

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25880035

研究課題名(和文) 応力測定に基づいた月惑星ローバのロバストな自律航法システムの構築

研究課題名(英文) Robust Navigation System based on Stress Measurements for Lunar and Planetary Rovers

研究代表者

須藤 真琢 (SUTOH, MASATAKU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・月・惑星探査プログラムグループ・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：80712851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、月惑星ローバのスリップに対してロバストな航法誘導の実現を目指し、車輪に働く応力の測定による新たな力学モデルの構築、およびそのモデルから推定される車輪スリップをローバの自己位置推定や経路計画に応用したシステムの研究開発に取り組んだ。また、本研究で提案するシステムの有効性について、ローバテストベッドを用いた実証試験から確認した。このシステムは、月惑星ローバや様々な不整地移動ロボットの航法誘導に幅広く適用可能であり、将来、当該分野での実用が期待される。

研究成果の概要(英文)：For a development of a slip-robust navigation system for lunar and planetary rovers, a wheel model was first constructed by measuring stress acting on a wheel. Along with a stress measurement system, this model makes it possible to estimate a wheel slippage. Subsequently, localization and path plan systems were developed based on this slippage estimation method. These systems have been verified through various experiments using a rover testbed. In the future, with some modifications/updates, the proposed navigation system is expected to be widely applicable to not only lunar and planetary rovers but also to various field robots.

研究分野：工学

キーワード：月惑星ローバ テラメカニクス 航法誘導

1. 研究開始当初の背景

生命の起源の解明や有用資源の発掘を目的とし、現在、世界各国において、移動ロボット(ローバ)を用いた月や火星の探査が計画されている。ローバは、詳細かつ広範囲にわたる地表面探査に貢献する科学技術であり、研究開発の必要性が高まっている。

ローバには、自身の位置を把握(自己位置推定)し、安全な経路を決定して目的地に到達する技術(経路計画)が求められる。しかしながら、月や火星の表面は細かい砂で覆われた軟弱地盤であり、また、クレータの縁には多数の急斜面が存在する。このような環境では車輪が砂に埋もれて空転(スリップ)し、走行が困難になることが懸念される。車輪のスリップやスタックによる探査継続の危機を回避するため、ローバの走行挙動に基づいて自己位置推定や経路計画を行う、スリップに対して頑強な(ロバストな)航法誘導技術が求められる。

これまで、ローバの走行挙動に関する研究は、テラメカニクス(地盤と機械の相互関係を扱う学問)を基に盛んに行われてきた。これらの研究では、車輪の力学モデルを基にローバのスリップ現象が解析されている。しかしながら、既存の車輪モデルは多くの経験則を含む複雑なものであり、そのモデルを用いて車輪のスリップをローバ上で逐次(オンライン)推定することはできなかった。

また、走行路面の正確な状況把握が困難であるため、航法誘導シーケンス(環境認識、自己位置推定、経路計画、移動制御)において、ローバは頻繁な停止を強いられる。これは探査効率を低下させるだけでなく、「一定速度で連続走行すること」を前提としている、テラメカニクス理論の航法誘導に対する適用を困難にしていた。

テラメカニクスの理論をローバの航法誘導に応用するためには、航法誘導に応用可能な簡略的な車輪モデルの構築、航法誘導の連続化、が課題であった。しかしながら、研究開始当初、これら課題に対する明確な解決策は存在しておらず、ローバがスリップに対して頑強な航法誘導を実現することは困難であった。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では、車輪に働く応力の測定により車輪力学モデルを簡略化し、そのモデルから推定される車輪スリップに基づいて自己位置推定や経路計画を連続的に行うことで、ローバのスリップに対してロバストな自律航法を実現することを研究目的とした。この研究目的を達成するため、以下に示す2つの要素研究に取り組む。

(1) 応力測定に基づいた車輪力学モデルの構築

研究代表者は、これまでの研究において、テラメカニクスに基づきローバの走行挙動

解析に取り組んできた。多くの砂上実験を通じて、車輪に働く応力と車輪のスリップを関連づける簡易な車輪力学モデルの着想に至った。このモデルは、車輪に働く応力の測定と併用することで、車輪スリップの推定を可能とするものである。

本研究では、車輪に働く応力についてオンライン計測可能なシステムを構築し、このシステムにより提案する車輪モデルを実験的に検証する。さらに、車輪モデルの構築により、車輪の応力計測による車輪スリップの推定を実現することで、ローバの航法誘導に対する応用を図る。

(2) 応力計測の航法誘導システムへの応用

車輪の応力計測から車輪スリップや路面情報を推定し、ローバの航法誘導に応用するシステムを構築する。その内容は、以下のとおりに分けられる。

車輪のスリップ情報を考慮した地図構築および自己位置推定

月や火星等のGPSが使用できない、絶対位置情報の取得が困難な環境において、移動ロボットは、自身で周辺環境の地図構築や自己位置推定を繰り返しながら走行する。従来、移動ロボットの地図構築には、複数のカメラを用いたステレオ視やレーザ距離計による手法が広く採用されてきた。しかしながら、これら手法には、画像処理や計測に時間を要するため、ローバが頻繁な停止を強いられる問題点がある。

本研究では、地図構築を連続的に行うシステム、および車輪に働く応力計測から推定される車輪スリップを自己位置推定に応用したシステムの構築に取り組む。これらシステムの完成により、精度良く自己位置推定を行いつつ、ローバの停止頻度が少ない、連続的な探査を実現する。

ローバの走破性を踏まえた経路計画

現在、米宇宙航空局(NASA)が運用する火星ローバは、環境情報(起伏や凹凸)を取得し、回避する経路計画アルゴリズムを採用している。しかしながら、そのアルゴリズムには、与えられた路面状況(柔らかい、硬いなど)におけるローバの走破性が十分に反映されていない。すなわち、走行路面が安全/危険であるかの最終判断基準は、ローバの走行軌等に基づいた、操縦者の直観に依存する部分が多い。

本研究で提案する応力計測システムにより、この直観を定量化することが可能となる。本研究では、このシステムを応用することで、与えられた路面におけるローバの走破性を考慮した経路計画アルゴリズムの構築に取り組む。アルゴリズムとして、現在地から目的地までの間における中継地点(サブゴール)の計画(広域経路計画、数十m範囲)、とサブゴール間の計画(狭域経路計画、数m範囲)に

関する各ケースを検討する。これにより、ローバの運用全般を通して、スリップに対して頑強な航法誘導の実現を目指す。

3. 研究の方法

以下、各要素研究の研究方法を記す。

(1) 応力測定に基づいた車輪力学モデルの構築

車輪力学モデル構築のため、砂上実験を行い、車輪と地盤の相互作用を詳細に解析するため、車輪内部に6軸力・トルクセンサを搭載し、車輪に働く応力について直接測定可能な車輪モジュールを開発する。続いて、開発した車輪モジュールを用いて、宇宙研究開発機構(JAXA)が所有する単輪試験装置にて走行実験を行う(図1参照)。単輪試験装置には、月土壌の機械的特性を模擬した砂が敷き詰められており、この試験装置を用いた走行実験により、月面における車輪の正確な挙動解析が可能である。実験では、斜面上で車輪を走行させ、異なるスリップ条件において車輪に働く応力や車輪の駆動力を計測する。



図1: 応力計測車輪モジュールを用いた走行実験

(2) 応力計測の航法誘導システムへの応用

車輪のスリップ情報を考慮した地図構築および自己位置推定

連続的な地図構築のため、色彩と深度情報の瞬時取得が可能なカメラ(RGB-Dカメラ)から成る地図構築システムを開発する。さらに、上述の車輪モジュールとRGB-Dカメラを姿勢センサ(ジャイロスコープと加速度計)や車輪エンコーダと統合的に使用した自己位置推定システムの開発を行う。

一般に、車輪がスリップしない場合には、ジャイロスコープと車輪エンコーダから得られる、ローバ車体中心軸周りの姿勢角と車輪の回転角を用いて、ローバの移動量が正確に推定できる(オドメトリ手法)。本研究で提案するシステムでは、車輪モジュールから推定されるスリップを用いて、オドメトリ手法から得られる移動量を補正することで、自己位置推定を行う。



図2: 航法誘導システム検証用ローバテストベッド

ローバの走破性を踏まえた経路計画

広域と狭域の各経路計画に対して、それぞれ、走行路面の起伏(山や谷など)や障害物(岩石など)の危険度について、ローバの走破性に基づいて判定するアルゴリズムを構築する。

広域経路計画について、与えられた路面状況におけるローバの走破性を既知として、月面模擬地形を用いた数値シミュレーションにより、提案する経路計画アルゴリズムの有効性を検証する。一方、狭域経路計画については、実機による走行試験から提案アルゴリズムの有効性を検証する。試験では、RGB-Dカメラにより障害物を検知し、車輪モジュールによりローバの走破性を準オンライン推定することで、走破性に基づいた経路計画や移動制御を行う。

上述した航法誘導システムの有効性を検証するため、実機による実証試験を行う。実機として、提案システムを実装した4輪型ローバテストベッドを使用する(図2参照)。このローバテストベッドは、4輪を独立して駆動、操舵させることで、全方向移動が可能である。

実証試験は、JAXA内の走行試験フィールドにて実施する。このフィールドには、3次元移動量計測システムが設置されており、このシステムの使用により、ローバ移動量を誤差~数mm精度で取得することが可能である。これにより、移動量(スリップ)の推定精度や経路計画アルゴリズムを評価する。なお、試験におけるローバの走行距離(1~3m)に対して、走行速度は1~2cm/sである。このため、上記システムの計測精度は、実証試験における要求を十分満たすものとなっている。

4. 研究成果

各要素研究から得られた研究成果を以下に記す。

(1) 応力測定に基づいた車輪力学モデルの構築

本研究で開発した、車輪に働く応力について計測可能な車輪モジュールを図1に示す。このモジュールにより、軟弱地盤をローバが

走行する際に、車輪の円周方向に働く応力分布を精度良く計測することが可能となった。

車輪モジュールを用いた単輪試験装置における走行試験から、車輪スリップ増加に伴う応力分布範囲の拡大、および応力ピーク値の減少に関する定量データを取得した(その一例を図3に示す)。そして、このデータに基づいて、車輪スリップを車輪沈下量の変化に伴う応力分布の関数として簡略的にモデル化することに成功した。このモデルの構築により、車輪に働く応力を計測することで、従来、推定に多くの土壌パラメータが必要であった、車輪スリップを簡易に推定することが可能となった。

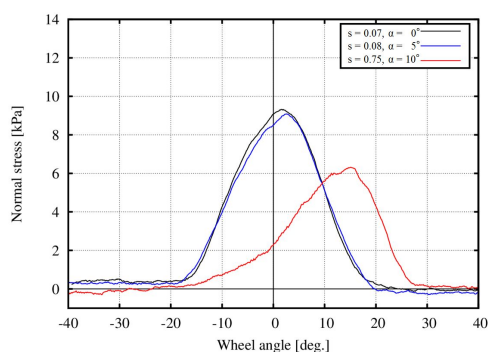


図3: 月模擬砂における応力計測結果

(2) 応力計測の航法誘導システムへの応用

車輪のスリップ情報を考慮した地図構築および自己位置推定

従来、ローバの航法誘導は頻繁な停止が強いられる断続的なものであったが、RGB-Dカメラを用いた逐次地図構築システムの開発により、停止頻度が少ない連続的な航法誘導を実現した。また、レーザ距離計を用いて構築した同一環境における地図との比較から、本システムによる3次元計測精度の高さを確認している。

一方、実機による走行実験から、構築した自己位置推定システムの使用により、ローバ移動量の推定が可能であることを確認した。なお、実証試験に用いたローバテストベッドとフィールドの組合せでは、車輪に大きなスリップが発生しなかったことから、現状、提案システムの有効性は、低スリップの範囲に限定される。今後、様々なスリップ条件に対する有効性の検証を行うことで、本システムは、スリップに対してより頑強な仕様として完成することが期待される。

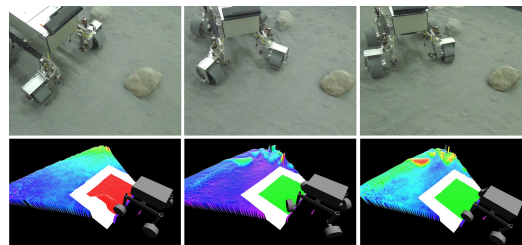
ローバの走破性を踏まえた経路計画

広域経路計画に関する数値シミュレーションにおいて、提案アルゴリズムは、異なるローバの走破性に対して、スリップや消費電力を踏まえた最適な経路の計画が可能であることを確認した。一方、狭域経路計画に関する実機を用いた実証試験では、RGB-D

カメラによる障害物検知、車輪モジュールの情報を基にした走破性判定、移動制御、という航法誘導シーケンスの繰り返しにより、ローバの走破性をオンライン推定しながら目的地まで自律走行できることを確認した(図4参照)。

以上より、各経路計画に対して、ローバの走破性に応じた最適な経路を計画するアルゴリズムが完成し、ローバの運用において、スリップに対して頑強な航法誘導が可能となった。

現在、本研究における提案システムの検証実験は、屋内試験フィールド内に限定されているが、今後の展望として、屋外の広範囲における実証試験の実施を検討している。屋外試験において、広域・狭域領域の経路計画を連続して試験することで、提案システムの完成度を向上させていく。本研究の成果は、月惑星ローバや様々な不整地移動ロボットの航法誘導に幅広く適用可能であり、完成度を向上させることで、将来、当該分野での実用化を目指す。



① 危険判定 ② 障害物回避 ③ 直進走行

図4: ローバの走破性を踏まえた経路計画

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Masataku Sutoh, Masatsugu Otsuki, Sachiko Wakabayashi, Takeshi Hoshino, Tatsuaki Hashimoto, "The Right Path: Comprehensive path planning for lunar exploration rovers", IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol.22, pp.22-33, 2015 (査読有), (DOI:10.1109/MRA.2014.2381359).

[学会発表](計1件)

Taizo Kobayashi, Genya Ishigami, Shingo Ozaki, Masataku Sutoh, "Current Status and Prospects of Terramechanics-based Simulation Technique for Planetary Rover Locomotion", 12th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Quebec, Canada, June 2014 (アブストラクト査読有).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

須藤 真琢 (SUTOH MASATAKU)
独立研究開発法人 宇宙航空研究開発機
構 月・惑星探査プログラムグループ
宇宙航空プロジェクト研究員
研究者番号：80712851