルク、 τ_{rw} はリアクションホイールによって発生する内部トルク、 c は減衰係数である。

リアクションホイールによる制御トルクは、姿勢角および角速度に比例する簡易的な制御則を用いてモデル化し、トルクには物理的制約を表現するため上限値を設けた。

3.2 外乱モデル

不整地走行時の段差や岩との接触を模擬するため、外乱は短時間作用するパルス状の外乱トルクとして与えた。また、実環境における不確実性を簡易的に再現するため、小振幅の確率的外乱を重ね合わせた。

3.3 シミュレーション条件

表 1 に、本研究で用いた主なシミュレーションパラメータを示す。

Table 1 Simulation parameters

記号	意味	値	単位
R	球体半径	0.125	m
M	ローバー全体質量 (モデル)	2.2	kg
I	ロール軸回り等価慣性 モーメント	0.023	kg·m ²
c	減衰係数 (速度比例)	0.020	N·m·s/rad
J _{rw}	リアクションホイール慣性 (設計想定)	1.6×10 ⁻⁴	kg·m ²
τ _{max}	RW 最大トルク (飽和)	0.10	N·m
K _p	PD 比例ゲイン	0.30	N·m/rad
K _d	PD 微分ゲイン	0.05	N·m·s/rad
Δt	時間刻み	0.001	s
T	計算時間	14.0	s
t _d	外乱付加時刻	2.0	s
Δt _d	外乱パルス幅	0.12	s
τ _{pulse}	外乱パルス振幅	0.10	N·m
N	試行回数	20	回

球体半径や質量、慣性モーメントは、実機製作途中で確定している仕様および搭載予定部品を基に設定した。リアクションホイールの慣性および最大トルクは、小型宇宙機用 RW の仕様例を参考に設計想定値として与えた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

4. シミュレーション結果

4.1 姿勢応答の比較

リアクションホイールの有無によるロール方向の姿勢応答を図 2 に示す。

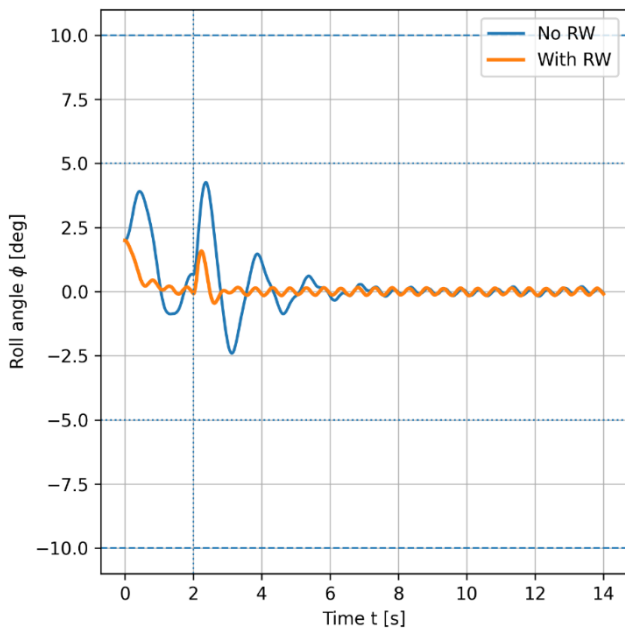


Fig.2 Roll angle response with and without reaction wheel

RW を考慮しない場合、外乱作用後に姿勢角の変動が増大し、その後も比較的長時間にわたって振動が残存する挙動が確認された。

一方、RW を考慮した場合には、外乱による姿勢角の最大値が抑制され、姿勢角が比較的短時間で小さな値へと移行する挙動が示された。

4.2 トルク応答

RW を導入した場合には、外乱トルクの作用に応じて内部トルクが発生し、姿勢角の変化を抑制する方向に作用していることが確認された。これに対し、RW を導入しない場合には内部トルクが存在せず、外乱トルクのみが姿勢変化に影響を与える結果となった。

5. 考察

以上の結果より、数値モデル上では、リアクションホイールを姿勢制御機構として導入することで、外乱環境下における球体ローバーの姿勢変化を抑制できる可能性が示唆された。

ただし、本研究で用いたモデルはロール方向 1 自由度に簡略化したものであり、実機挙動を定量的に予測するものではない。本研究の結果は、設計初期段階において RW 導入の有効性を定性的に評価したものと位置づけられる。

6. 結論

本研究では、内部車輪駆動を有する球体ローバーにリアクションホイールを組み合わせた構成を対象とし、数値シミュレーションによる姿勢安定性評価を行った。

シミュレーション結果より、RW を導入した場合には、外乱を受けた際の姿勢角の変動が抑制される挙動が確認され、姿勢安定性向上に寄与する可能性が示された。

本研究で得られた知見は、今後の実機設計および実環境下での走行実験に向けた基礎的指針を与えるものである。

参考文献

- (1) Solar Walk 2,
<https://starwalk.space/ja/news/rover-perseverance-is-on-its-way-to-mars> (accessed:2026/01/20)
- (2) JAXA, 月面ローバー研究試作機,
<https://tompei1.la.coocan.jp/WorldRobots1.htm>
(accessed:2026/01/20)
- (3) 筑波大学田中文英研究室,
<https://www.fll.iit.tsukuba.ac.jp/projects/ftmp/2022-ota/>
(accessed:2026/01/20)
- (4) sphero BOLT
<https://sphero.com/products/sphero-bolt>
(accessed:2026/01/20)
- (5) ROCKET LAB
<https://rocketlabcorp.com/space-systems/satellite-components/> (accessed:2026/01/20)