積層 PZT 素子を用いた超高速電気油圧サーボ弁* (ソフトウェアによるヒステリシス特性補償)

横 田 真 一^{*1}, 平 本 健 一^{*2}

An Ultra High-Speed Electrohydraulic Servo Valve by Making Use of a Multilayered Piezoelectric Device (PZT) (Compensation of the Hysteresis by Introducing a Software Algorithm)

Shinichi YOKOTA and Kenichirou HIRAMOTO

In a high-speed electrohydraulic servo control system, servo valves are mainly used to drive actuators, and the limit of the response of the system is dependent on the servo valves. The aim of this study is to develop an ultra high-speed servo valve with the spool displacement of 30 micrometers and the bandwidth over 5kHz. Piezoelectric devices have the potential to drive valves in quick response. However, as is well known, the devices have the disadvantage of hysteresis between applied voltage and output force. In this study, commercially available multilayered piezoelectric devices, are used to drive the spool of the valve directly. The hysteresis is removed by introducing an inverse hysteresis element implemented on microcomputers and operated in real time. In this case, we developed an element to operate at the sampling frequency of 50kHz. In addition, we develop a method to drive piezoelectric ceramic devices at high speed, and improve damping characteristics of the spool valve. As a result, a servo valve with the bandwidth over 5kHz is successfully developed.

Key Words: Fluid Power Systems, Electrohydraulic, Servo Valve, Piezoelement, Inverse Hysteresis

1. ま え が き

電気油圧制御は高速応答、大出力の要求されるパワーメカトロニクスの分野に広く用いられている。ここでは主としてサーボ弁がアクチュエータ駆動に用いられサーボ弁の応答性の限界が制御システムの応答性の限界になってきており、より高速のサーボ弁の開発が望まれている。これに関する従来の研究として、ムービングコイル形の直動タイプで 1 kHz 程度のバンド幅のサーボ弁が実用化されている。また試作的には大内らの電圧素子を用いた 2 kHz 程度のバンド幅を持つサーボ弁がある⁽¹⁾。本研究では駆動部に積層圧電素子を用い、従来のサーボ弁の応答性を大幅に上回る、バンド幅 5 kHz を超える直動形高速サーボ弁(弁変位 30 μm)を試作することを目的としている。

2. 積層 PZT 素子の特性とサーボ弁駆動への応用

ここでは、弁の高速化、高応答化のために積層 PZT 素子によりスプールを直接駆動する方式を試みてい

る。この方式は著者らによりすでにデジタル弁に使用して、高い応答性を得ている⁽²⁾⁽³⁾。

本研究で使用した積層 PZT 素子は圧電素子の一つである、ジルコン酸チタン酸鉛を主成分とするセラミックスを、薄い層状に成形し、はり合せたもので、一つの素子で 100 V 印加時に無負荷で 15 μm 変位する。素子の容量は約 1.6 μF である、また素子の剛性は $5.7 \times 10^7 \text{ N/m}$ と高く、100 V 印加時に変位しない状態で出する力は 850 N である。PZT 素子の先端につけた金属片(1 g)を含めたときの機械的共振周波数は約 25 kHz と算出され、この値は著者により実験的にも

図 1 積層 PZT 素子静特性

* 平成元年 11 月 17 日、秋季油圧用講演会において講演、原稿受付、平成 2 年 5 月 11 日。

*¹ 正員、東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町 4259)。

*² コニカ(株) (〒191 日野市さくら町 1)。

確認されている⁽²⁾。ここではこの素子を片側に二つ直列につないで合計四つ用いている。

図1に、使用した積層PZT素子の入力電圧を0～100 Vと変化させたときの入力電圧と出力(変位)間の静特性の測定結果を示す。約15%程度のヒステリシスがみられる。このヒステリシスにより波形はひずみ、位相ずれ(遅れ)をともない、また振幅依存性が生じる。

積層PZT素子を弁の駆動に用いる際、これまでのデジタル弁への応用では素子をオンオフ的に使用するため、ヒステリシスは問題にならない。しかし高い応答性を目指して積層PZT素子をサーボ弁の直動部として用いる場合に、スプールを比例的に駆動するには、このヒステリシスを除去することが望ましい。

このために、図2のように逆ヒステリシス要素をディジタルコンピュータ上にソフトウェアで実現し、入力をあらかじめこの要素を通してから積層PZT素子に加えることによりPZT素子のヒステリシスを除去することを試みている。

3. 実時間高速逆ヒステリシス要素(IHE)の試作

ここでは積層PZT素子のヒステリシスと逆の特性を持つ逆ヒステリシス要素を、高速化が必要になることも考慮して、つぎのようにして得ることを試みた。

図2 PZT素子のヒステリシス除去原理

図3 逆ヒステリシス要素の構成手順

(1) PZT素子の動きを実験によりこまかく調べる。

(2) この結果をもとにヒステリシスのモデルをソフトウェアで実現する。

(3) このモデルの逆関数、つまり入力を出力、出力を入力に置き換えた逆特性モデルをつくる。

ここでは実験結果の検討に基づきヒステリシスのすべての経路をつぎのような経路で代表させた。ヒステリシスを図3に示すように、PZT素子の0～100 Vの静特性における電圧増加、減少時の各包絡線をそれぞれC₁, C₂として、

(1) 経路C₁上の各点から電圧を0 Vへ降下時の

(a)

(b)

図4 試作した逆ヒステリシスマップ

図5 逆ヒステリシス出力の決定

各経路。

(2) 経路 C_2 上の各点から電圧を 100 V へ上昇時の各経路で代表し、ヒステリシスを (V_{in}, X) (ここで X は PZT 素子の変位量) 座標上の場所の関数であると近似してモデル化を行い、入出力のフルスケールをそれぞれ 6 bit (64) に分割したヒステリシスマップをつくり、それをもとに逆ヒステリシスマップを得ている。

図 4 に作成した逆ヒステリシスマップを示す。ヒステリシスは入力が増加するときと減少するときでは異なる経路をとる要素であるため、そのことに対応して逆ヒステリシスマップも、電圧が増加したときに参照するマップと減少したときに参照するマップの二つが必要となる。図 4 中 V_{in} は入力電圧、 V_{in}^* は逆ヒステリシス通過後の出力電圧である。図 4 (a) に示したマップは電圧が増加したときに参照するマップであり、図 4 (b) は電圧が減少したとき参照するマップである。

逆ヒステリシスマップによるつぎの時点の出力決定は、図 5 に示すように、つぎのように前回の推定値と今回サンプリングにより得られた入力電圧値を用いて行う。デジタルコンピュータのメモリ上に記憶させておいた前回のマップ上の位置 (V_{in1} , V_{in1}^*) から出発して、 X 座標が今回サンプリングしてきた入力電圧 (V_{in2}) に達するまで、逆ヒステリシスマップをたどることにより、今回あるべきマップ上の位置 (V_{in2} , V_{in2}^*) の Y 座標として今回の推定値が出力される。

この処理はサンプリング周波数の低下および演算によるむだ時間の増加による弁の応答の高速性の低下を避けるために、できるだけ高速に行う必要がある。そのため、ここでは、マップ上における以上の可能な組合せすべてについてのテーブルをあらかじめ計算しておき、制御に用いるつぎの方法を採用した。図 6 のように逆ヒステリシスマップの入力が n 分割されており、マップ上の点が m 個存在すると仮定しておく。現在位置を P とすると、この状態からつぎにサンプリングされた入力によって移る可能性のある点 Q は、電圧

図 6 逆ヒステリシス要素

の上昇、下降に関係なく、 n とおりである。したがって、すべてのマップ上の点に対しては、 $m \times n$ とおりである。現在マップの全点数 m_p は $m_p = 445$ であり、入出力は 6 bit であるから、 $n_p = 64$ 、したがって、マップ上のある点からつぎの点に行く可能性は全部で $m_p \times n_p = 28480$ である。この 28480 とおり一つ一つについて、出力は一つだけきまるので、マップの 1 点 1 点に番号 n_{hys} をつけておき、

(入力, 前回の番号) $\rightarrow$ (つぎの番号)

(番号) $\rightarrow$ (出力)

という二つのテーブルを用意しておけば、マップ上の前回の位置と今回サンプリングされ、取り込まれた入力データから瞬時に出力を決定することができる。

(a) ヒステリシス除去効果(正弦波入力)

(b) ヒステリシス除去効果(正弦波入力)

(c) ヒステリシス除去効果(静特性)

図 7

この方法により、計算時間を大幅に改善することができ、さらにアセンブラでプログラムを記述することにより可能な限りメモリアクセスタイムを減らした。またA-D、D-Aに関してもなるべく高速の5 μ sサンプリングが可能なA-Dボードを使用することにより、PC 9801上で50 kHz(周期20 μ s)のサンプリング周波数で実時間で動くシステムを実現できた。このときデータとりこみからA-D、D-Aを介して逆ヒステリシス出力までに要する時間はA-Dにともなう遅れがあるため、約35 μ sである。A-Dにより高速の1 μ s程度のもを用いればさらに20 μ s程度まで向上させることが可能である。

試作した逆ヒステリシス要素の妥当性を入力電圧に対する素子の変位により検討した。測定波形例を図7に示す。図7(a)、(b)はそれぞれ入力振幅が異なる正弦波を入力した場合の結果である。印加バイアス電圧は50 Vに設定している。図7(a)、(b)において左側に逆ヒステリシス要素がない場合の入力と変位、右側に逆ヒステリシス要素を付加した場合の入力と変位を示す。また図7(c)は静特性を調べた結果である。逆ヒステリシス要素を付加することで、各入力に対しヒステリシスによる非線形性が十分に除去されていることがわかる。

4. 高速サーボ弁の設計

4.1 PZT素子高速駆動回路 弁を高速で駆動するために、PZT素子印加電圧を高速で駆動する必要がある。PZT素子の機械的な共振周波数が高いため、駆動回路の動特性がPZT素子の応答性を左右する。ここで試作した回路を図8に示す。PZT素子の高速充放電の妨げになる出力インピーダンスがアクティブに制御できるためPZT素子の充放電を高速に行うことを可能にした。図9に容量負荷としてPZT素子を電氣的に2個並列につないだときの入力 V_{in} に対するPZT素子両端間電圧 V_p の周波数特性を示す。測定範囲におけるゲインの低下、位相ずれはわずかであり、試作した回路がPZT素子の高速充放電に適していることがわかる。

4.2 高速サーボ弁の構造 工作精度が出しにくいスリーブに関してはここでは東京精密測器のはん用サーボ弁(3 F-60 L)の2段めのスプール弁のスリーブをそのまま用いている。試作したサーボ弁の概略を図10に示す。スプールの径は8 mmで、質量は 9.5×10^{-3} kgである。スプールの左右に積層PZT素子がそれぞれ直列に2個ずつ配置されており、これらの素子にバイアス電圧をかけた状態で逆位相の電圧信号を加

えることによりスプールを駆動する。ここでPZT素子間、およびPZT素子と台座との接着には剛性を増すためにエポキシ樹脂系接着剤にアルミナ粉を加えたものを用いた。またスプールのなどの変位の計測には磁気抵抗素子を用いている。弁開度は最大30 μ mであり、このとき供給圧を6.9 MPaとすれば5.0 L/min (84 cm³/s)の流量が得られる。

図8 PZT素子高速駆動回路

図9 PZT素子高速駆動回路周波数特性

図10 超高速サーボ弁概略

図11 スプール変位記録波形例

スプールは左右の PZT 駆動部と鋼球を介してつながっており、位置の微調整と予圧縮量の調整はその両側に取付けられたマイクロメータヘッドにより行えるようになっている。左右の PZT 素子およびスプールにかけている予圧縮量については、実験結果に基づき $20\text{ }\mu\text{m}$ に設定している。

逆ヒステリシス要素を付加しない場合と付加した場合の弁の特性を図 11 に示す。入力を三角波に正弦波を重ねさせた波形とすることで、正弦波入力に対してバイアス電圧が変化していく場合のヒステリシス除去の効果を調べたものであるが、素子の静特性の場合とまったく同様にヒステリシスの影響を取り除くことができることがわかる。

5. 弁の動特性と応答性の改善

5.1 スプール弁変位のステップ応答 図 12 は PZT 駆動部に 30 V のステップを印加したときのスプール変位記録結果である。共振周波数は約 8.6 kHz で立上りは速いが、減衰特性が悪く、振動的な応答になっていることがわかる。これは PZT 素子を用いたときの一般的な問題でもある。応答をすみやかに整定するような手段としては、速度をフィードバックすることが考えられる。しかしこのシステムには図 13 に示すように PZT 素子のヒステリシスや、アンプの遅れが存在する。このことはあとに示す周波数特性によくあらわれており、本研究で扱うシステムの周波数特性は二次系に比べると、ゲインの低下に比べ位相の遅れが大きくなっている。そのため、オブザーバなどで

図 12 スプール変位のステップ応答 (30 V)

図 13 システムのブロック線図

得られるそのままの速度をフィードバックしても有効な制御結果が得られるとは限らない。

系の減衰特性改善方法として、ここでは、(1)オブザーバにより推定した速度を用いた速度フィードバックによる、(2)ステップ応答から近似的に得た二次系を構築してその速度をもとのシステムにフィードフォワードして、減衰特性を改善する、の二つの方法を試みた。この結果について述べる。

5.2 オブザーバによる速度の推定 弁の速度推定を行うためのオブザーバの構成を図 14 に示す。図 14 のように、PZT 素子の発生力-変位の関係を二次系で近似してオブザーバを設計した。共振周波数、減衰比については、さきに示したステップ応答から、それぞれ $f_c = 8.6\text{ kHz}$, $\zeta = 0.22$ とした。フィードバックゲイン K_1, K_2 を $K_1 = 1 \times 10^6$, $K_2 = 2 \times 10^8$ と設定したとき、ここには示さないが X と $\hat{X}$ はその波形を重ねると判別できない程度によく一致した。

5.3 擬似速度信号フィードフォワード ステップ応答から近似的に得た二次系の速度(擬似速度)を図 15 のように、もとのシステムにフィードフォワードして、減衰特性を改善する方法を以下では擬似速度フィードフォワード法と呼ぶことにする。この方法では、真の速度を位相を進ませてフィードバックするのに近い効果が得られるため、結果としてさきに述べた遅れ要素を補償する形になる。

5.4 実験結果 図 16 はさきと同様、PZT 駆動

図 14 システムおよびオブザーバのブロック線図

図 15 擬似速度フィードバックのブロック線図

図 16 スプール変位のステップ応答

部に 30 V のステップを印加したときのスプール変位記録結果である。1 段めには入力電圧、2 段めには制御なしのときの応答波形を示す。また 3 段めは擬似速度のフィードフォワード量を調整し、最適値に設定したときのスプール変位の応答、4 段めには二次系の線形オブザーバから推定した速度フィードバックしたときの比較的良好な結果を示す。図 16 より擬似速度フィードフォワードにより、高速応答性を損なうことなく減衰性を持たせることができることがわかる。一方速度フィードバックではゲインを上げるとオーバーシュート量は減るものの、アンプの極などをカバーしていないことと位相が非線形要素などにより遅れるため、振動の減衰特性はかえって悪くなる傾向がみられた。

図 17 は入力電圧に対する弁変位の周波数特性である。図 17 中、白丸は逆ヒステリシス要素を付加しない場合、黒丸は逆ヒステリシス要素を付加した場合の結果である。またゲインは逆ヒステリシス要素があるときの 50 Hz における値を 0 dB としている。両者ともゲインは 5 kHz 程度までほぼフラットであるが、逆ヒステリシス要素を加えた場合、ヒステリシスの影響が低減された分、ゲインは上昇しているのがわかる。また逆ヒステリシス要素を加えた場合、低域での位相遅れがなくなるが、500 Hz 以上の周波数域では逆ヒステリシス要素がない場合に比べて位相の遅れが大き

図 17 スプール変位の周波数特性

くなっている。

この位相遅れの差は、サンプリングおよび計算によるむだ時間によるものと考えられる。図 17 において実線はサンプリングおよび計算によるむだ時間の影響の推定結果であり、四角印はこの値と白丸を加え合せたものである。四角印は黒丸の実験結果に近い。

6. あとがき

本研究では積層 PZT 素子を用いた直動形的高速サーボ弁の試作をおこない、積層 PZT 素子のヒステリシス特性をソフトウェアで補償して、またスプールの応答の減衰特性を擬似速度フィードフォワード制御により改善して、そのスプール変位が 5 kHz を超えるバンド幅を持つことを明らかにした。

また、試作した逆ヒステリシス要素は、位相進み的な要素として積極的に応用できる可能性がある。

最後に、日頃ご教示を賜わっている東京工業大学中野和夫教授に深く謝意を表す。またこの研究の一部には(財)メカトロニクス技術高度化財団からの補助を受けたことを記して関係者の方々に謝意を表す。

文 献

- (1) Ohuchi, H., ほか 3 名, High-Speed Electro-Hydraulic Servo-Valves Using Electrostrictive Ceramic PMN Actuators, *Proc. FLUCOME*, Tokyo, (1985), 415.
- (2) 横田・平本・上西, 積層 PZT 素子を用いたデジタル電気油圧変換器, *油圧と空気圧*, 20・7(1989), 50-56.
- (3) 横田・雄, 高速デジタル電気油圧変換器に関する研究, *機論*, 56-524, B(1990), 1167-1172.
- (4) 桑野, オブザーバ理論による直動型サーボ弁の高性能化, *油圧と空気圧*, 15-2(1985), 102.
- (5) 内野, 圧電・電圧アクチュエータ(1986), 森北出版.
- (6) 布田, 積層型圧電アクチュエータ, *日本機械学会 66 期通電総会資料集「D」*, 364(1989).