

慣性力を利用した移動機構*

山本一幸*¹, 大滝英征*², 石川義雄*²

Moving Mechanism Using Inertia

Kazuyuki YAMAMOTO, Hideyuki OTAKI and Yosio ISHIKAWA

It is assumed that small sized moving machine is available in the field of biomechanics and chemical reaction, etc. If we construct an equipment using traditional electric motor as a power source and wheels as a driving element, it is difficult to keep the size within the permitted limit. So we must investigate a new type system. In this report, we constructed an equipment which is driven with the force of inertia produced on vibrating a piston of linear type actuator as a trial. Using this equipment, experiments on the performance was conducted and comparison between experimental data and specification was made. The results have shown that the driving performances are in approximate agreement with the specification. But the moving action at the lower speed becomes unstable owing to the frictional loss of the piston. The investigation on how far the influence extends by this loss is a topic for the future study.

Key Words: Robotics, Mechatronics, Frictional Vibration, Moving Machine, Inertia, Linear Type Actuator, ElectroMagnet

1. ま え が き

一般に移動機構は、動力源として電動機を、また、駆動部として車輪を用いる場合が多い。しかし、このような機構を採用すると、容積的に制約を受け小形化にも限界がある。そこで、これに対する一方策としてリニア振動式アクチュエータおよび電磁石を利用し、動力源および駆動部を一体化した単純な構造の機構を考案し、その駆動特性を検討することにした。

本機構では、リニア振動式アクチュエータのピストン部分が振動する際の慣性力を利用し、装置を移動させる。その際、装置本体に備えられた電磁石の床面に対する吸引力を制御し、装置自身の安定的移動を果たすようにしたのが特徴的である。

なお、本報で用いた記号は

F_x : リニア振動式アクチュエータにより装置の移動方向にかかる力
 F_y : 電磁石の吸引力
 A_g : 電磁石のギャップ断面積
 L_m : 電磁石内の磁束長さ

L : 電磁石のコイル幅

I_M : 電磁石に流れる電流

n : 電磁石のコイル線巻数

ν_0 : 真空の透磁率

ν_s : 比透磁率

F_A : リニア振動式アクチュエータピストン部に加わる力

I_A : リニア振動式アクチュエータのコイル線に流れる電流 (励磁電流)

B : 磁束密度

l_A : リニア振動式アクチュエータのコイル線長さ

f : I_A の周波数 (= F_A の周波数)

F : 装置全体にかかる推進力

M : 装置の質量

μ_{max} : 最大静止摩擦係数

μ : 静止摩擦係数

μ_a : 動摩擦係数

N : 装置にかかる垂直抗力

2. 装置の駆動特性

2.1 装置の構造 図1は装置の概略構造を示したものである。装置の中央部に電磁石①を、そしてその外側に互いに90°の間隔をおいて4個のリニア振動

* 原稿受付 平成2年6月12日。

*¹ 学生員, 埼玉大学理工学研究科 (〒338 浦和市下大久保255)。

*² 正員, 埼玉大学工学部。

式アクチュエータ②を設置してある。ここで電磁石、およびアクチュエータは図1(a)に示した矢印の方向にそれぞれ吸引力、慣性力を発生させることができる。

電磁石は図2に示した構造をしており、リニア振動式アクチュエータのピストンが振動するとき、装置全体が反力で後ずさりしないよう床面に対し十分な吸引力を発生する。電磁石と磁性体である床面との間の吸引力 F_V は

$$F_V = \frac{-A_g \nu_0 (n I_M)^2 L \nu_s^2}{L_m^3} \dots\dots\dots (1)$$

にて求まる。ここでは、電磁石の鉄芯および継鉄にはSS 41を使用し、コイルは $\phi 0.12$ mm の銅線を約 750

回巻付け製作、後述の2・2節のc段階の条件を満足する F_V を発生するようにした。

次に、リニア振動式アクチュエータの構造を図3(a)に示す。アクチュエータは、永久磁石①(異方性希土類コバルト磁石)、および磁束の向きを変更するための継鉄②からなるピストンと、デルリン製のボビン③、2組のコイル④、およびピストンをある一定の変位内に保持するための磁氣的なばねの役割と磁束の外部漏えいの防止を兼ねる鉄製のケース⑤よりなる外筒部により構成されている。

さていま、ピストンの駆動特性を検討してみる。図3(b)にて(1)の向きに励磁電流を流すと、ピストンには矢印の方向に慣性力が働く。この反力として外筒部には同じ大きさの慣性力が発生する。次に(2)のよ

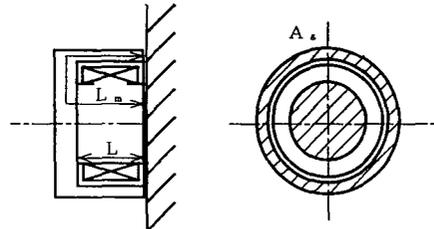
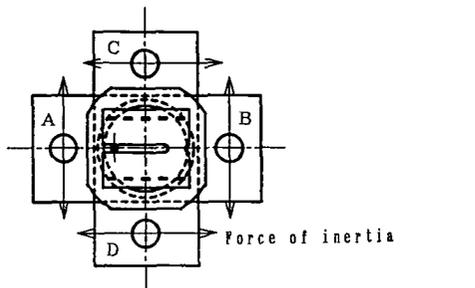
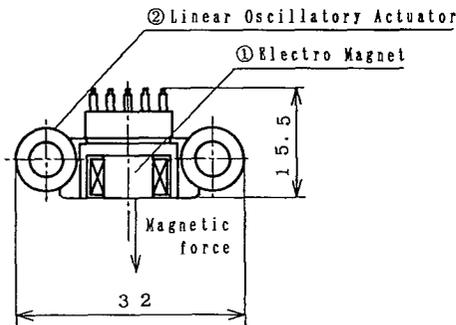
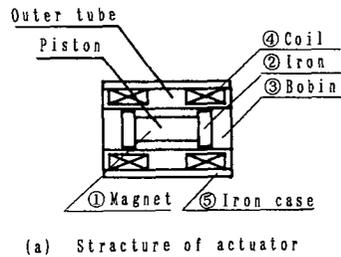


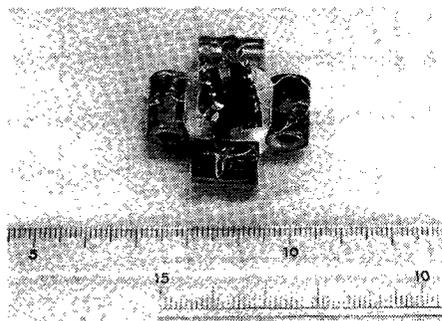
図2 電磁石



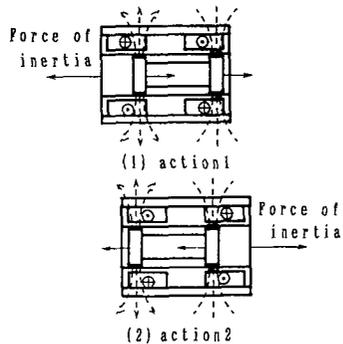
(a) The machine using force of inertia



(a) Structure of actuator



(b) Photo of the machine



(b) Action of actuator

図1 移動装置

図3 リニア振動式アクチュエータ

うに反対向きに励磁電流を流すと慣性力の向きも反転する。この繰返しにより直線的な慣性力を連続して発生させることができる。ここで、コイル線によって発生する F_A は以下の式で求められる。

$$F_A = 2I_A \cdot B \cdot l_A \dots\dots\dots(2)$$

すると、ピストンの運動方程式は次式で表されることとなる。

$$m\ddot{x} + kx = 2I_A \cdot B \cdot l_A \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 k はピストンの変位を拘束するために挿入したばねのばね定数である。そこでいま、

(a) I_A を図 4 (a) に示したような正弦波状に変動させた場合

(b) I_A を図 4 (b) に示したようなく形波状に変動させた場合

について、ピストンの変位を求め、その周波数特性について検討した。図 5 は与えた波形の周波数とピストンの変位の関係の例を示した例である。図より、周波数が同じならく形波を使用したほうがピストンの変位が小さいことがわかる。また、図 4 の斜線部の面積は力積と等価なものになるが、く形波を使用したほうが正弦波を使用した場合の約 1.4 倍となる。つまり、く形波の使用が小形高効率化には有利であることがわか

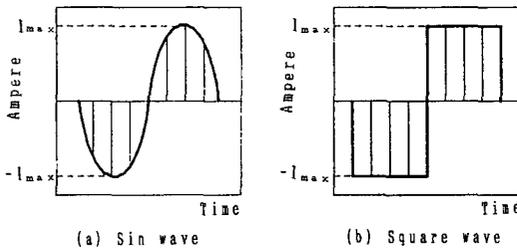


図 4 出力波形と力積

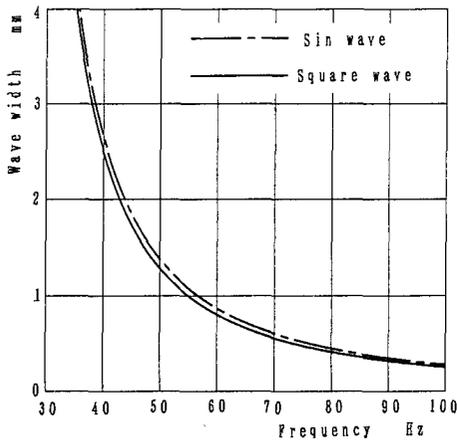


図 5 アクチュエータ振動数特性

る。

次に、ピストンに発生する慣性力 ($m\ddot{x}$) については、系の固有振動数に近い周波数の電流を与えると図 6 (a) のように出力波形が乱れ、入力に対応した慣性力が得られない。波形を入力電流に対応したく形に保つには、図 6 (b) のように系の固有振動数の 2 倍以上の周波数を持つ電流を流す必要がある。

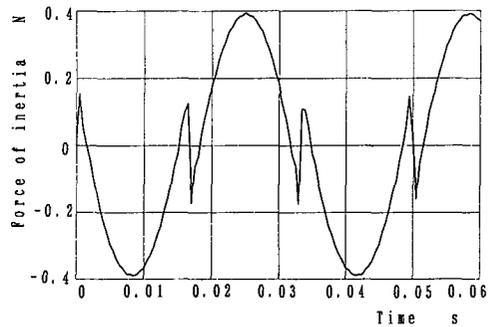
2.2 装置の駆動原理 移動装置の床面上における駆動特性について、簡単のため 1 個のリニア振動式アクチュエータからなる図 7 のモデルに従って述べる。

(a) の段階：リニア振動式アクチュエータのピストンの慣性力により装置には F_x が加わる。そのとき、垂直抗力 N は $N = Mg$ であるので、装置にかかる推進力 F は

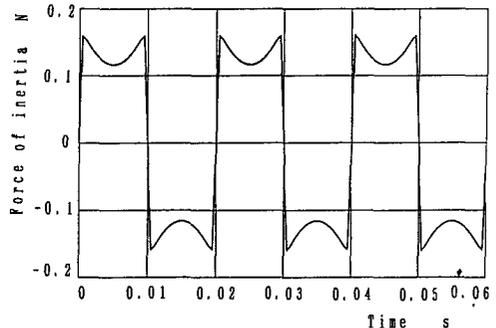
$$F = F_x - \mu_a N \\ = F_x - \mu_a Mg \dots\dots\dots(4)$$

常に $\mu_{max} > \mu_a$ であるので、 $F_x > \mu_{max} Mg$ となるように設計しておけば装置は矢印の方向へ移動する。

(b) の段階：ピストンの加速方向を逆方向に切換え F_x の向きを反転させる。その際、電磁石を on とし床面との間に吸引力が発生するようにする。すると $N =$



(a) 固有振動数 $f_n = 25$ Hz, 加振振動数 $f = 30$ Hz



(b) 固有振動数 $f_n = 25$ Hz, 加振振動数 $f = 50$ Hz

図 6 アクチュエータによる慣性力

$N_f = Mg + F_y$ となるので、装置にかかる推進力 F は

$$F = -F_x - \mu_a N_f$$

$$= -F_x - \mu_a (Mg + F_y) \dots \dots \dots (5)$$

となり式(4)で与えられる値に対し負値となる。それゆえ(a)の段階で加速、移動した装置は F により急制動がかかることとなる。

(c)の段階：上記の結果、装置は停止状態となるが、 F_x を装置が反対方向に移動するほどの慣性力 ($F_a = \mu_{max} N_f$) にはならないように設定しておけば装置は停止した状態が保たれる。この場合

$$F = 0 \dots \dots \dots (6)$$

となる。

さて、ここでさらに前進移動をさせるためには、電磁石を off にし、吸引力を零とした後、再び上述の(a)の段階へと進めればよい。

次に、(a)~(c)段階の繰返しにより装置がどのように移動するか検討した。ここでは、3段階に場合分けした F を式(4)、(5)、(6)により求めた後、装置

の質量 M で割り加速度 a を求め、その値をさらに台形法により積分し、装置の速度 v 、移動距離 l を求めた。図 8 は、 $F_x = 0.3 \text{ N}$ 、 $F_y = 0.1 \text{ N}$ 、 $M = 0.020 \text{ kg}$ 、 $\mu_{max} = 0.2$ 、 $\mu_a = 0.18$ とし、周波数 $f = 50 \text{ Hz}$ のく形波状の加振力でリニア振動式アクチュエータを駆動させた場合の装置の速度、および移動距離の例を示したものである。この結果より(a)、(b)、(c)の各段階で変

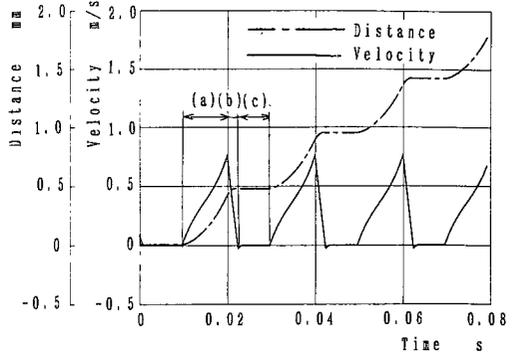


図 8 装置の速度および移動距離

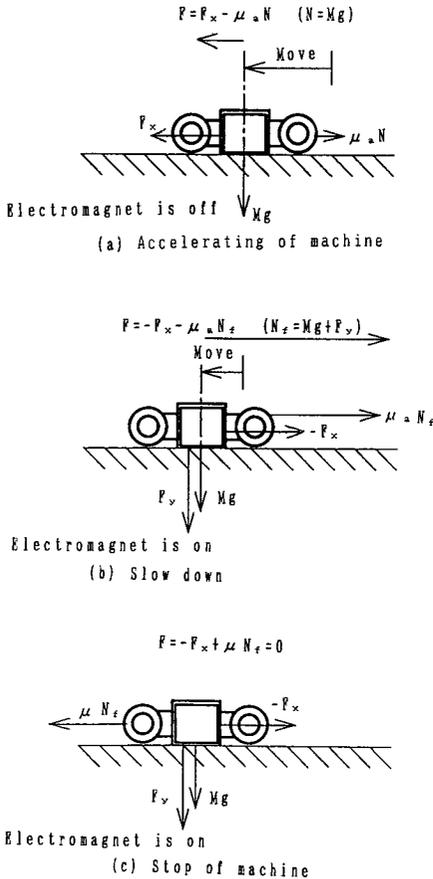


図 7 機構の移動原理

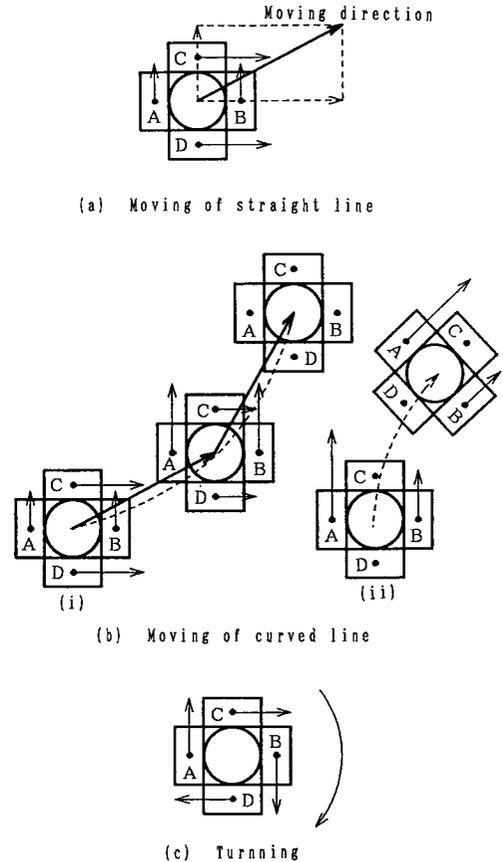


図 9 機構の運動

化状態がよく把握できる。

上記で単一のアクチュエータについて述べたが、図9に示したように複数のアクチュエータを組合せると直線運動、曲線運動等が可能となる。そこで以下に直線運動、曲線運動、方向転換の手順について述べる。

(1) 直線運動：リニア振動式アクチュエータのうち、図9(a)のようにA、BおよびC、Dを同位相、同出力をもって駆動すれば、各アクチュエータが発生する推進力の合成ベクトルの方向に進行する。

(2) 曲線運動：図9(b)(i)のように微小な前方向および横方向の直線運動を適切に組合せ、結果として曲線運動を達成させる方法と、図9(b)(ii)のように向かいあった二つのアクチュエータを同位相、異なる出力で駆動させる方法とがある。(i)の方法では装置自身は常に同じ方向を向いている。また(ii)の方法では装置は進行方向に頭を向けることとなる。

(3) 方向転換：その場で方向を転換するには、図9(c)に示したような同位相、同出力の推進力を各アクチュエータに与えればよい。(c)の場合は装置は右に回転する。左に回転させる場合は各アクチュエータの位相を反転させればよい。

2.3 制御機構 本機構では、四つのリニア振動式アクチュエータの励磁力と一つの電磁石の吸着力を制御する必要がある。電磁石については、流す電流のパルス幅を一定状態にしておく。リニア振動式アクチュエータのコイルには同位相、または逆位相のく形波電流に強弱をつけ、流すこととした。アクチュエータに流す電流に強弱をつける方法としては簡易的なアナログ方式を採用した。制御回路の構成を図10に示しておいた。

ここで、く形波発生回路は、オペアンプを用いた簡単な発信回路とした。なお、発生するく形波の周波数40~80 Hz程度とした。D/A変換回路はパーソナルコンピュータからの出力を受け、0 Aおよび、20~180 mAまでの間を15等分、すなわち計16通りの電流出

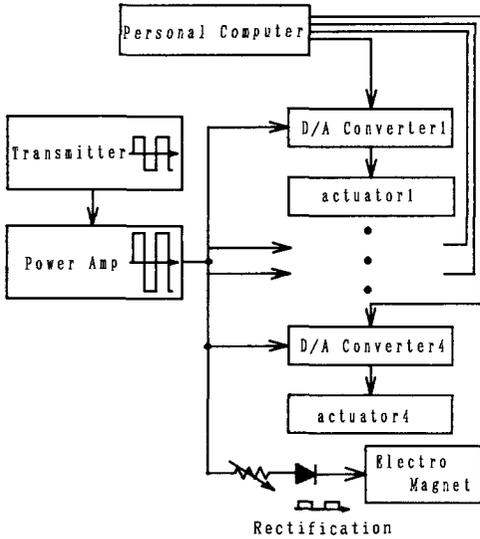


図10 制御機構

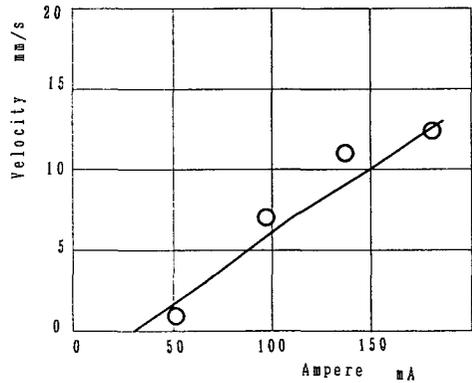


図12 励磁電流と速度の関係

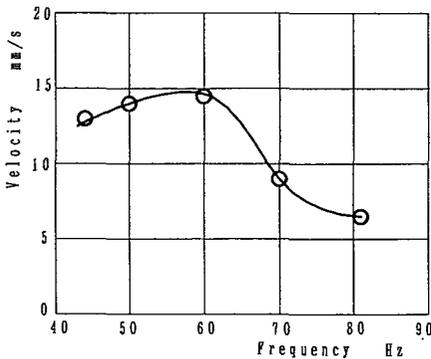


図11 周波数と速度の関係

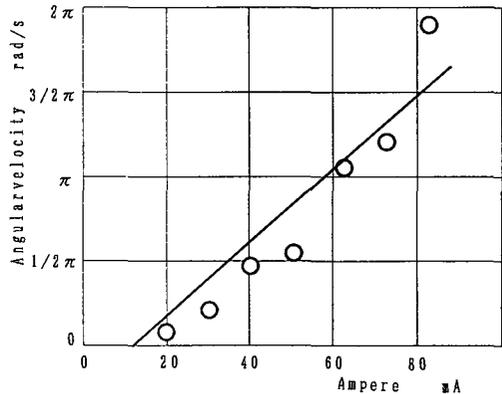


図13 励磁電流と角速度の関係

力を発生させるようにした。

3. 実走行実験結果

3・1 周波数と速度の関係 各周波数にて一定励磁電流を流した場合における装置の速度を測定し、周波数と速度の関係を検討した。

図 11 は実験結果を示したものである。58 Hz のときに最高速度が得られた。ただし、各アクチュエータの発生する推進力、あるいは位相に対し外乱が加わると、速度、進行方向が乱されてしまうこともあった。その対策は構造上の問題も含めて今後の検討課題である。

3・2 励磁電流と速度の関係 3・1 節と逆に周波数を一定としておき、励磁電流の大きさを変化させた場合について励磁電流の大きさと速度との関係を検討した。

図 12 は周波数 58 Hz の場合の結果を示したものである。図をみてわかるように励磁電流が小さくなるとほとんど移動しなくなってしまうことが観察される。

3・3 励磁電流と旋回量の関係 励磁電流の周波数を 58 Hz で一定とし、各段階の励磁電流の大きさと旋回角速度との関係を求めた。図 13 は実験結果を示したものである。励磁電流が小さいと、旋回角速度はかなり小さくなり、安定した旋回運動が達成できなくなる。また、励磁電流は出力を 16 段階に区分し発生させ

るようにしたが、そのうち 7 段階までしか求められなかった。これは、それ以上になるとピストンの慣性力が大きくなりすぎ外筒部から飛び出してしまうためである。

4. ま と め

考案した機構の基本的な動作特性が実験的にも確認された。しかし、床面のわずかな凹凸で動作が安定しなかったり、低出力時、高振動数時での動作が安定しないという問題点がある。

低出力、高振動数時での動作の不安定性はアクチュエータの加工精度に問題があるためと考えられる。すなわち、ピストンに働く慣性力、速度が小さいためピストンの移動中に筒部に接触、摩擦抵抗を受けてしまうことに原因があるようである。よって加工精度をより高めれば滑らかな動作が達成できるであろう。

これらの問題点を順次改良していくことが今後の課題となる。

文 献

- (1) 谷口, 電磁バイブレータの運動について, 機誌, 25-155(1959), 681.
- (2) 熊谷, 電磁気学の基礎-実験室における-, (1975), 225, 裳華房.
- (3) 太田, 磁気工学の基礎 II, (1973), 386, 共立出版.