ピエゾアクチュエータを用いた 6 自由度微振動 シミュレータに関する研究*

田川 泰 敬^{*1}, 武 藤 敦^{*2}, 小 高 規 史^{*3}
 藤 田 隆 史^{*4}, 安 田 正 志^{*5}

Study on 6DOF Microvibration Testing Device Using Piezoelectric Actuators

Yasutaka TAGAWA, Atsushi MUTO, Norio KODAKA,
Takafumi FUJITA and Masashi YASUDA

Microvibration control is becoming more important in high-technology fields such as semiconductor manufacturing, and influence of microvibration on precision machines is increasing. However, microvibration sensitivities of these machines cannot be measured using conventional vibration testing devices. In this study, using an active 6DOF microvibration control system with piezoelectric actuators, feasibility of a microvibration simulator is discussed. A control method is proposed based on the model matching method, which achieves almost the desired frequency characteristics using only absolute acceleration. Experimental studies are conducted with satisfactory results in isolation performance against micro-ground motion, and servo performance for various reference inputs.

Key Words: Microvibration Testing Device, Vibration Control, Active Control, Microvibration Control, MIMO System, 6DOF System, Model Matching

1. 結 論

超 LSI やマイクロマシンなどの超微細加工, STM などを用いた超精密計測など, さまざまな先端技術分野において微振動制御技術の重要性はますます高くなっている。これまでのアクティブ微振動制御技術は, 除振性能の向上と制振性能の両立といった“振動の少ない環境の実現”がおもな目的であった。しかし実際に除振装置に搭載される機器が複雑化, 精密化してくると, 機器の微振動感度や機器自体が微振動から受ける影響などが問題点として無視できなくなり, そのため機器の微振動特性などを事前に把握する必要性が生じてきている。それには問題になると予想される微振動波形を用い, 実際に加振試験を行うことが有効な手段であると考えられるが, 通常の加振機ではこのような微振動は生成できず, 機器の特性試験は実際にその設置場所, 設置環境で行わなければならない。このた

め精密機器の加振試験機として, 常に存在する微振動外乱を除去しながら, これと同レベルの任意の微振動を生成する装置である“微振動シミュレータ(微振動加振機)”の開発が求められている⁽¹⁾。そこで本研究では, アクチュエータ部分に圧電素子を用い, 任意の微振動波形を再現することができる 6 自由度微振動シミュレータを開発することを目的とし, その実現可能性を実験によって検討する。制御手法としては, 著者らが提案した「外乱および目標値からの伝達特性を考慮したモデルマッチング法」を用いる⁽²⁾。

本論文では, 実験装置の構造, 制御系設計手法について述べた後, 実験によって得られた除振性能, 目標値追従性能, および制御系のロバスト性について述べる。

2. 6 自由度微振動シミュレータ実験装置

2.1 実験装置の構造 ピエゾアクチュエータを用いた 6 自由度微振動シミュレータ実験装置を図 1 に示す⁽³⁾。本装置は, 質量 80 kg, 700×700 mm のアルミニウム製の定盤を制御対象としており, 定盤周辺には, ピエゾアクチュエータが 8 箇所(鉛直 4 箇所, 水平 4 箇所), サーボ形加速度センサが 6 箇所(鉛直 3 箇所, 水平 3 箇所)設置されている。定盤とアクチュエータの

* 原稿受付 1995 年 6 月 15 日。

^{*1} 正員, 東京農工大学工学部 (☎ 184 小金井市中町 2-24 16)。

^{*2} 正員, 大日本印刷(株) (☎ 350 13 狭山市上広瀬東久保 591-2)。

^{*3} (株)ケンウッド (☎ 150 東京都渋谷区道玄坂 1-14 6)。

^{*4} 正員, 東京大学生産技術研究所 (☎ 106 東京都港区六本木 7-22 1)。

^{*5} 正員, 特許機器(株) (☎ 660 尼崎市初島町 10-133)。

間にはゴムヘッドが介在されており、制御はアクチュエータの圧電変位によるゴムヘッドの伸縮力によって行う。駆動アンプユニットは、ピエゾドライバとインタフェースユニットからなる。コントローラ部はDSPを用いたデジタルコントローラと上位CPUとしてのパーソナルコンピュータで構成されている。

2.2 モデリング 微振動シミュレータの制御系設計、および数値シミュレーションを行うにあたり装置の解析モデルが必要となる。実験装置は、定盤と支持台の間にピエゾアクチュエータとゴムヘッドを直列

Fig. 1 6-DOF micro vibration testing device

Fig. 2 3-dimensional analytical model

に連結した8つの支持体を配置することにより構成されている。図2に実験装置の3次元解析モデルを示す。定盤は剛体とみなし、その運動の自由度を6として、定盤重心の x 方向の変位 (x_c), y 方向の変位 (y_c), z 方向の変位 (z_c), x 軸まわりの回転 (θ_x), y 軸まわりの回転 (θ_y), z 軸まわりの回転 (θ_z) を考える。ここで並進変位および回転角は各方向の床に対する相対量を採用する。また、定盤と支持台間には水平と鉛直方向に剛性 ($k_{xi}, k_{yi}, k_{zi}, i=1\sim 8$) と減衰 ($c_{xi}, c_{yi}, c_{zi}, i=1\sim 8$) をもち合せたばねを考える。定盤に加わる力は支持台からの常時微動外力と、ピエゾの圧電変位によるゴムヘッドの伸縮により生ずる制御力である。また、ピエゾアクチュエータには動特性はないものとする。図2から、相対座標系における本制御対象の運動方程式は、

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = [H]\{f\} - [M]\{d\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。ただし、

$\{x\}$: 重心相対変位, 角変位ベクトル (6×1)

$\{d\}$: 外乱加速度, 角加速度ベクトル (6×1)

$\{f\}$: 操作変位ベクトル (8×1)

$[M]$: 質量マトリックス (6×6)

$[C]$: 減衰マトリックス (6×6)

$[K]$: 剛性マトリックス (6×6)

$[H]$: アクチュエータ配置マトリックス (6×8)

である。

3. 制 御 系

3.1 制御手法 本研究では、制御則に「外乱および目標値からの伝達特性を考慮したモデルマッチング法」を採用する。モデルマッチング法とは制御系設計時に「望みの閉ループ伝達関数」を設定し、設定どおり、またはこれに非常に近い伝達特性を実現する制御器を設計する方法のことをいう。微振動シミュレータについて考えた場合、床からの振動絶縁のための外乱抑制特性と任意の微振動波形を実現するための目標値追従特性が重要である。したがって、外乱～制御量間、および目標値～制御量間の伝達特性が制御性能を決定す

Fig. 3 Block diagram of control system

3・2 多入力多出力系への拡張 微振動シミュレ

3・3 制御器の設計 各振動モード制御系において W_{vv} を,

Fig. 5 Signal flow of the control system

$$W_{vy} = \frac{s^2(\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0)}{(s-p_1)(s-p_2)(s-p_3)(s-p_4)(s-p_5)(s-p_6)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

とする。ここで、

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= \gamma_0 + 2\zeta_i \omega_i \gamma_1 + \omega_i^2 \gamma_2 - \alpha_2 \\ \beta_1 &= \gamma_1 + 2\zeta_i \omega_i \gamma_2 + \omega_i^2 \gamma_3 - \alpha_3 \\ \beta_2 &= \gamma_2 + 2\zeta_i \omega_i \gamma_3 + \omega_i^2 \gamma_4 - \alpha_4 \\ \gamma_0 &= \alpha_0 / \omega_i^2, \quad \gamma_1 = (\alpha_1 - 2\zeta_i \omega_i \gamma_0) / \omega_i^2 \\ r_3 &= \alpha_5 - 2\zeta_i \omega_i \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

であり、 γ_2 はフリーパラメータである。式中、 α_i は分母の特性式を展開したときの i 次の係数を、 p_i は全系の極を表す。 W_{vy} の相対次数を大きくとることにより制御器の高周波除去性能が増し、ノイズやモデル化されていない高次モードに対してロバスト安定となる。式(2)より W_{dy} は、

$$W_{dy} = \frac{(2\zeta_i \omega_i + \omega_i^2)(s^4 + \gamma_3 s^3 + \gamma_2 s^2 + \gamma_1 s + \gamma_0)}{(s-p_1)(s-p_2)(s-p_3)(s-p_4)(s-p_5)(s-p_6)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。ここで p_1 から p_6 までの極を設定し、フリーパラメータ γ_2 を与えることで望ましい伝達関数 W_{dy} を決定する。一方、 W_{rv} はプロパ性の条件(1)、(2)をふまえて、

$$\begin{aligned} W_{rv} &= \frac{s^2(s-b_{r1})(s-b_{r2})(s-b_{r3})(s-b_{r4})}{(s-p_1)(s-p_2)(s-p_3)(s-p_4)(s-p_5)(s-p_6)} \\ &= \frac{s^2(s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0)}{(s-p_1)(s-p_2)(s-p_3)(s-p_4)(s-p_5)(s-p_6)} \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

のように設定する。ここで $p_1 < p_2 < \dots < p_6$ とすると $b_{r1} \sim b_{r4}$ を $b_{r1} = p_3$, $b_{r2} = p_4$, $b_{r3} = p_5$, $b_{r4} = p_6$ と設定することにより広い周波数帯域において目標値と制御量とが一致する伝達関数 W_{rv} を設計することができる。式(14)、(17)を式(3)、(4)に代入することにより、制御器 C_{yu} , C_{ru} は、

Table 1 Natural frequency and damping coefficient of the device

$f(\text{Hz})$	8.93	22.12	8.93	22.12	14.23	13.75
ζ	0.052	0.062	0.052	0.062	0.057	0.067

f : eigen frequency ζ : modal damping ratio

Fig. 6 Experimental result of identification

$$C_{yu} = \frac{\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0}{s^4 + \gamma_3 s^3 + \gamma_2 s^2 + \gamma_1 s + \gamma_0} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$C_{ru} = \frac{s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^4 + \gamma_3 s^3 + \gamma_2 s^2 + \gamma_1 s + \gamma_0} \quad \dots\dots\dots (19)$$

のように計算される。

3.4 制御系の構成 制御系の信号の流れを図5に示す。定盤周辺に取付けられた6個のサーボ形加速度センサから得られた信号はアナログローパスフィルタ、ハイパスフィルタによって信号処理された後、A/D変換器によりデジタル量に変換され、DSPに送られる。DSPには、あらかじめホストコンピュータからプログラムが転送されており、6チャンネルの入力加速度に対して適切な8チャンネルの操作量を計算する。計算された操作量はD/A変換器によって再びアナログ量に変換され、PZTドライバにより増幅された信号はそれぞれアクチュエータに印加される。本実験では、加速度の入力からピエゾへの電圧印加までの操作量の計算を0.2 ms(5 000 Hz)で行っている。

4. 制御対象のパラメータ同定

同定実験は、おのおののピエゾアクチュエータに加振信号を入力し、このときの各チャンネルの加速度センサの出力から周波数応答関数を求める。加振信号には高速掃引正弦波(振幅2 V, 周波数帯域2~50 Hz)を入力した。図6は一例として、1chの鉛直方向ピエゾアクチュエータを加振したときの鉛直方向加速度センサ1chの周波数応答特性を、実験結果を点で、設計パラメータ値によるシミュレーション結果を実線で示し

たものである。また、同定実験より求めた装置の固有振動数とモード減衰比を表1に示す。

5. 除振実験

微振動シミュレータは外乱を抑えた上で目標微振動

Fig. 7 Acceleration transmissibility between d and y

を生成することを目的としているため、はじめに除振実験を行い、振動絶縁性能を確認する。制御方針は、すべての振動モードに対してスカイフック・スプリング特性と同等な性能を示すようにし、特に z 方向に対しては床の卓越振動数である $3\sim 4$ Hz近傍を抑えるようにした。図7に、 x, y, z 方向それぞれの床外乱加速度から定盤加速度までの加速度伝達率(破線: 非制御時, 実線: 制御時)を示す。これより、制御時における加速度伝達率は、水平(x, y)方向の $0.2\sim 20$ Hz近傍において -10 dB以下、鉛直(z)方向の $3\sim 7$ Hz近傍において -20 dB以下に抑えられていることがわかる。

6. シミュレータ実験

シミュレータ実験では $r\sim y$ 間の周波数特性が広い周波数帯域において 0 dBになるように制御器を設計し、実験を行った。

6.1 正弦波加振実験 はじめに、6自由度微振動シミュレータによる正弦波振動生成試験を行った。実験は、目標加速度振幅を外乱振動と同レベルの 0.1 Galの正弦波として行い、正弦波の周波数を $2\sim 30$ Hzに変化させて加振試験を行った。図8, 9に代表的な波形例として、 z 方向のみに 10 Hzの目標正弦波、

Fig. 8 Reference input tracking performance (one direction)

Fig. 9 Reference input tracking performance (three directions)

Fig. 10 Frequency response from r to y

Fig. 11 Cross talk characteristics

Fig. 12 Reference input tracking performance (random input)

Fig. 15 Reference input tracking performance (with loading)

Fig. 13 Frequency characteristics between r and y Fig. 16 Frequency characteristics between r and y (with loading)

Fig. 14 Reference input tracking performance (RMS)

Fig. 17 Reference input tracking performance (RMS)

および x, y 方向に 10 Hz, z 方向に 20 Hz の目標正弦波を同時に入力した場合の結果を示す。図 8 から, x, y 方向の床外乱加速度を $10^{-5} \text{ m/s}^2 (\mu\text{G})$ 以下に抑えながら, z 方向において床外乱加速度と同レベルの振幅 10^{-3} m/s^2 の正弦波が精度よく再現されており, 目標加振振幅に対してノイズの振幅レベルが -40 dB 以下に抑えられていることがわかる。

6・2 目標値追従性能評価 目標値追従性能の評価実験として, 入力波に高速掃引正弦波(加速度振幅 0.1 Gal , 周波数帯域 $5 \sim 50 \text{ Hz}$)を用いて加振試験を行った。図 10 にこれより求めた $r \sim y$ 間の周波数特性を示す。これより, ゲインは試験周波数帯域において 0 dB を保っており, 位相もほぼ 0° を示していることが確認でき, 制御系はすべての方向に対して約 50 Hz 付近まで良好な目標値追従特性を示していることがわかる。また, 図 11 にクロストーク特性を示す。低周波側では除振性能が低下しているためクロストーク特性のゲインは高いが, その他の周波数領域では約 -40 dB とゲインは低下しており加振信号の目標軸以外への干渉の度合は少なく, 良好な制御系が構成されていることが確認できる。

6・3 ランダム波加振実験 微振動シミュレータとして実用的な可能性を確認するため, 目標値としてランダム波形を入力し, 加振試験を行った。入力波形はホワイトノイズに通過帯域が $10 \sim 30 \text{ Hz}$ のバンドパスフィルタを通過させたものを用いた。図 12 に目標値と z 方向加振時の時刻歴波形を示す。また, このときの目標値-制御量間の周波数特性を図 13 に示す。また, 図 14 には目標値と制御時における定盤加速度の rms 値を示す。これより目標値をランダム波とした場合でもゲインは広い周波数帯域で 0 dB を保ち, 位相もよく目標値に追従していることがわかる。

6・4 制御系ロバスト性評価 制御系のロバスト性を評価するため慣性負荷試験として定盤のコーナ部分に質量 54 kg (質量変化率 68% , 慣性モーメント変化率 63%) の負荷を積載してランダム波加振実験を行った。図 15 にこのときの時刻歴波形を, 図 16 に $r \sim y$ 間周波数特性を示す。また, 目標値と制御時における定盤加速度の rms 値を図 17 に示す。これより, 非積載時とほぼ同等の目標値追従特性が得られ, 制御系は質量変化に対してロバストであることが確認できた。

7. 結 論

本研究では, ピエゾアクチュエータを用いた 3 次元 6 自由度微振動シミュレータについて, モデルマッチング法に基づくアクティブ制御によって実験的研究を行い, その実現可能性について検討した。本研究で得られた主要な結果の要約を以下に示す。

(1) 本研究で採用した制御系設計手法により, 「微振動外乱を抑えながら, これと同レベルの目標微振動」を生成することができ, 3 次元 6 自由度微振動シミュレータが実現可能であることを示した。

(2) すべての方向に対して広い周波数帯域において微振動外乱を $10^{-5} \text{ m/s}^2 (\mu\text{G})$ のオーダーまで絶対加速度を低減させることができ, さらに 10^{-3} m/s^2 オーダーの任意の微振動波形($2 \sim 50 \text{ Hz}$)を生成できることが明らかになった。

(3) 採用した制御系がパラメータ変動に対して非常にロバストであることを確認した。

文 献

- (1) 安田正史・ほか2名, D & D'94講演論文集, (1994), 552-555.
- (2) 田川泰敬・藤田隆史, 機論, 58-550, C(1992), 1819-1826.
- (3) 藤田隆史・ほか5名, 機論, 59-559, C(1993), 733-739.