

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04038

研究課題名(和文) 移動機構と柔軟地盤の相互作用の一般定式化ならびに最適化に関する実験的検証

研究課題名(英文) Experimental verification of general formulation and optimization of interaction between mobility mechanism and loose terrain

研究代表者

大槻 真嗣 (Otsuki, Masatsugu)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：50348827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で、新しいグロウサ形状の反力推定式を導出し、数値計算で求めた準最適な形状を持つグロウサ付き車輪の沈下-牽引力の結果に関して、実験結果と数値計算結果の比較、設計結果の性能を比較評価した。また、グロウサ付き車輪の設計製作を進め、複雑な形状に起因した、実製造上の問題に直面し、効果的な解決策を考え得た。より、一般的なグロウサも合わせて比較評価するために、3Dプリンタで最低限の強度を維持したグロウサを作り、比較評価し、所望の性能(牽引力、ブルドーzing力)を得るために検討した結果、製造性が高く、沈下のしにくい、かつブルドーzing力を確保できる正多面体形状のグロウサを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

成果は惑星探査ローバや着陸探査機に用いることのできる技術であり、実製造上の課題も含めて確認することができた。それに限らず、不整地で作業する建設機械や産業用機械、火山地域や極地等での観測ロボットへも応用できると考えられ、今後の発展が期待できる。より少ないパラメタである程度の精度で反力推定ができる手段を得たことになったため、ADAMS等ダイナミクスシミュレータとの親和性が高まり、いままで、計算の複雑さ故にできなかった、柔軟地盤とのインタラクションを持つ機械のダイナミクス解析の計算負荷を下げることでできた。新しい手法の適用可能な範囲を見定める課題が残っており、学術的にも新しいテーマを提供できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new reaction force estimation formula of the grouser-wheel geometry was obtained, and regarding the sinkage-traction force result of the wheel with the grousers with the calculated sub-optimal shape, the experimental results are compared with the numerical results. And, I performed the design and manufacture of the wheel with the grousers, and the problem in the actual manufacturing due to complicated shape of the grouser was faced, and the effective solution was obtained. As the result of examining in order to obtain desired performance (Traction force, bulldozing force), we obtained a regular polyhedron shape geometry which can ensure the followings: Productivity is high, depth of sinkage is low, and it has more than a certain amount of bulldozing force.

研究分野：機械力学制御

キーワード：テラメカニクス 反力推定 柔軟地盤 探査ローバ

1. 研究開始当初の背景

月や惑星の表面探査では、科学観測、惑星利用の観点から長距離を高速で移動可能な走行機構の要望が高く、地上における火山や砂漠地域での観測、農業機械の自動化でも同様に求められている。このような用途に対して、移動機構として車輪(地上ではゴムタイヤ、惑星探査では金属製の車輪)が使われることに議論の余地はない。自然環境、特に砂で形成される柔軟な地盤とグロウサや溝が付いた車輪との相互作用力、つまり反(作用)力を推定するために、実験で得た沈下-圧力関係式を基本として Bekker や Wong, Reece, 須藤等が検討を進めてきた。彼らは、地形を崩すことで得られる反力、必要なトルク、走行効率を事後的に得られるスリップ率から巨視的に算出する方法(テラメカニクス)を提案した。ただし、彼らの方法では十数もの地盤パラメータを事前に計測する必要があるため、未知な自然地形を移動する時の反力推定にはある程度の困難を伴う。また、有限要素法を用いて反力解析を行う研究もあるが、環境条件や車輪-グロウサ形状を単純化した検討例が多く、計算負荷と精度の観点で課題が山積している。同様に、未知の自然地形を想定した多様な環境を用意し、実験的にすべてを求めることも非常に困難を伴う。したがって、単純な実験結果から獲得される地盤パラメータを用いて、相互作用力を数値計算により「ある程度」の精度を持って推定するための手法は、リスクならびに要求リソースを低減する移動機構を設計評価するために、今後要望される機会がさらに増えると予測できる。また、移動機構が複雑な形でも適用可能で、より少ない地盤パラメータである程度の推定が期待できる、より汎用的な方法が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、RFT(Resistive Force Theory)に基づき、計算パラメータが少なく、計算負荷が小さい、幾何形状を限定しない、新たな機械-地盤系の相互作用モデルの構築を目指している。従来のテラメカニクスモデルでは、適用条件の制限、計算パラメータの多さ、適用可能な形状の単純さが大きな壁であった。本研究では、得られるモデル精度は変わらないまま上記の利点を獲得できるだけでなく、従来要求されていた繰り返し計算と事後的なスリップ率計算が必要なくなり、沈下量と形状から一意に反力が決定される。これにより、時間前方向への陽解法の提供、つまり、移動機構のダイナミクスをオンラインで計算できるようにもなる。さらに、グロウサ付車輪の最適設計で、少なくとも形状の解析的な最適化に地盤の違いが依存しないことが数値計算で確認している。これを平板でも同様に導出できれば、反力最大化の意味でのジャンプ機構や着陸装置の設計、抵抗最小化の意味でのスコップやドリルの最適設計、細菌培養床や粒状媒質の攪拌装置の形状設計にもつながる。

次に、宇宙固有の「重力」と「真空」の環境条件、地盤パラメータを入力として、応答を評価することはアポロ等で取得されたデータでも実施されていない試みであり、本研究での成果がテラメカニクス分野でのさきがけになる。これにより、地上で事前の相互作用シミュレーションが簡易かつある程度の精度でできるようになり、月・惑星、小惑星表面上での探査活動における機器設計がより簡便かつ確実になると考えられる。特に、はやぶさに代表される小惑星探査では、このような探査機設計は行われていなかった(硬い平面を仮定していた)ため、現状で横滑りする可能性がある等の明らかな課題も見つかっている。

まとめると、本研究では RFT を基本理論として移動応答を推定する相互作用モデルの妥当性を検証することを第一の目的とする。そして、そのモデルより導かれた沈下量が少ない状態でも

従来と同等の性能が得られるグローサを持った車輪を実験的に性能評価することを第二の目的とする。これらの結果は惑星探査に限らず、不整地で作業する建設機械や産業用機械、火山地域や極地等での観測ロボットへも応用できると考えられる。

3. 研究の方法

2013年、平板と粒状物質との相互作用力の定量化データから、ひとつの地盤パラメタを係数として、反力が沈下量に比例するという経験式に基づくRFT (Resistive Force Theory) が確立された。これは、任意の沈下量、任意の移動状態(傾きと速度方向)を持つ微小片が受ける反力を簡易的に表した式である。計測可能な沈下量と幾何形状から決定される接触面積、ひとつの地盤パラメタから得られる反力を計算することができる。事前に必要な地盤パラメタはスケールングファクタのみであり、これは対象地盤への平板貫入試験で簡単に計測できる。ただし、RFTは基本式となるため、移動機構の形状毎に定式化を図る必要がある。

これまでにグローサ付車輪の定式化と形状の設計結果は申請者独自の数値計算によりいくつか確認されている。したがって、柔軟地盤の単輪走行試験を通して、(1)実験結果と数値計算結果の比較、(2)設計結果の性能を比較評価することにまず着手し、一連のモデル化、設計の流れが妥当であることを確認する。そして、平板の定式化も進め、同様に沈下量を最小化もしくは最大化する形状を導出し、その形状を用いた車輪の性能を確認する。次に、「重力」や「真空」等の宇宙固有の条件を加えた場合での、各モデルの推定精度、性能を評価する。ただし、「重力」の条件を再現するには、航空機、落下棟、宇宙ステーション等の利用が必須となり、かかるリソースが許容範囲を超える。また、真空で砂を扱えるチャンバも同様である。したがって、既存のDEMソフトウェアを利用した、三次元シミュレーションを併用して一定の妥当性を得る。上記をまとめると、3年の研究期間において、グローサ付車輪や平板等のRFTを基本としたモデルを推定・評価ツールとして獲得し、その適用が可能なシミュレーションの準備をする。また、変分法を基本とした形状設計の手順を確立し、その設計で得られた移動機構の最適性を実験的に確認する。

4. 研究成果

RFTの基本式を用いて、グローサ付車輪の反力(牽引力)の推定式を独自に導出し、過去の実験結果と比較検討した。また、反力推定式が「曲線の長さ」を表す式に類似していることから、変分法を用いて極値を導出したところ、それが沈下量を極小化するグローサ形状であることが判明した。また、形状が線形であることを仮定した場合の形状は、1800年中頃に考案された、ブキャナン/モルガンの船舶用パドル車輪と完全に同じ結果となった。しかしながら、いずれの結果も回転位置に応じてグローサ形状を変化させる必要があるため実装性が低い。ただし、類似の形状、例えば、4分の1(楕)円弧で固定された形状グローサを用いてもほぼ同様の結果を得られることを数値計算上で確認した。その性能は通常の平坦なグローサと比べて、同じ沈下量で得られる反力が倍以上になると推測している。このような経緯から、提案するモデルの妥当性の確認も含めて、設計されたグローサ形状の実験的な検証が必要と認識された。そこで、グローサ付き車輪の設計製作を進めたところ、複雑な形状となるため、製造費用が非常に高額となることがわかった。そこで、車輪構造を支持構造(ジョイント含む)とグローサに分割して設計し直し、実装も含めた検討を行いその一つの解(図1)を得ることができた。より、一般的なグローサも合わせて比較評価するために、3Dプリンタで最低限の強度を維持したグローサを作り、評価した結果、所望の性能(牽引力、ブルドーzing力)を得るための手順を確認することができた。最終的

には、沈下のしにくい、かつブルドーリング力を確保できる正多面体形状のグローサを設計製造する一連の流れを獲得することができた。

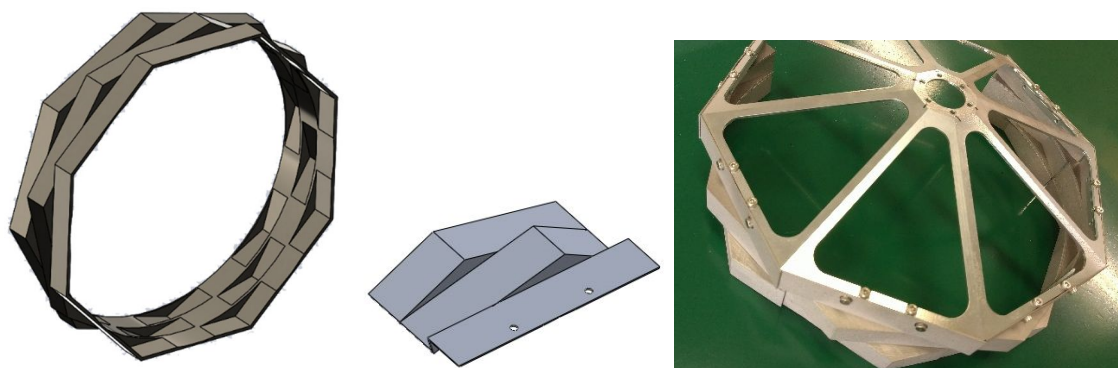


図1 少ない沈下量で比して大きな牽引力ならびにブルドーリング力を発生できるグローサ付き車輪。左：全体形状(奥行方向で分割し位相をずらす)、中：3Dプリンタで製造するように部品を分割した1ブロックのCAD図、右：金属削り出しスポークと3Dプリンタで製造したグローサを組み合わせた試験用車輪

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Masatsugu Otsuki, Kento Yoshikawa, Takao Maeda, Tetsuo Yoshimitsu, Yasuharu Kunii
2. 発表標題 Design for wheel grouser geometry to direct planetary hopping rover
3. 学会等名 i-SAIRAS 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------