

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760193

研究課題名(和文) 偏心モータによる繊毛推進機構の微小重力環境適応型ホップ移動に関する力学理論

研究課題名(英文) Analysis on Dynamics of Ciliary Micro-Hopping Mechanism by an Eccentric Motor in a Micro-Gravity

研究代表者

永岡 健司 (Nagaoka, Kenji)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60612520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、近年注目される太陽系小天体探査における微小重力天体表面上での小型ロボットによる新たな移動方式に関する研究を実施した。具体的には、これまでにない新方式として、偏心モータの振動的な遠心力と反トルクを弾性繊毛に作用させて重力等の環境に応じたホップ移動を実現する繊毛推進機構の力学モデルを構築した。特に、振動により繊毛推進機構でマイクロホップ移動せきることを明らかにし、地上での模擬微小重力下での実験を通じて、繊毛推進機構の有用性、および力学モデルとの整合性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Novel locomotion mechanism and its theoretical mechanics were investigated for future robotic exploration in a micro-gravity asteroid. The proposed mechanism is adaptive ciliary hopping by using an eccentric motor and its dynamics modeling was developed. The validity of the mechanism and the modeling were also confirmed through experiments with an air-floating test bed which can emulate planar micro-gravity environment.

研究分野：宇宙ロボティクス

キーワード：移動ロボット 微小重力 振動推進 力学モデリング

## 1. 研究開始当初の背景

小惑星や彗星などの太陽系小天体は、太陽系誕生期の記録を留めた学術的に探査価値の高い始原天体とされている。2010年6月に地球へ帰還した小惑星探査機「はやぶさ」の功績を受け、今後の太陽系小天体探査には、移動ロボットが直接的に天体表面を調べることが期待されている。

一般に、小惑星上での重力は地球上の1万分の1以下と非常に小さく、形状の歪さによる偏差も大きい。そのため、このような不安定な微小重力環境下で用いる移動機構は、地上のような重力依存の接触力に基づく摩擦力を推進源とした移動方式では十分な移動速度を実現することができない。そこで、微小重力天体上での新たな移動方式として、不確定性を持つ微小重力環境に適応可能な繊維推進機構の着想に至った。その移動原理は、偏心モータを用いることで「本体の回転反力」および「斜めに取り付けられた弾性を有する繊維束の復元力」を利用し、微小な重力環境に応じたホップ移動を実現するものである。

しかし一方で、微小重力下での繊維推進機構はこれまで適用例がないため、研究の着想の初期検討段階として、簡便な実験装置を製作し、提案する移動方式の実現性を予備走行実験により確認した。その結果、地上重力の1/152の模擬低重力下で偏心モータによる遠心力(振動)を繊維束に作用させることで、これまでにないマイクロホップ移動が実現できることを確認した。

以上のような背景のもと、微小重力環境下での新たな移動方式として繊維推進機構の精細な力学モデルの構築し、実システムへの応用を踏まえた実験的検証を行うことを目指して、本研究を計画した。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、偏心モータ型の繊維推進機構の移動力学を実験から体系化し、学術的

に信頼性を持った理論モデルを構築することを目的とする。これにより、微小重力などの重力環境への適応性を踏まえた解析へと拡張させることを目指す。

## 3. 研究の方法

モデル化に際して、具体的には、以下の研究項目について実験的な解析を反映させて動力学を明らかとしていく。

- 各影響因子と運動特性(並進・回転運動の軌跡)との相関の整理: 実験中の全体運動を解析
- 各影響因子と繊維のミクロな動的挙動との相関の整理: 実験中の繊維挙動を観察
- 繊維と走行表面との力学的な相互関係の数式化(理論モデルの構築)

また、本研究課題では、以下の項目に影響因子として各々の値を変化させることにより、繊維推進機構による運動特性(並進・回転運動の軌跡)との相関を体系的に整理する。

- 環境: 微小重力環境, 走行表面の摩擦特性
- 動作: 偏心モータの回転速度(振動数), 偏心モータの回転加速度(トルク)
- 設計: 繊維束(直径・長さ・取付角・弾性係数), 偏心錘(質量・回転中心から錘の重心までの距離)

本研究課題では繊維推進機構と走行表面との間に生じる相互力学現象の理解を目的とし、実験的アプローチを基盤として環境・動作・設計の各影響因子に対して本体の並進・回転の運動軌跡が時間毎にどのように変化するかを体系的にまとめる。

なお、本研究で用いた実験的アプローチとしては、これまで当研究室で実績のある空気浮上装置を利用した模擬微小重力実験にて実施する。本システムは精密石定盤(既に所有)上の実験装置を重力と垂直な方向に二次元的に微小重力とすることが可能である。また、走行表面(は石定盤の側面に垂直固定し、所

望の微小重力を模擬するよう石定盤をわずかに傾けることで、所望の条件を実現する。さらに、新たに、繊毛推進機構を有する移動ロボットの試作機を製作し、運動計測用カメラシステムにて実験装置の運動を解析し、各影響因子との相関を整理する。

#### 4. 研究成果

本研究では、まず図1に示すような、空気浮上装置を備えた繊毛推進機構を有する移動ロボット試作機を製作した。また、実験環境を図2に示す。特に、走行面への微小重力環境の模擬方法として、図2中の石定盤をベニヤ板の取り付けられた走行面側に僅かに傾斜させることで、安定した微小重力環境を実現した。ロボットは無線通信を介した遠隔操作により駆動し、外部の外乱因子を取り除いた装置となっている。ロボット運動は、定盤の周囲に配置したモーション・キャプチャ・カメラ・システムにより、位置誤差1mm以下の高い精度での運動解析を行った。

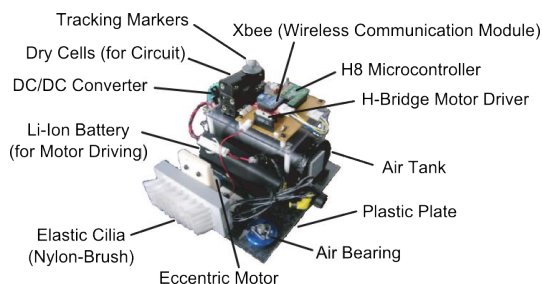


図1: 空気浮上型の繊毛推進ロボットの外観

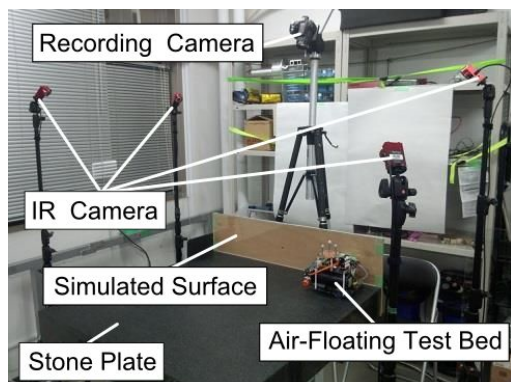


図2: 実験環境の外観

本実験装置を用いて、偏心モータの回転速

度と弾性特性の異なる繊毛での実験を行った。図3にロボットの移動の様子を、走行履歴データの一例を図3に示す。

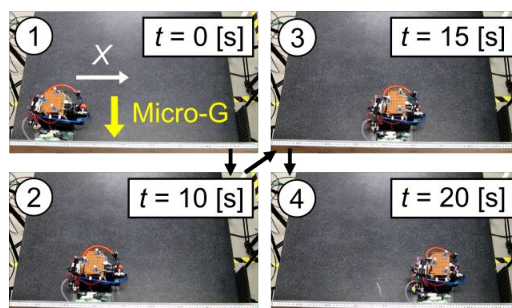


図3: ロボットのマイクロホップの様子

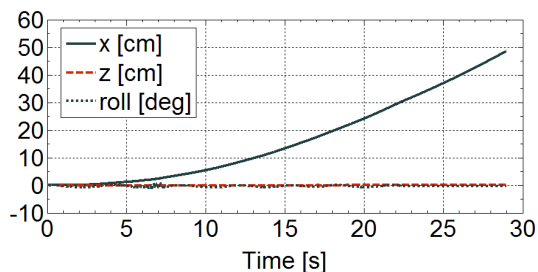
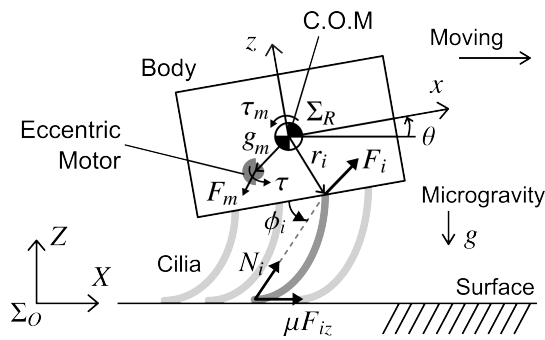


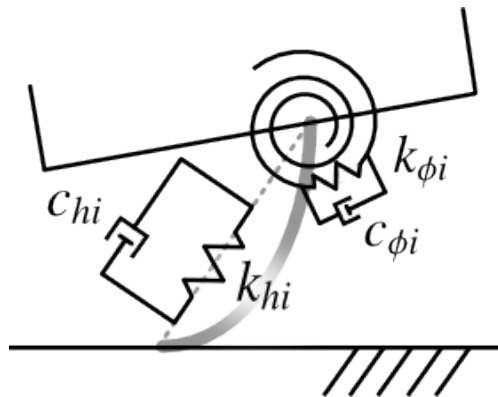
図4: ロボット位置・姿勢の時間履歴例 (高弾性繊毛, 高速回転の場合)

これらの結果から、繊毛機構の弾性特性や偏心モータの回転速度、および走行面の摩擦特性の違いに対する動的運動の影響を定量的に整理するとともに、提案する機構が一定以上の遠心力により、正常にマイクロホップホップが実現できることを明らかとした。

実験的な運動解析に次いで、力学モデルの構築を行った。本研究課題では、過去に地上の振動推進ロボット用として構築されているモデルを規範として、微小重力での影響を考慮した反トルクモデル、および摩擦判定、モータ方程式を導入した拡張モデルを構築した。本研究課題で対象とした力学モデルの概略を図5に示す。ここでは、二次元モデルを対象とし、弾性繊毛は付け根部での回転トルク成分と伸縮力の成分とに分割できると見なして、それぞれ図5(b)で示すような線形バネ・ダンパ系で表現した。



(a) ロボットシステム全体



(b) 繊毛部の動力学モデル

図 5: 繊毛推進型ロボットの動力学モデル

以上のモデルに基づく動力学シミュレーションの結果と実験結果とを比較した結果、構築した動力学モデルが、微小重力振動下でのロボットの運動を表現できていることが分かった。これにより、微小重力下での繊毛を用いた振動推進機構の力学メカニズムを明らかとすることができたといえる。また、構築したモデルには、ロボットを駆動させる制御項、および各環境因子がパラメータとして組み込める形で構成されており、未知の小天体環境下での動作シミュレーションを可能とする基盤技術を構築することができた。

## 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)

[学会発表](計5件)

Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida,

Masamitsu Kurisu, Koichi Osaka, Kenjiro Tadakuma, Yuichi Tsumaki, Takashi Mineta, Shinichi Kimura, Tomohiro Narumi, Takashi Kubota, and Tetsuo Yoshimitsu, “Development of MINERVA-II2, a Micro-Robot for Asteroid Surface Exploration with Innovative Mobility”, *The 11th Low-Cost Planetary Missions Conference*, Germany, 11 June, 2015.

K. Nagaoka, H. Yatsunami, K. Yoshida, T. Adachi, M. Kurisu, Y. Kuroda, T. Yoshimitsu, T. Kubota, H. Yano, “Analysis and Evaluation of Deployment Mechanism of a Tiny Rover in a Microgravity by Drop Tower Experiments”, *The 40th COSPAR Scientific Assembly*, Moscow, Russia, 5 August, 2014.

K. Nagaoka, K. Yoshida, “Modeling and Analysis of Ciliary Micro-Hopping Locomotion Actuated by an Eccentric Motor in a Microgravity”, *The 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, 4 November, 2013.

永岡健司, 吉田和哉, “小惑星探査ローバのための繊毛式マイクロホップの動力学解析”, 日本ロボット学会 第30回記念 学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 北海道, 2012年9月18日.

K. Nagaoka, R. Takano, T. Izumo, K. Yoshida, “Ciliary Locomotion of an Asteroid Exploration Rover with an Eccentric Motor”, *Proceedings of the 11th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, Turin, Italy, 5 September, 2012.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

永岡 健司 ( NAGAOKA, KENJI )  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：60612520

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし