

平面微小重力実験による環境駆動型トルカの性能評価

Performance Evaluation of Environment-Driven Torquer by Planar Microgravity Experiments

○風間亮, 菊地喜貴, 妻木勇一

○ Ryo Kazama, Yoshitaka Kikuchi, Yuichi Tsumaki

山形大学

Yamagata University

キーワード: トルカ (torquer), 小惑星探査 (asteroid exploration),
宇宙ロボット (space robot), ローバ (rover), 微小重力 (microgravity)

連絡先: 〒 992-8510 山形県米沢市城南 4 丁目 3-16
山形大学大学院 理工学研究科機械システム工学専攻 妻木研究室
風間亮, Tel&Fax: 0238-26-3252, E-mail: tkk68539@st.yamagata-u.ac.jp

1. 諸言

現在 JAXA は 2014 年 11 月 30 日にはやぶさ 2 の打ち上げを予定している¹⁾. はやぶさ 2 は小惑星 1999 JU3 を探査し, 科学的観測及びサンプルリターンを行う予定である. はやぶさ 2 には DLR が製作した MASCOT²⁾ や 3 台の小惑星探査ローバ (以下ローバ) が搭載予定である. その内の 1 台は大学コンソーシアムで製作が進められており, 打ち上げに向け最終調整が行われている. このローバは小惑星探査のための技術確立が目的であり, ローバのための新たな移動機構の提案・開発が進められている³⁾⁴⁾⁵⁾.

ローバははやぶさ 2 から離れて自立行動するため, CPU・センサ・通信機器等を使用するための電力はローバ表面に取り付けられた太陽電池セルの発電から供給される. しかし, ローバは小型であるため太陽電池セルの設置面積が小さく, 得られる電力は乏しい. さらに, 観測デー

タの取得やはやぶさ 2 との通信には大量の電力が必要となり極めて厳しい電力環境が予想される. このため移動機構は少ない電力で駆動することが望ましい. そこで我々は移動機構のエネルギー源として小惑星の環境に着目し, 環境駆動型ローバを提案・開発してきた⁶⁾⁷⁾. 外部電源や CPU を使わず, 環境の温度変化だけで形状記憶合金やバイメタルを変形させ移動するローバである. 同様の構想は Montminy らも火星探査を対象として提案している⁸⁾. しかし, 機構が複雑で重力が比較的大きく自転速度が地球と変わらない火星を対象としているため, 効率的な探査は困難である.

これまで我々は環境駆動型ローバを移動機構に応用した環境駆動型トルカ (EDT, Environment-Driven Torquer) を開発してきた⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾. EDT はアクチュエータにバイメタルを使用することを特徴としており, 環境の温度変化で起こるバイメタルの湾曲を利用することで電力や

CPU を用いずに駆動することができる移動機構である。小惑星表面は自転のたびに 100 °C 以上の温度変化が起こる環境であり、この温度変化を利用することでローバの厳しい電力環境に依存することなくローバを移動させることができる。

本稿では新たに製作した EDT のフライトモデル (FM) 相当品を用いて平面微小重力実験を行い、性能評価を行う。以後フライトモデルを FM, FM と同寸法の地上プロトタイプを FM 相当品と呼ぶ。

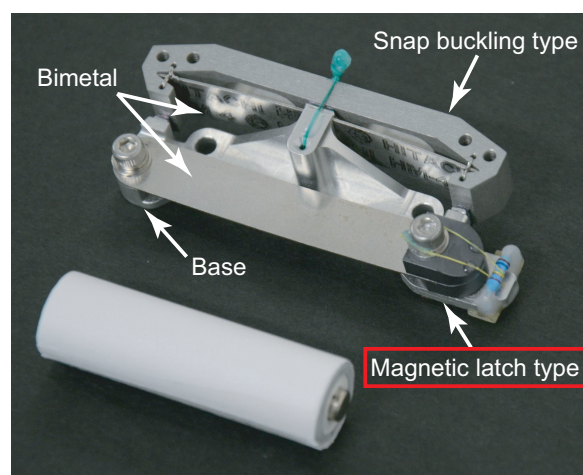


Fig. 1 EDT FM

2. EDT FM

2.1 EDT FM の基本仕様

製作した移動機構の FM を Fig. 1 に示す。主な仕様を以下に示す。

- 全重量 27.5 g
- アクチュエータにバイメタルを使用
- 環境の温度変化のみで駆動
- 土台に誤作動防止のための固定機構を設置
- 一部部品に表面処理を施し、宇宙空間での金属固着を防止
- 磁石ラッチ型と飛び移り座屈型の 2 種類の EDT を搭載
- 2 つの EDT の動作温度をずらし、小惑星の幅広い推定表面温度に対応

EDT はアクチュエータとして環境の温度変化で湾曲を生じるバイメタルを使用する。小惑星の自転周期は 7.6 時間と推定されており、自転による温度差により昼夜に 1 回ずつ駆動することができれば地球時間の 1 日で 6 回、1 年間で 2000 回以上の駆動が期待できる。

2.2 磁石ラッチ型 EDT

本稿では磁石ラッチ型 EDT についてのみ論じる。磁石ラッチ型 EDT の駆動する仕組みを Fig. 2 に示す。駆動サイクルを以下に示す。

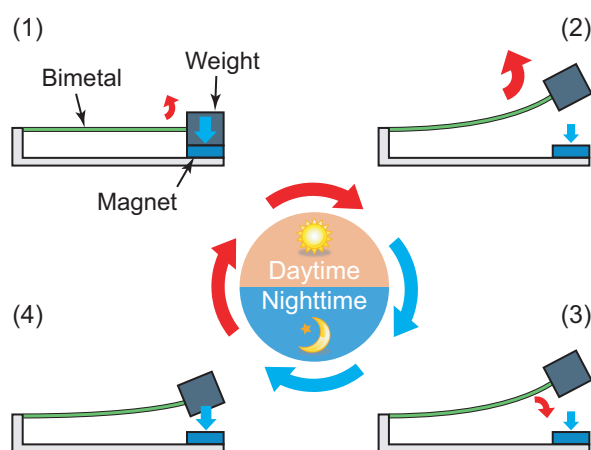


Fig. 2 Principle of the magnetic latch type EDT

- 1) 小惑星が昼間になるとローバの内部温度が上昇し、バイメタルは上向きに湾曲しようとするが磁石によっておもりは固定されている。
- 2) ある温度に達するとバイメタルの湾曲しようとする力が磁石の吸着力に勝り、おもりが磁石ラッチから離脱し、反力を発生させローバをホップさせる。
- 3) 小惑星が夜になるとローバの内部温度が下がり、バイメタルは下向きに湾曲を開始する。
- 4) ある程度下向きに湾曲すると磁石の吸着

力でおもりがラッチに吸着する。

以上のサイクルを繰り返すことで電力を使用することなく環境の温度変化のみでローバをホップさせることができる。磁石ラッチ型のみの重量は 10.1 g となっており、バイメタルの先端には 6.2 g のおもりが取り付けられている。実験からおもりの動作温度は 36 °C、吸着温度は 0 °C 付近、動作直後の変位量は 4.7 mm であった。FM のバイメタルのばね定数は直接計測することができなかったため同じ部材から同時期に作成した同寸法のバイメタル 12 本を計測し、その平均値である 401 N/m の値を使用することとした。おもりと磁石を固定する部品には金属固着を防ぐためのモリブデンコーティングが施してある。

3. 平面微小重力実験

FM の性能評価を行うため FM 相当品を用いた平面微小重力実験を行った。実験の様子を Fig. 3、実験装置のコントロールシステムを Fig. 4 に示す。エアベアリングを用いて CO₂ ボンベからガスを噴射することで実験機と接地面との摩擦を小さくし、石定盤を僅かに傾けることで平面上に微小重力下を再現した。EDT おもり、実験機の重心位置、地面との接触面が鉛直線上になるように EDT が取り付けられており、XBee を用いて信号を送ることでバイメタルの真下に設置したニクロム線ヒータでバイメタルを加熱し、EDT を動作させることができる。実験機には赤外線 LED が取り付けられており、OptiTrack を用いて実験機の動きをトラッキング出来るようになっている。石定盤には傷が多く見られたので平滑性の高いガラス板の上で実験を行った。平面微小重力実験の地面に相当する場所にニッタ株式会社製 6 軸力覚センサ IFS-67M25A25-I40 を設置し、地面から動き出す際の力を計測した。実験は 5 回行った。

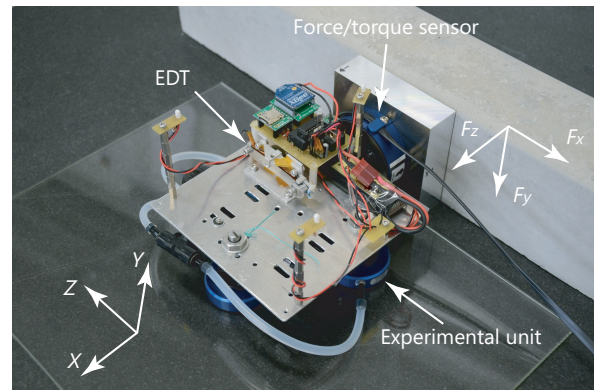


Fig. 3 Experimental setup

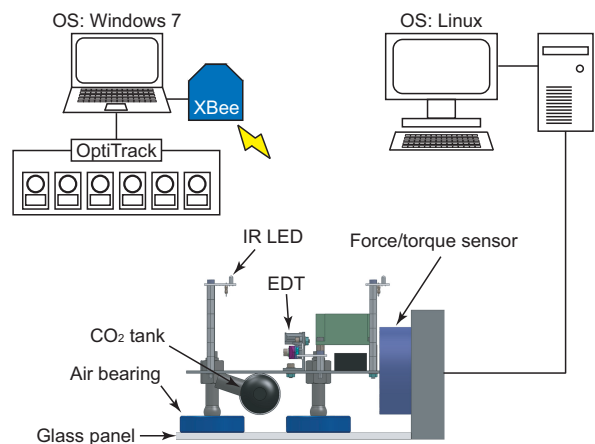


Fig. 4 Control system

実験機は 1.05 kg となっており、FM 相当品のバイメタルは動作温度 37 °C、動作直後の変位量 5.6 mm、ばね定数 408 N/m のものであった。

3.1 解析方法

バイメタルのばね定数、動作直後の変位量から板ばねが蓄えていたエネルギーが算出できるため、そこから実験機の初速を算出できる。これを計算値と呼ぶ。

一方、実験機の軌跡を OptiTrack で計測し、FM 相当品動作後の実験機の動きを放物線の 2 次関数に近似し、そこから重力加速度・初速・エネルギーを求める。この値を実験値 1 とし、計算値を比較することで EDT の性能評価を行った。また検証用に小惑星表面を模擬した 6 軸力

Table 1 Experimental results

重力加速度 [μg] (実験値 1)	213
初速 [mm/s] (実験値 1)	7.49
最高点 [mm] (実験値 1)	14.1
初速 (実験値 1) から算出した 運動エネルギー [μJ]	29.5
計算値に対する初速の相対誤差	-11.5 %
計算値に対する最高点の相対誤差	-21.1 %

覚センサのデータから力積を求め、初速を算出した。これを実験値 2 とする。なお 2 次関数への近似は後半になるにつれて摩擦の影響が出てくるので最高点付近までの値を用いた。FM 相当品の計算値は初速は 8.5 mm/s 、運動エネルギーは $37.7 \mu\text{J}$ となった。

3.2 実験結果

実験のスナップショットを Fig. 5, OptiTrack の計測結果を Fig. 6, 力覚センサの計測結果を Fig. 7, 実験結果を Table 1 に示す。Fig. 5~7 は重力加速度の平均値の $213 \mu\text{g}$ に最も近い $191 \mu\text{g}$ の実験データを抜粋したもので Table 1 の値は 5 回の実験の平均値である。解析結果より計算値の初速と実験値 1 の初速の相対誤差は -11.5 %、最高点の相対誤差は -21.1 % となった。ここで運動エネルギーは速度の 2 乗、位置エネルギーは高さに比例する。したがって初速から求めたエネルギーの相対誤差の平均は -21.7 % となる。さらに、6 軸力覚センサの計測値から初速を求めると 7.5 mm/s となり、実験値 1 と実験値 2 の初速はほぼ一致した。

3.3 移動性能

実験結果より FM の性能を推定する。ローバの質量を 850 g とし、FM の特性から計算するとローバの初速は 8.7 mm/s 、エネルギーは $32.2 \mu\text{J}$ となり、予想重力下である $5.3 \sim 44.3 \mu\text{g}$ では $8.72 \sim 72.9 \text{ cm}$ ホップする。実験と同様に EDT がローバに与える初速を計算値の 11.5 % 減、エネルギーを計算値の 21.1 % 減するとローバの初

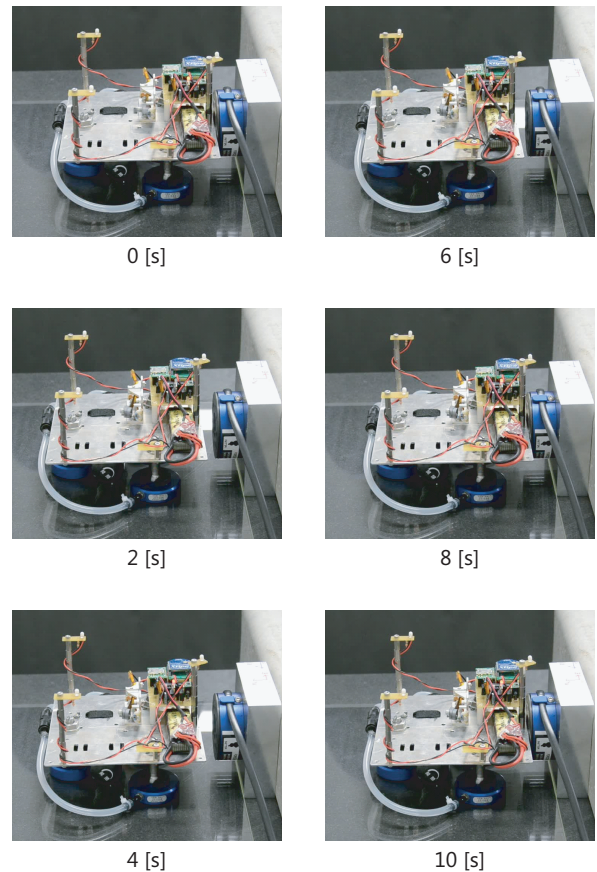


Fig. 5 Snapshots

速は 7.7 mm/s 、エネルギーは $25.4 \mu\text{J}$ となり、 $6.88 \sim 57.5 \text{ cm}$ ホップすると考えられる。

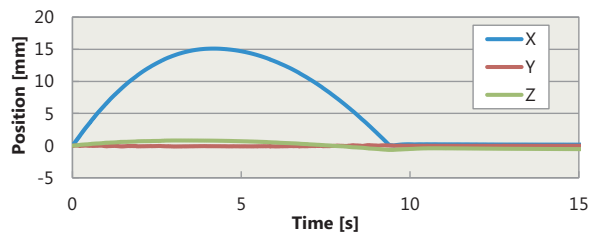
4. 結言

平面微小重力実験により磁石ラッチ型 EDT FM の性能評価を行い、磁石ラッチ型 EDT は小惑星の微小重力下では $6.88 \sim 57.5 \text{ cm}$ ホップする移動性能があることを示した。

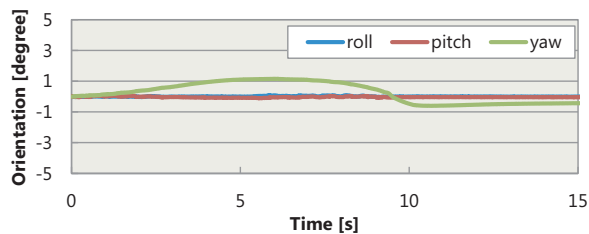
今後は地面と EDT の相対位置の違いによる移動方向の違いや摩擦の影響を検証する。

参考文献

- 1) はやぶさ 2 プロジェクト
<http://b612.jspec.jaxa.jp/hayabusa2/index.html>
- 2) Caroline Lange, Claudia Dietze, Tra-Mi Ho, Olaf Kroemer, Michael Lange, Susanne Wagenbach, Lars Witte and the MASCOT Study



(a) Position with 191 μg



(b) Orientation with 191 μg

Fig. 6 Measurement results of the OptiTrack

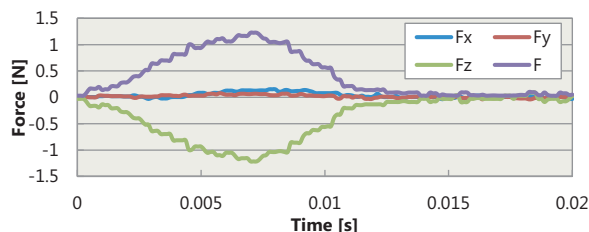


Fig. 7 Reaction force with 191 μg

Team: “Baseline design of a mobile asteroid surface scout (MASCOT) for the Hayabusa-2 mission,” 7th International Planetary Probe Workshop Proceedings, Barcelona, Spain, 2010.

- 3) 永岡健司, 高野陸, 出芝崇之, 吉田和哉: “次期小惑星探査ロボットののための繊毛推進機構の移動特性”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’12 講演論文集, 1A2-L09, 2012.
- 4) 栗栖正充: “永久磁石を用いた低重力下における小型ホッピング機構の提案”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’12 講演論文集, 1A2-L10, 2012.
- 5) 大須賀公一, 望山洋, 多田隈建二郎, 坂東麻衣, 大方圭介: “微小重力小惑星探査ローバーのための飛び移り座屈を用いた駆動ユニットの提案”, 第13回制御部門大会, 2013.
- 6) 妻木勇一, 赤池貴裕, 峯田貴, 多田隈理一郎: “環境駆動型小惑星用ローバーの提案”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’12 講演論文集, 1A2-L08, 2012.

- 7) Y. Tsumaki, T. Akaike, R. Kazama, T. Mineta, R. Tadakuma: “Environment-Driven Rover for Asteroid Exploration,” i-SAIRAS 2012.
- 8) Steeve Montminy, Erick Dupuis, Henri Champiaud: “Mechanical design of hopper robot for planetary exploration using SMA as a unique source of power,” ACTA ASTRONAUTICA, Vol.62, issues 6-7, pp. 438-452, 2008.
- 9) 風間亮, 妻木勇一, 赤池貴裕, 峯田貴, 多田隈理一郎: “環境駆動型トルカの提案”, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会, 2G2-2, 2012.
- 10) Y. Tsumaki, R. Kazama, Y. Kikuchi, K. Ota, A. Sugai, T. Mineta, R. Tadakuma, T. Yoshimitsu, T. Kubota, T. Adachi, Y. Kuroda, H. Yano: “Free-fall experiments of Environment-Driven Torquer with magnetic latch for asteroid exploration,” i-SAIRAS 2014.
- 11) 風間, 菊地, 大田, 妻木, 菅井, 峯田, 多田隈, 吉光, 久保田, 矢野, 黒田, 足立: “自由落下実験による環境駆動型トルカの性能評価”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’14 講演論文集, 1P2-K03, 2014.