

圧電素子を用いた菱形機構の精密位置決め制御

Precise Positioning Control of Diamond Shape Amplitude Mechanism with Piezoelectric Element

○佐藤雄大*, 長縄明大*, 櫻田陽**, 森英季**, 安藤大樹***, 大日方五郎***

○Yudai Sato*, Akihiro Naganawa*, Akira Sakurada**,
Shigeki Mori**, Hiroki Ando***, Goro Obinata***

* 秋田大学, ** 秋田県産業技術総合研究センター, *** 名古屋大学

* Akita University, ** AIT, *** Nagoya University

キーワード: 積層型圧電素子(Layered piezoelectric element), 菱形機構(Diamond shape amplitude mechanism), 位置決め制御(Positioning control), 高速高精度制御(High speed and highly precise control)

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

1. はじめに

現在, ハードディスクドライブ(HDD)の面記録密度は, 年率40%以上の向上が求められている. そのため, 磁気ヘッドや記録メディアを試験評価する最先端の磁気記録再生評価装置(スピンスタンド)では, 15000[r.p.m.]に達するような高速で回転するメディア上に書かれた記録信号を正確に追従し, 記録再生できる基本性能の改善が常に求められている. すでに, スピンスタンドには著者らが提案した磁気ヘッドのトラッキング用のアクチュエータとしての積層型圧電素子(PZT:Pb(Zr,Ti)O₃)と変位を拡大する並行バネとてこの機構を有する共振周波数:5[kHz], 最大変位量:12[μm]のNano-motion Actuator(NMA)が搭載されている¹⁾. しかしながら, さらにアクチュエータの高速化を図りながら駆動して, Head Gimbal Assembly(HGA)のヘッド部の位置決めを正確に行う場合, 現行のアクチュ

エータの構造ではPZTによる反力がスピンスタンド全体を加振し, 位置決め性能に重大な影響を与えることが懸念された. そこで著者らは, 菱形リンク機構の中心軸上の固定部を挟んで2つのPZTを対向させ, 反力の相殺と共振周波数の高域化を図るアクチュエータを提案した^{2, 3, 4)}. このアクチュエータは, 2つのPZTと菱形形状の変位拡大機構により構成され, 直行する2つの対角の長さの比で変位が変化する. また, 機構の対称性により低次の振動モードがキャンセルされるので, 大きな変位量を確保しながら, 等価的に剛性の高い機構となる.

本研究では, 弾性ヒンジを有する菱形機構のオリジナルモデルと, リンク全体の曲げを応用した改良モデルに対し, DSP(Digital Signal Processor)を用いた位置制御系を構成し, 制御性能への影響について実験的に検証した結果を報告する.

2. 菱形変位拡大機構

Fig. 1は菱形機構の写真を, Fig. 2は菱形機構の構成図を示している. 菱形リンク機構を用いたアクチュエータは, 固定部aを挟んでPZTが対称に取り付けられている. このPZTの伸長によって図に示される角度 θ の変化に対応した x_1 軸方向の変位が, c, d部に表れる. したがって, 2つの θ が $90[\text{deg}]$ に近づくほど変位拡大率は向上する.

Fig. 2(a)は, 原理確認に用いたオリジナルモデルであり, 弾性ヒンジを有している. この機構は, 4つのリンク長さ $L=15[\text{mm}]$ と角度 $\theta=71.6[\text{deg}]$ を固定し, 開ループ伝達関数のループ整形法により弾

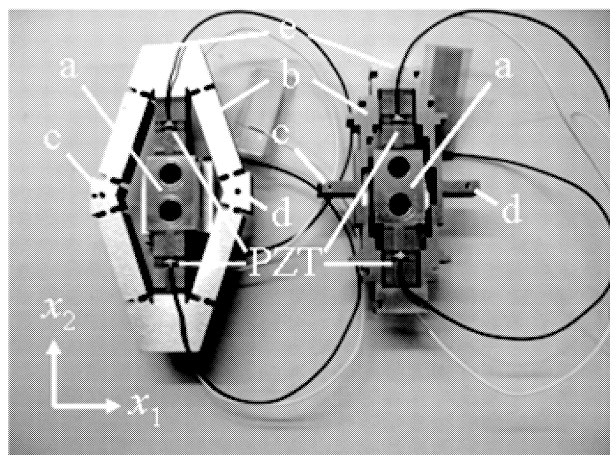


Fig. 1 Two types of diamond shape amplitude mechanism

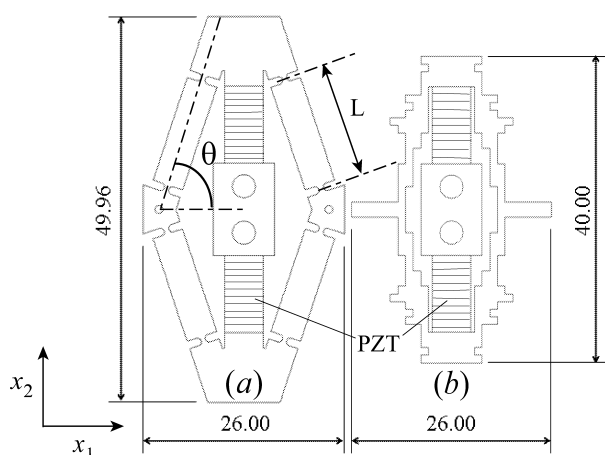


Fig. 2 Structure of mechanism

性ヒンジ部の構造とこれを制御するためのコントローラを同時最適化したものである. さらに, Fig. 2(b)は, 弾性ヒンジ部に応力を集中してリンクを動作させるのではなく, リンク全体の曲げを応用した改良モデルを示しており, (a)と同様に同時最適化の手法で設計した. この改良モデルでは, オリジナルモデルと比較して共振周波数を維持したまま, 変位拡大量を1.5倍向上できることを確認した²⁾.

3. 実験装置の構成

Fig. 3は, 位置決め制御の実験を行った装置の構成図を示している. 位置信号のフィードバックには, 光ファイバ式変位計(MTI-2000, プロブ: MTI2032R, センサ感度: $0.0181[\mu\text{m}/\text{mV}]$, 分解能: $0.03[\mu\text{m}]$, 計測出力ノイズ: $30[\text{mVp-p}]$)を用い, このフィードバック信号はA/D(Analog Devices社製AD7874BR, 最大変換周波数: $25[\text{kHz}]$ (4ch同時変換時), 分解能:14bit)を介してコントローラを実装するDSP(MTT製, TI:DSP6067)に取りこまれ, 制御演算後のアクチュエータへの指令は, D/A(Analog Devices社製DAC8412FPC, 最大変換周波数: $120[\text{kHz}]$, 分解能:16bit)を介して, 駆動アンプ(エヌエフ回路設計ブロック社製:HAS-4051)で40倍に電圧増幅さ

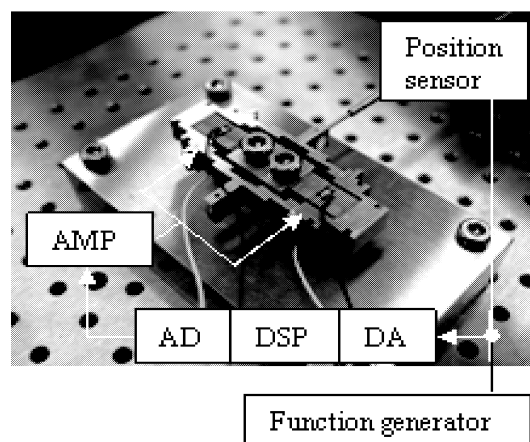


Fig. 3 Experimental system of positioning control

れた電圧が、PZTに印加される。また、ステップ応答試験では、ファンクションジェネレータ(YOKOGAWA : FC300)で生成される信号を目標値として入力した。

4. PZT反力の影響

PZT固定部への反力の影響を調べるため、2つのPZTを同時に駆動し、反力を相殺した場合と、一方のPZTのみを駆動した場合の周波数特性を比較した。Fig. 4は、周波数応答の測定結果を示しており、(a)がオリジナルモデルに対する結果、(b)が改良モデルに対する結果を示している。

Fig. 4(a)に示されるオリジナルモデルでは、どちらか一方のPZTを駆動させることで発生した反力が2.4[kHz]の共振や、2.5[kHz]の反共振として現

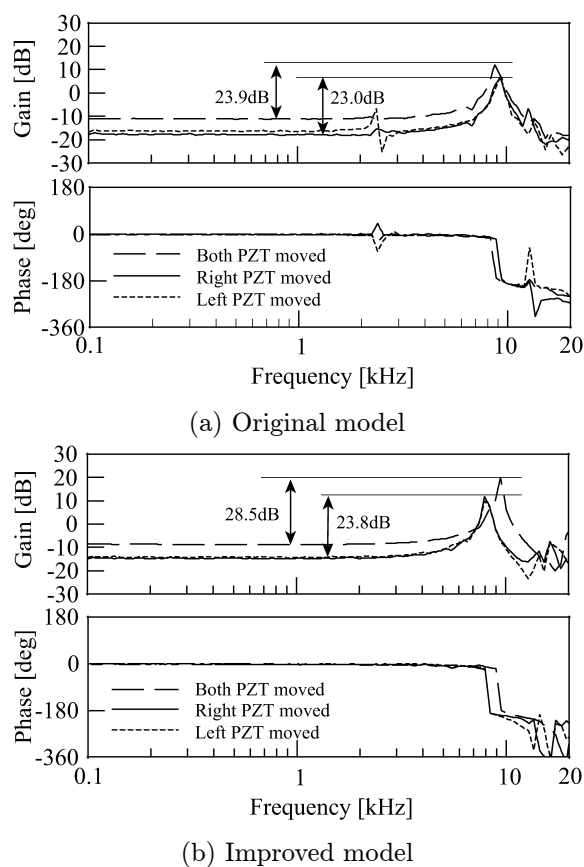


Fig. 4 Frequency responses of diamond shape actuators

れ、9.3[kHz]には23.0[dB]の共振ピークを有する主共振が観測された。しかし、2つのPZTを同時に駆動して、反力を相殺した場合には、2.4[kHz]の共振と2.5[kHz]の反共振は消失し、8.8[kHz]に23.9[dB]の共振ピークだけとなった。

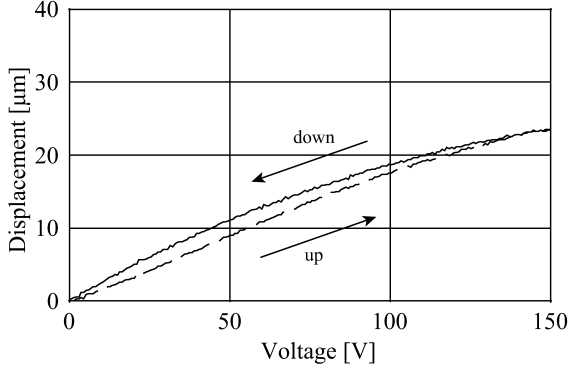
また、2つのモデル共に、一方のPZTを駆動させた場合、3[kHz]近傍の帯域まで一定である振幅が、オリジナルモデルでは-16.0[dB]、改良モデルでは-14.0[dB]であった。反力を相殺するために2つのPZTを駆動させると、低域の振幅はそれぞれ-11.0[dB]、-8.5[dB]となり、振幅は2倍(約6[dB])に増加した。

主共振周波数においても、一方のPZTを駆動させた場合、オリジナルモデルでは6.9[dB]、改良モデルでは9.8[dB]であったものが、2つのPZTを駆動させることで、それぞれの共振ピークは、12.0[dB]、20.0[dB]と2倍程度、共振ピークも増加した。

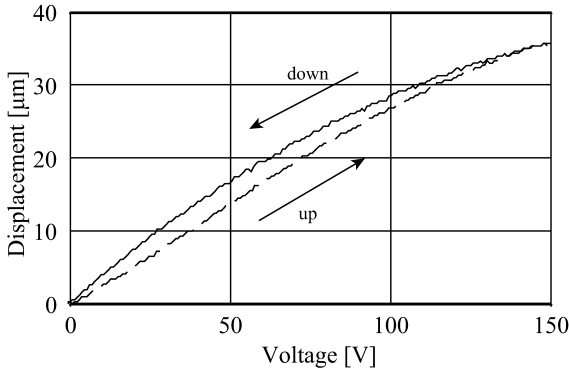
5. 変位特性

菱形機構の最大変位量と変位の履歴を調べるため、ファンクションジェネレータで、1秒間に0[V]から150[V]まで線形に増加させた電圧をPZTに印加し、光ファイバ式変位計の出力をオシロスコープ(YOKOGAWA : DL1540L)で測定した。

Fig. 5(a)に示すオリジナルモデルの場合、最大変位量は、23.88[μm]で最大変位量の約5%のヒステリシス特性が確認された。これは、PZTに内在するヒステリシス特性が、変位拡大機構の拡大率に比例して表れたものである。Fig. 5(b)の改良モデルの場合、最大変位量は36.05[μm]とオリジナルモデルの1.5倍に増加し、文献2)のFEM解析による構造解析の結果通り、共振周波数を下げずに変位量の向上が確認できた。



(a) Original model



(b) Improved model

Fig. 5 Displacement characteristics of diamond shape actuators

6. モデル化とコントローラ設計

Fig. 5の周波数特性から2つの菱形リンク機構を式(1)で示される2次遅れ系でモデル化した。

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

ここで、 K はゲイン、 ω_n は共振周波数、 ζ は減衰係数を示しており、Table 1に示すような値とした。パラメータを調整して得られたモデルによるシミュレーション結果と測定値はFig. 6に示されるもので、オリジナルモデル(a)、改良モデル(b)共に式

Table 1 Plant parameters for two models

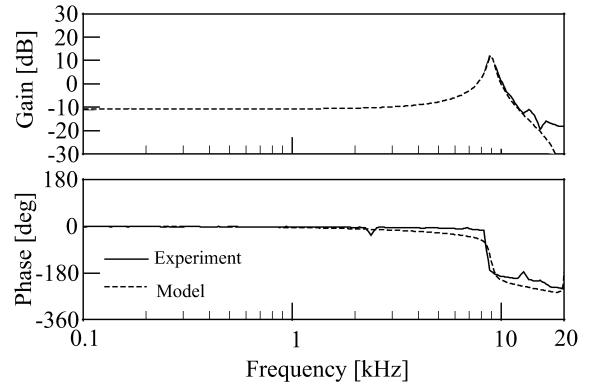
	K	ω_n	ζ
Original model	0.2880	$8940 \times 2\pi$	0.0350
Improved model	0.3712	$9450 \times 2\pi$	0.0165

(1)によって適切にモデル化されていることが確認できる。

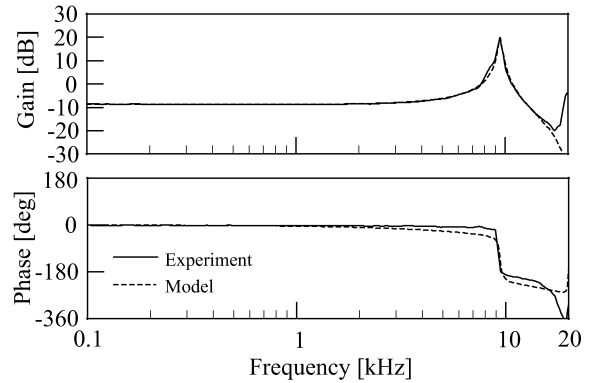
本研究で適用したコントローラは式(2)に示されるPIDコントローラで、設計指針としてゲイン余裕5[dB]、位相余裕30[deg]以上を保ちながら最大のゲイン交差周波数を得られるよう、シミュレーションで各パラメータを決定し、サンプリング周波数40[kHz]で離散化している。

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

ここで、 K_P は比例ゲイン、 K_I は積分ゲイン、 K_D は微分ゲインを示し、 α は微分器のカットオフ周波数である。



(a) Original model



(b) Improved model

Fig. 6 Frequency responses of diamond shape actuators

7. 実験結果

アクチュエータの制御性能を評価するため、開ループ伝達関数の周波数特性を測定した。Fig. 7は測定結果を示している。Fig. 7(a)のオリジナルモデルの場合、ゲイン交差周波数は2.22[kHz]，その時のゲイン余裕は6.75[dB]，位相交差周波数は4.26[kHz]，位相余裕は23[deg]となった。Fig. 7(b)の改良モデルの場合、ゲイン交差周波数は2.50[kHz]，その時のゲイン余裕は5.19[dB]，位相交差周波数は4.13[kHz]，位相余裕は32[deg]となった。2つのアクチュエータは、ゲイン及び位相余裕を設計指針の目標値に保ちながら、概ね同等の開ループ伝達関数の周波数特性が得られた。

Fig. 8に1[μm]を目標値とするステップ応答試験結果を示す。測定に用いた光ファイバ式変位計

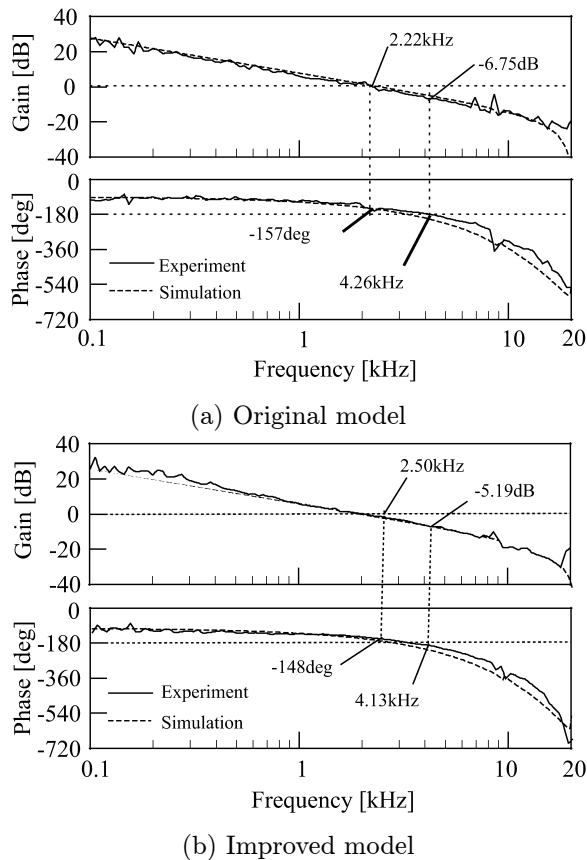


Fig. 7 Open-loop transfer function of diamond shape actuators

には、常に30[mV]の計測のノイズが重畳しているが、その周波数成分は、ホワイトノイズに近いものである。そこで、1[μm]ステップ応答の繰り返し性が高いことを前提に、オシロスコープ(Hewlett-Packard:54540C)上で1024回の平均化処理をすることでノイズ成分を低減化した。

2つのアクチュエータのステップ応答の結果、オリジナルモデルの立ち上がり時間(応答が目標値の10%から90%までに要する時間)は0.060[msec]となり、改良モデルの立ち上がり時間も、0.052[msec]とほぼ同等の性能を示し、シミュレーションとも一致している。2つの結果は、コントローラのゲイン交差周波数がほぼ同じことから、容易に予想できる。しかし、オーバーシュートは、オリジナルモデルが39%、改良モデルは55%、整定時間(応答が目標値の $\pm 5\%$ の幅の中に収まるまでの時間)は、オリジナルモデルが1.276[msec]、改良モデルが0.704[msec]となり、同等の性能が得られている

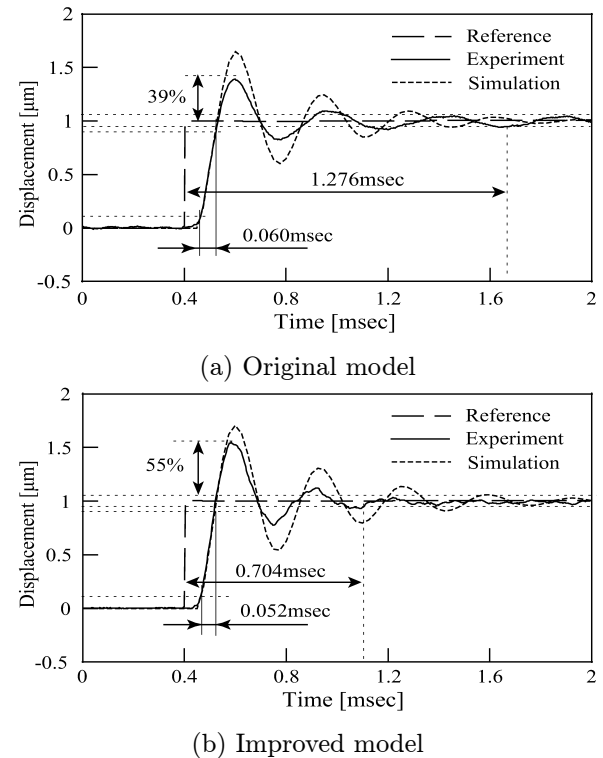


Fig. 8 1 μm step Responses of diamond shape actuators

とは言えない。シミュレーションの減衰係数の結果から改良モデルの方が、振動的になり整定時間が遅くなる予想であったが、実際は、改良モデルの整定時間の方がオリジナルモデルと比べ、早い結果となった。この原因は、改良モデルの制御系がオリジナルモデルの制御系よりゲイン交差周波数が高いこと、また、A/DからD/Aまでの入出力遅れが実験では約1.6サンプルであるのに対して、シミュレーションでは2サンプルとしていることなどが上げられる。

8. おわりに

本研究では、弾性ヒンジを有する菱形リンクの機構の各寸法が最適化されたアクチュエータをオリジナルモデルとし、リンク全体の曲げを応用するように形状最適化を進めた改良モデルと比べ、基本特性及び制御性能への効果を実験的に検証した。改良モデルでは、主共振周波数やゲイン交差周波数を保ちながら最大変位量を1.3倍向上することが確認できた。また、反力が発生するように固定部に対向する2つのPZTの一方のみを駆動させた場合、弾性ヒンジを有するオリジナルモデルでは、2[kHz]近傍に反力を相殺した場合には見られなかった、共振と反共振が現れたが、改良モデルでは、この様な反力の影響は見られなかった。この現象の要因は、弾性ヒンジの有無によるものと予想されるが、今後の構造解析で解明する必要がある。また、1[μm]ステップ応答試験では、同様な特性のコントローラが、シミュレーション上で設計されていたが、実際は特性の異なる結果となっていた。開ループ伝達関数の周波数特性では、正確に減衰を合わせてはいたが、ステップ後の減衰傾向を見ると一致しているとは言えない。これは、コントローラ設計時のサンプル遅れとのギャップ等が影響していると考えるが、DSPへコントローラを実装した場合の遅れ補償と改善は、今後の課

題である。

アクチュエータの今後の改良点としては、共振周波数における大きなピーク振幅がある。現在のように大きな振幅をコントローラ設計だけで改善することはできない。機械的な減衰機構を含めたコントローラとの統合化設計を行うことで、更に制御性能の改善を進める。

参考文献

- 1) Shigeki Mori, Hirohiko Tada, Akihiro Naganawa, Goro Obinata and Kazuhiro Ouchi : Damping Effect on Precise Track Following for Nano-Motion Actuator, IEEE Trans. on Magnetics, 41-2, 842/848 (2005)
- 2) 安藤大樹, 大日方五郎, 宮垣絢一郎 : 磁気記録評価装置用変位拡大位置決め制御機構の機構系と制御系の統合化設計, 日本機械学会論文集(C編), 71-703, 987/994 (2005)
- 3) 安藤大樹, 森英季, 大日方五郎 : 高速位置決めアクチュエータの機構形状とコントローラの統合化設計, 日本機械学会D&D, CD講演論文集, 講演番号219 (2006)
- 4) 安藤大樹, 酒井猛, 大日方五郎 : 磁気記録評価装置用変位拡大位置決め制御機構の機構形状とコントローラの統合化設計, 日本機械学会論文集(C編), 72-719, 2146/2153 (2006)