

# 慣性力と弾性体を利用した移動メカニズムを有する 小天体探査ロボットにおけるホップ移動の実験的解析

## Experimental Analysis of Hopping Locomotion for Exploration Robot utilizing Inertia Force and Elastic Body on Small Celestial Body

○板東歩\*, 金子利康\*, 永岡健司\*, 吉田和哉\*

○ Ayumu Bando\*, Toshiyasu Kaneko\*, Kenji Nagaoka\*, Kazuya Yoshida\*

\* 東北大学

\*Tohoku University

キーワード： 小天体探査 (small celestial body exploration), 微小重力 (micro gravity), ホップ移動 (hopping locomotion), 反トルク (reaction torque), 繊毛 (cilia)

連絡先： 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻 吉田研究室

板東歩, Tel.: (022)795-6993, Fax.: (022)795-6993, E-mail: ayumu.bando.p3@dc.tohoku.ac.jp

### 1. 緒言

小天体を探査することで、太陽系の起源や進化の過程を解明する重要な手がかりが得られると期待されている。天体表面の詳細調査には、探査ロボットによる移動調査が有効である。小天体上は微小重力環境であるため、地面との摩擦が十分に得られない車輪型のロボットは不向きである。そこで、JAXAによる小惑星探査機「はやぶさ」や「はやぶさ2」に搭載された探査ロボット MINERVA<sup>1)</sup> や MINERVA-II<sup>2)</sup> 等では、小天体表面の重力場や地形の環境不確定性を考慮して、内力によってロボットを地面に押し付け、その際発生する反力を利用して跳躍するホップ移動が採用されていた。これは微小重力を有効活用した移動方法ではあるが、ロボットが静止するまでバウンドを繰り返すため、目的の場

所に正確にたどり着くことは困難である。永岡ら<sup>3)</sup>は、目的地到達性の向上を目的として、探査ロボット MINERVA-II-2 の移動モードの一つに、偏心モータを用いた繊毛型振動推進機構を採用した。これは、偏心モータを利用して振動を発生させてロボットを加振し、ロボット表面に斜めに取り付けた無数の弾性繊毛を微小変形させることにより、推進力を得られる移動機構である<sup>4)5)</sup>。この移動モードは、遠心力を利用して天体表面を這って進むため、微小重力環境でも十分な移動速度かつ高い移動精度を発揮することができる。しかし、繊毛型振動推進機構は、起伏のある傾斜地や凹凸のある地形での移動には不向きである。

このような偏心モータが生み出す遠心力を利用した繊毛型振動推進に加えて、永岡ら<sup>6)</sup>は同

時に発生する反トルクを利用して、ホップ移動にも遷移することができる移動機構の実現可能性を示した。この移動機構は、単一のアクチュエータで2つの移動モードを生み出すことができる。よって、繊毛型振動推進では踏破できないような傾斜地や凹凸を、モータの制御方法を切り替えることで、ホップ移動により踏破性を向上させることができるといった、移動モード遷移が可能であることが利点として挙げられる。これに関して、金子ら<sup>7)</sup>はその移動原理や運動特性を明らかにした。この移動機構において、繊毛型振動推進については適当な入力条件を与えることで、運動を変化させられることが報告されている。しかしホップ移動に関しては、ホップ時の状態と生み出される運動性能との相関は明らかにされていない。

そこで、本研究では、遠心力と反トルクにより移動モード遷移が可能であるロボットにおける、モータ入力やロボット状態を変化させた場合のホップ移動の解析を行うことを目的とし、二次元微小重力環境における実験を行った。

## 2. ホップ移動実験

### 2.1 実験環境

Fig. 1に、実験環境を示す。Fig. 1は、石定盤とテストベッドからなる空気浮上式の二次元微小重力模擬環境である。石定盤の二次元平面における大きさは1 m×1 mであり、定盤に固定する慣性座標系をFig. 1に示すように設定した。Fig. 1に示すように、テストベッドの進行方向はX軸の正方向であり、重力の作用方向はY軸の負方向である。テストベッドは空気浮上装置として内部にエアタンク、底面にエアベアリング(NEWWAY社製)を搭載しており、エアベアリングを通して空気を噴出することで、石定盤上を微小に浮遊させることができる。このため、石定盤とテストベッド間の摩擦をほぼ0とみなすことができ、この状態で石定盤をY軸

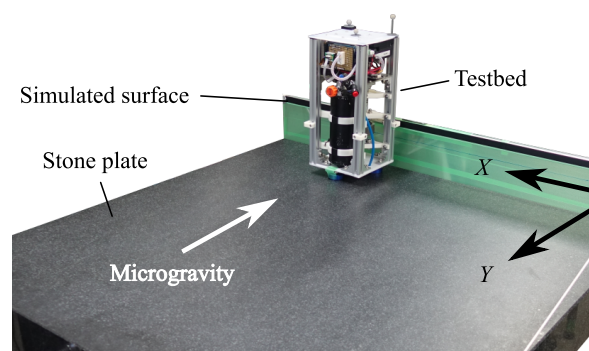


Fig. 1: Overview of microgravity emulation environment

方向に僅かに傾けることで、テストベッドに微小重力が作用するため、二次元の微小重力環境を実現できる。

外部計測環境として、モーション・キャプチャカメラ(NaturalPoint社製FlexV100:R2)を使用し、テストベッドの重心位置と姿勢を計測した。なお、計測データの位置誤差は0.1 mm以下、カメラのサンプリング周期は100 Hzである。その際に、モータの起動時刻とモーション・キャプチャカメラの記録開始時刻を一致させることで、エンコーダから読み取ったモータの回転周波数と、テストベッドの位置・姿勢情報を同時刻で比較できるように環境構築を行った。さらに、模擬表面においてテストベッドがホップ移動する様子を観察するため、デジタルスチルカメラRX100V(SONY社製)を用いて撮影を行った。

### 2.2 テストベッド概要

Fig. 2に、使用したテストベッドを示す。テストベッドのXY平面上の大きさは15 cm×15 cm、全体質量は4.32 kg、全体慣性モーメントは $1.54 \times 10^{-2} \text{ kgm}^2$ である。モータはmaxon motor社製のブラシ付きDCモータDCX32L(公称電圧18 V、トルク定数19.5 mNm/A)であり、Fig. 3に示すように、カップリングを介して偏心錘ユニットと接続している。その中心部に位置する偏心錘は外径65 mm、厚さ23 mmであり、内

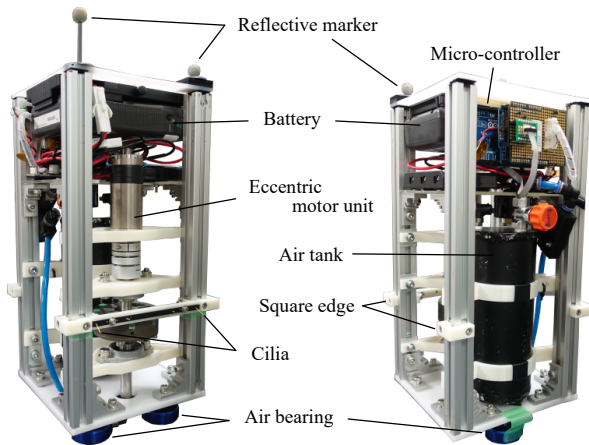


Fig. 2: Overview of an air-floating testbed

部に錘を付加するための8つの空間をもつ。実験条件に応じて使用する錘の個数を変更し、偏心量を設定した。モータドライバはHibot社製1XH PowerModule（電圧5~60 V, 定格直流電圧15 A）、マイコンはArduino Mega 2560（Arduino LLC社製）を使用した。なお、バッテリーはモータ駆動用とマイコン駆動用に分けており、モータ駆動用のバッテリーにはIDX社製E-7s（最大電圧16.8 V, 最大放電電流4.6 A）を使用した。また、操作用PCとマイコン間のデータの送受信には、XBeeモジュール（Digi International社製）を用い、テストベッド搭載のマイコンに対して制御指令の送信と、モータの時系列毎の回転周波数や電流値の受信を行った。

弾性体には、ポリプロピレン樹脂製の線材（直径約0.5 mm）を2本使用し、Fig. 2に示すように弾性体ユニットをテストベッドの一側面に設置した。この弾性体とテストベッド本体がなす取り付け角度はおよそ70 degであり、本数は2本である。

ロボットをホップさせるためには、ロボットの一部を地面に接触させる必要がある。本研究では、Fig. 2に示したように、テストベッドの四角のフレームにABS製のエッジ（以下、直角エッジ）を設置し、これを地面に接触させるものとした。

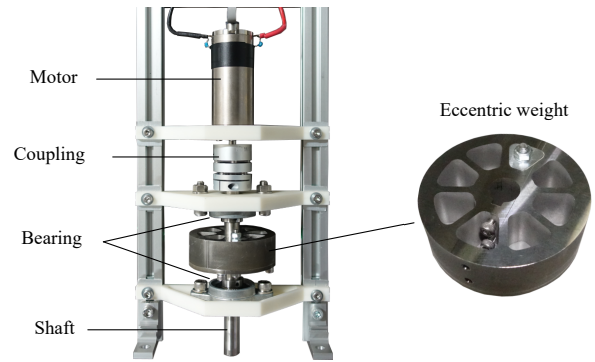


Fig. 3: Overview of an eccentric motor unit and eccentric weights

### 2.3 ホップ移動特性の定義

本研究では、Fig. 4に示すように、ホップ移動メカニズムの運動特性として、以下で定義するホップ速度とホップ角度に着目する。

- ホップ速度

ロボットが地面との接触を断つ瞬間の重心速度とする。XY軸方向のホップ速度として、それぞれ $v_{hx}$ と $v_{hy}$ を用いる。

- ホップ角度

ロボットが地面との接触を断つ瞬間の重心速度ベクトルが地面となす角度とする。ホップ角度 $\theta_h$ は、ホップ速度 $(v_{hx}, v_{hy})$ を用いて以下のように与えられる。

$$\theta_h = \tan^{-1}(v_{hy}/v_{hx}) \quad (1)$$

本研究で実現されるホップ移動の場合、ホップ後にどのような内力を発揮しようとも、ホップ速度とホップ角度が同じであれば、ホップ後は同じ放物軌道を描く。そのため、ホップ移動の軌道を決めるためには、ここで定義したホップ速度とホップ角度の特性を明らかにすることが重要となる。

### 2.4 ホップ移動の様子

ここでは、実際にテストベッドがホップ移動している様子について説明する。テストベッドをホップ移動させるための反トルクを、モータを回

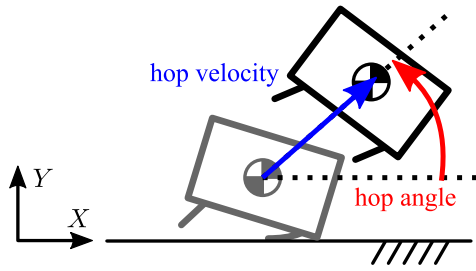


Fig. 4: Definition of hop velocity and hop angle

転周波数制御を行うことで発生させた。モータの制御方式はPID制御とし、制御周期は100Hzとした。このとき、モータの回転方向を反時計回りにすることで、テストベッドに対して時計回りに反トルクを発生させた。Fig. 5は、重力加速度を $1.25 \times 10^{-3} G$ 、目標のモータ回転周波数を25 Hz、目標周波数までの到達時間を0.30 sとしたときのテストベッドの様子である。この図から、モータ反トルクを利用することでホップ移動が実現できることがわかる。また、Fig. 6とFig. 7にこのときのテストベッド重心の時間履歴を示す。Fig. 6とFig. 7はそれぞれテストベッド重心のXY座標と姿勢の時間履歴を表しており、これらの図において、時刻 $t = 0$  [s]はモータが駆動を開始した時刻を表す。

ここで、ホップ移動の軌道に注目すると、Y軸方向については重力が作用するため、Fig. 6が示す通り、上に凸な二次関数のような履歴となり、X軸方向については外力が作用しないため、ほぼ一定速度で移動している。よって、放物軌道で移動していることがわかる。またFig. 7を見ると、ホップ中のテストベッドの姿勢は、時間の経過とともに線形的に減少している。このことから、反時計回りを正としているため、テストベッドは時計回りに一定の角速度で回転しながら移動していることがわかる。

次に、模擬表面近傍にカメラを設置して撮影した動画から、本研究におけるホップ移動のメカニズムについて明らかにする。Fig. 8に、ホップ移動が始まる瞬間の様子を示す。Fig. 8(a)で示すように、直交座標系で $Y = 0$ の水平面が地面で

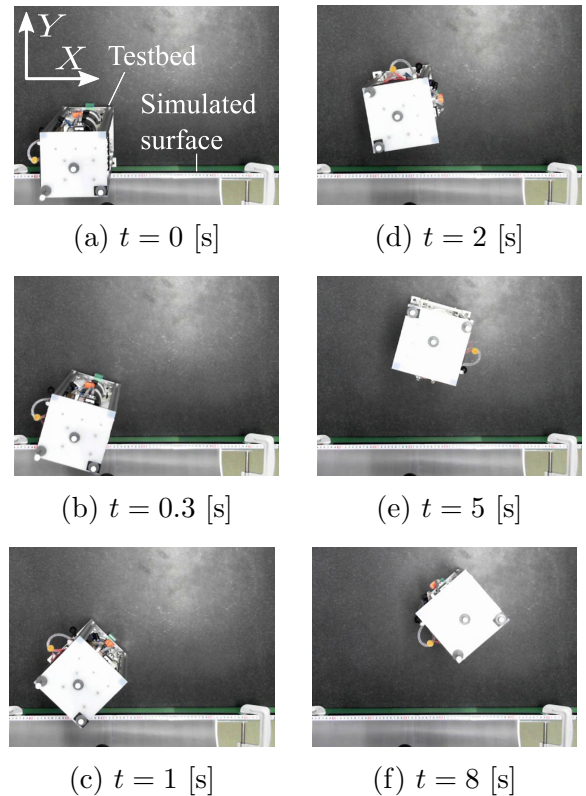


Fig. 5: Experimental results: Snapshots of hopping movement

ある。Fig. 8を用いて、本移動メカニズムを時系列順に整理する。はじめに、 $t = 0$  [s] (Fig. 8(a))で内部の偏心モータが起動する。モータの加速に伴ってトルクが発生し、テストベッドはその反作用として反トルクを受け取るために、時計回りに回転しようとする。その後、 $t = 0.21$  [s]で弾性体先端が地面上を滑ることでテストベッドの姿勢が傾き始める (Fig. 8(b)).  $t = 0.28$  [s] (Fig. 8(c))でテストベッドの直角エッジが地面に接触する。その直後、 $t = 0.35$  [s] (Fig. 8(c))で直角エッジは地面から離れ、ホップを開始する。これらの図から、ホップ移動においてテストベッドが地面に接触している時間は非常に短いことが読み取れる。このため、テストベッドは地面に接触している際に姿勢がほぼ変動しない。よって、このホップ移動は、直角エッジが地面に衝突することにより生じる撃力型のメカニズムであるといえる。

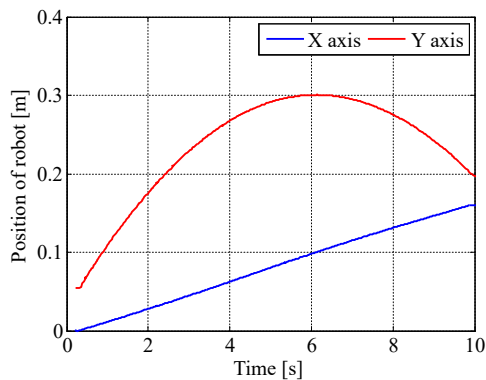


Fig. 6: Experimental result: Time history of position of the testbed

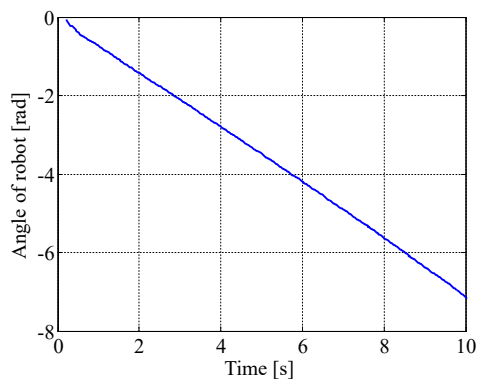


Fig. 7: Experimental result: Time history of angle of the testbed

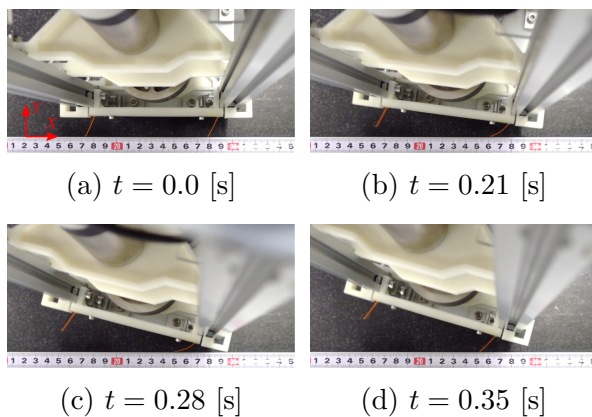


Fig. 8: Experimental results: Snapshots at the start of hopping

### 3. ホップ角度特性の解析

#### 3.1 ホップ角度を変化させる方法の検討

先行研究において、本テストベッドでは反トルクの大きさを変化させても、ホップ角度を大きく変化させることができなかつたことが報告

されている<sup>7)</sup>。一方で、何らかの条件でホップ角度を変化させることができれば、テストベッドの運動の多様性が増し、さらに今後の小天体探査を行う上での活用が期待される。そこで、本章ではホップ角度を変化させる方法として、以下の2つの条件に対して解析した。

- 1) 接触角度を変えてホップさせる
- 2) X軸方向速度をもたせた状態でホップさせる

#### 3.2 接触角度を変えてホップさせる方法

本節では、接触角度がホップ角度にどのような影響を与えるのかを実験的に検証する。Fig. 9に接触角度を定義する。接触角度はロボットが地面から離れる直前に重心と接触部が地面に対してなす角とする。本移動メカニズムは撃力型であるため、地面に接触中のテストベッドの姿勢の変化が小さい。よって、接触中の角度の目安として、Fig. 9で定義した接触角度を用いることとする。

##### 3.2.1 実験方法と実験条件

実験方法としては、テストベッドを模擬表面から少し高い位置で静止させた状態から、モータを駆動してテストベッドに反トルクを作用させてホップ移動させる。テストベッドの初期位置はモータを駆動させたときにすぐに右側のエッジが表面に当たるほどの高さの範囲内で、適した位置に調整した。

実験条件として、重力加速度を  $1.25 \times 10^{-3} G$ 、目標のモータ回転周波数を 25 Hz、目標周波数までの到達時間を 0.3 s と設定した。

##### 3.2.2 実験結果

得られた実験結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 から、接触角度の変化に対するホップ角度の変化に明瞭な傾向は見られないことがわかる。ま

た、ホップ角度は $10^\circ$ 程度の変化量であり、この変化量はあまり大きくないと言える。よって、ホップ角度を変化させるために接触角度を変えるという方法は、両者に明確な関係が見られないため、効果的とは考えにくい。

### 3.3 姿勢を傾けてからホップさせる方法

次に、弾性体を利用して、ゆっくりとロボットの姿勢を傾けてから $X$ 軸方向速度をもたせる方法について検討する。Fig. 11に概念図を示す。Fig. 11(a)に示すように、静止状態のロボットをホップさせるために反トルクを与える際、ロボット本体の回転力が支配的に働くため、弾性体先端は最大静止摩擦力を超えることで $X$ 軸負方向に滑り始める。ここで、弾性体がロボットを押す力はロボットの回転力に比べて非常に小さいことより、ロボットは滑っている弾性体先端ではなく、自身の重心回りに回転しようとすると考えられる。よって、この場合はホップ前に $X$ 軸方向の速度をもたせることができない。

一方で、ここではFig. 11(b)に示す方法について検討する。本手法では、静止状態からホップさせるための反トルクを与えるのではなく、最初は姿勢を変化させる程度の小さい反トルクを与える。このとき、ロボットの回転力は比較的小さな状態であるため、弾性体先端を支点として徐々にロボットが前傾し、 $X$ 軸方向の速度が生じる。このタイミングでロボットをホップさせるための大きなトルクを与えると、ロボットは速度をもった状態でホップする。以降では、本手法によってホップ角度が変化するかを実験的に検証する。

#### 3.3.1 実験方法と実験条件

実験方法として、先述のように最初はテストベッドの姿勢が変化する程度の小さなトルクを与え、一定時間が経過した後に大きなトルクを与えることでホップさせる。このとき、1回目

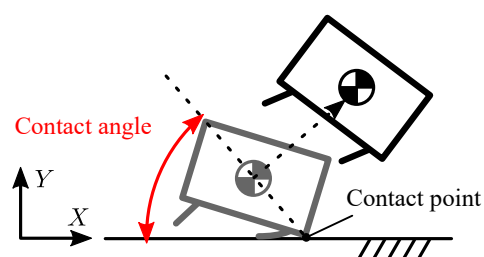


Fig. 9: Schematic illustration of contact angle

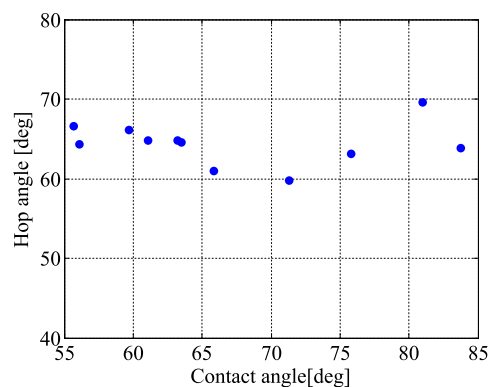
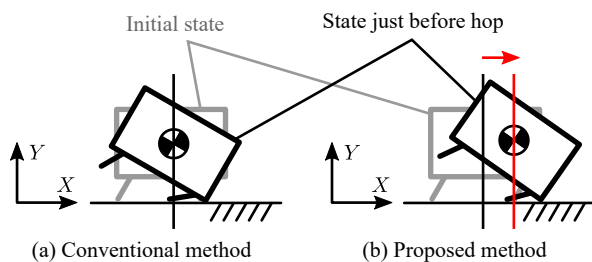


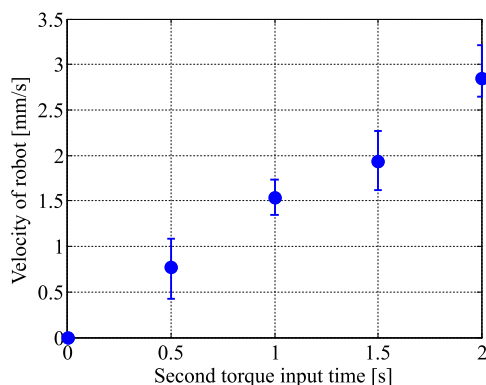
Fig. 10: Experimental result: Relation between contact angle and hop angle

のトルクを与える時間を変化させることでホップ直前の $X$ 軸方向速度を変化させる。1回目に与える小さい反トルクとしては、モータ回転周波数を7 Hz、目標値までの到達時間を2秒に設定することで生成する。2回目にロボットをホップさせるための反トルクは、モータ回転周波数25 Hz、目標値までの到達時間を0.3秒の加速度を以て到達させることで与える。ここで、2回目のトルクをかけるまでにテストベッドに与えることのできた $X$ 軸方向速度についてFig. 12に示す。Fig. 12から、2回目のトルク印加開始時刻を遅らせるほど、テストベッドは $X$ 軸方向速度をもっていることがわかる。これらの結果から、テストベッドは理論通りの挙動を示していることを確認した。以下に、実験条件を示す。

- 重力加速度  
 $1.25 \times 10^{-3} \text{ G}$
- ホップ直前の $X$ 軸方向速度  
#1: 0 mm/s, #2: 0.77 mm/s,  
#3: 1.54 mm/s, #4: 1.94 mm/s,  
#5: 2.84 mm/s



**Fig. 11:** Schematic illustration of the method for changing hop angle



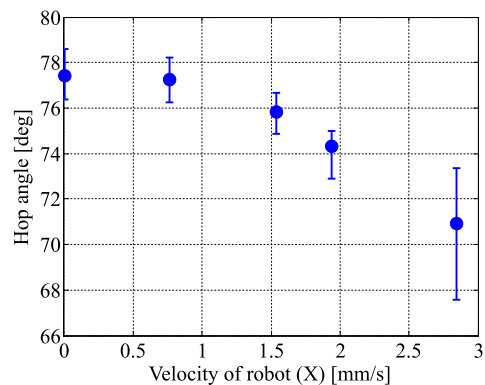
**Fig. 12:** Result of experiment for changing hop angle: Velocity in  $X$  axis under different motor input conditions

### 3.3.2 実験結果

Fig. 13 に、ホップ直前の  $X$  軸方向速度と、その際のホップ角度の関係を示す。Fig. 13 から、変化量は大きくはないものの、ホップ直前の  $X$  軸方向速度が大きくなるほどホップ角度が小さくなる傾向が確認できる。以上より、ホップ直前の  $X$  軸方向速度を大きくすることによって、ホップ角度の変化が実現できることを実験的に示した。

### 3.4 振動推進状態からホップさせる方法

最後に、弾性体を利用してロボットを振動推進させた後にホップさせる方法について検討する。前節では、ホップ前に  $X$  軸方向速度をもたせることでホップ角度が変化する傾向が現れることを確認した。そこで本節では、前節の結果を踏まえ、本移動機構の特長を活かした方法として、移動モード遷移を利用してホップ角度を変化させる方法を検討する。振動推進からホップ



**Fig. 13:** Result of experiment for changing hop angle: Relation between Velocity in  $X$  axis and hop angle

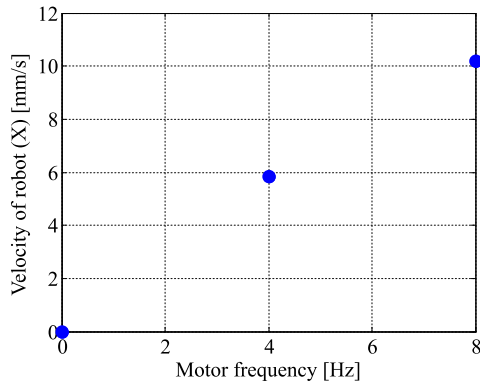
プ移動への移動モード遷移を利用し、ホップ直前の速度を大きくすることで、ホップ角度の変化量も増加すると考えられる。

#### 3.4.1 実験方法と実験条件

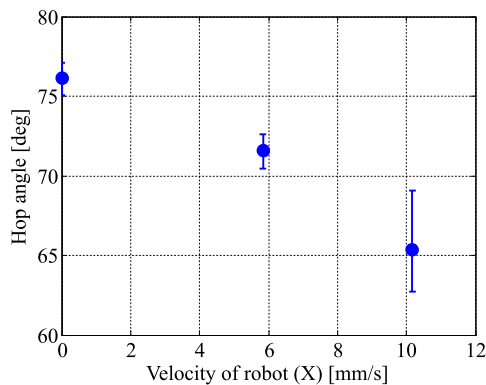
実験方法として、まずは小さな回転周波数で偏心モータを駆動して遠心力を利用することで、テストベッドを振動推進させる。振動推進で模擬表面を一定時間移動させてから、大きな回転周波数でモータを駆動させて反トルクを利用することで、ホップ移動させる。反トルクとして、モータ回転周波数を 25 Hz、目標値までの到達時間を 0.3 秒に設定することで生成する。Fig. 14 に、各周波数においてテストベッドに発生したホップ直前の  $X$  軸方向速度を示す。Fig. 14 から、モータの回転周波数を上げるほどテストベッドの  $X$  軸方向速度が大きくなっていることが確認できる。

以下に実験条件を示す。

- 重力加速度  
 $1.25 \times 10^{-3} G$
- ホップ直前の  $X$  軸方向速度  
#1: 0 mm/s, #2: 5.84 mm/s,  
#3: 10.2 mm/s



**Fig. 14:** Result of experiment for changing hop angle: Velocity in  $X$  axis under different motor frequencies



**Fig. 15:** Result of experiment for changing hop angle: Relation between Velocity in  $X$  axis and hop angle

### 3.4.2 実験結果

Fig. 15 に、ホップ直前の  $X$  軸方向速度とホップ角度の関係を示す。Fig. 15 から、ホップ直前の  $X$  軸方向速度が大きくなるほど、ホップ角度は小さくなるという傾向が確認できる。ここで、ホップ角度は式 (1) で表されることに着目すると、ホップ角度は  $Y$  軸方向速度と  $X$  軸方向速度の比で決定される。これを考慮すると、 $X$  軸方向速度が増加することによって、ホップ角度は小さくなったと考えられる。

また、Fig. 15 で得られた傾向は、前節の Fig. 13 で確認できた傾向と似ていることがわかる。よって、Fig. 13, Fig. 15 から、ホップ角度は接触角度が影響しているわけではなく、ロボットに対してホップ直前に  $X$  軸方向速度をもたせることで小さくすることができるといえる。

## 4. 結言

本研究では、提案する偏心モータを利用した移動モードの生成方法のうち、モータ反トルクを利用したホップ移動メカニズムに焦点を当て、その運動特性について実験的に解析した。ロボットをホップ移動させる際に、ホップする直前に  $X$  軸方向の速度をもたせることで、ホップ角度に変化をもたせることができる可能性があることを示した。今後の方針としては、目的地到達性を向上させるための移動制御に向けて研究を進めていく。

## 参考文献

- 1) T. Yoshimitsu *et al.*: Micro-Hopping Robot for Asteroid Exploration, *Acta Astronautica*, vol. 52, no. 2- 6, pp. 441-446, 2003.
- 2) T. Yoshimitsu *et al.*: Development of Hopping Rovers for a New Challenging Asteroid, *Proc. 12th i-SAIRAS*, #5C-01, 2014.
- 3) K. Nagaoka *et al.*: Ciliary Micro-Hopping Locomotion of an Asteroid Exploration Robot, *Proc. 11th i-SAIRAS*, #6A-04, 2012.
- 4) 五百井清: 遠心力を利用した走行マイクロロボットの研究, *日本ロボット学会誌*, 第 17 巻, 第 3 号, pp. 396-401, 1999.
- 5) M. Konyo *et al.*: Ciliary Vibration Drive Mechanism for Active Scope Cameras, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 20, No. 3, pp. 490-499, 2008.
- 6) 永岡健司 他: 小天体探査ロボットのための異なる物理次元の反動を生かした移動形態遷移の提案, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会, #1E1-04, 2017.
- 7) 金子利康 他: 微小重力環境における偏心モータの遠心力・反トルクを利用した探査ロボットの運動特性, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2G16, 2017.