

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14926

研究課題名（和文）小型跳躍天体探査ローバシステム開発とそれを用いた土質推定

研究課題名（英文）Development of Hopping Rover for Planetary Exploration and Terrain Estimation

研究代表者

前田 孝雄（Maeda, Takao）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：00761149

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：天体表面の調査，一般的に土質調査に相当する測定は，小型のロボットには不適である．十分な荷重を掛けられず反力測定ができないためである．これを改善するための土質推定を実施する小型跳躍ロボットを開発し，跳躍反力を用いて十分な荷重を確保し，土質推定を実施できるようにした．軟弱土壌を模擬するため砂を敷き詰めた実験設備での跳躍実験を実施した．種々の模擬砂（模擬地盤）での跳躍データを得られたため，未知地盤上での跳躍データが得られたとき，既存データと力覚センサの力の立ち上がり，加速度や応答反力のピーク値，反力ピークの山の数などを比較することで，跳躍移動中の土質推定が可能になった．

研究成果の学術的意義や社会的意義

小型の天体探査ロボット（ローバ）は，大型天体着陸探査ミッション時に，余剰ペイロードを活用した即応的な探査システムとして期待されている．小型ローバに求められるミッションには，大型主ミッションシステムの外部からの観測，主ミッションと別行動によるサイエンスの強化などがある．その中でも，主ミッション側のローバの移動経路を事前に調査することや，将来の月面基地・火星基地建設のため，広い範囲で天体表面正常を調査することは，大型主ミッションの成功を支える重要な役割となる．本研究ではこれを小型ローバで実施できることを示し，将来の探査において様々な小型ローバが同時に多数活躍できる可能性を示した．

研究成果の概要（英文）：Measurement of terrain specification of a celestial body by a small robot is difficult because the robot's weight is insufficient. A hopping robot can solve this problem by using a reaction force of jump. In this research, we developed a small robot mechanism that can measure the terrain specification by using a reaction force of jump. In an experiment on jumping on an artificial terrain made of loose sand, the dataset of the relationship between a condition of terrain and a reaction of force during jumping is obtained. By comparing the dataset and the experiment result on unknown terrain, it became possible to estimate the feature of terrain by using a small hopping rover.

研究分野：Robotics, Space Engineering, Terramechanics

キーワード：Hopping robot Terramechanics Planetary exploration

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

小型の天体探査ロボット(ローバ)は、大型天体着陸探査ミッション時に、余剰ペイロードを活用した即応的な探査システムとして期待されている。小型ローバに求められるミッションには、大型主ミッションシステムの外部からの観測、主ミッションと別行動によるサイエンスの強化などがある。その中でも、主ミッション側のローバの移動経路を事前に調査することや、将来の月面基地・火星基地建設のため、広い範囲で天体表面正常を調査することは、大型主ミッションの成功を支える重要な役割となる。一方で、天体表面の調査、一般的に土質調査に相当する測定は、小型のロボットには不適である。十分な荷重を掛けられず反力測定ができないためである。重力の小さな月面上や小天体上では、この問題はより顕著になる。この点を改善できれば小型ローバの有用性が向上し、様々な探査ミッションで活躍が期待できる。

2. 研究の目的

軽量の小型ローバを用いて、天体表面の土質パラメータを取得できるシステムの構築が本研究の目的である。小型探査ローバにより、主ミッションの大型ローバが進入できない場所や、主ミッションと異なる場所の探査、あるいは、主ミッションのローバのための事前調査等が可能になる。特に、大型ローバや、将来の有人探査ミッションを想定した場合、走行可能性を把握するために、天体表面の状況を調査することが重要なミッションの一つになる。本研究では、小型探査ローバを用いて、従来は困難だった天体表面の機械的特性の計測方法を主たる目的とする。一方で、天体表面のような砂や砂礫の特性を計測するためには、ある程度大きな荷重を掛けて変形量と反力を測定する必要がある。ローバ走行や建築物構築で最も重要な地盤支持力は、平板の載荷圧縮試験により剛性を求めることで得られる。本研究は、このような載荷試験を、小型の移動ロボットを用いて実施できる方法の構築することが目的である。宇宙探査ミッションにおいて、余剰ペイロードとして搭載できる小型ローバの質量は、主ミッションの質量の数%である。200 kgの月着陸機に搭載されるとすれば、2 kg程度である。「数 kgの質量で、しかも低重力な月面や火星表面上で、十分な荷重を発生して土質調査が可能」なロボットを検討する必要がある。それがロボットの跳躍動作で実現可能かについて実機実験を通して検証する。また、小型探査ローバという特徴から、将来的に地上用アプリケーションとして、ドローン等に搭載して災害時に即応的に運用できる探査システムなどへ拡張することも可能と考える。

3. 研究の方法

これまで代表らが開発してきた月面探査用小型ホッピングローバの構造・制御システムをベースに新たに小型跳躍ロボットの開発を実施する。計測のために、追加で力覚センサ、姿勢センサをロボットに搭載する必要がある。計装系を搭載して、かつ必要な動荷重を印加できる跳躍ロボットシステムを構築する。

解析の面では、土壌力学モデルの一つである Resistive Force Theory (以降 RFT) をベースに検討を行う。RFT は比較的新しい土壌等の粉体反力計算モデルで、従来モデルのように、垂直載荷や車輪など、特定の形状に限定されることなく、任意の形状・姿勢の物体に作用する反力計算が可能で特徴を持つ。自然地形上において、小型ローバは跳躍時に姿勢変動を生ずるため、任意姿勢での反力推定が可能で特徴が有効活用される。

ロボットの跳躍実験装置を製作し、様々な種類・高密度の模擬土壌に対して実験を実施する。実験は、初めは垂直飛びを実施して、砂の種類、高密度に対応した、加速度、力履歴を取得する。続いて、ローバを用いたより現実に近い状況での跳躍試験を実施する。平行して、シミュレータを開発し、実験データと対比するための RFT ベースの解析モデルを構築する。参照する土壌パラメータはかさ密度や静的圧縮試験により求め、跳躍時の時系列データから、土壌パラメータ(剛性や、RFT のスケールリングファクタ ζ)を取得できるようにする。また、跳躍時の土壌飛散などを観測して、エネルギー散逸の経路も考慮に入れる。

4. 研究成果

土質推定を実施するためのプラットフォームである実験のための小型跳躍ロボットを製造し、軟弱土壌を模擬するため砂を敷き詰めた実験設備での跳躍実験を実施した。数種類の模擬砂での実験を実施して、跳躍時の応答を取得した。応答の取得は外部観測型の位置センサ(Optitrack)及び高速度カメラを用いて実施した。種々の模擬砂(模擬地盤)での跳躍データを得られたため、未知地盤上での跳躍データが得られたとき、既存データと力覚センサの力の立ち上がり、加速度

や応答反力のピーク値、反力ピークの山の数などを比較することで、跳躍移動中の土質推定が可能になった。一方で、土質の水分状態や土壤に混合した石や礫などによっては、事前データとの比較が困難になるため、将来に向けた更なる性能向上の課題として、跳躍反力の比較だけでなく、周波数応答などを比較するなどして対象の地盤の状態を推定する必要があることも見いだされた。比較方法の完全自律化に関しては議論の余地を残すため、引き続きの議論を要する。実験装置は完成して様々な地盤条件でデータ取得実施が可能となったので、今後データを拡充して土質の推定性能を洗練させることは可能である。

ロボットの実験によって得られた成果として、斜め跳び移動時の性能向上を達成できた。跳躍時のロボットの応答や砂の流動具合を観測し、個別要素法 DEM を用いた解析も実施して、跳躍パッドと土壤を模したパーティクルとの接触時の状況を計算し、土壤内部での応力伝達状況に関する可視化も実施した。これまで用いていた Resisitve Force Theory モデルのみでは表現が困難であり、実験と乖離があった部分を DEM 結果で補完し、凹型の接触面を持つ跳躍パッドを使用した際の応力状態が可視化された。凹形状跳躍パッドは余分な砂の飛散を抑制でき、跳躍性能向上につながる。また、凹型形状時に Resisitve Force Theory モデルに必要な補正に関する知見が見いだされた。さらに、跳躍ロボットの跳躍ばね力の伝達を、リンクを介して実施する方法についても検討した。これは、跳躍ばね力が急激に土壤に印可されないように工夫されたものであり、砂の飛散を抑制できるメリットが確認できた。非常に軟弱な土壤（斜面の珪砂や、月面のレゴリスなど）において、土壤を破壊しすぎることなく実験が可能であると期待できる結果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 峰岸理樹, 前田孝雄, 坂本康輔, 國井康晴	4. 巻 40, 7
2. 論文標題 跳躍移動機構における脚の伸張軌道が飛翔結果に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 峰岸理樹, 前田孝雄, 坂本康輔, 國井康晴
2. 発表標題 跳躍移動機構における脚の伸張軌道が飛翔結果に及ぼす影響
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田孝雄, 吉川健人, 大槻真嗣, 吉光徹雄, 國井康晴, 富木淳史, 澤田弘崇, 平野大地, 須藤真琢, 久保田孝
2. 発表標題 SLIMへ搭載可能な小型天体表面探査プローブ
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田孝雄, 吉光徹雄, 大槻真嗣, 吉川健人, 國井康晴, 富木淳史, 澤田弘崇, 平野大地, 須藤真琢, 久保田孝
2. 発表標題 SLIMへ搭載可能な小型天体表面探査プローブとその開発状況
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田 孝雄, 國井 康晴, 佐藤 冬唯, 松元 隆磨, 神山 和人, 宮口 幹太, 戸田 武, 関 光雄
2. 発表標題 複数小型ロボットを用いた領域制御型確率的月惑星表面探査方式とその地上利用
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大槻 真嗣, 前田 孝雄
2. 発表標題 微小重力環境における粉粒体と機械の相互作用に関する実験的検討
3. 学会等名 第16回運動と振動の制御シンポジウム講演集
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究の過程で得られたホッピングローバの製造及び実験に関する知見の一部は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の小型月着陸実証機に搭載予定の小型ローバにも応用された。

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------