

圧電素子型 XY ステージにおけるダンパの影響解析

Influence Analysis of Damper in Piezoelectric Element-type XY stage

大坂達也*, 大川元寿*, 櫻田陽**, 長縄明大*, 渋谷嗣*, 森英季**

Tatsuya Osaka*, Motoharu Okawa*, Akira Sakurada**, Akihiro Naganawa*,
Yotsugi Sibuya* and Shigeki Mori**

* 秋田大学, ** 秋田県産業技術センター

* Akita University, ** Akita Industrial Technology Center

キーワード： 圧電素子 (Piezoelectric element), XY ステージ (XY stage), 位置決め (Positioning),
ダンパ (Damper), 高次モデル (High order model)

連絡先： 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1, 秋田大学院工学資源学機械工学研究科専攻
長縄明大, Tel.: (018)889-2726, Fax.: (018)889-2726, E-mail: naganawa@ipc.akita-u.ac.jp

1. 緒言

近年, エレクトロニクス分野の急速な進歩発展の背景には, 半導体集積回路などの高密度化があり, ナノメートルの精度による評価装置が要求されている. 一方, サブ・ナノメートルの空間分解能を有する表面観察装置として開発された走査プローブ型顕微鏡は, 適用範囲が広がり, ナノテクノロジーの分野において重要性が一層高まっている. このような装置では, 走査領域の拡大と高速な走査および位置決め精度の向上が要求されている. しかし, 実用化されている一般的な XY 平面の位置決め機構は, 2 つの 1 軸動作のステージを直交に重ねるか, コラム側とベッド側に各軸を直交に配置し, 上下に対向させる形体が主なものとなっている. したがって, 同一平面内の移動ではないことから, 高精度な位置決めには不可欠なアップの原理に従うことが構造的に難しい. さらに, 2 つの軸を重ね

た場合は, 一方の軸が, もう一方の軸の全重量を支えながら移動するため, 高速化が困難であり, 必然的にステージの重心が各軸の位置で常に変化するため, 制御性が良いとはいえない.

そこで著者らは, 積層型圧電素子と変位拡大機構を組み合わせた 1 軸の精密位置決め機構を応用し¹⁾, 同一平面内を走査することができる圧電素子型 XY ステージを開発した²⁾. 本機構は, 1 軸の位置決め機構を 2 個用いてそれらを直行配置し, 平行バネと四角形型バネにより支持されたステージ部を, X 軸方向および Y 軸方向へ移動することができる. しかし, その周波数応答を測定したところ, 共振ピーク値が非常に高く, 制御性能に影響を与えることが懸念されるため, 変位拡大機構にダンパを貼りつけた³⁾. 本研究では, ダンパを貼りつけた際に生じる特性変化をモデル化し, ダンパが位置決めに与える影響の解析を行った.

2. 圧電素子型 XY ステージ

Fig. 1 に著者らが研究開発した圧電素子型 XY ステージの写真を, Fig. 2 にその概要を示す. XY ステージは, X 軸方向および Y 軸方向に位置決めを行う機構 (圧電素子と変位拡大機構を組み合わせたもの) がそれぞれ配置されており, 位置決めを行う機構中央部のステージは, 平行バネと四角形型バネにより支持されている. XY ステージの大きさは縦および横が 57.5 mm であり, 四角型バネの大きさは縦および横ともに 15.25 mm である. 圧電素子は, 各軸ともに $5 \times 5 \times 20$ mm ($17.4 \mu\text{m}/150\text{V}$) と $5 \times 5 \times 10$ mm ($9.1 \mu\text{m}/150\text{V}$) を直列に並べて使用し, この最大変位量は $26.5 \mu\text{m}/150\text{V}$ である. 一方, 変位拡大機構は Fig. 2 中の $ab:ac = 4:23$ の比率で圧電素子の変位を拡大する. 実際に最大変位

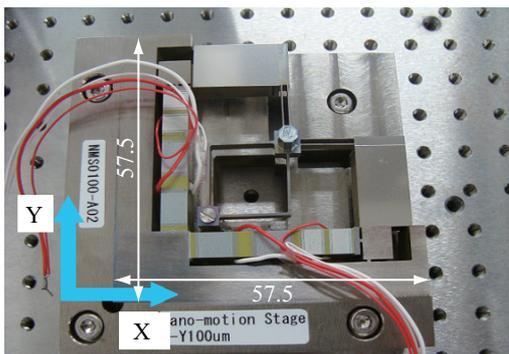


Fig. 1 圧電素子型 XY ステージの写真

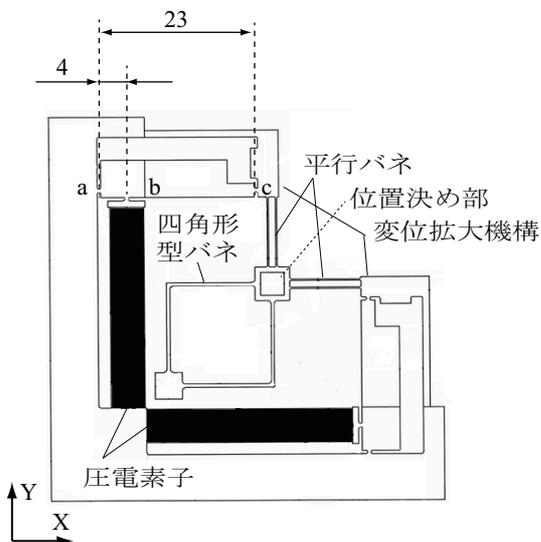


Fig. 2 圧電素子型 XY ステージの概要

量を測定した結果, X 軸方向に $112.4 \mu\text{m}$, Y 軸方向に $117.9 \mu\text{m}$ であった. 変位拡大率から求めた最大変位量は $152.4 \mu\text{m}$ となるが, この値に対して X 軸方向で 74%, Y 軸方向で 77% の変位量となった. この差が生じた原因として, 変位拡大機構の歪みなどの影響が考えられる.

つぎに, XY ステージの各軸において, 周波数特性をダイナミックシグナルアナライザ (HP, 35670A) を用いて測定したところ, 典型的な 2 次遅れ要素の特性を示していたが, 低域に比べて共振ピーク値が約 30 dB と非常に高かった. そこで, 変位拡大機構の上下面に粘弾性材 (IVY810 改 27, 大協技研工業製) と拘束板 (SUS304) からなるダンパを貼り付けた.

この場合の周波数特性を Fig. 3 に X 軸方向の結果を, Fig. 4 に Y 軸方向の結果を示す. 図より, X 軸方向の共振周波数は 5.6 kHz, Y 軸方向の共振周波数は 5.3 kHz であった. また, 各

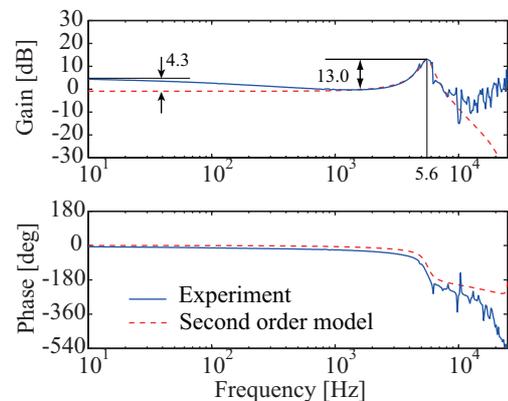


Fig. 3 位置決め機構のボード線図 (X 軸)

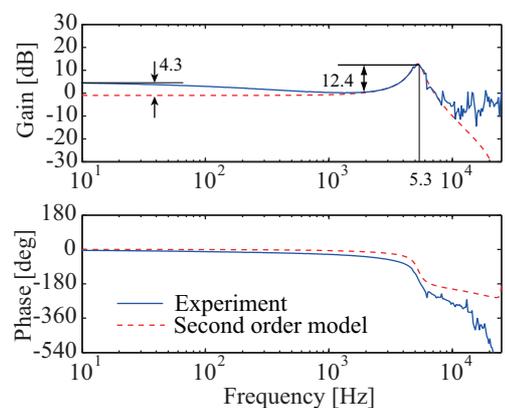


Fig. 4 位置決め機構のボード線図 (Y 軸)

軸とも共振周波数よりも低域側において、周波数が高くなるとゲインが低減する現象がみられ、その低減量は各軸とも約 4.3 dB であった。一方、共振ピーク値は、約 1 kHz のゲインに比べて、X 軸では 13.0 dB、Y 軸では 12.4 dB までピーク値が抑えられていた。

3. XY ステージの位置決め制御

Fig. 1 に示す圧電素子型 XY ステージの位置決め制御を行うため、Fig. 3, 4 に示す位置決め機構の周波数応答を用いてモデル化を行った。ここでは、各軸ともに共振ピークを有していたため、次式に示す 2 次遅れ要素とした。

$$P(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

ここで、 K はゲイン、 ω_n は固有角周波数、 ζ は減衰係数を表し、各係数は Table 1 の値とした。つぎに、位置決めを行うためのコントローラは、次式で与えられる不完全微分型 PID コントローラとした。

$$C(s) = L_1 \left(K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{s + \alpha} \right) \quad (2)$$

ここで、 K_P は比例ゲイン、 K_I は積分ゲイン、 K_D は微分ゲイン、 α は微分器のカットオフ周波数であり、 L_1 はゲイン交差周波数を任意の周波

Table 1 2 次遅れ系のモデルの係数

	K	ω_n [rad/s]	ζ
X	0.900	$5600 \times 2\pi$	0.10
Y	0.890	$5300 \times 2\pi$	0.10

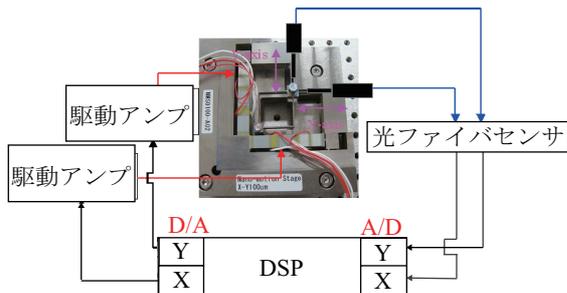


Fig. 5 精密位置決めのための実験装置の構成

数に調整するためのゲインである。本研究では、Fig. 3, 4 に見られる約 10 kHz 以上の高次共振の影響を抑制するため、 $\alpha = 10,000 \times 2\pi$ とし、開ループ伝達関数におけるゲイン交差周波数が 1 kHz となるように各ゲインを求めた⁴⁾。

Fig. 5 に実験装置の構成を示す。精密位置決めのためのセンサには、光ファイバ式変位計 (MTI-2000, プローブ: MTI2032RX) を用いた。このセンサ信号は、AD 変換器 (Analog Devices 社製 AD7874BR, 最大変換周波数: 25 kHz, 分解能: 12bit) を介して DSP (Digital Signal Processor, MTT 製, TI: DSP6067) に取り込まれ、制御演算が行われる。アクチュエータへの指令は、DA 変換器 (Analog Devices 社製 DAC8412FPC, 最大変換周波数: 120 kHz, 分解能: 12bit) を介して、駆動アンプ (MED 製: PZT-01N) で 15 倍に電圧増幅される。目標値応答におけるステップ信号は、ファンクションジェネレータ (NF 回路設計ブロック製: WF1974) により生成し、AD 変換器で離散化して DSP に取り込んだ。なお、目標値応答特性はオシロスコープで記録し、サンプリング周波数は 50 kHz とした。

Fig. 6, 7 に実装したコントローラを用いて行った X 軸と Y 軸のステップ応答実験の結果を示す。図より、立ち上がり時間 (応答が定常値の 10% から 90% になるまでに要する時間) は、X 軸が 0.13 ms、Y 軸が 0.11 ms であった。図中に示すシミュレーションの結果では、オーバーシュートすることなく目標値に一致しているが、実験では X 軸で約 26.6%、Y 軸で 27.4% のオーバーシュートが見られた。

一方、Fig. 8 に平面位置決め性能を評価するため、リサージュ円を描かせる実験を行った結果を示す。本研究では円の大きさは直径 $5 \mu\text{m}$ とし、各軸への入力信号は目標値換算した電圧振幅の sin 波を X 軸に、cos 波を Y 軸に入力し、その周波数は 10 Hz とした。図より、円の形が真円とはならず多少ゆがんでいることがわかる

が、これはステップ応答でも見られたオーバーシュートによるものと考えられる。

上記のように位置決め実験においてオーバーシュートが見られる要因として、ダンパを貼り付けたことによる生じる約 4.3 dB (Fig. 3, 4)

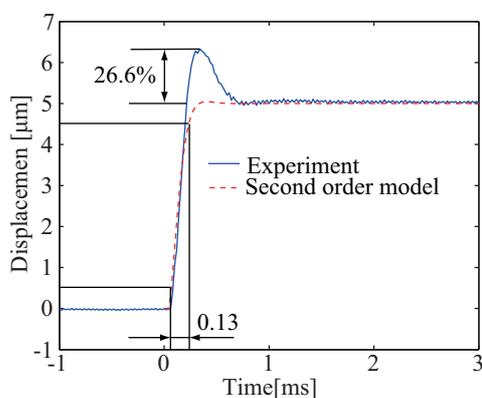


Fig. 6 位置決め応答 (X 軸)

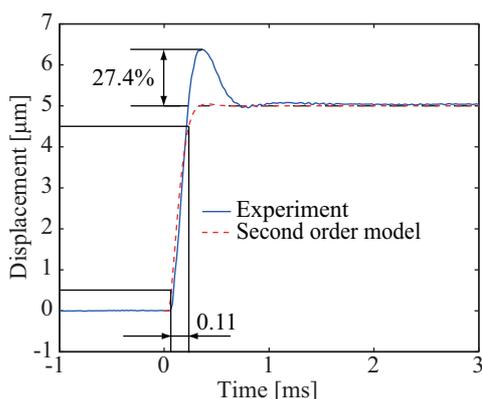


Fig. 7 位置決め応答 (Y 軸)

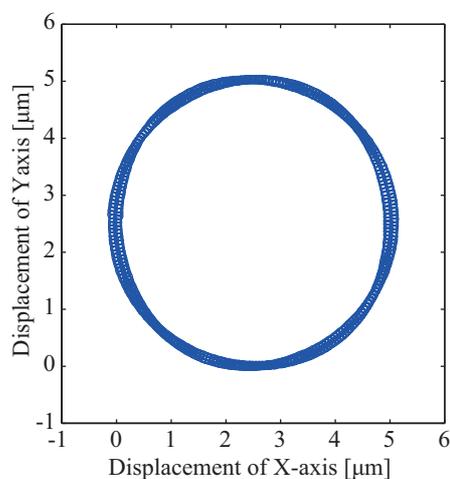


Fig. 8 平面位置決め性能

のゲインの低減を考慮したかどうかであると考え、2次遅れ要素より次数の高いモデルを同定して解析することとした。

4. 高次モデルの同定

本研究では、つぎの状態方程式表現のモデルを同定することができる部分空間同定法を用いて、高次モデルの同定を行った⁵⁾。

$$x[k+1] = Ax[k] + Bu[k] \quad (3)$$

$$y[k] = Cx[k] \quad (4)$$

同定信号は、 ± 0.1 V の M 系列信号とし、DSP から発生させて圧電素子に印加した。このとき、得られたセンサ信号は、M 系列信号とともにオシロスコープにより記録した。

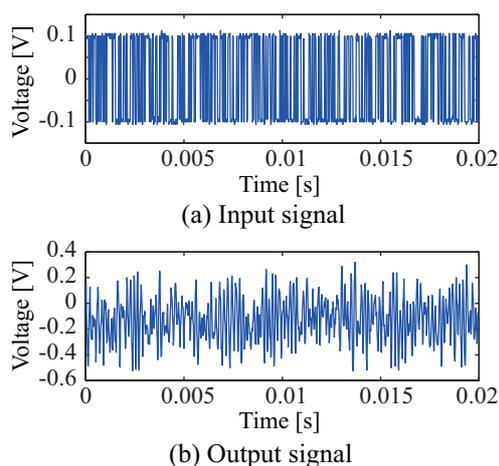


Fig. 9 同定に用いた入出力信号 (X 軸)

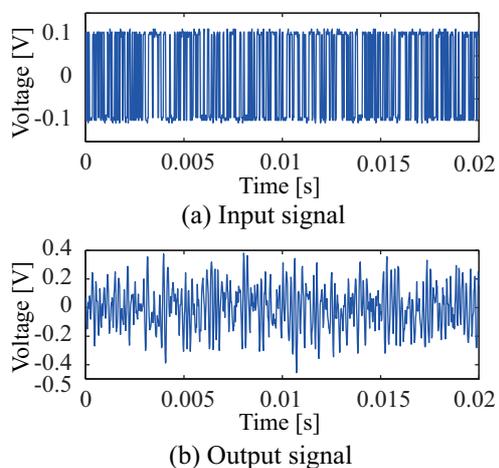


Fig. 10 同定に用いた入出力信号 (Y 軸)

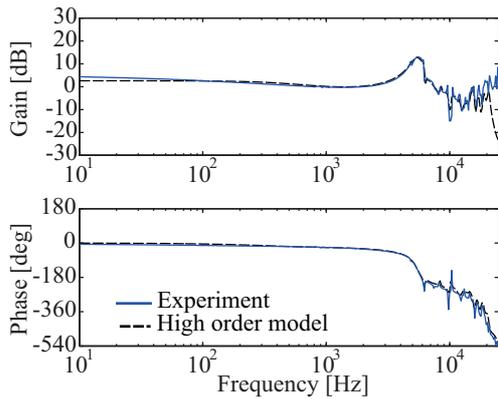


Fig. 11 高次モデルの同定結果 (X 軸)

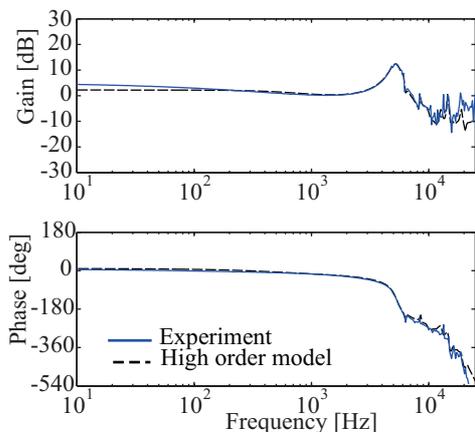


Fig. 12 高次モデルの同定結果 (Y 軸)

Fig. 9, 10 に同定に用いた入出力信号を示し、各図の上図が入力信号 (M 系列信号)、下図が出力信号 (センサ信号) である。これらの信号を MATLAB の System Identification Toolbox を用いて計算することにより、状態方程式の同定を行った。なお、Fig. 1 に示す XY ステージでは、他軸干渉の影響があると考えられるため、本研究では X 軸と Y 軸を同時に同定した。

Fig. 11, 12 は、部分空間同定法で求めた高次モデルの結果を示し、Fig. 11 が X 軸方向の結果を、Fig. 12 が Y 軸方向の結果である。図より、高次モデルの結果は、実験結果に良く一致しているといえ、また Fig. 3, 4 に示す 2 次遅れ要素では表現することができなかったゲイン低減部も同定できているといえる。なお、高次モデルの次数は、MATLAB の計算において試行錯誤することにより 30 次とした。

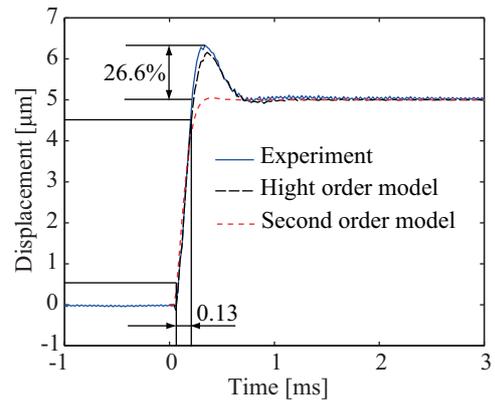


Fig. 13 位置決め応答 (高次モデル, X 軸)

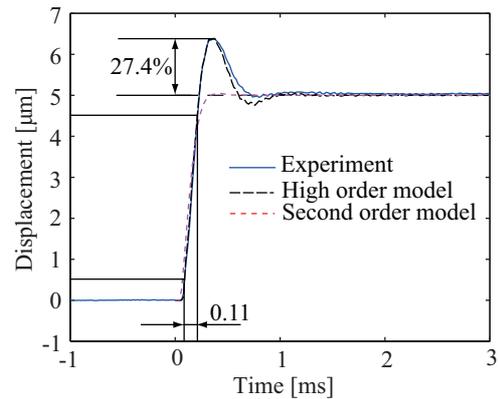


Fig. 14 位置決め応答 (高次モデル, Y 軸)

つぎに、同定した高次モデルを用いて、位置決め制御に関するシミュレーションを行った。Fig. 13, 14 に結果を示す。3 章でも述べたように、両軸とも 2 次遅れ系のモデルでは、実験で生じるオーバーシュートを再現することができなかった。しかし、図に示すように、高次モデルを用いたシミュレーション結果は、実験結果と良く一致しており、オーバーシュート量もそれぞれ X 軸ではシミュレーションが 23.2%であったのに対して実験では 26.6%、Y 軸ではシミュレーションが 27.2%であったのに対して実験では 27.4%と比較的良く一致した。

5. ダンパの影響解析

前章で述べたように、部分空間法を用いた高次モデルでは、XY ステージの周波数応答および位置決め応答が良く一致していた。そこで本章では、ダンパを貼り付けたことにより生じた

ゲイン低減部が、どのようにモデル化されたのかの解析を行う。

Fig. 15, 16 に高次モデルの極 (×印) とゼロ点 (○印) の配置を示し, Fig. 15 が X 軸方向の結果, Fig. 16 が Y 軸方向の結果である。なお, 同定結果は安定なシステムであったので, 離散時間系の安定領域内 (単位円内) の極とゼロ点のみを示しており, 不安定ゼロ点は省略した。本研究では, 高次モデルの次数を 30 としたため, 多くの極とゼロ点を有していることがわかる。しかし, Fig. 3, 4 より, ダンパを貼り付けたことによるゲインの低減は, 共振周波数

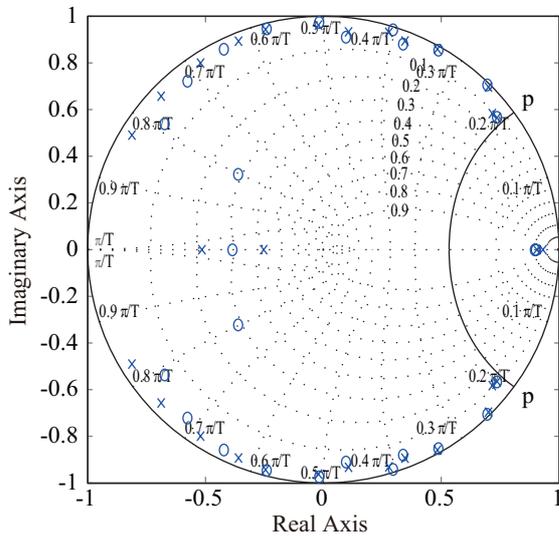


Fig. 15 高次モデルの極-ゼロ点配置 (X 軸)

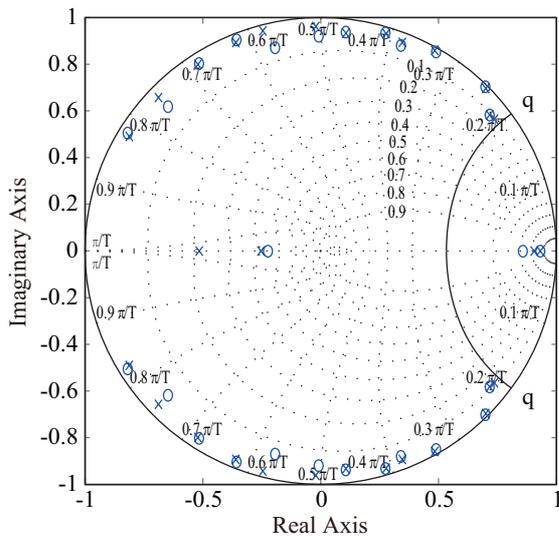


Fig. 16 高次モデルの極-ゼロ点配置 (Y 軸)

(X 軸が 5.6 kHz, Y 軸が 5.3 kHz) より低域であったため, ダンパの影響解析は 5kHz より低い周波数の極とゼロ点についてのみ行うものとする。このため, Fig. 15 において p-p の曲線, Fig. 16 において q-q の曲線が描いてあるが, それぞれが 5 kHz に対応する曲線である。この曲線 (5kHz) より低い周波数の極とゼロ点は, X 軸および Y 軸ともに 2 個ずつ配置されており, いずれも実数極, 実数ゼロ点であった。このことから, 高次モデルの次数は 30 であったが, 共振周波数より低域には, 1 次遅れ要素, 1 次進み要素が各 2 個ずつ使われており, 共振周波数に 2 次遅れ要素, 残りは全て高域の特性や干渉項を表現するために使われていることがわかる。

一方, 高次モデルにおけるゲイン低減部の表現を明らかにするため, 式 (3), (4) で表される状態方程式表現を, 次のような伝達関数表現に変換した。

$$P_h(z) = C(zI - A)^{-1}B = \frac{n(z)}{1} \cdot \frac{1}{d(z)} \quad (5)$$

ここで, $n(z), d(z)$ は, それぞれ伝達関数 $P_h(z)$ の分子多項式, 分母多項式であり, $n(z)/1, 1/d(z)$ を分子伝達関数, 分母伝達関数と呼ぶことにする。

Fig. 17, 18 に分子伝達関数と分母伝達関数のゲイン線図を示し, Fig. 17 が X 軸の結果, Fig. 18 が Y 軸の結果である。なお, これらのゲイン特性を足し合わせるにより, 同図中の同定結果に一致する。図より, ゲイン低減部は, 共振周波数より低域に配置された 2 個ずつの極およびゼロ点の内の一つに対応する周波数において, 折れ線近似的に表現されているといえ, X 軸方向には 561 Hz の極と 827 Hz のゼロ点に対応する周波数, Y 軸方向には 558 Hz のゼロ点と 561 Hz の極に対応する周波数で特性が変化していることがわかる。

以上のことから, 高次モデルにおいては, ダンパを導入することにより生じた周波数応答のゲイン低減部を, 1 次遅れ要素と 1 次進み要素

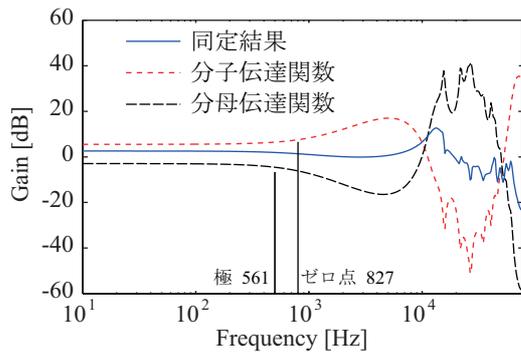


Fig. 17 分子伝達関数と分母伝達関数のゲイン線図 (X 軸)

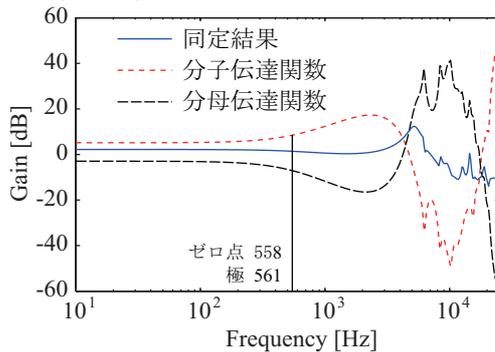


Fig. 18 分子伝達関数と分母伝達関数のゲイン線図 (Y 軸)

により表現されているといえる。

6. 結言

本研究では，圧電素子型 XY ステージの共振ピーク値を抑えるために導入したダンパの影響について解析した．得られた結果をまとめると，以下の通りとなる．

- (1) XY ステージの周波数応答を測定した結果，高い共振ピークを有していたので，これを低減するためのダンパを導入した．その結果，共振ピーク値は抑えられたが，共振周波数より低域側に，周波数に依存してゲインが低減する特性が見られた．
- (2) (1) の結果に対して，2 次遅れ要素でモデル化し，位置決め応答の検証をした結果，シミュレーションではオーバーシュートが生じ

なかったが，実際の実験ではオーバーシュートが生じていた．

- (3) 周波数応答におけるゲインの低減部を高次モデルにより表現するため，状態方程式を同定する部分空間法によりモデルを導出した．その結果，周波数応答は測定結果と良く一致しており，また位置決め応答も実験結果と良く一致していた．
- (4) (3) で同定した高次モデルにおいて，ゲインの低減部の表現を明らかにするため，極およびゼロ点と，それぞれに対応する周波数を求めた．その結果，ゲインの低減部は 1 次遅れ要素と 1 次進み要素により表現されていた．

今後の課題は，ダンパを導入した際に生じるオーバーシュートを改善する制御系設計法について検討することである．

参考文献

- 1) S. Mori, M. Furuya, A. Naganawa, Y. Shibuya, G. Obinata and K. Ouchi : Nano-motion Actuator with Large Working Distance for Precise Track Following, *Microsystem Technologies* Vol. 13, pp.873–881, 2007.
- 2) 櫻田陽, 森英季, 長縄明大, 渋谷嗣, 大日方五郎: 同一平面内を高速位置決めする Nano-Motion Stage, 第 22 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, pp.36–39, 2010.
- 3) S. Mori, H. Tada, A. Naganawa, G. Obinata and K. Ouchi : Damping Effect on Precise Track Following for Nano-motion Actuator, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 41, No. 2, pp.842–848, 2005.
- 4) 長縄明大, 平元和彦, 古谷将人, 渋谷嗣, 森英季: ナノモーション・アクチュエータに対する PID 制御器の設計, *日本機械学会論文集 C 編*, 75 巻 754 号, pp.1770–1776, 2009.
- 5) 足立修一: MATLAB による制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局, 1996.