

惑星探査ローバーの不整地走行基礎研究

Fundamental research of rough terrain traversability for planetary explorer

吉田和哉, 浅井央章

Kazuya Yoshida, Hisafumi Asai

東北大学

Tohoku University

キーワード : 探査ローバー (exploration rover), 不整地 (rough terrain), 踏破性能 (traversability), ロックカーボギーサスペンション (rocker-bogie suspension), すべり率 (slip ratio)

連絡先 : 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01 東北大学 大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻
浅井央章, Tel.: (022)217-6993, Fax.: (022)217-6992, E-mail: asai@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

1997年夏に火星に到着した JLP の火星探査機 Mars Pathfinder に搭載された小型ローバーは, 火星表面上を移動探査することで, 多くの有益なデータを獲得することに成功した。ランダーによる点観測からローバーの移動による面探査の可能性が開かれたと言える。このミッションの成功によって惑星探査ミッションにおけるローバーの有用性が広く認められることとなった。

一方, 日本においては宇宙開発事業団と宇宙科学研究所の共同で, セレーネ計画が議論されている。このセレーネ計画は, 月の起源と進化を解析するためのデータを取得することを目的とした 2003 年からの月面探査ミッションである。ここで得られるデータは将来の月面探査の技術開発や, 月利用の可能性を調査

するために応用されることが期待されている。火星でのローバーミッションの成功を背景に, このセレーネ計画でもローバーによるミッションが計画されており, ローバーを用いた月惑星探査への技術開発が必要となっている。

本稿では, ローバーの不整地走行に関する基礎データ取得を目指した, テストベッドを用いた走行実験を含む基礎研究に関して報告する。

2. セレーネ計画でのローバーミッション

セレーネ計画では月表面の元素組成, 鉱物組成, 地形, 表面付近の地下構造磁気異常, 重力場の観測を全球にわたって行うことを想定している。そして将来的には月の内部構造にまで踏み込んだ調査が行われると考えられる。

月の内部のサンプルは月面を深く掘削することで得られるが、大がかりな掘削装置を月面まで運ぶことは重量やコストの面から現実的ではない。

しかし地下に穴を掘らずとも、隕石が衝突した後であるクレーター丘には衝突の反動で地下の層が地表付近に露出している可能性がある。クレーターは月の海と呼ばれる部分であり、月面には多数存在する。

クレーター内は隕石との衝突で飛び散った月と隕石の構成物が多数散在する不整地であり、ランダーがクレーター丘付近に着陸するとは考えにくい。クレーター内探査のためには、ローバーはクレーター外部の比較的穏やかな地形に着陸したランダーから、クレーター丘までの数百メートルから数キロメートルにわたって、月面上を移動することが求められる。

長距離を移動するローバーを開発するにあたっては、その不整地踏破性能を向上させるため走行時の挙動を明らかにする必要がある。

3. 実験装置

3.1 6輪ローバー

実験に使用するローバーを紹介する(Fig. 1 および Fig. 2)。

サスペンションは JPL の火星探査ローバーでも採用された 6 輪独立駆動のロッカーボギーシステムである。ロッカーボギーシステムは火星表面のような岩の多い地形には有効であると言われ、パッシブに動くロッカーリンクとボギーリンクにより、車輪の直径程度の障害物を乗り越える。クレーター内には衝突の衝撃で飛び散った様々な大きさの岩が散在していると考えると、この機構は月面クレーター探査に対しても有効であると考えた。ロッカーボギーシステムの各リンクには角度検出のた

めにポテンシオメータを配置した。

ローバーが持つ 6 輪はすべて駆動輪として利用される。各輪はそれぞれ独立に制御できる。モータにはタコジェネレータを取り付け、タイヤの回転角速度を検出する。

さらに前後 4 輪には独立に駆動できるステアリング用モーターを取り付けた。ステアリング角は回転軸に取り付けたポテンシオメータにより計測する。

車輪には直径 90mm のラジコン用ゴムタイヤを使用した。

本体部には制御系、電源系、通信系を搭載し、総重量 8.0kg である。



Fig. 1 The rover test bed (side view and front view)



Fig. 2 The rover test bed moving on rocky rough terrain

3.2 計測制御システム

ローバーの制御系および計測系を紹介する。

ローバーの走行制御はローバー本体部に

搭載した AMD K6-CardPC(Fig. 3) および Hitachi H8 の 2 台の計算機による．それぞれに役割を持たせ，上位に Card-PC を，下位に H8 を位置づける．Card-PC は OS に Linux を搭載し，オペレータからのコマンドをワイヤレス LAN を経由して受け取る．コマンドを受け取った Card-PC は，下位計算機である H8 と RS-232C を通して通信を行い，コマンドを伝達する．

Hitachi H8 はローカルにローバーのモータを制御する．上位計算機である Card-PC から受け取ったコマンドに対して，H8 はモータドライバに対し PWM により電圧を出力する．また，Card-PC からの要求に対して，現在の状態を送信する．

ローバーの角リンクおよび各モーターに取り付けられたセンサのデータはローバー本体に搭載したデータ収集装置 (Keyence NR-2000) により記録する．サンプリング周波数は 1kHz に設定した (Fig. 4) ．

K6 Card-PC は H8 に比べパフォーマンスに余裕があり，Card-PC と H8 との通信によりオペレータを介さずに何らかの判断を下す制御系を構成することも可能である．

4. 実験

このテストベッドを用い，乾いた砂の上において不整地走行実験を行った．

4.1 実験フィールド

宇宙開発事業団筑波宇宙センター宇宙ロボット実験室内に設けられた砂場をフィールドとして不整地走行実験を行った．実験フィールドの外観を Fig. 6 に示す．

砂場の広さは 5m × 3.6m であり．このうち計測に用意された領域は 2m × 2m × 0.6m

の直方体である．

砂場の外部には 2 台のカメラが置かれており，ローバーに取り付けた 4 つのマーカーの位置をステレオ視によって計測する．マーカーの三次元的な位置から，ローバー本体の走行軌跡と走行時の姿勢を求めることとする．

この三次元計測によって得られた砂場の地形は Fig. 7 である．

4.2 実験方法

オペレータからの遠隔操縦により，次の 4 通りの実験を行った．

実験 1 直線登坂走行

実験 2 スキッドステア走行

実験 3 車輪半径程度のひとつの石の乗り越え

実験 4 石の連続乗り越え

実験 1 の直線登坂走行においては，ステアリング角をとらず，6 輪すべてに同じ指令値を与え直線走行させる．経路はほぼ平坦な地形から傾斜のきつい山に向かう経路を選んだ．

実験 2 のスキッドステア走行では，左右の車輪に速度差を与えることで，旋回走行させる．速度差のつけかたにより複数の経路をとる．

実験 3 および実験 4 においては，砂場に人為的に石を配置し，その石を乗り越える経路を選び走行させる．石の大きさはほぼ車輪の半径 (45mm) 程度である．

1 パスはおよそ 20 秒から 50 秒で，複数回行った．

4.3 測定項目

実験に際し測定した項目は以下の通りである．

- 走行用モータータコジェネレータからの電圧 6 チャンネル
- ステアリング角 4 チャンネル
- ロッカーボギーリンク角 4 チャンネル
- 走行軌跡
- 走行時の本体姿勢
- 実験フィールド 地面地形
- オペレータ送信コマンド履歴

5. 実験結果

5.1 実験 1 直線登坂走行

直線登坂走行時のローバー本体の速度，車輪の周速，すべり率を Fig. 8 に示す．

オペレータからは，コマンドとして常に一定のデューティ比を持つ PWM 出力がモーターに加えられているにも関わらず，ローバー本体の移動速度は傾斜がきつくなるに連れ減速し始める．そして傾斜がある大きさに達したところで，車輪は依然回転を続けているものの．ローバー本体は停止する．これはすべり率の解析でも明らかである．結果として，タイヤはその場に穴を掘りはじめ，スタックし抜け出せなくなる．

すべり率は，本体の移動速度 v_b とタイヤの周速 v_w から計算される量で，次式で定義される．

$$s = \begin{cases} (v_b - v_w)/v_b & (v_b > v_w : \text{braking}) \\ (v_b - v_w)/v_w & (v_b < v_w : \text{accelerating}) \end{cases} \quad (1)$$

すべり率が正のとき，本体は減速しており，すべり率が負の範囲においては，本体は加速していることを意味している．

5.2 実験 2 スキッドステア走行

左右の車輪に適当な速度差を与えることで，ローバーは旋回走行をする．その経路を Fig. 9 に示す．

5.3 実験 3 車輪半径程度のひとつの石の乗り越え

事前に行われた計算機によるシミュレーションでは，石に当たった側のタイヤのすべり率が減少するため，その後の経路が石を乗り越えたタイヤの側にわずかに傾く傾向がある結果が得られた．

この実験においても，石を乗り越える際にタイヤがすべる様子が観察されていた．一方石を乗り越えなかった側はすべりなく回転を続けるため，その後の経路が変化する．

5.4 実験 4 石の連続乗り越え

砂地には能力を発揮できなかったロッカーボギーサスペンションであるが，石を連続的に乗り越えるこの実験では，サスペンションが効果的に機能し，高い踏破能力を示した．Fig. 10 に走行時のリンク角の変化を示す．

石の大きさはおよそ車輪の半径程度であったが，車輪の上下運動に比較すると，本体の姿勢変化は小さかった．

6. おわりに

本稿では不整地走行実験に用いたローバーテストベッドと実験の結果に関して述べた．

車輪のすべり率のセンシングによると，すべり率がある値を越えると車輪はその場に穴を掘り始め，ローバーはスタックする．スタックはレゴリスで覆われた月面上でのローバーの長距離移動には致命的である．一度スタックし穴を掘り始めると穴は深くなる一方であ

るため、スタックを効率よく回避しなければ、ローバーの長距離移動は困難である。

スタックを回避するためにはスタックが始まる限界すべり率に達する以前に、車輪の回転速度を落とし減速する必要がある。

参考文献

- 1) <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/> (as of Dec. 2000)
- 2) <http://yyy.tksc.nasda.go.jp/Home/Projects/SELENE/> (as of Dec. 2000)
- 3) <http://www.isas.ac.jp/j/enterp/mission-s/selene/> (as of Dec. 2000)
- 4) 室達郎(著): テラメカニックス, 31/74, 情報堂出版(1993)
- 5) 樋口健治(著): 自動車工学, 25/32, 朝倉書店(1980)
- 6) Karl Ignemma, Robert Burn, Eric Wilhelm, Steven Dobowsky: Experimental Validation of Physics-Based Planning nad Control Algorithms for Planetary Robotic Rovers, ISER '99, 1999



Fig. 3 A Linux based on-board system (180mm × 120mm)

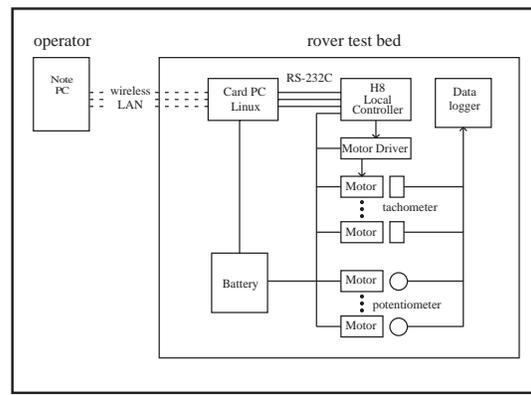


Fig. 4 Control and measurement block diagram

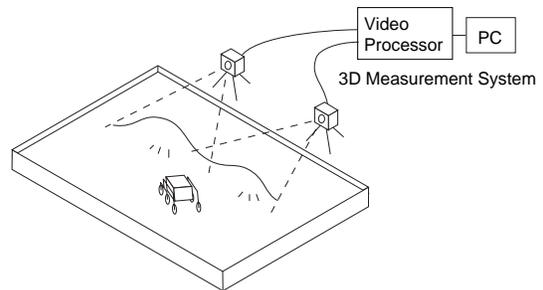


Fig. 5 Test field and a 3D measurement system

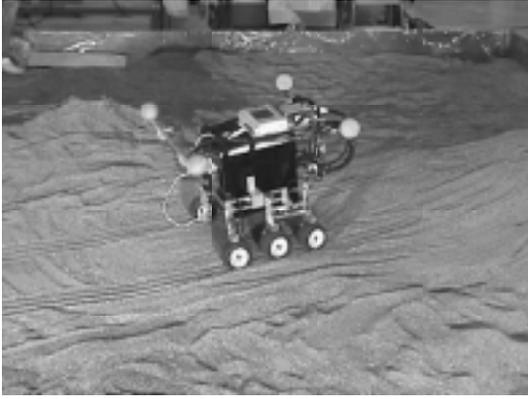


Fig. 6 A rover test bed moving on the test field

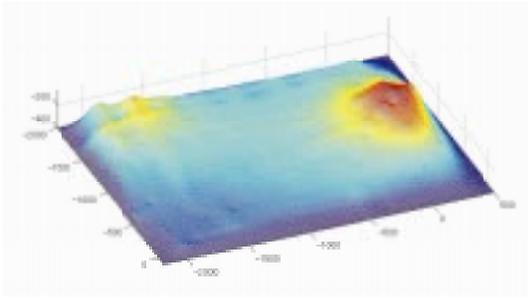


Fig. 7 Map of the test field obtained by the 3D measurement system

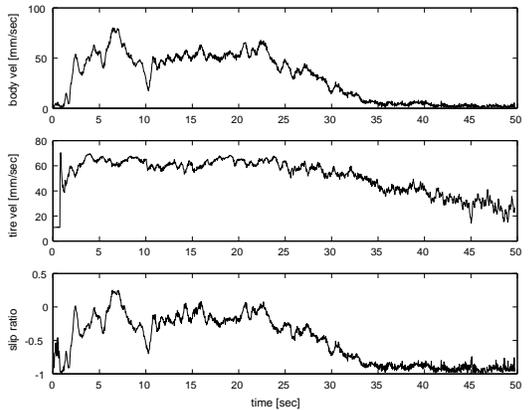


Fig. 8 Observation data for body velocity (top), tire circumference velocity (middle), and slip ratio (bottom), when the rover test bed is climbing up an increasing slope.

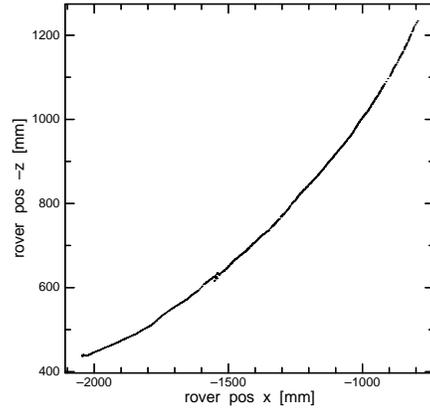


Fig. 9 Observation data for body track when the rove test bed is moving with skid steering

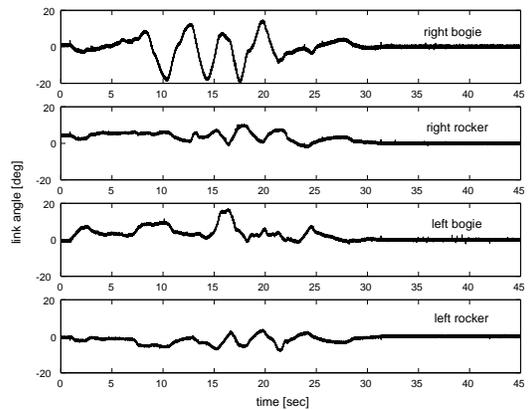


Fig. 10 Observation data for rocker-bogie angles when the test bed is moving on random stones