ゴム膜を用いた電磁アクチュエータによる位置決めおよび振動制御*

野村 健作^{*1}, 則次 俊郎^{*2}, 荒井 淳二^{*3}

Positioning and Vibration Control by Electromagnetic Actuator Using Rubber Film

Kensaku NOMURA^{*4}, Toshiro NORITSUGU and Junji ARAI^{*4} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushimanaka, Okayama-shi, Okayama, 700-8530 Japan

This study investigates the positioning and the vibration isolation performance of a precise positioning mechanism which is composed of a electromagnetic actuator using a rubber film. The results obtained by the experiments are as follows: (1) The actuator has the hysteresis, but it has not influence on the positioning accuracy by applying PI control. (2) The rubber film plays the part of the passive vibration isolation. (3) As a result of employing the disturbance cancellation control, the vibration isolation performance improves further.

Key Words: Electromagnetic Actuator, Rubber Film, Vibration Isolation, Positioning, Microvibration Control

1. は じ め に

近年, ナノメートル, マイクロメートルオーダの寸法での事象を扱う研究は, 情報, 通信の分野をはじめ医療分野など多岐に及び, 大きな期待がかけられている^{(1)~(3)}. これらの分野において使用される精密機器は, 床から伝わる振動など外来ノイズから遮断された環境が要求される. とくに, 電子顕微鏡など高精度の位置決め性能が要求される機器は, 大重量の除振台の上に設置され, その上での作業を強いられる. 通常の位置決めは, 除振台上に設置された微動機構によって行われるため, 外来ノイズの絶縁はできても微動機構自体が発生する振動の低減は困難である.

微動機構用アクチュエータとして, 微小変位が得やすいなどの理由から圧電アクチュエータが使われることが多い^{(4)~(7)}. 圧電アクチュエータは変位の分解能に優れ, ナノメートルオーダの微動が可能で電子顕微鏡の試料台の駆動機構などに広く普及している. しかし, 圧電アクチュエータは振動減衰機能がなく, 位置決め時の残留振動が問題となることが報告されている⁽⁸⁾. このように位置決め機構に内在する要因によって発生する振動は, アクチュエータに減衰要素を付加す

るか, アクチュエータ自身が有する減衰機能により対処する必要がある.

したがってナノスケールの移動を可能にするアクチュエータは, 位置決め性能と同時に高い制振性能をもつことが望まれる. 本研究では, 位置決めと制振が両立するアクチュエータの開発をめざして, ゴム膜を用いた電磁アクチュエータを試作した⁽⁹⁾. 本アクチュエータは, 電磁石と駆動対象物の間にゴム膜を挟み込み, 磁力によってゴム膜を伸縮させて変位を得る構造をもつ. ゴム膜の粘性によって大きな減衰が付与され, アクチュエータが制振装置としても機能する. 本アクチュエータを用いて位置決め機構を構成し, 位置決め性能とゴム膜による制振性能について考察する. さらに外乱オブザーバを用いた制御系を構成することにより, 制振性能がさらに向上することを明らかにし, 除振装置を要さない精密位置決め機構の実現について検討する.

2. アクチュエータと実験装置

図1に試作したアクチュエータの概略を示す. 下部の磁極と上部の電磁石の間にゴム膜を挟み込んだ構造をもち, 収縮は磁気吸引力, 伸張はゴム膜の復元力によって行われる. 試作したアクチュエータで用いた電磁コイルの抵抗は 23.5Ω, インダクタンスは 73.3mH である. 本アクチュエータは被駆動部である下部磁極をゴム膜によってのみ支持しているので, 次のような特徴がある.

* 原稿受付 2001年10月31日.

^{*1} 正員, 岡山大学大学院(☎ 700-8530 岡山市津島中 3-1-1).^{*2} 正員, 岡山大学工学部.^{*3} 正員, 津山工業高等専門学校電子制御工学科(☎ 708-8509 津山市沼 624-1).

E-mail: nomura@tsuyama-ct.ac.jp

Fig.1 Structure of actuator

Fig.2 Shape of rubber

1. ゴム膜の粘性によって減衰が得られる。
2. 摺動部がないので高精度の位置決めが可能である。
3. フレキシブルジョイントとしての機能も備える。

また圧電アクチュエータと比較して、応答性や発生力は低いが低電圧で大きな可動範囲が得られることを確認している。したがって、本アクチュエータを用いることで、除振台や大規模な電源を要さずストロークの大きい微動機構を実現できることが期待される。

図2に使用したゴム膜の形状を示す。ゴム膜は、二液型 RTV シリコンゴムに希釈剤である RTV シンナー及び硬化剤を混入したものを金型に流し込み室温で硬化させて製作した。RTV シンナーの体積含有率は25%である。厚さ1mmの内側のリング状の部分が磁極と電磁石によって加圧される。この部分の寸法を変えることでゴム膜の復元力を調整できる。図示する寸法は、アクチュエータの可動範囲を大きくすると、電磁石に印加する電圧と発生変位が極力比例するように決定されている。

図3に本アクチュエータを用いて構成した位置決め機構の概略を示す。アクチュエータを門型フレームの上部に取り付け、下部の磁極に変位センサを含むエンドエフェクタを取り付けた。エンドエフェクタの質量は117gである。下部には粗動のためZ軸ステージを設置し、これらを全てベースプレート上に固定した。これを除振機能のない実験台の上に設置した。実際には、Z軸ステージの上に試料を置き、これに対

Fig.3 Experimental setup

Fig.4 Displacement of end-effector
してエンドエフェクタで微細作業を行うことを想定している。Z軸ステージとエンドエフェクタの相対変位に対する位置決めと振動の低減を問題とした。

3. 基本特性

本実験装置におけるエンドエフェクタは、重力、電磁石の吸引力およびゴム膜の復元力の合力によって駆動される。この内、磁力によってエンドエフェクタの発生変位を能動制御する。図2に示すゴム膜を用いたとき、電磁石の印加電圧に対する発生変位の特性を調べた結果を図4に示す。電磁石には予めバイアス電圧を10V加え、電圧はそこからの変化分を示している。変動範囲はそれぞれ±1V, ±2V, ±5V, ±10Vとしている。また変位は図3において上向き（ゴム膜が収縮する方向）を正值としている。20Vの電圧変化に対して140μmの可動範囲が得られるが、ヒステリシスが存在することおよび上向きの変位より下向きの変位が大きいことが確認される。

これらの問題を、変位をフィードバックするサーボ系を構成することで回避する。また、開ループ制御においては、印加電圧に対する変位の特性を図4に示すような直線で近似する。

Fig.5 Frequency response

Fig.6 Model of experimental setup

開ループ制御系において、 $30\mu\text{m}$ に相当する振幅を持つ正弦波状の電圧を加えたときの変位の周波数応答を図5に示す。本装置は軽量、コンパクト化のためフレームの剛性を高めていない。このため磁力によってフレームの固有振動が励起される。高周波側で見られる2つのピークはアクチュエータを固定しているフレームの固有振動とアクチュエータ自身の固有振動が連成して生じた結果である。

実線は、図6に示すようにアクチュエータとフレームの動特性を考慮した下記の数学モデルより計算した周波数応答である。

$$m_1 \ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_f x_1 + k(x_1 - x_2) = -k_i i \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) = k_i i \quad (2)$$

$$L \dot{i} + R i = e \quad (3)$$

$$x_{ref} = k_g e \quad (4)$$

ここで、 m_1 :電磁石の質量、 c :ゴムの減衰係数、 k_g :アクチュエータの電圧に対する発生変位の感度、 L :電磁コイルのインダクタンス、 R :電磁コイルの抵抗、 x_{ref} :電圧の変位換算値である。また x_1, x_2, i, e はそれぞれ電磁石の変位、エンドエフェクタの変位、電流及び印

Table 1 System parameters

m_1	170	g
m_2	120	g
ω_1	1271.5	rad/sec
ω_2	879.6	rad/sec
ζ	0.08	
k_g	8.5	$\mu\text{m/V}$

Fig.7 Block diagram of PI control system

加電圧であり、これらは 10V のバイアス電圧に対応する各状態の平衡点からの微小変動分としている。さらに電磁力 f を間隙と電流の関数とすれば、 $k_i = \partial f / \partial i |_{x_1=0, x_2=0, i=0}$, $k_x = -\partial f / \partial (x_1 - x_2) |_{x_1=0, x_2=0, i=0}$ であり、いずれも正値を取る。また、ゴムの剛性を k_r とすれば $k = k_r - k_x$ である。式(1)～式(4)より x_{ref} に対する x_2 の応答特性は次式で表される。

$$G(s) = K G_c(s) G_m(s) \quad (5)$$

ここで、

$$K = \frac{k_i}{m_2 k_g}, G_c(s) = \frac{1}{Ls + R}$$

$$G_m(s) = \frac{s^2 + \omega_1^2}{g_{m1} g_{m2} - g_{m3}}$$

$$g_{m1} = s^2 + 2\zeta\omega_2 Ms + \omega_1^2 + M\omega_2^2$$

$$g_{m2} = s^2 + 2\zeta\omega_2 s + \omega_2^2$$

$$g_{m3} = M(2\zeta\omega_2 s + \omega_2^2)^2$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_f}{m_1}}, \omega_2 = \sqrt{\frac{k}{m_2}}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{k m_2}}, M = \frac{m_2}{m_1}$$

である。パラメータの値を表1に示す。図5の実測値はフレームの動特性を考慮した式(5)の周波数応答と良好に一致する。なお、実測値はエンドエフェクタとZ軸ステージとの相対変位 x の応答を示すが、外乱 z がなければ $x = x_2$ である。

図7にエンドエフェクタとZ軸ステージの相対変位をフィードバックするサーボ系の構成を示す。ここで、フレームは剛体とし実際のフレームの振動は床から伝わる外乱 z に含めている。このとき、エンドエフェクタの動特性は次式で与えられる。

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_2 \dot{x} + \omega_2^2 x = \frac{k_i}{m_2} i - \ddot{z} \quad (6)$$

Fig.8 Step response

式 (6) と式 (3) によって得られる制御対象に PI 補償器を付加した。

図 8 にエンドエフェクタと Z 軸ステージの相対変位のステップ応答を示す。図 8(a) は $\pm 1 \mu\text{m}$, $\pm 2 \mu\text{m}$, 図 8(b) は $\pm 10 \mu\text{m}$, $\pm 20 \mu\text{m}$ のステップ状入力を与えたときの応答である。単純に電圧をステップ状に変化させる開ループ制御系では、印加電圧に対する発生変位の感度 k_g をステップ幅に応じて調整し、時刻 10sec までの応答がほぼ目標値に近づくようにした。しかし、10sec 以降の応答は図 4 に示される特性を反映し、下向きの変位のほうが大きくなってしまったりヒステリシスの影響で 15sec 以降の変位が零に戻らない。これらの現象はステップ幅が大きくなるに従って顕著になる。

一方、PI 制御系を構成した場合、このような問題が解消され良好な位置決め性能を得られることが確認される。センサ分解能 ($0.55 \mu\text{m}$) などによる制限から、 $1 \mu\text{m}$ 以下の位置決め性能は確認されていない。

4. 制 振 性 能

図 9 は、実験台に衝撃を与えたときのエンドエフェクタと Z 軸ステージとの相対変位の応答を示す。ゴム膜の制振性能を確認するため、アクチュエータからゴム膜を取り除きエンドエフェクターを電磁石に固定したときの応答も示している。圧電アクチュエータを本アクチュエータの代わりに用いるとこのような応答を示すことが予想できる。図 9(a) よりゴム膜がない場合、

Fig.9 Impulse response

励起された振動がなかなか減衰しない。減衰比を見積もると 0.039 になる。ゴム膜がある場合、高減衰が得られ整定時間が短くなることが確認される。減衰比を見積もると 0.082 になる。図 9(b) は (a) の波形のパワースペクトルである。ゴム膜がない場合、144Hz 近傍で大きなピークが存在する。この周波数は図 6 のモデルにおいて $k \rightarrow \infty$ とした時のエンドエフェクタと電磁石の固有角周波数 ($\sqrt{k_f/(m_1 + m_2)}$) に一致する。一方ゴム膜がある場合、共振振幅が抑制されている。図 6 に示すエンドエフェクタとゴム膜は粘性摩擦式ダンパ⁽¹⁰⁾と等価である。ゴム膜が粘性摩擦式ダンパのバネとダンパの役割を果たし、制振効果を発揮している。117Hz で現れるピークはエンドエフェクタと電磁石が同方向に同位相で動く 1 次モード振動であり、280Hz 近傍のピークは 2 次モードの振動である。また、33Hz のピークは実験台の固有振動と連成して生じる振動である。

ゴム膜によって相対変位に現れる振動が低減されることを示したが、一般にエンドエフェクタの質量やフレームの剛性などが異なれば十分な制振性能が得られるとは限らない。たとえば、エンドエフェクタの質量が極端に小さい ($m_2 \rightarrow 0$) 場合、制振効果がないことは明らかである。このため相対変位に現れる振動を外乱オブザーバによって推定し、これをフィードバックして相殺する外乱相殺制御系を構成する⁽¹¹⁾。

設計した制御系の構成を図 10 に示す。式 (3) と式

Fig.10 Block diagram of control system

(6) より次式が得られる.

$$\ddot{x} + (2\zeta\omega_2 + \frac{1}{T_c})\dot{x} + (\omega_2^2 + 2\zeta\omega_2)\dot{x} + \frac{1}{T_c}\omega_2^2 x = \frac{k_i}{m_2 L} u - \frac{1}{T_c} \ddot{z} - \ddot{z} \quad (7)$$

ここで,

$$T_c = \frac{L}{R}, u = e$$

である. さらに操作量を $u = u_{fb} + u_{ff}$ とし u_{fb} を PI 補償器の出力とする. u_{ff} を次式で与えて, 式 (7) の右辺第 2 項と第 3 項を相殺する.

$$u_{ff} = \frac{m_2 R}{k_i} (\hat{z} + T_c \dot{\hat{z}}) \quad (8)$$

ここで, $\hat{z}$ は z に対する外乱オブザーバの推定値である. 外乱オブザーバは式 (6) より得られる x と i から z までの伝達関数に 2 次フィルタを加えて次式になるように構成した.

$$\hat{\ddot{z}}(s) = \frac{1}{(Ts + 1)^2} \left[\frac{k_i}{m_2} I(s) - (s^2 + 2\zeta\omega_2 s + \omega_2^2) X(s) \right] \quad (9)$$

図 10 に示す破線内が外乱オブザーバであり, 式 (9) と等価である.

設計した制御系の有効性を確認するため振動試験を行った結果を図 11 に示す. 外乱は補償器内で生成して操作量に加えた. 図 11(a) は外乱として 10Hz の正弦波を加えたときの応答, 図 11(b) は 100Hz のときの応答を示す. 外乱相殺制御系の効果が現れ, 振動振幅が抑圧されていることが確認できるが, 100Hz の外乱に対しては効果が小さい.

このため, 外乱 z と外乱オブザーバの推定値 $\hat{z}$ を調べた結果を図 12 に示す. 外乱オブザーバの設計パラメータ T は, 試行錯誤により $1/(2\pi T) = 110\text{Hz}$ としている. その結果, 10Hz の外乱に対しては良好な推定値が得られているが, 100Hz の外乱に対しては推定誤差が大きくなっている.

Fig.11 Response for periodic disturbance

Fig.12 Estimation value of disturbance observer

図 13 は実験台の衝撃試験の結果である. PI 制御系の応答より外乱相殺制御系の応答の方が整定時間が短くなり, 振動振幅が抑圧されていることが確認できる. なお, パワースペクトルにおいて振動の周波数成分が 123Hz にほぼ限定されている. このような場合, 周波数が既知の調和励振力として外乱を推定するオブザーバ⁽¹²⁾を使えば, 制振性能がさらに向上することを確認している⁽¹³⁾.

図 14 に目標値を $10\mu\text{m}$ としたときの相対変位のステップ応答を示す. この場合アクチュエータ自身が振動源となりフレームの振動が励起される. 精度良い位置決めを実現するためにはサーボ系を構成することが不可欠となる. しかし, 本実験で使用した PI 補償器のパラメータは, ヒステリシスの問題の回避や追従性の観点でのみ決定されているので, 開ループ制御系より制振性能が悪くなる結果が得られた. このことは, 図 13 における PI 制御系の応答が図 9 のゴム膜がない場合の応答に類似していることから類推できる. 一方, 外乱相殺制御系は PI 制御系と同様の位置決め性能を得られ,

Fig.13 Impulse response

Fig.14 Step response

Fig.15 Vibration isolation performance

同時に制振性能も得られることが確認できる。

本位置決め機構は図6に示されるように、外乱 z がなくても x_1 の振動が x に影響を与える。図15に x_1 のみが振動しているときの x の振動特性を示す。縦軸は x と x_1 の振幅比を表す。 x_1 は振幅 $10\mu\text{m}$ の正弦波を補償器内部で生成し操作量に加えた。線で示される解析値は式(2)、式(3)及び各補償器の操作量を使って求めた。 x は x_1 に対して 120Hz 近傍で共振する特性を有しているが、制御することで共振振幅が抑制されていることが確認できる。また図15は外乱 z がない状態($x_2 = x$)の特性を示しているため、アクチュエータ自身の除振特性を示すものである。アクチュエータが 150Hz 以上の振動に対してパッシブ除振装置として機能することも確認できる。

5. おわりに

精密位置決め機構をゴム膜を用いた電磁アクチュエータによって構成した。本アクチュエータはゴム膜によって高い減衰が得られることが特徴である。試作

した機構の位置決め性能とゴム膜がもつ振動絶縁効果について考察するとともに、基本特性を実験により調べた。さらに外乱オブザーバを用いた制御系を構成することで、制振性能がさらに向上することを確認した。

本研究で得られたおもな結果は次の通りである。

1. 試作した位置決め機構では、PIサーボ系を構成することで $1\mu\text{m}$ の位置決め性能が得られることを確認した。さらに高分解能の位置決め機構が構成できる可能性をもつ。
2. アクチュエータが粘性摩擦式ダンパと同様の構造をもち、ゴム膜の粘性によって高い制振効果がある。
3. 外乱オブザーバを用いることで位置決め性能と同時に制振性能の向上が図れることを確認した。

本アクチュエータを用いた位置決め機構は、制振装置のない環境下での使用が期待できる。

文 献

- (1) 柴田 他, [テーマ] ナノ・マイクロマシンの世界, 日本機械学会誌, Vol.103, No.984, (2000), pp.715-764
- (2) 中山 他, 特集 創立100周年記念 ミクロの世界, 日本機械学会誌, Vol.100, No.943, (1997), pp.593-640
- (3) 河田 他, ミニ特集 表面/ナノ構造の計測, 計測と制御, Vol. 38, No.12, (1999), pp.735-775
- (4) マイクロアクチュエータ研究会, ミクロをめざすニューアクチュエータ, 工業調査会, (1994), pp.45-57
- (5) 大岩, 金子, 金子, 久曾神, 圧電素子を用いた高剛性多自由度微動機構, 精密工学会誌, Vol.60, No.9, (1994), pp.1355-1359
- (6) 新井, 谷川, Rene Larssonneur, マイクロハンドを構成するフィンガーマジューラの機構と制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3, (1997), pp. 402-407
- (7) 谷川, 新井, 二本指マイクロハンドの設計と微細作業, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No. 2, (1997), pp. 284-289
- (8) 早瀬, 村上, 初澤, 丸山, 圧電素子駆動ステージの高速整定動作のための入力決定手法, 日本機械学会論文集, Vol.67, No. 655, (2001), pp. 712-717
- (9) 野村, 則次, 荒井, ゴム膜を用いた電磁アクチュエータの基本特性, 第43回自動制御連合講演会(前刷), (2000), pp.99-100
- (10) 日本機械学会編, 機械工学便覧 基礎編, 新版6刷, (1993), pp. A3-47-A3-48
- (11) 大西, 外乱オブザーバによるロバストモーションコントロール, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4, (1993), pp. 486-493
- (12) 吉田, 野波, 振動と運動の制御手法の展望, 日本機械学会論文集 C, Vol.57, No.534, (1991), pp.345-354
- (13) 野村, 則次, 荒井, ゴム膜を用いた電磁アクチュエータによる位置決めおよび振動絶縁, ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, (2001), pp.1A1-M4(1)-1A1-M4(2)