学術論文

低速で柔らかく高速で高剛性のばね型アクチュエータ の開発と振動絶縁制御への応用

Spring Actuator with Low Stiffness at Low Speed but High Rigidity at High Speed and Its Application to **Vibration Isolation Control**

長屋 幸助^{*1} (正員),畑 秀樹^{*2},村上 岩範^{*2} (正員),野尻 飛鳥^{*2} 坂本 直也^{*2},安藤 嘉則^{*2} (正員), 今村 州^{*3}

Kosuke NAGAYA(Mem.), Hideki HATA, Iwanori MURAKAMI(Mem.), Asuka NOJIRI Naoya SAKAMOTO, Yoshinori ANDO(Mem.), Hiroshi IMAMURA

A new bellows type actuator under electromagnetic control is developed. The actuator consists of a bellows, a permanent magnet and an electromagnet which are installed in the bellows. The actuator having low stiffness at low speed but high stiffness at high speed is desirable for decreasing control energy. To have such characteristics, a mid plate is installed in the bellows which creates an air chamber with small holes in the actuator. The air chamber behaves like rigid damper at high frequency, and so high rigidity can be obtained at high speeds. A method of vibration isolation control is presented using the actuator. In the control, only the disturbance of base is detected, and the disturbance cancellation control is performed. Especially, the system requires no state variables of the vibrating body, and the transmissibility is reduced to be significantly small in wide frequency ranges.

Keywords: spring actuator, electromagnet, bellows, mid-plate, vibration isolation, control.

1 緒言

リニアアクチュエータは、位置決め制御とか振動の アクティブ制御とかの幅広い用途に用いられる[1]-[7]。 とくに高速性のあるリニアアクチュエータとしては, 圧電アクチュエータと超磁歪アクチュエータが開発さ れているが、これらは、応答性は速いが変位が小さい ため、使用する範囲が限定される。近年圧電アクチュ エータの特殊な応用として, 圧電インパクト駆動方式 が報告されている[5]-[6]。この方式はもともと位置決 め用に開発されたもので、大きな変位が得られ、位置 決め精度も良いがインパクト駆動方式のため、高次モ ードを誘起するため振動制御には不向きである。一方, 比較的大きな変位(1mm~1cm 程度)の得られるアク チュエータとしては、形状記憶合金を用いたアクチュ エータがあるが、これは熱で制御するため、応答性は 極めて悪い[1]-[3]。比較的応答性が良く変位も大きい アクチュエータとしては、可動コイルアクチュエータ が一般的であるが[4]、これである程度の力を有するア クチュエータを構成しようとすると、サイズはかなり

連絡先:長屋 幸助, 〒250-0875 小田原市南鴨宮 1-7-1-404 連絡充 _取座 , e-mail:nagaya420@yahoo.co.jp

*3日本発条株式会社

大きなものとなる。これとは別に著者らはコイルばね 素線に鉄粉層を接着したばね型アクチュエータを開発 した[7]。このアクチュエータはばねによる原点復帰機 能を持ち、変位も大きく、高速で、コンパクトである が、製造法が難しく、横揺れを防止するため、スライ ダを用いており、耐久性に問題がある。一方、原点復 帰機能を有するアクチュエータでは、機構にばねを用 いているが、ばねが柔らかい場合は駆動力が小さいが 共振周波数が低いため,使用周波数範囲が小さくなり, 共振周波数を大きくするためにばね定数を大きくする と、大きな駆動力を必要とする。ばね型アクチュエー タとしては、ゆっくりとした振動ではばねが柔らかく て駆動力が小さく,速い振動のときにばねが硬くなり, 共振周波数が大きくなるものが望ましいが、そのよう なアクチュエータは開発されていない。本研究では, 横剛性が大きいベローズに注目し、ベローズ内に永久 磁石と電磁石を挿入し、さらに適切な穴を有する仕切 板をベローズ内に挿入したアクチュエータを提案する。 このアクチュエータでは、ゆっくりした振動に対して は、空気が仕切板の穴をゆっくり流れるため、仕切板 の有無に関係なく,ばね定数は同じとなる。しかし, 速い振動に対しては、仕切板の穴が小さく流動に抵抗 するため、仕切板で作られた空気室が剛体のように作

用する。また、小さな穴を空気が流れるときに大きな 減衰を与えることになる。本研究では、このようなア クチュエータを実際に試作し、その性能を確認する。 さらに著者らの提案している外乱相殺法[8-9]を改良し て床の変位センサのみを使用し、振動体のセンサを必 要としない新しい振動絶縁制御法を示し、本アクチュ エータをその制御に応用した。

2 アクチュエータの構成

本アクチュエータは厚み方向に磁化した永久磁石, ベローズ,電磁石および小さな穴のあいた仕切版より 成り,Fig.laのように配置される。このとき,電磁石 には穴が空いており,空気はベローズ内に出入りでき るが,永久磁石側は完全に閉じられており,空気は仕 切り板の穴のみから出入りできる構造となっている。 その組み立て図の写真と各要素の諸量を Fig.lb およ び Tables 1~3 に示す。また,仕切り板は厚さ1.5mm, 重量8.5gのアルミニウム製の円板が電磁石上面と永久 磁石下面のほぼ中央位置のベローズ内壁に接着されて いる。

電磁石と永久磁石を用いた場合、反発型では軸直角 方向に不安定であり, また, 吸引型では軸方向に不安 定である。位置決め・振動制御等に用いる電磁アクチ ユエータは、電磁石の電流制御により吸引型としても 反発型としても使用するのでその両方向に安定でなけ ればならないが、本アクチュエータでは、横方向の不 安定性を横剛性の高いベローズで安定化させ、軸方向 については、ベローズのばね力で安定化させており、 スライダを用いることなく,吸引と反発の両方向に安 定化を図っている。したがって、摩擦を無くしたこと で、高精度の位置決めと摩耗による劣化を防いでおり、 耐久性も従来型のアクチュエータより改善されている。 一方、アクチュエータとして用いるときは、コンパク トで、原点復帰機能があり、変位が大きく、高速で減 衰が大きく,制御電力が小さいものが望ましい。本ア クチュエータはベローズと電磁石および永久磁石を一 体化したことで、コンパクト化し原点復帰機能を持た せ, 電磁吸引・反発力を用いることで, 10mm 程度の 大きな変位が得られるようにしてある。また、中間に 配置した穴明き板は、ベローズ内をふたつの空気室に 仕切り, ベローズが伸縮するときに穴を通して空気が ふたつの空気室に流動するときの抵抗力を減衰力とし て用いることで高減衰化を図っている。

本アクチュエータは Fig. 2 のような三要素モデルで

表すことができる。ここに,k0は空気と空気室部分の ベローズのばね定数,kl は空気室以外のベローズのば



Fig. 1a Present bellows type actuator.



Fig. 1b Photograph of the present actuator.



Fig. 2 Model of the actuator.

Table 1 Dimensions of the bellows

D[mm]	68
d[mm]	50
L[mm]	60
L _{min} [mm]	33
t[mm]	0.2
P[mm]	4.4
P _{min} [mm]	2.4
[g]	82
[N/m]	3700
	$\begin{array}{c} D[mm]\\ d[mm]\\ L[mm]\\ L[mm]\\ t[mm]\\ t[mm]\\ P[mm]\\ P[mm]\\ P_{min}[mm]\\ [g]\\ [N/m] \end{array}$

Table 2 Dimensions of the electromagnet.

Diameter of the core [mm]	20
Height of the magnet [mm]	28
Wire diameter [mm]	0.75
Average diameter of the coil [mm]	32.5
Number of turns	464
Electrical resistance $[\Omega]$	1.9
Hole diameter [mm]	12

Table 3 Dimensions of the permanent magnet.

Diameter of the permanent magnet[mm]	40
Height of the permanent magnet[mm]	10
Magnetic flux density at the center[mT]	280
Weight of permanent magnet[g]	94.5

ね定数であり、c は空気の絞りによる減衰係数で本ア クチュエータでは極めて大きい。このモデルで変位を 図のように x_1 およびxとおくと、相対速度 $(\dot{x} - \dot{x}_1)$ が 零に近いとき(ゆっくりと運動するとき)は、減衰力 c $(\dot{x} - \dot{x}_1)$ はほぼ零となり、このときのばね定数は k_1 と k_2 の直列結合となり、合成ばね定数は、

$$k = k_0 k_1 / (k_0 + k_1)$$

一方,速度 \dot{x} が大きくなると, $c(\dot{x}-\dot{x}_1)$ はcが極めて 大きいため無限大に近づき,ダンパ部分は剛結合の状 態となる。そのため、ベローズ先端の振動はばね定数 k_1 のばねのみの振動となる。このとき、

 $k_1 > k$

となるので、ばね定数は見かけ上振動数とともに増大 することになる。すなわち、ゆっくりした運動に対し ては剛性が小さいが、速い運動に対しては剛性が高く なるので、このような構成とすることで共振周波数を 増大させることができる。

アクチュエータは共振振動数以下で用いられるの で、最大駆動周波数を大きくするためには、ばね定数 を大きくする必要があるが、ばね定数を大きくすると その分装置を大型化し、制御エネルギも大きくしなけ ればならない。このとき、駆動周波数が小さいときに ばね定数を小さくしておけば、制御エネルギは小さく なるので、低速でばね定数が小さく、高速でばね定数 の大きいアクチュエータはコンパクトで省エネ型とな るが、このような観点からのアクチュエータの開発は 見受けられない。本アクチュエータはこのような性能 を有することが大きな特徴である。

3 静的ばね定数

本アクチュエータはベローズを用いているため、復 元力と変位の関係はほぼ線形であり、ばね定数は Table 1 のように得られた。一方、電磁石に電流を印加する と電磁石と永久磁石の間に吸引・反発力が作用し、ア クチュエータ先端が変位する。中間に仕切り板のある アクチュエータと仕切り板の無いアクチュエータの電 磁石に電圧を印加したときのアクチュエータ先端の変 位と印加電圧の関係の比較を Fig. 3 に示す。この図に 示されるように仕切り板のあるアクチュエータの値と 仕切り板の無いアクチュエータの値は一致しており、 また、変位と電圧の間に若干の非線形性はあるものの、 変位が-1mm~+1mm の範囲ではほぼ線形と近似でき ることが分かる。

4 ステップ応答

本アクチュエータについて、ステップ電圧を印加す ることで応答性、可動範囲を検討する。実験は、アク チュエータの電磁石にステップ電圧 $V = V_0 U(t)$ を印加 し、アクチュエータ先端の変位をレーザ変位計で計測 した。ここに V_0 は入力電圧、U(t)はステップ関数で ある。得られた結果を Fig. 4 に示す。図より本アクチ ュエータの変位はかなり大きく、電圧が 5V で約 1.7mm, 10V で約 3.5mm 程度の変位が得られることが 分かる。このときの整定速度は約 0.3 秒程度である。 とくに、仕切り板がある時も仕切り板がないときも整 定値はほぼ同じ値となっているが、仕切り板がある時 にオーバーシュートが無くなっており、整定速度も小



Fig. 3 Displacements versus voltages in the electromagnets.



Fig. 4 Step response at the top of the actuator $(V_0 = -10V)$.

さくなっていることが認められる。これは、仕切り板 があるとき、永久磁石側に作られた空気室から電磁石 側(解放)に空気が流れるとき(あるいはその逆)に 仕切り板の空隙が抵抗となって大きな減衰を与えたた めである。なお、本アクチュエータは前述のように三 要素モデルで表されるため、単純な一自由度系に対し て、整定するまでの現象に若干の差があるが、整定値 は変わらないので、位置決め制御では、通常のアクチ ュエータと同様に考えて用いることができる。この場 合、電圧をゼロにすると、ばねの復元力によりアクチ ュエータ先端はもちろん原点に復帰する。

5 振動絶縁制御への応用

5.1 基本特性

本アクチュエータは通常のアクチュエータと同じ く正負の電圧に対し,正負の変位が得られるので, 振動制御等のアクチュエータとしても利用できる。 そこで,振動絶縁制御に応用することを考える。本 アクチュエータの上端に質量 2.1kg を載荷し,それ を上下振動加振器のテーブルに載せてテーブルを加 振したときの質量(振動体)の伝達率(*W*₀/*u*₀)の周 波数応答の結果を Fig. 5 に示す。ここに *W*₀は振動体 の振動振幅を表し,*u*₀ は床の振動振幅(=0.43mm) である。

図よりベローズ内に仕切り板を入れた空気ダンパ 付きベローズアクチュエータ(図中の黒点)の場合 は、仕切り板の無いアクチュエータに比べ約 2.5 倍 と大幅に共振周波数が大きくなっていることがわか る。この特性が本アクチュエータの大きな特徴で, これにより制御を行う場合,遅い運動に対しては, ばね定数が小さいので制御エネルギが小さくでき,



Fig. 5 Frequency response of the vibrating body under the base excitation ($u_0=0.5$ mm).



Fig. 6 Experimental set up.

かつ共振振動数を大きくできるので,適用周波数も大 きくできるという利点を有する。

5.2 振動絶縁制御法

本アクチュエータは、前述のように3要素モデル的 な特性を示すと思われるが、1 次振動の領域に使用振 動数域が限定されるアクチュエータに対して、通常の 1 自由度近似による振動絶縁制御法が適用できるかど うかの検討を行う。このとき、垂直振動台上に質量 mを有する本アクチュエータを振動台に垂直に置き、加 振台から上下方向に $u = u_0 \sin \omega t$ の強制加振変位を 与える場合を考えると、その運動方程式は(Fig. 6 参 照)

$$m_a \frac{d^2 w}{dt^2} + C_a \frac{d w}{dt} + k w = C_a \frac{d u}{dt} + k u + F(I)$$
(1)

ここに m_a は振動体質量 m とアクチュエータの等価 質量 (\cong 電磁石を除くアクチュエータ質量/3)の和, w は振動体変位, C_a は減衰係数, k はアクチュエータ のばね定数, u は加振台変位, F(I)はアクチュエータの 制御力である。著者らは式(1)の右辺を零とする振動絶 縁制御を提案している(外乱相殺法)[8,9]。すなわち, 式(1)より右辺を零とすると振動体には荷重が作用し ないので振動体の振動を零とすることができる。この ときの制御力 F(I)は,

$$F(I) = -C_a(du/dt) - ku$$
⁽²⁾

式(2)で表される制御力F(I)を電磁石から発生するこ とにより、理論的には振動体の振動振幅を零とするこ とができる。また、この制御力F(I)には振動体の変 位、速度が含まれていないため、振動台の振幅と速度 だけで完全な除振ができることから、このような制御 を行うことで、振動体の変位と速度を計測するセンサ を理論的には必要としないことがわかる。しかし、こ の制御を完全に行うことは困難であるので,実際には, わずかな外乱相殺誤差が残る。この残留外乱による影 響は共振点以外では小さいが,共振点では系の減衰係 数*C*にもよるが、かなり大きく振動体を振動させるこ とになる。この共振峰を抑制するため著者らの先の論 文では振動体の状態量を計測し,最適レギュレータを 構成して伝達率を抑制する方法を示した[8,9]。しかし, この系では新たに振動体の状態量を計測するセンサが 必要となり,系が複雑化し,高価となる。本研究では, 上記の外乱相殺法を基本とするが、外乱変位u を計測 するだけで振動体の計測を必要としない振動絶縁制御 法を提案する。すなわち外乱変位 u を基に外乱速度 du/dt が得られるので、これを用いて振動体の共振を抑 制する方法を考える。計測変位をu*としたとき、制御 力F(I)は次のように表すことができる。

$$F(I) = -f_2 \frac{du^*}{dt} - f_1 u^*$$
(3)

ここに $f_1 = k \ge 1$, f_2 は共振峰を最小にするように決定する。 u^* は振動台の変位uの計測誤差を含む値である。計測等による変位誤差を $\Delta u = \eta u$ としたとき,計測変位 u^* は,

$$u^* = u - \Delta u = (1 - \eta)u \tag{4}$$

これを式(1)で求めた運動方程式に代入すると

$$\frac{d^2w}{dt^2} + 2\mu \frac{dw}{dt} + p^2 w = 2\mu' \frac{du}{dt} + p^2 \eta u$$
(5)

ここに,

$$2\mu = \frac{C_a}{m_a}$$
, $p^2 = \frac{k}{m_a}$, $2\mu' = \frac{C_a - f_2 + f_2\eta}{m_a}$

式(5)の運動方程式を解いて伝達率 T=W₀/u₀を求めると, 振動伝達率Tは,

$$T = \frac{\sqrt{\left\{\eta\left(1-\Omega^{2}\right)+4\zeta\zeta\Omega^{2}\right\}^{2}+\Omega^{2}\left\{-2\zeta\eta+2\zeta'\left(1-\Omega^{2}\right)\right\}^{2}}}{\left(1-\Omega^{2}\right)^{2}+4\zeta^{2}\Omega^{2}}$$
(6)

ここに,

$$\Omega = \frac{\omega}{p}, \ \zeta = \frac{\mu}{p}, \ \zeta' = \frac{\mu'}{p}$$

式(6)で求めた振動伝達率の式より,完全な外乱相殺が 行われるとき,すなわち $\eta = 0$ (測定値に測定誤差が 含まれない場合), $\zeta' = 0$ となるので振動体の振動振幅 は $w_0=0$ となり完全な振動相殺となる。ここで共振点 $\Omega = 1$ の場合を考える。すなわち式(6)に $\Omega = 1$ を代入 すると,

$$T_{\Omega=1} = \frac{\sqrt{4\zeta'^2 + \eta^2}}{2\zeta}$$
(7)

式(7)より $\zeta'=0$ とおくと、共振点における振動体の振動振幅 w_0 は、

$$w_0 = \frac{a\eta C_a}{2\sqrt{m_a k}} = const \tag{8}$$

となる。このとき,

$$\mu' = \frac{C_a - f_2 + f_2 \eta}{2m_a}, \quad \zeta' = \frac{\mu'}{p} = \frac{C_a - f_2 + f_2 \eta}{2\sqrt{m_a k}}$$

すなわち、上式の分子が零となるためのフィードバッ ク係数は、

$$f_2 = C_a / (1 - \eta)$$
 (9)

このようにフィードバック係数を設定すると共振をな くすることができる。 5.3 コントローラの設計

実験装置の垂直振動台には、変速機が接続されてお り、この部分で振動台の振動数を決定する。なお振動 台の振動数は、振動台に接続されているフライホイー ル部分の回転数をタコメータにて測定する。また,振 動台の変位は床部分の変位を、ばね型アクチュエータ の変位はばね上端に配置される永久磁石上端の変位を それぞれレーザ変位計を用いて測定され, DSP を介し て PC に取り込まれる。なお、振動台の振動数および ばね先端変位のセンサーは計測専用で制御には用いな い(Fig. 6 参照)。制御では、振動台変位V_dに外乱変 位相殺ゲインK1を乗じたものが外乱変位相殺信号と なり、また、速度信号に関しては、変位信号を時間微 分することで求める。このようにして求めた振動台速 度 dV_d/dt に外乱速度相殺ゲイン K_2 を乗じたものが外 乱速度相殺信号となる。したがって DSP から発生され る制御信号電圧 V はこれらを足し合わせたものとな るため,

$$V_{c} = K_{1}V_{d} + K_{2}(dV_{d}/dt)$$
(10)

この電圧V。をパワーアンプを介して電磁石に印加 する。

本ばね型アクチュエータは Fig. 3 に示すように制御 力は電磁石に印加する電流に対して非線形である。そ のため大きな変位を受ける場合は、非線形の特性を考 慮しなければならない。しかし本研究でターゲットと する工場等の機械振動による床の変位は、大きくても $300[\mu m]$ 程度といわれており、除振装置としては 1[mm]程度までの振動変位を制御できれば十分だと考 えられる。そこで Fig. 3 を見ると、変位が 1[mm]程度 まではほぼ線形とみなせるので、以下、制御力と電圧 の関係は線形と仮定しコントローラを設計する。この とき、床の計測変位を u^* としたとき $f_1u^* = keI$ とな る。ここに ϵ は単位電流あたりのアクチュエータの変 位[m/A], f_1 は変位のフィードバック係数である。こ れより変位相殺電流 I を求めると $I = f_1u^*/(k\epsilon)$ 。制御 電圧は、電磁石の抵抗を R とすると、

$$V = IR^* = \frac{R}{c}u^* \tag{11}$$

つぎに変位センサの計測変位 u^* と計測電圧 V_m の関係を $V_m = K_d u^*$ としたとき、 $u^* = V_m / K_d$ 。またパワー

アンプの倍率を*K_a* とすると DSP からの変位フィード バックによる制御電圧*V_a* は,

$$V_{cd} = \frac{R}{\varepsilon K_d K_a} V_m \tag{12}$$

同様に速度フィードバックによる制御電圧 V。は,

$$V_{cv} = \frac{f_2 R}{k \varepsilon K_d K_a} \left(\frac{dV_m}{dt}\right) = \frac{C_a R}{k \varepsilon K_d K_a (1-\eta)} \left(\frac{dV_m}{dt}\right) \quad (13)$$

計測および Fig. 3, Fig. 5 を用いた同定で,制御パラ メータは次のように求められた。すなわち,電磁石抵 抗 R=1。9 Ω ,質量 m_a =2。16kg,単位電流あたりの変 位 ϵ =0。633 mm/A,レーザ変位計係数 K_d =0。25 V/mm, ばね型アクチュエータ減衰係数 Ca=29。8 N・s/m, ばね 型アクチュエータばね定数 k=3700 N/m,外乱補正係数 η =0。2 (仮定)である。これらの値を式(12)および(13) に代入すると,

$$V_{cd} = K_{1th}V_m / K_a$$
, $V_{cv} = K_{2th}(dV_m / dt) / K_a$ (14)

ここに, $K_{1th} = 12$ は理論的外乱位置相殺ゲインを, $K_{2th} = 0.12$ は理論的外乱速度相殺ゲインを表し、 V_{cd} および V_{ex}は DSP からの制御電圧であり、パワーアン プを通して電磁石に印加するので、電磁石の駆動電圧 は K_a倍されたものとなる。なお、本実験では、K_a=10 としている。これらの理論的相殺ゲインを用いて実験 を行ったところ、共振峰を低減でき、また共振周波数 以下の振動数に対する振動伝達率を 0.5 以下にするこ とができたが、その振動絶縁効果は未だ十分ではない ように思われる。この原因は前述のモデリングの不一 致とパラメータの推定エラーによるものと考えられる。 本研究で用いているフィードバック係数は,通常のPD 制御のそれとは異なり、ゲインを大きくすれば良いも のでは無く、適切なゲイン以下では振動相殺の効果が 少ないし、それ以上では制御器から外乱を与えること になるので、外乱を相殺する適切なゲインを選択しな ければならない。

そこで,最急降下法を用いた適応制御法を用いて適切 なゲインを求めることとした。このときの評価関数は,

$$J = \left(\frac{w(t)_{\max} - w(t)_{\min}}{2}\right)$$
(15)

前述の理論より求められたゲインを初期値として、式

(15)を最小とするようなゲインを求めたところ,外乱 位置相殺ゲインが $K_1=9$,外乱速度相殺ゲインが $K_2=0.43$ であった。また,試行錯誤的にも最適ゲイン を探索したが,これらの値がほぼ適切な値であること も確認した。

これらの値を用いて制御したときの変位の伝達率の周 波数応答を Fig. 7 に示す。 図中 PDC-control (proportional disturbance cancellation control) は本外乱相殺制御法で 床の変位のみを相殺する制御を表し, PDDC-control (Proportional and differential disturbance cancellation control) は床の変位と速度を相殺する制御を表してい る。従来の振動体の変位と速度をフィードバックする PID 制御にせよ最適レギュレータにせよ、通常の制御 法では共振振動数より小さい振動数域の伝達率は1よ り大きくなる。それに対し、本制御法を用いると共振 周波数より低い振動数域での伝達率は0.1~0.3となっ ており、1よりかなり小さくできることが分かる (Fig. 7参照)。また、床の速度をフィードバックしない制御 (PDC)では、共振峰が残るが、変位と速度を組み合わ せた振動相殺法を用いると、共振峰を無くできること がわかる。一方, Fig. 8 は振動体の変位の時刻歴応答 の一例を示したものである。図より、振動体の変位は 本制御により速やかに減少し、きわめて小さな値にな っていることが確認できるが、振動基線が若干ずれて いる。このことは、前述のように、本アクチュエータ の性質に由来するもので、振動が速くなると、ベロー ズ内の永久磁石側の空気室からの空気の流動がアクチ ュエータの動きに追随できなくなるため、その部分が 剛体のようになり、その下(電磁石側)のみが振動す るようになるため、ずれたものである。一般の使用で は、振動伝達を遮断できれば、基線の小さなずれは問 題にならない機器が多いので、本アクチュエータをこ の状態で用いてかまわない例が多いと思われる。しか し、基線のずれを嫌う場合はもちろん振動体に対する 通常の積分制御を組み合わせれば良い。一方、この図 で残留する振動の振動数は8.77Hzであり、固有振動数 に一致しており、外乱相殺はほぼ完全になされている が、わずかな自由振動は残留することを示している。 これは本制御では、振動体の速度をフィードバックし ていないため、自由振動を完全に消失できないためで あるが、その値はかなり小さい。すなわち、本アクチ ュエータを用い、本外乱相殺制御法を用いると、共振 周波数より小さい振動数域の振動伝達率を1よりかな り小さい値に抑制でき、かつ、共振を含む広い振動数



Fig. 7 Frequency response of the transmissibility.



Fig. 8 Time response of the vibrating body under PDDC control (Base excitation frequency=10.5Hz).

域で伝達率を 0.1~0.3 に抑制できることがわかる。

6 結言

本研究は、低速で柔らかく高速で高剛性、コンパク トでかつ高減衰なアクチュエータの開発を行ったもの である。その内容を要約すると

- (1)静的ばね定数が同じであるにもかかわらず、共振振動数を通常の場合の数倍にでき、かつ共振振動数より低い領域の周波数応答曲線をフラットに近くしたことで、静的ばね定数を同じのままで使用振動数範囲を大幅(2.5倍程度)に拡張できるアクチュエータを開発できた。
- (2) 床の変位センサのみを用い、振動体にセンサを必要としない簡便な振動絶縁制御法を示した。この方法を用いると、従来困難とされていた共振振動数より小さい振動数域の伝達率を1より小さい値に抑制でき、また、共振を含む広い振動数域で伝達率を0.1~0.3 に抑制できることが分かった。 (2009年3月14日受付、2009年7月17日再受付)

参考文献

- [1] Y. Haga, W. Makishi, K. Iwami, K. Totsu, K. Nakamura and M. Esashi, "Dynamic Braille display using SMA coil actuator and magnetic latch", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.119, Issue 2, pp.316-322, 2005.
- [2] Qin Chang-jun, Ma Pei-sun and Yao Qin, "A prototype micro-wheeled-robot using SMA actuator", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.113, Issue 1, pp.94-99, 2004.
- [3] J. D. Chiodo, N. Jones, E. H. Billett and D. J. Harrison, "Shape memory alloy actuators for active disassembly using smart materials of consumer electronic products", *Materials & Design*, Vol.23, Issue 5, pp.471-478, 2002.
- [4] S..Ikai, K.Ohsawa, K.Nagaya and H. Kashimoto, "Electro-magnetic actuator and stacked piezoelectric sensors for controlling vibrations of a motor on a flexible structure", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.231, No.2, pp.393-409, 2000.
- [5] T.Higuchi, Y.Yamagata, K.Kudoh, K.Iwasaki, "Micro robot arm utilized rapid deformations of piezoelectric elements", *Proc.* 5th International Symposium on Robotics Research, pp.111-115 (MIT press), 1989.
- [6] Y.Yamagata, T.Higuchi, H.Saeki, H. Ishimaru, "Ultrahigh vacuum precise positioning device utilizing rapid deformation of piezoelectric elements", *Journal of Vacuum Science and Technology*, A, Vol.8, No.6, pp.4098-4100, 1990.
- [7] M. Notoya, K.Nagaya, N.Sakamoto, T.Fujinaka, H.Hata, J. Zheng, "Development and design of spring actuator with iron particles inside layers under permanent-electromagnetic control", *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.72, No.724, pp.3878-3885, 2006.
- [8] K. Nagaya,H.Kanai,"Direct Distubance Cancellation with an Optimal Regulator for a Vibration Isolaion System with Friction", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.180, No.4, pp.645-655, 1995.
- [9] 遠藤正規,長屋幸助,渥美全弘,「反発型磁気浮上除振台の外乱相殺と状態フィードバック組み合わせ制御」,日本 機械学会論文集(C編), Vol.58, No.550, pp.1827-1832, 1992.