

跳躍による微小移動装置の特性*

山本 一 幸*¹, 大滝 英 征*²
石川 義 雄*², 綿 貫 啓 一*²

The Characteristics of Micro-Jumping-Device

Kazuyuki YAMAMOTO, Hideyuki OTAKI,
Yoshio ISHIKAWA and Keiichi WATANUKI

Investment in micro-moving devices has been carried out. In many cases, their driving principle is based on a small amplitude of vibration. But, using this principle, it is difficult to move smoothly if there are holes or differences in level. In this paper, I have tried to make a device which can jump over obstacles and move smoothly on a rough surface, and then have examined its characteristic obstacles condition. This device has some functions for moving adjusted to the change of, for example, jumping in all directions moving quickly and recovering when it falls down.

Key Words: Robotics, Mechatronics, Moving Device, Linear-Type Actuator, Jumping, Vibration

1. ま え が き

微小な移動装置に関する研究開発が各所で行われているが、その駆動系には、微小振幅の振動を利用していている場合が多い。しかしこの方法では、表面粗さが振幅より小さな面上での移動は比較的容易であるものの、振幅より粗い面の場合や、穴、段差などの障害物が存在する場合には移動が困難となる。

本研究では粗い面上での移動、障害物の乗越えなども可能となるよう、跳躍を利用した微小移動装置を試作、その特徴を検討した。

試作した装置は、跳躍による全方向への移動、微小振幅を利用しての高速移動、転倒時の回復など、状況に対応した複数の動作が可能となるようにした。

本報告で用いた主な記号は次のとおりである。

F_A : リニアアクチュエータの脚部(ピストン)に加わる力

l_A : リニアアクチュエータの有効範囲のコイル線長

$I(t)$: リニアアクチュエータに流す励磁電流

B : リニアアクチュエータのコイルを貫く平均磁束密度

x_M, y_M : 装置の水平方向、鉛直方向変位

x_P, y_P : リニアアクチュエータ脚部の装置に対する水平方向、鉛直方向の相対的変位

M : 装置全体の質量

m : リニアアクチュエータ脚部の質量

θ : 装置の進行方向角

ϕ : 装置のピッチ角

L_1, L_2, L_3 : 装置底面から床面に伸びる各アクチュエータの脚の長さ

L : 装置底面中央から床面に伸ばした垂線の長さ

r : 装置中心からリニアアクチュエータ中心までの距離

g : 重力加速度

μ_0 : 床面と脚部との間の動摩擦係数

f : 床面と脚部との間に働く摩擦力

2. 装置の駆動特性

2-1 装置の構造 図1は移動装置を示したもので、駆動源となるリニアアクチュエータを120°おきに配置してある。リニアアクチュエータは図2に示したような構造をしている。移動を担う脚部を取付けた

* 原稿受付 平成3年10月25日。

*¹ 学生員, 埼玉大学大学院(☎338 浦和市内大久保255)。

*² 正員, 埼玉大学工学部。

永久磁石とアクチュエータ筒部の間に機械的な拘束はないが、永久磁石に変位が生じた場合でも、永久磁石とアクチュエータ筒部を覆っている鉄との間の磁気抵抗を最も小さくし磁束を通りやすくなる位置(最初の設定位置)に永久磁石は移動する。この際の変位と戻そうとする力は比例的な関係にある。換言すれば磁気的なばねとみなし得る。このときのばね定数を k とする。

ここで、コイルに励磁電流を流すと、永久磁石を取付けた脚部には以下で与えられる電磁力 F_A が働き、これが跳躍移動する際の推進力となる。

$$F_A(t) = I(t) \cdot B \cdot l_A \dots\dots\dots(1)$$

また、コイルに交流の励磁電流を流せば、脚を任意の周期で微小振動させ得る。これにより装置の高速移動が可能となる。この場合、励磁電流にオフセットをかければ、振動の中心を任意の位置に持ってくる事ができる。

2.2 装置の駆動原理

2.2.1 跳躍による移動 跳躍により装置を移動させるために必要な手順について述べる。図3は跳躍移動を模式的に示したものである。

①~②の段階 跳躍の準備段階で脚の引込みを行う。同時に所望する進行方向角 θ を決定する。すなわち、図4に示したように、装置の中心とアクチュエータ1を結ぶ線を基準線とし、そこから角度 θ の方向に跳躍移動するには、 θ 方向に装置全体をまず ϕ だけ傾ける。これは、次段での跳躍の前段となるもので初期姿勢を意味する。そのため、図4に示したようにア

クチュエータ下面から張出している脚の長さ L_1, L_2, L_3 を変化させることにより θ, ϕ を設定する。しかし、この段階では、脚の引込みにより姿勢を設定しているアクチュエータ内部での脚の可動範囲の関係から大きなピッチ角をとることができない。大きなピッチ角をとるためには脚の蹴りだしを行うとき、すなわち③の段階で補正を加えればよい。なお、この段階でピッチ角 $\phi = 0$ とせず、ある値を設定するのは、③の段階のみでピッチ角の設定をすると、跳躍時の姿勢変化が大きく、装置自体に大きなモーメントが作用するため、転倒する確率が高くなることによる。

③の段階 脚の蹴りだしを行う。所望するピッチ角 ϕ より、跳躍の瞬間における各脚の長さを決定する。このとき、 L_1, L_2, L_3 、および L と θ, ϕ との関係は以下のようになる。

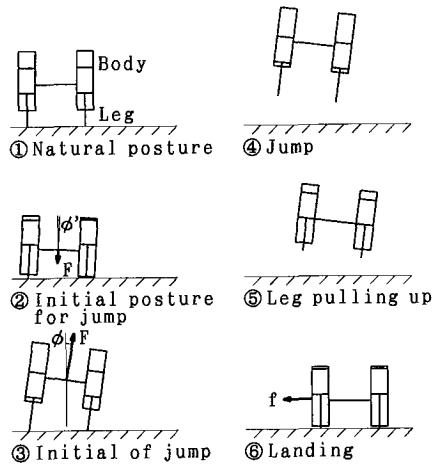


図3 跳躍動作

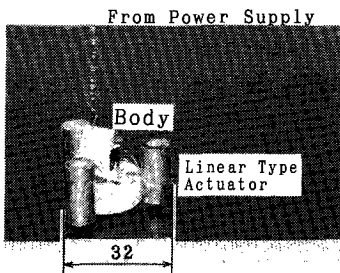


図1 移動装置(全長32mm, 全高16mm, 質量14g)

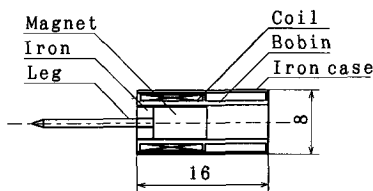


図2 リニアアクチュエータ

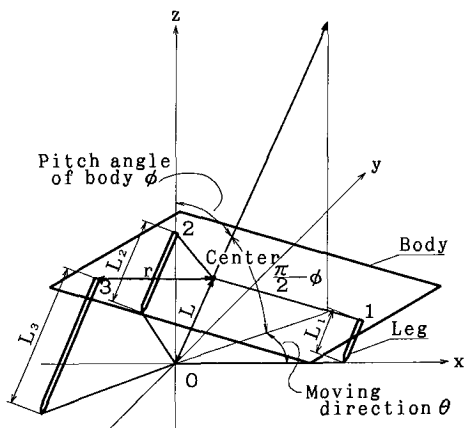


図4 装置の傾きの決定

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \gamma \sin \phi \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

④の段階 跳躍移動中の状態。

⑤の段階 跳躍後、脚は伸びた状態となっているため、そのままではすぐに床面に触れてしまい跳躍移動の距離を延ばすことができない。また、着地時における重心位置が高く不安定となる。そこで、脚の引き込みを行い、跳躍距離を延ばすとともに、着地時における装置の重心位置を下げる。

⑥の段階 着地後、装置は慣性力により進行方向に若干滑るが、やがて床面との摩擦力により停止する。

以上が跳躍の手順である。ここまでの動作をまとめ、装置の水平方向および、鉛直方向の運動方程式を求めると以下ようになる。

水平方向

$$M\ddot{x}_M = \sum_{i=1}^3 (F_{Ai} \sin \phi - kx_{pi}) - f \quad \dots\dots\dots (3\cdot a)$$

鉛直方向

$$M\ddot{y}_M = \sum_{i=1}^3 (F_{Ai} \cos \phi - ky_{pi}) + Mg \quad \dots\dots\dots (3\cdot b)$$

i : 脚の番号

ただし、 f は⑥の段階でのみ作用する項であり、以下の式で与えられる。

$$f = \mu_0 \{ Mg - \sum_{i=1}^3 (F_{Ai} \cos \phi - ky_{pi}) \} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 F_{Ai} は i 番めの脚に加える電磁力であり、各動作段階における励磁電流 I_i により式(1)で与えられる。

ここで、式(3・a)、(3・b)を離散形に変換して装置の速度 \dot{x}_M 、 \dot{y}_M を求めると

$$\dot{x}_M = V_x(t) \quad \dots\dots\dots (5\cdot a)$$

$$= V_x(t - \Delta t)$$

$$+ \{ \sum_{i=1}^3 (F_{Ai} \sin \phi - kx_{pi}) + f \} \Delta t / M$$

$$\dot{y}_M = V_y(t) \quad \dots\dots\dots (5\cdot b)$$

$$= V_y(t - \Delta t)$$

$$+ \{ \sum_{i=1}^3 (F_{Ai} \cos \phi - ky_{pi}) - Mg \} \Delta t / M$$

Δt : 時刻み幅

式(5・a)、(5・b)を時間ごとに追跡することにより装置の跳躍時における装置の特性が解析できる。

2・2・2 振動による高速移動 図5に示したように、装置を傾斜させ、各アクチュエータを微小振動させる。このとき、各アクチュエータに等しい励磁電流

I を流すと、ピストンの水平方向および、鉛直方向の運動方程式は、それぞれ

$$m\ddot{x}_p + kx_p = F_A(t) \sin \phi \quad \dots\dots\dots (6\cdot a)$$

$$m\ddot{y}_p + ky_p = F_A(t) \cos \phi \quad \dots\dots\dots (6\cdot b)$$

また、脚と床面との間に働く摩擦力を f_0 とすると、装置の水平方向の運動方程式は

$$M\dot{x}_M = f_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、式(7)を離散形に変換して装置の速度 \dot{x}_M を求めると

$$\dot{x}_M = V(t) = V(t - \Delta t) + f_0 \Delta t / M \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

この場合、 f_0 は斜め姿勢をとる装置の脚と床面との間の摩擦力であり、文献(2)を参考にすると、以下の式で与えられる。

(i) $Mg - \sum_{i=1}^3 m\dot{y}_{pi} > 0$ の場合

$$\dot{x}_p + \dot{x}_M > 0;$$

$$f_0 = f_{0a} = - \frac{(Mg - \sum_{i=1}^3 m\dot{y}_{pi}) \mu_0}{1 + \mu_0 \tan(\pi/2 - \phi)} \quad \dots\dots\dots (9\cdot a)$$

$$\dot{x}_p + \dot{x}_M < 0;$$

$$f_0 = f_{0b} = \frac{(Mg - \sum_{i=1}^3 m\dot{y}_{pi}) \mu_0}{1 - \mu_0 \tan(\pi/2 - \phi)} \quad \dots\dots\dots (9\cdot b)$$

(ii) $Mg - \sum_{i=1}^3 m\dot{y}_{pi} < 0$ の場合

$$f_0 = f_{00} = 0 \quad \dots\dots\dots (9\cdot c)$$

ここで、 f_{0a} は脚部先端の動く方向が装置の進行方向と等しいときに、 f_{0b} は脚部先端の動く方向が装置の進行方向と反対向きに働く動摩擦力である。よって、 f_{0a} は装置の移動を妨げる方向に働き、 f_{0b} は装置を移動させる方向に働く力となる。式(7)~(9)より装置の運動特性が解析できる。

さて装置は、各アクチュエータに流す励磁電流のオフセット値により決定される角度 θ の方向に移動する。そこで、図6(a)のように各脚を同出力で振動させながら励磁電流のオフセット値を変化させると、 θ

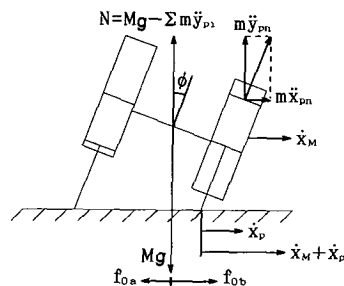


図5 振動による推進

が変化し、旋回可能となる。あるいは、図6(b)のように装置を傾けた後、旋回したい方向に位置する脚の発生させる電磁力を抑えることによっても旋回が可能となる。図(a)の方法では装置自身は常に同じ方向を向いている。また図(b)の方法では装置は進行方向に頭を向けることとなる。さらには、旋回したい方向の脚の振動を停止すると、その脚を中心にしてその場で方向転換することも可能となる。

2・2・3 転倒回復 装置は、跳躍、振動により移動する際、急激な姿勢変化、速度変化を受けることがあり、その際転倒する可能性もある。そのため装置には、転倒しても姿勢回復する機能を付加することが求められる。図7は、装置の転倒回復のための手順について示したものである。

①～②の段階 転倒回復の準備段階で、上側とな

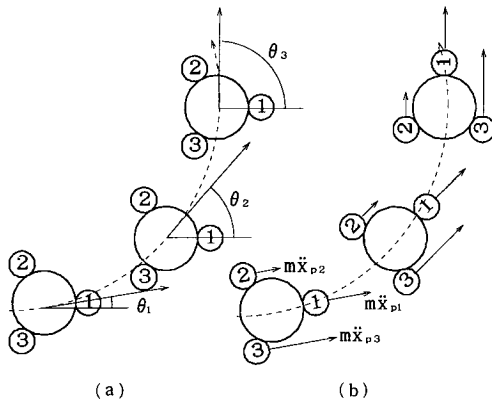


図6 装置の曲線運動

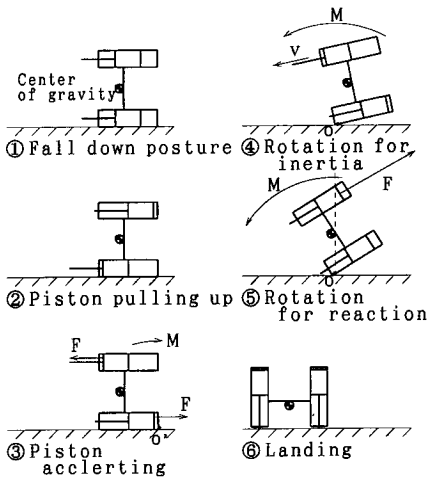


図7 装置の転倒回復

った脚の引込みを行う。同時に、下側の脚の押出しを行う。

③の段階 各脚を①の段階とは反対方向に加速する。このとき、装置自身にはその反作用として点Oまわりにモーメントが生じるので、脚に加える電磁力は、装置が回転しない程度とする。

④の段階 脚の加速を停止する。すると、脚の慣性力により、装置は点Oを中心姿勢回復し始める。

⑤～⑥の段階 装置がある程度傾いたところで、上側の脚を急激に引込む。すると、その反作用により、装置には点Oを中心とするモーメントが働き、姿勢回復を助長する。重心位置が点Oより左側にくると、装置の自重によるモーメントも姿勢回復を助長する方向に加わり、装置は原状に戻る。

3. 移動実験

3・1 実験装置 図8は装置の移動特性を解析する実験装置の概略を示したものである。移動装置の制御には16ビットパーソナルコンピュータ(CPU 80286)を使用し、D/A変換器、アンプを介し、各アクチュエータに-0.5～+0.5Aの電流を出力する。このとき、 F_A は最大0.2Nを得ることができる。

また、移動装置の運動を測定するために、CCDカメラ、グラフィックプロセッサおよび32ビットパーソナルコンピュータ(CPU 80386+80387)を用いた。ここでは、CCDカメラを移動装置の上方、または側方に配置し、サンプリングタイム(1/40s)ごとに撮影し、必要部分のみをプロテクトメモリ内に取入れた後、各画像を二値化処理した。その二値化画像の図心位置を求め、これを装置の位置を代表する座標値とし、運動軌跡、および速度を求めた。

なお、実験に使用した移動装置は

$$B \cdot I_a = 0.4 \text{ [N/A]}$$

$$M = 1.4 \times 10^{-2} \text{ [kg]}$$

$$m = 9.0 \times 10^{-4} \text{ [kg]}$$

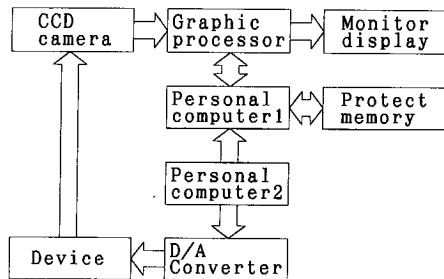


図8 実験装置の構成

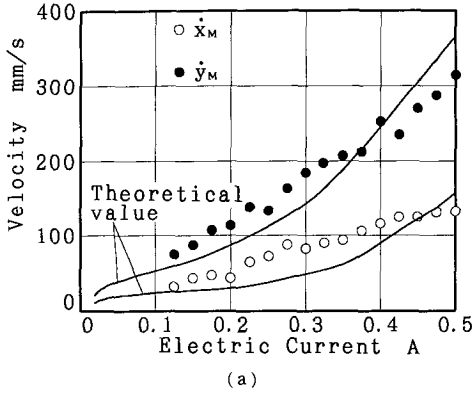
$\mu_0=0.14$

$k=23$ [N/m]

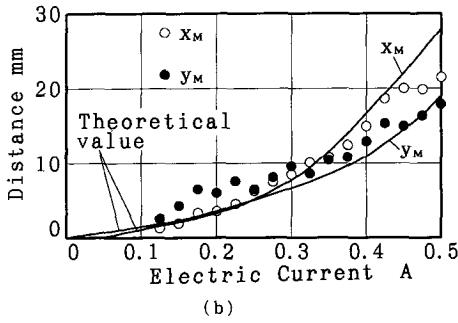
である。

3.2 跳躍による移動

3.2.1 励磁電流と移動距離、および速度の関係

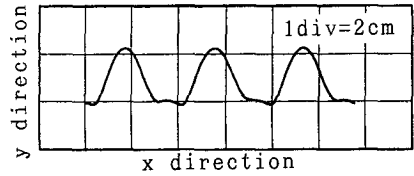


(a)

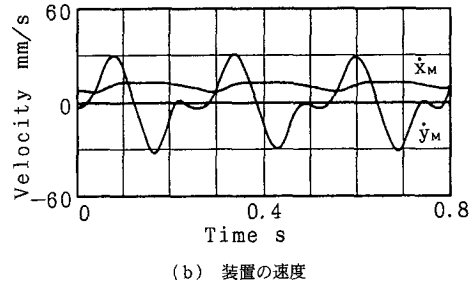


(b) 装置の跳躍

跳躍姿勢を $\theta=0, 2\pi/3, 4\pi/3, \phi=\pi/15$ と設定した場合について、励磁電流 I_b を種々選んだ場合について、装置の跳躍運動を測定した。図9(a)は上記の θ を3方向にとった場合の装置の移動距離、高度の平均値を示したものである。また、図9(b)は装置の水平方向、鉛直方向の跳躍直後の速度成分を示したものである。実験によると、励磁電流が0.1A以下では脚は動作するものの機械的損失などのため、跳躍移動を可能とするまでには至らず、0.1Aを超えてはじめて移動を開始した。

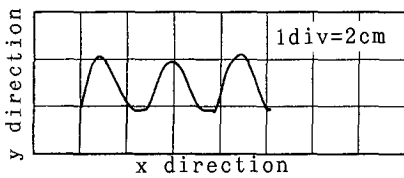


(a) 装置の運動軌跡

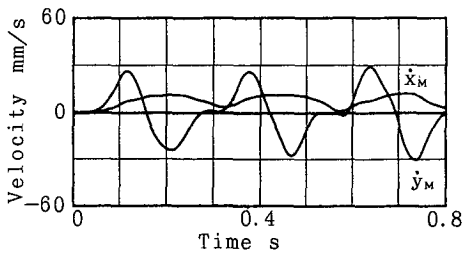


(b) 装置の速度

図11 連続跳躍(周期250ms, 理論値)

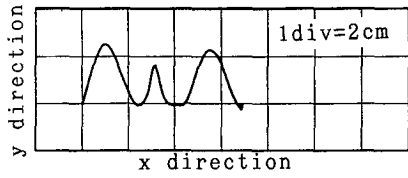


(a) 装置の運動軌跡

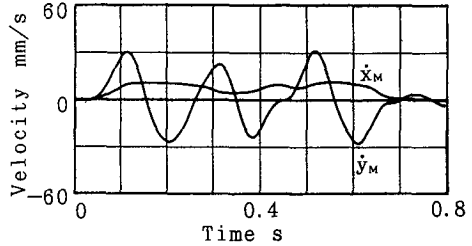


(b) 装置の速度

図10 連続跳躍(周期250ms, 実験値)



(a) 装置の運動軌跡



(b) 装置の速度

図12 連続跳躍(周期190ms, 実験値)

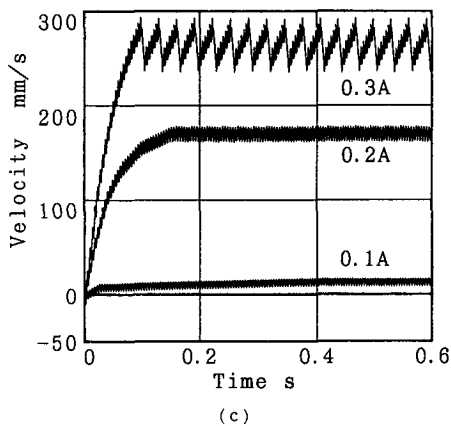
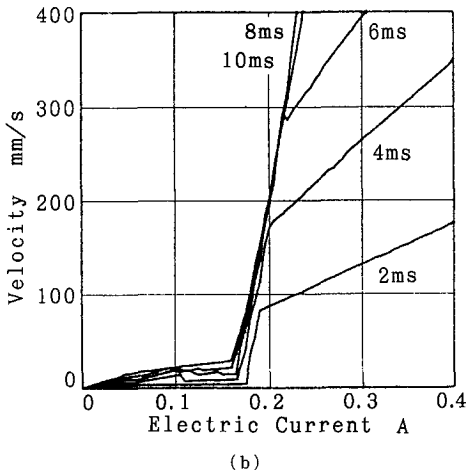
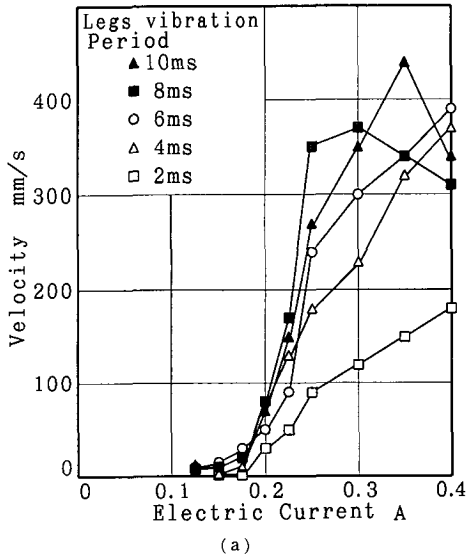


図 13 振動による推進

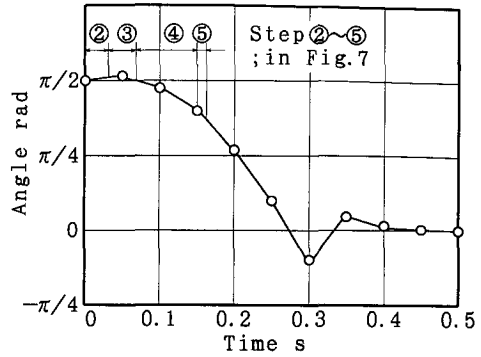


図 14 転倒回復

3.2.2 連続跳躍 跳躍姿勢を $\theta=0, 2\pi/3, 4\pi/3$, $\phi=\pi/15$ としたうえで、跳躍ごとに励磁電流 ($I_0=0.5$ A) を 30 ms 通電した。図 10 は跳躍周期を 250 ms とし、装置が跳躍した場合の軌跡、水平および鉛直方向の速度成分を示したものである。図 11 は理論解析結果を示したものであり、傾向は実験結果とほぼ一致した。ただし、跳躍周期を 190 ms 以下とすると、図 12 に示したように安定した跳躍ができなかった。これは、前回の跳躍後の姿勢回復の影響を受け、図 3 に示したような跳躍準備のための初期姿勢を完全につくりあげる以前に、次回の跳躍へと移ってしまうためである。

3.3 振動による高速移動 装置の移動速度と、励磁電流の周期、電流値の関係を検討した。図 13(a) は初期姿勢を $\theta=0, 2\pi/3, 4\pi/3$ の 3 方向、 $\phi=\pi/10$ とした場合の速度を測定し、それを平均して縦軸の値とした結果を示したものであり、図 13(b), (c) は 2・2・3 項による理論解析結果を示したものである。図 (b) 中で、励磁電流が 0.16 A 以下の領域においては、 f_{0a}, f_{0b} が周期的に装置に働き、装置は微小速度変動を繰り返しながら加速し、ある時間経過後定常状態となる。0.16 A から 0.2 A 近傍までは、装置が微小な跳躍をし、式(9・c)に示される摩擦力 $f_{00}=0$ となる部分が出現する。そのため、それ以下の励磁電流の場合と比較して、同じ時間経過後の到達速度はかなり大きくなる。しかし、0.4 A 以上となると、装置の床に対する速度が脚の装置に対する相対的な速度を上回る場合が生じる。そのため、 f_{0a}, f_{0b}, f_{00} の周期性が乱れ、推進力 f_{0b} を得られない部分が出現し、その瞬間に急激に減速する。その後、微小速度変動を繰り返しながら加速するが、再び前出の現象を繰り返す。ちなみに図 13(c) は、周期 4 ms としたときの、上記の三つの領域における装置の速度の時間的変化を示したものである。

3.4 転倒回復 装置を $\pi/2$ 転倒した状態に置き、転倒回復を図った場合の実験結果を図 14 に示した。図

中②～⑤は、2・2・4項での各動作段階を示しており、予期どおりの特性を持つことがわかる。

4. ま と め

考案した移動装置の基本的な動作特性が実験的に確認され、次の結果を得た。

(1) 跳躍による連続移動は、急激な姿勢変化が見られるため、安定性が低く、高度な制御を必要とすると考えられがちだが、本装置は、極めて簡単な制御によっても、滑らかに連続移動した。万が一転倒した場合でも、簡単に回復することが可能である。

(2) 振動を利用した高速移動、旋回も可能である。しかし床面の凹凸や、電力供給用のケーブルの剛

性により、動作が乱されることや、低出力時に動作が不安定になるという問題点が残る。

文 献

- (1) 佐藤・ほか3名, 振動滑走子に関する基礎的研究, 機論, 46-407, C(1980), 734.
- (2) 青島・ほか2名, 圧電振動を用いた細径管移動機械に関する基礎的研究, 機論, 55-516, C(1989), 1934.
- (3) 山本, 慣性力を利用した移動機構, 機論, 57-538, C(1991), 1854.
- (4) 日本機械工業連絡会, マイクロメカニックスの調査研究, 生産技術高度化に関する調査研究報告書, (1987), 80.
- (5) 畔津, 基礎からの映像信号処理, (1987), 152, CQ 出版社.
- (6) 日本機械学会編, 機械工学便覧(1989), A 8-56.