ソレノイドアクチュエータの垂直方向の力の測定のための 実験システム

Experimental system for measuring the vertical force of the solenoid actuator

○江塚 航（横浜国立大） 正 瀧脇 大海（横浜国立大）

Wataru Ezuka, Yokohama Nat. Univ., ezuka-wataru-mh@ynu.jp
Ohmi Fuchiwaki, Yokohama Nat. Univ.

In previous report, we have reported that 3 degrees of freedom precise mobile mechanism that is composed of three solenoid actuators and 4 “Moonie” piezoelectric actuators. The mechanism moves like an inchworm by an synchronization of an alternately fixing of two legs to a floor and vibrations of the piezoelectric actuators. However, this mechanism does not move precisely as designed because of ununiformity of the static forces among 6 legs and the floor. In this report, we have described newly-proposed frictional force control method based on the internal force feedback control of the 3 solenoid actuators with 6 pressure sensors attached to the 6 legs.

Key Words: Solenoid actuator, piezoelectric actuator, internal force control, pressure sensor

1. 緒言

1.1 研究の背景

近年、小型携帯機器が普及しており、それらの中に使用されている電子部品を基板に配置するために用いられている位置決め装置として、多軸リニアステージ（Fig.1.1.1）がある。この装置は高出力で耐荷重が高く、位置決め精度が高いという特徴がある。しかし多軸リニアステージは数 mg の電子部品に対し、100kg の可動部を位置決めする必要があるため、エネルギー効率が悪く、ガイドレールに沿って直動するため可動範囲に比例して重量が重くなるという 2 点の問題点がある。そこで本研究室では、位置決め精度とエネルギー効率がよく、フレキシブルに動く位置決め機構が必要であると考え、その条件を満たす機構として、2 つの足を交互に床面に着脱をして、そこに圧電アクチュエータの伸縮を組み合わせることで移動するインチワーム機構（Fig.1.1.2）の開発を行っている。

Fig.1.1.1 Multi-axis linear stage (NIKKIDENSO CO.,LTD.)

Fig.1.1.2 Inchworm mechanism with 3 solenoid actuators

1.2 目的

昨年開発されたインチワーム機構（Fig.1.1.2）は Fig.1.2.1 の 8 方向動作の結果をまとめたグラフを見ると確認できる通り、位置決め再現性(最終到達点の標準偏差)が大きく、精密な動作ができていない。その主要因は、移動の際に脚先に発生する摩擦力の不均一性であると考えている。そこで本研究では、可動脚の三つの接地点の摩擦力を 0 に、固定脚の三つの接地点の摩擦力を均一に制御することで位置決め再現性を向上する事を目的としている。この目的を達成するために、圧力センサを 6 つの接地点に配置して各脚に作用する垂直効力を測定し、摩擦力を算出してフィードバック制御を行う予定である。本報では垂直抗力を計測してソレノイドアクチュエータを制御するための、基礎実験装置の設計と力学モデルについて説明する。

Fig.1.2.1 Results of straight motions in 8 directions

2. インチワーム式自走機構

2.1 機構構成

この機構は以下の二つの要素により構成されている。

- ・ X Y θ 軸の振動機構

Fig.2.1.1 に示すように、交差する二つのフレームの間に Fig.2.1.2、および Table2.1.1 で示す 4つの圧電アクチュエータを前後左右に配置し平行バネを介して二つのフレームに接続した。

- ・ 二脚間の垂直方向の内力切り替え装置

脚部にソレノイドアクチュエータ(Fig.2.1.3)とポット型マグネットを配置した。

これら二つを Fig.2.1.4 で示すように連結する事で自走機構を構成している。

Fig.2.1.1 Vibration part

Fig. 2.1.2 A pair of piezoelectric actuators (CEDRAT Tech.)

Fig. 2.1.3 Solenoid actuator

Fig. 2.1.4 Inchworm mechanism

Table 2.1.1 Specification of the pair of actuators^{*)}

Generated displacement (120V) ^{*)}	112 [μ m] ^{*)}
Generative force (100V) ^{*)}	11.5 [N] ^{*)}
Spring constant ^{*)}	115000 [N/m] ^{*)}
Capacitance ^{*)}	0.25 [μ F] ^{*)}
Resonant frequency (Fixed at both ends) ^{*)}	12.45 [kHz] ^{*)}
Height ^{*)}	12.85 [mm] ^{*)}
Thickness ^{*)}	6.4 [mm] ^{*)}
Length ^{*)}	9.2 [mm] ^{*)}
Weight ^{*)}	2 [g] ^{*)}

2.2 ソレノイドアクチュエータ

ソレノイドアクチュエータで用いたカバーとネオジム磁石、鉄芯、コイルの物性値を Table2.2.1 に示す。また、ソレノイドアクチュエータの断面の模式図を Fig.2.2.1、磁気回路図は Fig.2.2.2 に示す。紙面の都合上詳細な導出は割愛するが、磁気回路モデルより得られるソレノイドアクチュエータの発生力は式(1)で表される。

$$F = N \cdot i_C \cdot \frac{hl_m}{l \left(\frac{l_m}{\mu_r \pi r_m^2} + \frac{\log \frac{a_2}{a_1}}{2\pi \mu_0 l} \right)} \quad (1)$$

Table2.2.1 Physical properties of the Solenoid actuator

a_2	Inner diameter of the cover
l_m	Length neodymium magnet
l	Length iron core
a_1	Inner diameter of the coil
a_3	Outer diameter of the coil
N	Turns of the coil
μ_0	Magnetic permeability of the vacuum
i_C	Electric current
h	Magnetic flux density of the Neodymium magnet
r_m	Radius of neodymium magnet
μ_r	Reversible permeability of the Neodymium magnet

Fig.2.2.1 Sectional views of the solenoid actuator

Fig.2.2.2 Magnetic circuit

Fig.2.2.1 Experimental setup

3. 実験装置

Fig.2.2.1 に、ソレノイドアクチュエータの電流による垂直抗力の制御装置の構成を示す。ソレノイドアクチュエータは 2 組の平行バネで支持されているため、垂直方向のみに変位する。またソレノイドアクチュエータに接続された脚と、床面との間には圧力センサを配置し、脚に作用する垂直効力を測定できる構成になっている。

3.1 実験装置の力学モデル

圧力センサを線形バネの特性を持つと仮定した場合の力学モデルを Fig. 3.1.1 に示す。

Fig.3.1.1 Dynamical model

3.2 垂直抗力の定式化

Fig.3.1.1 の力学モデルで使用している各パラメータを Table 3.2.1 に示す。

Table 3.2.1 physical properties of the dynamic model

m	Mass of the iron core
k_p	Spring constant of the parallel springs
k_s	Spring constant of the pressure sensor
x	Displacement of the iron core
g	Gravitational acceleration
F_p	Restoring force of the parallel springs

F_s	Restoring force of the pressure sensor
F	Generative force of the solenoid actuator

力学モデルの運動方程式は、以下のようになる。

$$m\ddot{x} = -k_p x - k_s x + mg + F \quad (2)$$

鉄芯が静止している場合は、(2)式に $\ddot{x} = 0$ を代入することで鉄芯の変位 x は以下の式で表現される。

$$x = \frac{F + mg}{k_p + k_s} \quad (3)$$

また、圧力センサに作用する力は次の(4)式で表せる。

$$F_s = k_s x \quad (4)$$

(3)式を(4)式に代入すると、ソレノイドアクチュエータの発生力 F を(5)式のように定式化できる。

$$F = \frac{(k_p + k_s)F_s}{k_s} - mg \quad (5)$$

(5)式は圧力センサにより測定される実験値である。そのため、(1)式で求められる理論式と連立することで、垂直抗力とソレノイドアクチュエータの電流の関係式を得る事が出来る。

4. 結論と今後の課題

本報では、初めに多軸精密ステージの小型軽量化によるエネルギー効率の向上には大きな利益がある事を述べた。次に、非磁性面で駆動できるホロノミック自走機構について紹介し、位置決め再現性の向上が課題であることを説明した。位置決め再現性低下の主要因として固定脚の3つの接地点の摩擦力の不均一性、可動脚の3つの接地点の摩擦力を完全には0にできていない事を説明した。この問題の解決方法として、六つの接地点に作用する垂直効力を、ソレノイドアクチュエータにより適切に制御する事が必要であることを述べた。現在の取り組みとして一本の脚に作用する垂直効力をソレノイドアクチュエータの電流により制御する実験装置の構成や力学モデルを説明した。今後は、提案した実験装置による垂直抗力の制御実験を行う。

文 献

- [1] 大井章生, "インチワーム機構の内力切り替え用磁気アクチュエータの開発と非磁性体面上での駆動実験", 横浜国立大学卒業論文, 2013.