

圧電アクチュエータヒステリシス特性の改善に関する研究* (第1報, ひずみゲージ出力帰還法ならびにセルフセンシング駆動法)

江 鐘 偉^{*1}, 長 南 征 二^{*1}
山 本 崇^{*2}, 布 田 良 明^{*3}

Linear Compensation of Piezoactuator's Hysteresis (1st Report, Strain Feedback and Self-Sensing Control Methods)

Zhongwei JIANG, Seiji CHONAN,
Takashi YAMAMOTO and Yoshiaki FUDA

This paper presents a study on the linear compensation of nonlinear hysteretic piezoelectric ceramic actuators. Both the feedback control using the strain gauge output and the self-sensing control technique are investigated. In the strain feedback control, the strain on the surface of the actuator is measured directly by using the strain gauge and the output is fed back to the input voltage to decrease the actuator hysteresis. In the self-sensing control, the voltage generated by the piezoelectric effect of the actuator is detected by a bridge circuit and then used as a feedback signal to compensate for the nonlinearity of the actuator. The experimental results show that the self-sensing feedback control is more efficient to reduce the hysteresis of the actuator. Further, the self-sensing compensator is more simple and needs no additional external sensing devices.

Key Words: Piezoceramic Actuator, Hysteresis, Linear Drive, Strain Gauge, Self-Sensing

1. 結 言

圧電アクチュエータの変位量は圧電定数と印加電圧の積に比例するため、一般にアクチュエータ用圧電材料としては圧電定数の大きな材料を採用することが望ましい。しかしながら圧電材料は分極域の反転を伴うため、圧電定数の大きな材料はヒステリシスも大きくなる傾向にある。精密位置決め装置や走査型トンネル顕微鏡(STM)に用いられる圧電アクチュエータはできるだけヒステリシスが小さいことが必要である。このようなヒステリシスの小さい材料としてはLiNbO₃が知られている^[1]。しかしながらLiNbO₃を用いたアクチュエータは圧電セラミックアクチュエータに比べ圧電定数が小さく、十分な変位を得るためには高電圧を印加する必要がある。このため一般には圧電セラミックアクチュエータが広く用いられており、材料特性の非線型性等を駆動方法や変位拡大機構の工夫等でカバーしていくことが必要となっている。

現在、圧電素子の履歴特性を除去する方法としては、出力変位を検出しフィードバックするものが一般的である。岡崎^[2]はギャップセンサを使用した変位フィードバック型微小変位台を試作している。三矢ら^[3]は目の字形機構にひずみゲージを2枚はりつけ、検出した変位をコンピュータを用いてフィードバックしている。しかしながらこれらの方法ではシステムが複雑で応答速度が遅いという欠点がある。

一般に素子自身のヒステリシスを取り除く駆動法としては、この他にパルス幅変調方式、コンデンサ挿入方式、電荷駆動方式などがある。パルス幅変調方式^[4]は制御方式としては巧妙な手法であるが高周波のパルスを使用するために素子の耐久性が悪化したり素子が発熱する等の欠点がある。コンデンサ挿入方式^[5]は簡単で低コストであるが、十分な効果を得るためには挿入コンデンサの容量を下げねばならず結果的に圧電素子の変位感度が小さくなる欠点がある。電荷駆動方式^{[6],[7]}は投入電荷量によって変位を制御するものであり、簡単で実用性も高いことから応用例も報告されているが、電荷駆動方式は交流駆動やアクチュエータの絶縁抵抗が非常に大きく圧電素子が純粋なキャパシタンス

* 原稿受付 1996年12月5日。

^{*1} 正員, 東北大学工学部 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

^{*2} 日本電装(株) (〒448 刈谷市昭和町1-1)。

^{*3} 正員, トーキン(株) (〒982 仙台市太白区郡山6-7-1)。

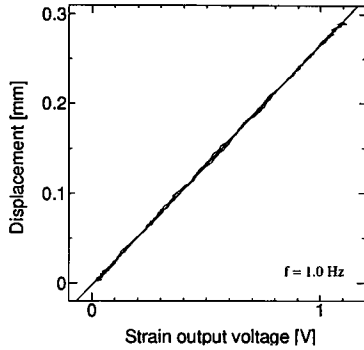


Fig. 1 Tip displacement versus output voltage of strain gauge on bimorph-type piezoelectric actuator.

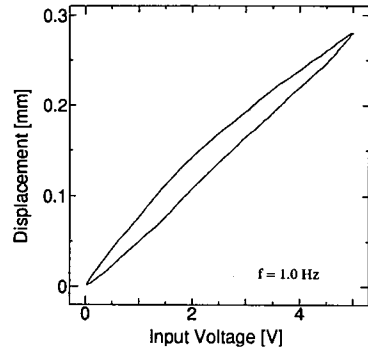


Fig. 3 Variation of tip displacement versus input voltage (open-loop drive).

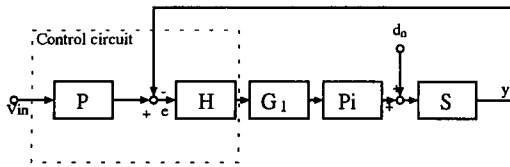


Fig. 2 Circuit diagram of strain gauge feedback control.

とみなせる場合は非常に有効であるが、静的あるいは準静的駆動時は投入電荷のアクチュエータ内漏電によって安定した制御ができない。また、江ら^[8]は圧電アクチュエータのヒステリシスを3次式に近似し、入力電圧をそれに合わせて非線形変換して素子に印加することにより圧電アクチュエータを線形駆動している。しかしながらこの方法は、入力電圧が単調増減を繰り返す場合には有効であるが、ランダムな入力電圧まで取り扱う場合には回路が複雑になる欠点を持っている。

以上の点に鑑み本研究は、汎用でより簡易なランダム入力に対応できる線形駆動法の開発を行うものである。具体的には、はじめに素子に直接ひずみゲージをはりつけその出力をフィードバックし線形駆動する従来の方法について検討する。次にセルフセンシングを用い、圧電素子の変形により発生する電圧を検出しフィードバックするセルフセンシング駆動回路を試作し、理論と実験により圧電アクチュエータの線形駆動特性を調べ、セルフセンシングを用いた線形駆動法を完成させる。

2. ひずみフィードバックを用いた線形駆動法

本節では、圧電素子に直接ひずみゲージをはりつけ、その信号によりフィードバックする制御回路を試作、その動作特性を調べる。

図 1. に、圧電素子に貼りつけたひずみゲージの出

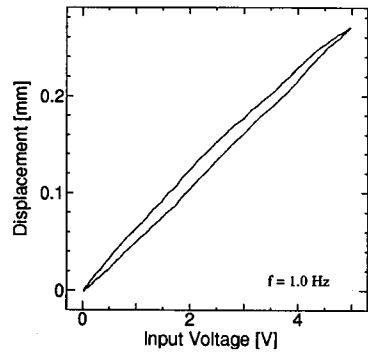


Fig. 4 Variation of tip displacement versus input voltage (closed-loop drive with $H = 4$).

力電圧と圧電素子の変位の関係を示す。図よりひずみゲージ出力と素子の変位の関係は線形であることがわかる。従って、ひずみゲージの出力電圧を素子の入力電圧に対して線形になるようフィードバックすることにより、圧電素子の発生変位を入力電圧に対して線形にすることが考えられる。

図 2 に制御回路のブロック図を示す。破線内が本研究で試作した制御回路部である。図において、 P は出力変位を調整するためのゲイン、 H は比例ゲイン、 G_1 は圧電素子用線形アンプのゲインである。また P_i は圧電素子の入力電圧から出力変位への線形伝達関数である。圧電素子のヒステリシス等の非線形成分は変位外乱 d_n を用いて考慮する。圧電素子の発生変位は、ひずみゲージから抵抗ブリッジ、ひずみゲージアンプを経て電圧に変換されるが、このときの発生変位から電圧への伝達関数を S とする。この場合、ひずみゲージアンプ出力 Y は入力電圧 V_{in} と非線形成分 D_n により次のように表わせる。

$$Y = \frac{PHG_1P_iS}{1 + HG_1P_iS} V_{in} + \frac{S}{1 + HG_1P_iS} D_n \quad (1)$$

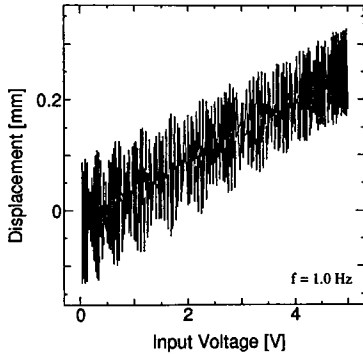


Fig.5 Variation of tip displacement versus input voltage (closed-loop drive with $H = 10$).

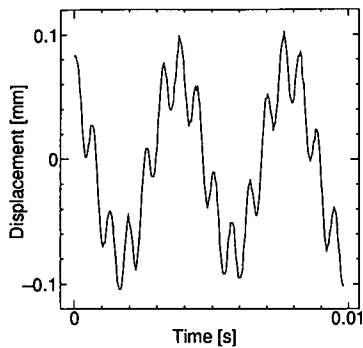


Fig.6 Displacement time response of Fig. 5.

式(1)の第一項は入力電圧 v_{in} による影響、第二項は非線形変位成分 d_n による影響である。比例ゲイン H を十分に大きくすることで上式の第二項目(ヒステリシス等の非線形成分)が無視でき、入力電圧 v_{in} とひずみゲージ出力が線形関係になることがわかる。

図3に、ひずみフィードバック回路を用いず正弦波駆動を行った場合の結果を示す。この場合は駆動周波数 f (共振周波数まで)に無関係に大きなヒステリシスがみられる。図4にひずみフィードバック回路を用いて駆動した場合の結果を示す。ゲインは $H = 4$ である。図3の結果と比べるとフィードバック駆動した場合の方がヒステリシスが小さくなっており、フィードバックの効果が確認できる。

理論ではゲイン H が大きいほど非線形性が改善されるが、実験ではゲインが $H = 4$ 以上になると出力変位が不安定になり、素子の応答に振動が生じてしまった。例えば、ゲインを $H = 10$ にした場合の一例を図5に示す。また、その場合の発生変位の時間変化を図6に示す。応答振幅には238Hzと1516Hzの振動成分が含まれており、それぞれ圧電素子の一次と二次共振周波数に対応している。また、圧電素子の変位出力は

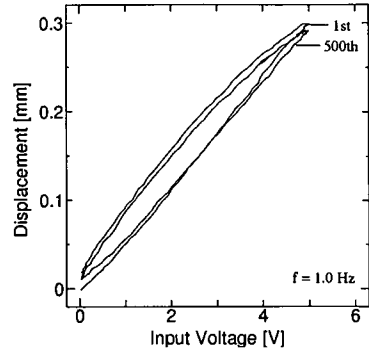


Fig.7 Variation of tip displacement versus input voltage (500 cycles of open loop drive).

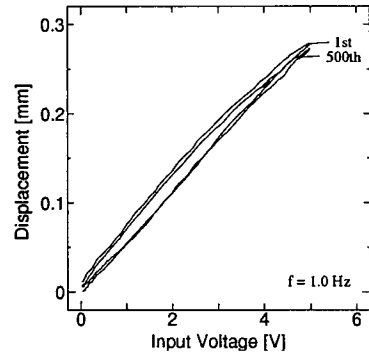


Fig.8 Variation of tip displacement versus input voltage (500 cycles of closed-loop drive with $H = 4$ and LPF($f_c=19.4\text{Hz}$)).

一次共振点近傍では低周波数帯に比べ27dBを越えており、これをひずみゲージで検出し直接フィードバックをかけると、比例ゲイン H の値が大きいと共振周波数近傍で開ループゲイン(HG_1P_iS)が大きくなりすぎ系の応答が不安定になるものと思われる。

そこで、圧電素子の一次共振点付近の開ループゲインを下げるために、ひずみゲージアンプの出力にLPF(ローパスフィルタ)を接続してみた。図7-10にLPFのカットオフ周波数を $f_c = 19.4\text{Hz}$ とした場合の結果を示す。図中の記号1stと500thは500回連続駆動した場合の第1回と500回目の結果を示す。図7はオープンループで駆動した場合の結果、図8, 9および10はそれぞれフィードバックゲインを $H = 4, 10, 20$ とした場合の結果を示す。ゲイン H が大きくなるにつれて線形性が改善されていくことがわかる。オープンループ駆動の結果である図7では500回駆動した後は出力変位は少し下がっており、さらに変位が零まで戻りきらない現象がみられる。フィードバック駆動した場合、ゲイン H を上げると繰り返し駆動による変位の

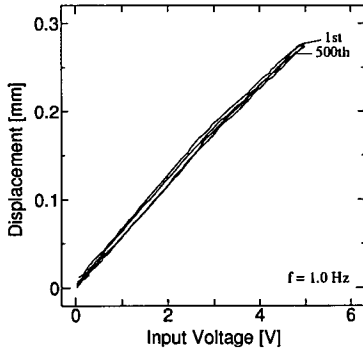


Fig.9 Variation of tip displacement versus input voltage (500 cycles of closed-loop drive with $H = 10$ and LPF($f_c=19.4\text{Hz}$)).

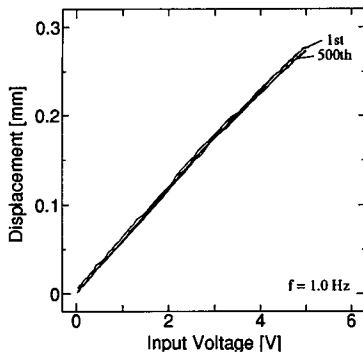


Fig.10 Variation of tip displacement versus input voltage (500 cycles of closed loop drive with $H = 20$ and LPF($f_c=19.4\text{Hz}$)).

低下や変位が零まで戻りきらない現象も低減されることが分かる。以上よりゲイン H を増加することで圧電素子の長時間駆動時における安定性を改善できることが分かる。

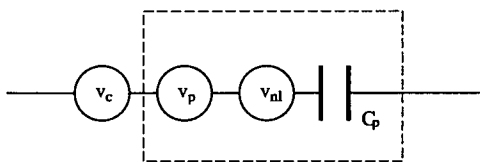


Fig.11 Electric model of nonlinear piezoactuator.

また、LPFのカットオフ周波数による影響を調べたところ、カットオフ周波数 $f_c = 88.4\text{Hz}$ のLPFを用いた場合では入力周波数 $f = 10\text{Hz}$ 以上で、 $f_c = 53.0\text{Hz}$ の場合では $f = 5.0\text{Hz}$ 以上で、 $f_c = 19.4\text{Hz}$ では $f = 2.0\text{Hz}$ 以上で入力電圧に対するひずみゲージアンプ出力電圧の位相ずれが大きくなってしまふことが分かつ

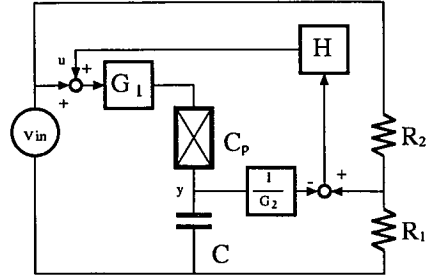


Fig.12 Experimental setup.

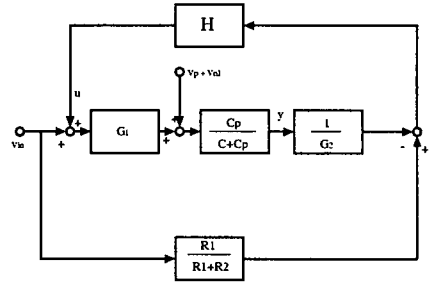


Fig.13 Block diagram of Fig.12

た。よって、実際にこの回路を圧電素子の線形駆動に応用する場合は、LPFによって位相がずれない範囲で使用するか、あるいは位相進み回路を加える必要がある。

以上の結果をまとめると、LPFを用いればゲイン H を上げる余裕をます効果がある一方で、使用できる周波数範囲を狭めてしまう欠点のあることが分かる。従って、使用目的に合わせ LPF のカットオフ周波数 f_c とゲイン H を設定することが必要である。

3. セルフセンシングによる線形駆動法

本節では Dosch[9] らの提案したセルフセンシングテクニックを発展させ、圧電素子の非線形発生電圧 v_{nl} を検出しフィードバックすることで線形駆動を実現する回路を提案し、理論と実験によりその動作特性を調べる。

図 11 に示した圧電素子モデルは、変形する圧電素子の発生電圧を線形成分 v_p と非線形成分 v_{nl} に分けて示したものである。その発生電圧を検出し線形駆動する回路の概略図を図 12 に示す。図中、圧電素子 C_p 、コンデンサ C 、抵抗器 R_1 、 R_2 の 4 個の部品によって素子のひずみにより発生する応力を検出するブリッジ回路が形成されている。ここで C_p は圧電素子をコンデンサとみなした場合の静電容量である。

本回路は、ブリッジにより検出した信号に比例ゲイ

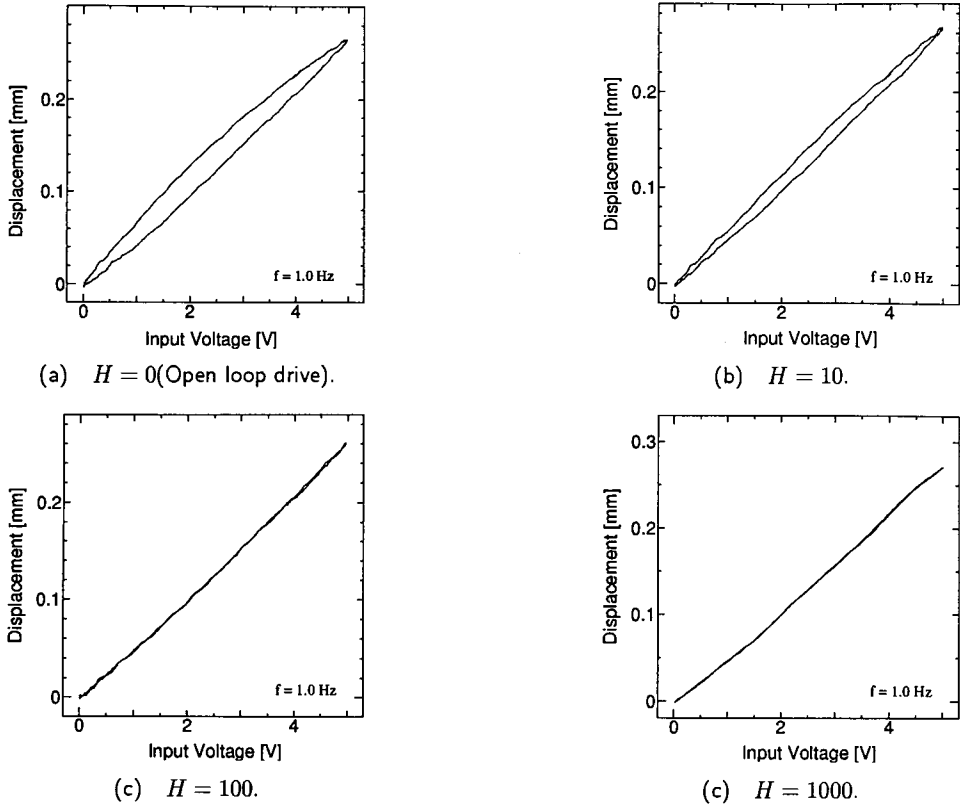


Fig.14 Variation of tip displacement versus input voltage with self-sensing feedback control.

ン H をかけた後入力信号 v_{in} に加算し、さらにゲイン G_1 の線形パワーアンプを経由して、圧電素子に印加駆動する仕組みとなっている。一方、抵抗器 R_1 、 R_2 には直接入力信号 v_{in} しか印加されていないことと、線形パワーアンプのゲイン G_1 は圧電素子 C_p とコンデンサ C にしかかかっていないことより、ブリッジ回路のバランスをとる目的でゲイン $1/G_2$ を挿入した。

図 12 の回路をブロック図へ書き直したものを図 13 に示す。図より圧電素子-コンデンサ間の電圧 Y およびフィードバックされる制御量 U は

$$Y = \{(V_{in} + U)G_1 + V_p + V_{nl}\} \frac{C_p}{C + C_p} \dots (2)$$

$$U = \left\{ \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in} - \frac{1}{G_2} Y \right\} H \dots (3)$$

と求まる。フィードバックされる制御量 U は、式(2)を式(3)に代入し

$$U = \frac{R_1/(R_1 + R_2) - G_1 C_p / G_2 (C + C_p)}{1/H + G_1 C_p / G_2 (C + C_p)} V_{in}$$

$$- \frac{C_p / G_2 (C + C_p)}{1/H + G_1 C_p / G_2 (C + C_p)} (V_p + V_{nl}) \quad (4)$$

$$Y = \frac{1/H + R_1/(R_1 + R_2)}{(C + C_p)/C_p H + G_1/G_2} G_1 V_{in} + \frac{1}{(C + C_p)/C_p + H G_1/G_2} (V_p + V_{nl}) \cdot (5)$$

式(4)と(5)の第一項目は入力電圧による項、第二項目は応力に比例した電圧と非線形発生電圧による項である。 H を十分大きくとると

$$U = \frac{G_2 C + C_p}{G_1 C_p} \left\{ \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{G_1 C_p}{G_2 C + C_p} \right\} V_{in} - \frac{1}{G_1} (V_p + V_{nl})$$

$$Y = \frac{R_1}{R_1 + R_2} G_2 V_{in} \dots (6)$$

y は入力信号 v_{in} に対して線形になることが分かる。さらに、式(6)において

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{G_1 C_p}{G_2 C + C_p} = 0 \dots (7)$$

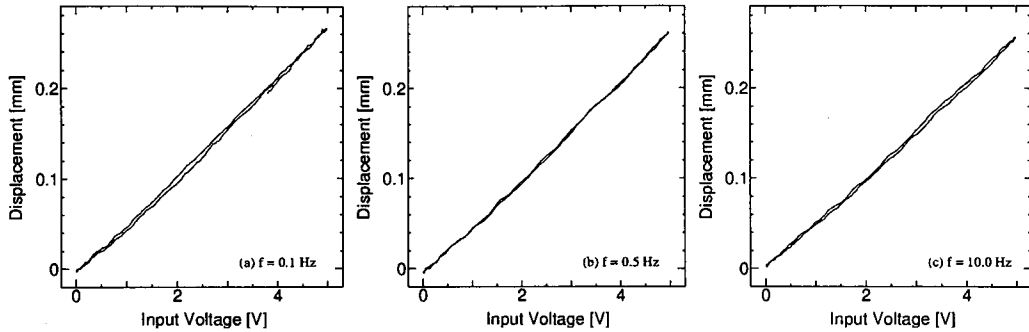


Fig.15 Variation of tip displacement versus input voltage for a change of excitation frequency (self-sensing feedback control with $H = 100$).

となるよう各定数を選ぶと

$$U = -\frac{1}{G_1}(V_p + V_{nl}) \dots \dots \dots (8)$$

となる。式(8)は、ゲイン H を十分大きく設定しさらに式(7)の条件を満たせば、圧電素子の変形で発生する電圧を分離、測定できることを示している。本実験では以下の関係を用いることとする。

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{C_p}{C + C_p}$$

$$G_1 = G_2 \dots \dots \dots (9)$$

実験では、図12に示した圧電素子駆動用の線形アンプのゲイン G_1 を10倍に固定し、式(9)の条件を満たすよう $G_2 = 10$ とした。圧電素子の静電容量は実測より $C_p = 1.55 \times 10^{-6} \text{F}$ であった。また、コンデンサの容量 C を C_p の約10倍の $C = 22 \times 10^{-6} \text{F}$ とし、 R_1 および R_2 は式(9)の条件に合致するよう $R_1 = 1.32 \times 10^3 \Omega$ 、 $R_2 = 1.87 \times 10^4 \Omega$ と設定した。

以下、ゲイン H を10、100、1000と変化させた場合の圧電素子の入力電圧-出力変位の関係を求める。入力信号 v_{in} として $5V_{p-p}$ の正電圧の正弦波を用いる。フィードバックをかけない ($H = 0$) 場合の結果を図14(a)に、またセルフセンシングによるフィードバックをかけた場合の結果を図14(b)-(d)に示す。

オープンループ駆動(図a)の場合に比べ、フィードバックをかけた場合の結果(図b-c)はすべての駆動周波数の領域でより線形に駆動され、ヒステリシスが小さくなっていることが分かる。ゲイン H が10倍の場合ではヒステリシスが残り、明らかにゲイン不足であるが、ゲイン H が100倍、1000倍と大きくなるに従いほぼ線形に駆動されることが分かる。

また、図15に、セルフセンシング駆動アンプを導入し駆動周波数を変化させた場合の結果を示す。フィー

ドバックゲインは $H = 100$ としている。図より、周波数の変動に関わらず圧電素子は線形に駆動されていることが分かる。

圧電素子を500回連続駆動したときの出力応答の変化を図16に示す。図(a)はフィードバックをかけない場合の結果、図(b)-(d)はフィードバックをかけた場合の結果を示す。オープンループ駆動およびフィードバック駆動いずれの方法でも、駆動回数を重ねるに従い素子の出力変位が低下していくことが観察された。図(b)-(d)を比べると、ゲイン H が大きくなるに従いこの低下幅も大きくなっていくことが分かる。この変位ドリフトは、使用した圧電素子とコンデンサが純粋なコンデンサでないため、それらに含まれる抵抗成分を通じて電流が漏れることが原因と思われる。ゲイン H が大きいほどその影響も大きくなっている。さらに、 $H = 100, 1000$ のときには駆動回数が増すに従いヒステリシスが再びあらわれるようになっている。これは、漏れ電流によって圧電素子とコンデンサからなるブリッジ回路の電圧バランスが崩れてしまったためと考えられる。

上記に鑑み、今後はセルフセンシングによる線形駆動の改良を目指して、圧電素子とバランスコンデンサ回路の漏れ電流を軽減する方策を考えていきたい。

4. 結 言

バイモルフ型圧電素子にひずみゲージを直接はりつけその信号をフィードバックする回路、および圧電素子の変形により発生する電圧を検出するセルフセンシングフィードバック回路を試作し、素子の線形駆動を試みた。得られた結果を要約すると以下ようになる。

1. ひずみゲージによるフィードバック駆動制御回路を用いることにより圧電素子のヒステリシス特性

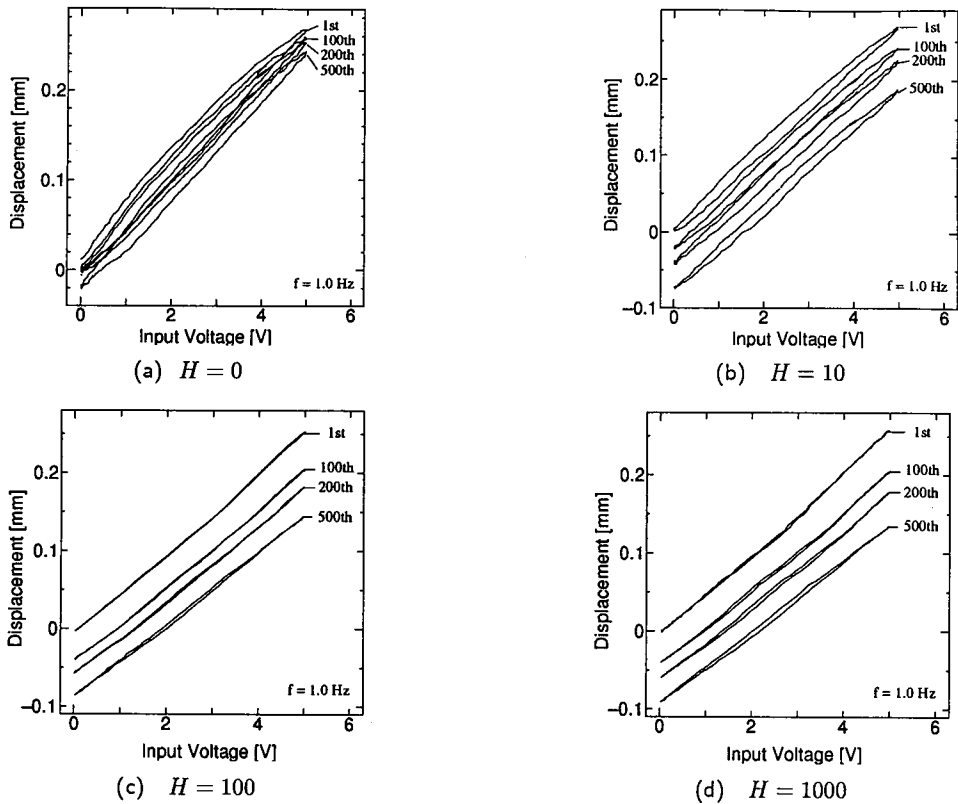


Fig.16 Variations of tip displacement versus input voltage (500 cycles of self-sensing feedback control).

を改善することができる。この場合、フィードバックゲイン H が大きいほどよりよい効果が得られるが、大きなフィードバックゲイン H を得るにはローパスフィルター(LPF)を導入する必要がある。LPF のカットオフ周波数 f_c を低くするとより大きなゲインを設定できるようになるが、使用可能な周波数帯域を狭くするという欠点を生じる。

2. 素子自身の変形により発生する電圧をフィードバックするセルフセンシング線形駆動方法を提案した。本方法をもとに制作した駆動回路は、回路構成が簡単でありかつ線形駆動特性もよい。しかしながら漏れ電流の影響が残るため、長時間使用の際には漏れ電流の影響を補償する回路を導入が必要である。

文 献

(1) K.Nakamura,K.Yamada,Ferroelectric Domain Inversion in LiNbO₃ and Its Application to High-Precision Piezoelectric Actuators., MRS Fall Meeting Symposium Proceedings,1994.
 (2) 岡崎裕一、圧電素子を用いた微小変位工具台、精密工学

会誌, Vol. 54, No. 7, 1988, pp. 1375-1380.
 (3) 三矢保永、大島康司、青野 肇、野々垣剛、歪みゲージ出力のフィードバックによるピエゾアクチュエータの広範囲線形駆動、日本機械学会 第72期全国大学講演論文集、IV, 1994, pp. 709-711.
 (4) 池辺、田中：油圧と空気圧3、78(1972).
 (5) H.Kaizuka and B.Siu, A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 27, No. 5, 1988, pp. 773-776.
 (6) C.V.Newcomb and I.Flinn, Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuator, Electronics Lett., Vol 18, 1982, pp.442-444.
 (7) 小池 誠、斉藤昭則、石川友二、友田晃利、積層型圧電アクチュエータの作動解析、第5回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集、1993,pp. 376-381.
 (8) 江 鐘偉、長南征二、山本 崇、布田良明、圧電アクチュエータの線形駆動、日本機械学会論文集C編、Vol. 60, No. 580, 1995, pp. 189-196.
 (9) Jeffrey J.Dosch and Daniel J.Inman, A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control, J. of Intell. Mater. Syst. and Struct., Vol. 3, 1992, pp. 167-184.