計測自動制御学会東北支部 第 283 回研究集会 (2013.10.25) 資料番号 283-8

ダンパを有する圧電素子型XY ステージの制御系設計

Control System Design for Piezoelectric Element-type XY stage with Damper

大澤 諒*,長縄明大*,櫻田陽**,渋谷嗣*,森英季**

Ryo Ohsawa^{*},Akihiro Naganawa^{*},Akira Sakurada^{**}, 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), 位相進み補償 (phase-lead compensation)

連絡先: 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1,秋田大学大学院工学資源学研究科機械工学専攻 大澤 諒, Tel.: (018)889-2971, Fax.: (018)889-2971, E-mail: ohsawa@control.mech.akita-u.ac.jp

1. 緒言

2000年に米国で発表されたナノテクノロジー 戦略構想により世界に広がったナノテクノロジー の研究開発の潮流は,年々種々の関連分野におい て,その幅と深みを増し拡大の一途を辿ってい る.それによりナノオーダーでの観察や測定が 可能であり,ナノサイズレベルで材料をコント ロールしたり,微細加工を行うために不可欠で ある評価装置(走査型プローブ顕微鏡:Scanning probe microscopy)は非常に重要である.

このような装置では,走査領域の拡大・高速 な走査・位置決め精度の向上が要求されている ¹⁾.一般的な走査型プローブ顕微鏡の平面位置 決め機構は,円筒型をしており(以下チューブス キャナ)スキャナ自身が緩やかな円弧運動をする ことで,探針または試料が移動する²⁾.チュー ブスキャナは,円筒を覆うように圧電素子が配 置されており,それに電圧を加えることで伸長・ 収縮させ,チューブを稼働させる.筒先端での 変位量(走査幅)は筒の長さと印加電圧によって 決定される.しかし,この方法では走査領域を 拡大するためには円筒を長くし,変位量大きく する必要がある.一方で,走査速度を高速化す るためには移動距離を短くする必要があるため, 円筒は長くすることができない.従って,従来 の方法では走査領域と走査速度は反比例する結 果となる.更に,走査する場合は円筒を歪曲さ せて移動させるため,変位センサと測定対象(探 針またはステージ)が同軸に存在できないため 高精度な位置決めに不可欠であるアッベの原理 に従うことができない.

そこで,著者らは磁気記録評価用ピキーバック トラッキングアクチュエータとして研究開発を 行ってきた積層型圧電素子(PZT:Piezoelectric element)と変位拡大機構を組み合わせた1軸の 位置決め機構の技術を応用して,同一平面上を 高速高精度で走査可能な圧電素子型XYステー ジの開発を行った^{3),4)}.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.各軸の動作にはもう一方の軸に対 して,せん断力として働き,ステージを回転さ せる動作を生じるが,平行リンクによって,せ ん断力は制御可能な並進運動に変換されるので, X軸とY軸のアクチュエータが連携することで 抑制することができる.また,平行バネの外側 にPZT とてこ機構を配置することで,変位拡 大機構とPZT が,互いの形状や大きさに制約 されない設計となっているため,大きな変位量 と高い共振周波数の両立を可能にしている.

しかし, 圧電素子型 XY ステージの周波数応 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⁵⁾. その結果, 共振ピークより低域側にダンパを貼 り付けなかった場合には見られなかったゲイン の低減がみられた.ゲインの低減の影響により, 2次遅れ要素のみの同定モデルでは共振ピーク付 近を一致させると低域では実験値とモデルに大 きな差が発生した.特に低域での差はオーバー シュートの原因となる.本研究の目的は,ダン パを貼りつけた圧電素子型 XY ステージのゲイ ン低減を補償したモデルの作成である.作成し た同定モデルよりコントローラを作成し,その 性能を検証する.

2. 圧電素子型 XY ステージ

Fig.1 に本研究で開発した圧電素子型 XY ス テージの外観及び寸法を示す.X-Y ステージは, X 軸方向及び 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,実際の位置決めを行 うステージは Fig.2 に示される平行バネ及び四 角型支持バネによって支持されている.Fig.2 に 圧電素子と四角形型バネの固定位置を示す.四 角バネの寸法はX軸方向,Y軸方向ともに15.25 mmである.圧電素子は,5×5×20 mm,(変 位量 17.4 μm/150 V)と5×5×10 mm,(変位 量 9.1 μm/150 V)を直列にならべて積層圧電素 子として使用し,この積層圧電素子の最大変位 量は26.5 μm/150 Vである.X-Y ステージ機 構の変位拡大効率はFig.2 に示すように,a点 が支点,b点が力点,c点が作用点として機能 し,圧電素子の変位をab:ac = 1:5.75 の比で拡 大し,ステージに伝達する.つまり,理論上の 最大変位はX軸・Y軸ともに152.4 μm となる.



Fig. 1 圧電素子型 XY ステージ外観





しかし,実際の最大変位量は X 軸 112.4 μm,Y 軸 117.9 μm にとどまった.これは,変位拡大 機構による圧電素子変位の抑制・変形方向の平 行バネのたわみによる変位損失よる影響のもの と考えられる.

Fig.2 に駆動方向を示す. 圧電素子に電圧が 印加されると伸長し, てこ機構を介して変位が 拡大され, 平行バネより変位が伝達されステー ジが駆動する仕組みとなっている. 圧電素子が 収縮する際も同様である. Fig.2 にある矢印は, 圧電素子が伸長する際各部分の駆動方向を示し ている. 収縮する際は, 矢印と逆の方向に駆動す る. X 軸, Y 軸共に駆動方法は同一である.

Fig.2 に示される平行バネ及び四角形型バネ は,ステージ制御において重要な役割を持ち,結 合部の梁にせん断応力として働く,回転モーメ ントを抑制する効果がある.粘弾性材(IVY810 改27,大協技研工業製)と拘束板(SUS304)か らなるダンパを変位拡大機構(てこ機構)の上下 面に貼り付けている.

圧電素子型 XY ステージの周波数特性をダイ ナミックシグナルアナライザ(HP, 35670A)を 用いて測定した.X軸を Fig.3,Y軸を Fig.4 に示 す.図より,X軸方向の共振周波数は 5.2 kHz, Y軸方向の共振周波数は 4.8 kHz であった.ま た,各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 X軸 $4.7 \text{ dB} \cdot \text{Y}$ 軸 4.4 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 14.0 dB, Y軸では 13.6 dBまでピーク値が抑えられていた.ダンパ を貼りつけるまえでは共振ピーク値は約 30 dBであったので,おおよそ半減に成功している⁶⁾.

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, Fig.4 に示す位置決



め機構の周波数応答は、各軸ともに2次遅れ系 に近い特性を有していると考えられるため、次 式によりモデル化を行なった.

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

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. Y 軸での実際の共振周波数とモデルでの共振周 波数が 300 Hz 異なっているが,全体的にモデル を合わせるために変更している.

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.

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

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 数に調整するためのゲインである.本研究では, Fig.3,Fig.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⁶⁾. このモデルでは,共振周波数帯域ではよく実験 値と一致しているが,低域でのゲインの低減を 考慮できていない.

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を 用いた.このセンサ信号は,AD 変換器を介し て DSP (Digital Signal Processor)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 変換器を介して,駆動アンプで15 倍に電圧増幅される.目標値応答試験(位置決 め性能)では,目標値信号をファンクションジェ ネレータにより生成し,AD 変換器で離散化し

Tal	ole 1	2 次	、遅れ系のモラ	ールの優	系数
		K	$\omega_n \; [rad/s]$	ζ	
	Х	1.08	5200 × 2π	0.08	
	Y	1.0	$5100 \times 2\pi$	0.08	



Fig. 5 精密位置決めのための実験装置の構成

て DSP に取り込んだ.目標値応答試験の測定値 は,変位計の計測信号に含まれる白色ノイズを 除去するため,1024 回の平均化した値を使用す る.次に,設計した PID コントローラ P(z)を 用いて評価実験を行った.Fig.6 に X 軸,Fig.7 に Y 軸の開ループ伝達関数を示す.両軸ともにゲ イン交差周波数は約 1.1 kHz であり設計通りで ある.位相余裕は X 軸 49.8 deg,Y 軸 49.5 deg であり,ゲイン余裕は X 軸 9.3 dB,Y 軸 9.3 dB であった.よって十分安定なシステムといえる.

Fig.8, Fig.9 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.目標値換算した矩形波 100 Hz を目標値 としている.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 0.14 ms,Y 軸が 0.14 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 19.9 %,Y 軸で 19.2 %のオーバーシュートが見られた.この実験値 とシミュレーションとの差は,低域のゲインを 考慮できなかったためと考え,制御設計を大幅 に変更することなくゲイン低減部を表現・補償 できるモデル表現法を検討する.



Fig. 6 開ループ伝達関数のボード線図 (X軸)



Fig. 7 開ループ伝達関数のボード線図 (Y 軸)



Fig. 8 目標値応答 (X 軸)



Fig. 9 目標値応答 (Y 軸)

オーバーシュートを改善する制 御系設計

Fig.3,Fig.4 に示すように,低域でゲイン特性 が数デシベル低減する現象をモデル化し,制御 系設計に反映させるため,本研究では位相遅れ 要素によりこれを近似する.位相遅れ要素は,一 般的に次式のように表すことができ,

$$D(s) = K \frac{\beta(Ts+1)}{\beta Ts+1} \tag{3}$$

ここで $\beta > 1$ である. Fig.10 に D(s) のゲイ ン線図の模式図を示す.図より低域と高域では, ゲインがそれぞれ $D(0) = \beta K$, $D(\infty) = K$ と なっていることがわかる.この図に示すように 低域において+ 20 log β dB だけゲインを持ち 上げることができ, β は低域のゲインの低減量 を表現できる設計パラメータとなる.また,1/Tにより折れ点周波数を調整する.なお, $1/(\beta T)$ は1 次遅れ系,1/T は1 次進み系の折れ点周波 数となる.Table 2 は X 軸, Y 軸の位相遅れ要素 の式 (3) のパラメータを示している.

実際のモデル式は式 (1) に式 (3) をかけ合わ せた次式である.

$$P(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \times \frac{\beta(Ts+1)}{\beta Ts+1} \quad (4)$$

Fig.11,Fig.12 にゲイン低減部を上記方法によって補償したモデル関数を示す.X軸,Y軸ともに2次遅れモデルよりはるかに高い基礎特性との一致性が見られる.式(3)により,周波数低域でのゲイン低減はよく表現されていることがわかる.したがって,位相遅れ要素の組み合わせは非常に有効に機能しているといえ,簡易的に一致性の高いモデルを作成することが出来た.

この位相遅れ補償モデルよりコントローラを 作成する.PID コントローラC(z) に位相遅れ 補償式D(z)の逆数をかけて補償することとし た.この操作は,PID コントローラC(z) に位 相進み補償を行ったことに相当する.次に改良 したコントローラを用いて評価実験を行った. Fig.13 に X 軸,Fig.14 に Y 軸の開ループ伝達関

Table 2 位相遅れ要素パラメータ

軸	K	β	1/T
X	1	1.7	$340 \times 2 \pi$
Y	1	1.7	335 × 2 π

数の周波数応答を示す.改良コントローラによ る実験結果及びシミュレーション,比較対象と して PID コントローラを記載している.シミュ レーション結果は DSP の2サンプルの遅れを考 慮したものである.Table 3 に開ループ伝達関 数の評価表を示す.位相余裕は X 軸で 57.9 deg, Y 軸 56.7 deg,ゲイン余裕は X 軸 9.5 dB,Y 軸 9.3 dB となり,より安定的なシステムになって いる.一方,ゲイン交差角周波数は X 軸で 1.14 kHz から 1.1 kHz,Y 軸が 1.2 kHz から 1.1 kHz 減少しており速応性の低下が見られた.シミュ レーションとの差異がみられるが,完全に正確 なモデルではなく近似的モデルよるコントロー ラであるためである.

次に Fig.15 に X 軸, Fig.16 に Y 軸の閉ループ 伝達関数の周波数応答を示す.Table 4 に開ルー プ伝達関数の評価表を示す.閉ループ伝達関数 の周波数応答における帯域幅は, X 軸 2.4 kHz から 2.3 kHz, Y 軸 2.4 kHz から 2.3 kHz に低下 しており,速応性の低下が認められる.これは



Fig. 10 位相遅れ要素によるゲイン低減部の モデル

Table 3 開ループ伝達関数の評価表

	PID		Phase-lead	
評価項目	Х	Y	Х	Y
Gain margin [dB]	9.3	9.3	9.5	9.3
Phase crossover frequency[kHz]	3.08	3.08	3.14	3.08
Phase margin [deg]	49.8	49.5	57.9	56.7
Gain crossover frequency[kHz]	1.14	1.16	1.11	1.14



 Fig. 11
 位相遅れ要素を加えた X 軸モデルの

 ボード線図



 Fig. 12
 位相遅れ要素を加えた Y 軸モデルの

 ボード線図

Fig.13,Fig.14 での開ループ伝達関数でも確認で きた速応性の低下を裏付ける結果となった.し かしピークゲインは,X軸2.0 dB(1.2 kHz)か ら 0.66 dB(1.2 kHz),Y軸1.8 dB(1.3 kHz)か ら 0.53 dB(1.3 kHz)となり,ピークが減少して いる.

次に Fig.17 に X 軸, Fig.18 に Y 軸の目標値応 答評価としてステップ応答を示す. Table 5 に ステップ応答の評価表を示す. PID コントロー ラと比較すると立ち上がり時間 (目標値変化の 10 ~90 % に到達するまでの時間) が X 軸 0.14 ms から 0.16 ms, Y 軸 0.14 ms から 0.16 ms と



Fig. 13 開ループ伝達関数のボード線図 (X軸)



Fig. 14 開ループ伝達関数のボード線図 (Y 軸)



Fig. 15 閉ループ伝達関数のボード線図 (X軸)



Fig. 16 閉ループ伝達関数のボード線図 (Y軸)

速応性が低下している.これは,開ループ・閉 ループ伝達関数でも速応性の低下が認められる ため,裏付けが取れている.遅れ時間(目標値変 化の 50 % に到達するまでの時間) が X 軸 0.12 msから0.14 ms, Y軸0.12 msから0.14 msと 多少立ち上がりが遅くなった.定常特性は,整 定時間(目標値の(±5%)の範囲内に収束する までの時間) が X 軸 0.56 ms から 0.44 ms, Y 軸 0.58 msから0.44 msと整定時間の向上が見ら れる.オーバーシュートはX軸19.9%からX軸 9.2%, Y軸 19.2%から7.1%とおよそ半分まで 減少している.若干のアンダーシュートが認め られるが,目標値の(±5%内でのことである ので問題はないとする.速応性は若干低下する ものの整定速度・オーバーシュートの改善が見 られるため, 改良コントローラは非常に良い制 御性能を持っていると評価できる.

次に Fig.19 に平面位置決め性能を評価するため,直径 4 µm になるよう 70Hz の正弦波と余

Table 4	羽ループ	'伝達関数の	評価表
---------	------	--------	-----

	PID		Phase-lead	
評価項目	Х	Y	Х	Y
Bandwidth[kHz]	2.40	2.44	2.34	2.34
Peak gain [dB]	2.0	1.8	0.66	0.53
Resonant frequency [kHz]	1.18	1.28	1.21	1.30



Fig. 17 目標値応答 (X 軸)

弦波の指令電圧をX軸とY軸に加えて,オシ ロスコープ上に直径4µmのリサージュ円を描 き,その真円度で位置決め精度を評価した.こ こでは70Hzでのリサージュ円を示す.低周波 数では、どちらのコントローラも良い追従性を 見せるが周波数が上がると改良したコントロー ラのほうが良い追従性をみせ、次第に差が開い ていく.よって、平面位置決め性能においても改 良コントローラは優れている.

PID コントローラを改良したコントローラは 各実験結果より,速応性は低下したものの,最 終的な整定時間が優れているため問題はないと 判断する.更にゲイン低減部を補償したことで, オーバーシュートをおよそ50%以上抑制するこ とに成功した.平面位置決め性能も向上してい るため,コントローラの改良に成功したと判断 できる.これ以上,この手法で性能向上を目指 すのであればゲイン低減部の補償方法を工夫す る必要がある.Fig.10で示されている様に位相 遅れ要素の傾きは-20 dB/dec と固定されてい る.なので,この傾きを自由に調整できるように なれば,コントローラの性能向上が期待できる と予想される.









Table 5	目標値応答の評価表
---------	-----------

	PID		Phase-lead	
評価項目	Х	Y	Х	Y
Overshoot(%)	19.9	19.2	9.2	7.1
Rise time (ms)	0.14	0.14	0.16	0.16
Settling time (ms)	0.56	0.58	0.44	0.44
Delay time (ms)	0.12	0.12	0.14	0.14

5. 結言

本研究では,ダンパを貼りつけることによって 特性が変化した圧電素子型XYステージのモデ ルを考案し,作成モデルに基づいたコントロー ラを設計し、その有効性を検証した.

- (1) 圧電素子と変位拡大機構を組み合わせた 圧電素子型 XY ステージの周波数応答を調 べ,X 軸の共振周波数は 5.2 kHz,Y 軸の共 振周波数は 4.8 kHz であった.各軸とも共 振周波数よりも低域でのゲインの低減がみ られ,X 軸で最大 4.7 dB,Y 軸で最大 4.4 dBであった.共振ピーク値は低域のゲイン に対して X 軸では 14.0 dB,Y 軸では 13.6 dBであった.
- (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 じないが,実験ではオーバーシュートが生 じていた.これはゲイン低減部でのモデル との差が大きいことが原因であった.
- (3) 周波数応答におけるゲインの低減部を表現 するため,位相遅れ補償を組み合わせたモ デルを作成した.PID コントローラに位相 遅れ要素の逆数をかけあわせ,位相進み補 償を行った結果,PID コントローラより若 干速応性が低下したが,整定速度が向上し たためコントローラの改善をすることが出 来た.オーバーシュートはPID コントロー ラの半分以下に抑制することができたため, 非常に良い結果を得ることが出来た.

今後の課題は, 位相遅れ要素の傾きの調整法に ついての検討を行い, オーバーシュートの抑制 を目指すことである.

参考文献

1) 特許庁:平成18年度 特許出願技術動向調査報告書 ナノテクノロジーの応用-カーボンナノ

チューブ,光半導体,走査型プローブ顕微鏡-(要約版) (2007)

- 2) 日本表面科学会:ナノテクノロジーのための走 査プローブ顕微鏡(表面分析技術選書), pp.19-34
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 大坂達也,大川元寿,櫻田陽,長縄明大,渋谷嗣, 森英季: 圧電素子型 XY ステージにおけるダンパの影響解析,計測自動制御学会東北支部第 266 回研究集会 (2011.7.20),資料番号 266-1
- 7) 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.
- 第上和夫:MATLAB/simulimk によるわかりや すい制御工学 pp.142 森北出版 (2001)
- 9) 大日方五郎:制御工学 基礎からのステップアッ プ 朝倉書店 (2003)
- 10) 内野研二,石井孝明:マイクロメカトロニクス 圧電アクチュエータを中心に,森北出版 (2007)
- 11) 松尾芳樹:デジタル制御,昭晃堂 (2001)
- 12) 山口高司,平田光男,藤本博志:ナノスケール サーボ制御 高速・高精度に位置を決める技 術,東京電気大学出版 (2007)
- 13) 大塚二郎:ナノテクノロジーと超精密位置決め 技術,工業調査会 (2005)
- 14) 吉田郷弘: 使える! MATLAB, 講談社 (2002)
- 15) 山本重彦,加藤尚武: PID 制御の基礎と応用, 朝倉書店 (2005)