研 究

高応答電磁弁を使った空気圧シリンダの高精度位置決め*

小 山 紀**, 原 田 正 一**
井 田 良 博***, 吉 田 寿****

High Accuracy Positioning of Pneumatic Cylinder Using High Response Solenoid Valve

Osamu OYAMA, Masakazu HARADA
Yoshihiro IDA, Hisasi YOSIDA

The high accuracy position servo system of pneumatic cylinder is already reported by using a diaphragm-type electro-pneumatic converter. In this paper, a novel simple high accuracy position servo system are shown by using high response solenoid valves. The actuating part consists only of two valves and a cylinder. The valves open or close by a pulsating signal and charge the air to the cylinder or discharge from the cylinder directly. The pulse time duration and interval change with position of piston and this is not same as the conventional PWM method. To realize high accuracy piston displacement, the interval becomes as short as 0.005 s when the piston approaches near by the desired point.

The characteristics of this servo system are given by using a system model, and the relationship between stability of the piston displacement and valve opening duration can be shown theoretically. The single rod-type cylinder with 40 mm bore and 100 mm stroke is tested experimentally. As a result of repeated positioning test, it was shown that the piston keeps moving slightly at the desired point but it is able to position within 0.01 mm to the point.

1. 結 言

空気式アクチュエータは、長い間高精度制御はできないものと考えられてきたが、著者らは既に膜形電空変換器を使って高精度位置決めを実現している¹⁾。また最近、高精度制御の試みがさかんに行われるようになり、空気式アクチュエータを高度な自動機に利用する道が開かれてきている。しかしこれらの多くは比例制御弁と組合わせて行われているため、軽量安価という特性が損なわれる可能性が指摘される。また比例制御弁自体もまだ開発過程にある。本報では小型の電磁弁を使った位置サーボ機構を提案する。電磁弁を使った位置決めや速度制御機構に花房²⁾や則次^{3,4)}のものがある。ここでは空気圧シリンダへの給気および排気

を高応答の電磁弁で直接制御する方式で、良好な位置決め性能が示されたので報告する。これは2個の2ポート弁を使ったもので(5ポート弁を使えば1個でよい)、きわめて簡便な構造となっている。

2. 実験装置および理論

高応答電磁弁を使った位置サーボ機構の概略図をFig. 1に示す。空気圧シリンダの一方には一定圧力 P_c を加えて、単動式にしている。ピストンは伸長時にはAの弁を、収縮時にはBの弁を開くことにより、目標位置に位置決めされる。このとき弁は可変周期の短いパルスにより駆動されている。一周期で一回の弁開および弁閉が行われるが、A、Bの弁開および弁閉時間 T_{ao} , T_{bo} と T_{ac} , T_{bc} はそれぞれ次のようにする。

$$y \leq Y_d \text{ の時 } \begin{aligned} T_{ao} &= Kva(Y_d - y) \\ T_{ac} &= \text{一定} \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$y > Y_d \text{ の時 } \begin{aligned} T_{bo} &= Kvb(y - Y_d) \\ T_{bc} &= \text{一定} \end{aligned} \quad (1.2)$$

ここで Y_d , y はそれぞれ目標位置およびサンプル時位置である。 T_{ac} , T_{bc} は10msを超えない程度で、位置の

*昭和63年10月31日 原稿受付

**明治大学

***横河電機

****東芝

(所在地 〒214 川崎市多摩区東三田1-1-1)

Fig. 1 Experimental pneumatic servo system

サンプルはこの間におこなう。\$T_{ao}\$、\$T_{bo}\$が100msを超えるときは100msを与える。したがってこの方式では通常のパルス幅変調方式(PWM方式)と異なりピストン位置によりサンプル周期が変わり、目標位置近傍で最も短くなる。位置決め場所で可能な限り位置の検査の頻度を高くして高精度化を計ると同時に、弁通過の空気流量が多く必要な時には弁開放を十分長いパルスで行い、弁動作が確実に行われるようにしたものである。比例制御弁の弁開度の効果を弁開時間に置換えているともいえるが、比例制御と同様の効果があることを理論により確認する。

この系を状態変数を使ったモデルで表せば、Aの弁の開放時は次のように近似できる。

$$\dot{x} = Ax + B[Ps \ Pc \ F \ W]^T \quad (2)$$

$$y = [1 \ 0 \ 0]x \quad (3)$$

ここで

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{M} & \frac{A_1}{M} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{A_2}{M} & -\frac{SGN(\dot{y})}{M} & -\frac{1}{M} \\ \frac{1}{RC} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \frac{V_0 + A_1 y}{1.4(p + Pa)}$$

ただし\$A_1\$、\$A_2\$はピストン受圧面積、\$D\$は粘性摩擦係数、\$F\$はクーロン摩擦力、\$M\$は可動部質量、\$W\$は荷重である。\$Ps\$は電磁弁の供給圧で\$B\$の弁開放時は零とする。\$Pa\$は大気圧、\$Pc\$はロッド側一定圧、\$p\$はヘッド側圧力、\$R\$は実験から求める弁の抵抗であり\$V_0\$は配管の容積である。したがって\$C\$はシリンダと配管によるキャパシタンスである。\$R\$と\$C\$は圧力とピストン位置により変わるため時変システムとなるが、それぞれサンプル時の値を用いる。つぎに弁閉鎖時は次のようになる。

$$\dot{x} = Ax + B[p \ Pc \ F \ W]^T \quad (4)$$

$$y = [1 \ 0]x \quad (5)$$

ここで

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{D}{M} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{A_1}{M} & \frac{A_2}{M} & -\frac{SGN(\dot{y})}{M} & -\frac{1}{M} \end{bmatrix}$$

これらの式では弁開あるいは弁閉中のピストン移動による圧力変化は、時間が短いので移動距離も少ないと考え無視している。サンプル間隔が一定であればこれらの式を離散化して応答を計算できるが、前述のように位置により異なるので推移行列\$\exp(At)\$を使って弁動作毎に計算した。すなわち弁開時間はサンプル時の\$y\$により(1)式から求められるので、次のサンプルまでの\$x\$の推移が計算できる。これを繰返すことによりピストン移動をシミュレートした。また弁動作のむだ時間や弁開時間に対する通過量の非直線性などは、弁の特性に関する実験結果を使って\$T_{ao}\$、\$T_{bo}\$を補正して計算に用いた。

3. 実験および結果

弁を通過する流量波形は完全なステップ状にならないが、各弁開時間および圧力差毎の通過量から、この間の実効抵抗\$R\$の値を求める。供試電磁弁の特性をFig. 2に示す。横軸に弁開時間、縦軸にそのときの通過空気量を示す。ただし一回のみの動作での空気量を測定することは困難なので、おなじ幅のパルスで繰返して開閉させて、その結果から弁開時間あたりの平均通過空気量を求めた。この電磁弁はポペット弁を使用した試作品で毎秒300回程度までの開閉動作が可能で、かなり応答の速いものであり高応答電磁弁と称す。0.3ms程度の弁開時間で動作を開始して、以後の通過量は弁開時間の増加にほぼ比例している。ただし弁開

Fig. 2 Relation between valve opening duration and air volume through the valve

時間の非常に短いときの通過量は開閉毎にばらつくものと思われる。シリンダ入口で熱線流速計により観測された弁動作のむだ時間は約1.5msであった。

使用したシリンダは内径40mm、行程100mmで上下方向に動作させた。シールを交換してやや低摩擦化を計ったが、その実測結果は市販の同型のものとはあまり変わらなかった。 D 、 F および M の実測結果はそれぞれ1362Ns/m、0.49Nおよび0.4kgであった。後述の理由で P_s 、 P_c を比較的低い圧力として、このピストンを約50mmの場所に位置決めしたときの計算結果をFig. 3に示す。まず荷重なし、したがってピストン自重および測定部重量のみが加わる場合の例を示す。初期条件としてピストンはスロークエンド ($y=0$ mm) にあり、このときの p は大気圧であるものとした。約1s程度で位置決めされるが、弁開時間を決める K_v が小さいときは大きくオーバーシュートして、整定までに時間がかかる。これは K_v が小さいと均り合点付近で弁通過流量が制限される結果、シリンダ内圧力が応答遅れを起こすためである。 K_v を3s/m以上とすると行き過ぎ量は1.5

mm程度になる。 K_v をさらに変えても行き過ぎ量は、シミュレーションではこれより小さくはならなかった。 $K_v=5.7$ s/mは実際の実験を行ったときの条件であるが、実際の方が安定的であり、白丸に示す実験結果ではオーバーシュートはほとんど観測されない。これは停止直前で摩擦力が移動中より大きくなるためと考えられる。他のところは両者は比較的良好に一致している。 K_v をさらに大きくすると、応答は再び振動的になりもっと大きくすると発散する。理論的にオーバーシュートが防げないのは、この方式が流量制御方式であり、他の流量形比例制御弁を使ったシステムと同様に、シリンダ内圧力の応答遅れが避けられないためである。しかしこの問題は流量と、これにより変化するシリンダ内圧力との間に伝達関数があるために発生するものであるから、高次の状態量をフィードバックさせて、いわゆる極配置を行うことで解決できると考えている。 K_v を変えても計算では立ち上がり速度が変わらないのは、ピストン移動による圧力変化を無視したためと思われる。黒丸はPWM方式でほぼ同様のパラメータを用いて位置決めを行ったものである。PWM方式での最適化等についての検討はしていないため一概には判断できないが、本制御方式の方が整定が速いことがわかった。

供給圧力が低いいためあまり大きな荷重は与えられないが、質量荷重2kgを与えたときの結果をFig. 4に示す。この場合位置決めには約2s程度を要したが、その他は荷重のない場合とほぼ同様の結果となった。これらの実験結果によると立ち上がり速度はピストン位置によらず一定となり、粘性摩擦力により制限されているのがわかる。したがってさらに速く位置決めしたり、重荷重を扱うにはより高い圧力を与えなくてはならない。

Fig. 3 Step response with no load

Fig. 4 Step response with 2kg load

Fig. 5 Sample time interval changes

Fig. 6 Step response when high pressure exited

Fig. 5にFig. 4の場合のサンプリング周期を計算結果により示す。場所および条件により変わり、位置決め場所ではほぼ一定値（この場合では0.005s）になる。

Fig. 6には P_s を686kPa、 P_c を294kPaとそれぞれ高くしたシミュレーション結果を示す。一点鎖線で示す $K_v=0.57$ s/m程度では整定が遅いがこれ以上大きくしても改善されない。これはピストン移動が速くなるため、 K_v を大きくするとサンプル遅れが問題となるためである。弁の有効断面積が10倍位大きくできれば、図中の実線に示すように0.2s程度の高速位置決めが可能となる。高速でかつ大流量の弁の開発が望まれる。

供試弁は有効断面積が小さいので低圧力で動作させて、同一場所に繰返し位置決めしてその精度を調べた。制御回路は8ビットCPUによるフルソフトウェアサーボとした。位置のフィードバックにはポテンシオメータと12ビットのA/Dコンバータを使った。この量子化量は0.015mmである。ただし測定は光学式リニアエンコーダでおこなった。この量子化量は0.001mmであり、累積誤差はピストン全行程で0.003mm以下となっている。

Fig. 7 Worst (most over and under) position value under positioning

Fig. 8 Distribution of position

本機構は位置決めが完了した後はすべての弁は閉じたままととなり、シリンダへの給排気はおこなわれない筈であるが、弁が時々動作してピストンが細かく動く。この動きを小さくすることもひとつの課題である。Fig. 7に位置決めしたままで数分間放置して、この間測定された最悪値（最も目標位置にたいして行過ぎた位置と手前の位置）を示す。測定は50回行い左から測定順に並べて示している。位置決め後もピストンは約0.02mmの範囲で動いていることになる。この範囲は、フィードバック系の量子化量にほぼ等しい。

Fig. 8に同一場所に50回繰返し位置決めをしたときに、測定された位置のヒストグラムの例を示す。ただし、前述のように位置決め後もピストンは微動するためこの間の最頻値を使う。分布の形は完全な正規分布とはならないが、中央位置付近に高い頻度で分布している。目標位置に対する位置決め精度は、フィードバック系の量子化量の0.015mm程度と考えられるが、以後では位置決め精度の評価は、主として繰返し精度を考

慮してエンコーダで測定された位置の標準偏差でおこなう。この例の場合位置の標準偏差は0.0038mmとなる。この値はポテンショメータとA/Dコンバータによる量子化量よりも小さい。これはコンバータの量子化トリガ点付近に集中して位置決めがおこなわれているためと考えられる。

目標位置に数分間位置決めをしておき、その間に50ms毎に位置を記録し、最悪値と最頻値および標準偏差などを整理したものをTable 1に示す。各同一の条件毎にサーボ機構に十分な休止時間（数時間あるいは数日）をおいて、5回づつの測定を行って再現性を調べた。その結果各位置決め間のピストン位置の標準偏差は数ミクロン程度であり、かなりの時間を経た後でもその位置の平均値あるいは最頻値のずれは最大0.02mm程度であった。ただし室温度等の一定化は行っていない。なるべく同じ条件になるようにしたが、それでも完全に同じでないことを考慮すると、このサーボ機構はかなりの再現性精度を持っていると思われる。

荷重がある場合となない場合では、平均位置が約0.01mm程度異なっている。このサーボ機構は積分機能を本来的に内蔵しているため（圧力差で釣り合うため静的バネを内蔵しないのでこうなる）、理論的には位置に対しては定常偏差なく追従しこれが特長の一つでもあるが、実際はこのように偏差を生じた。Pcが完全に一定ではないか、荷重により停止直前の速度が変わってくるため、ピストンシールの弾性変形やクリープの影響が現れてくるのかもしれない。

弁開時間は先に示されたように、ある範囲では比例

ゲインのような働きをするから定常偏差をなくするために、積分動作の機能を弁の開放時間にもたせることが可能な筈である。このような観点から現在積分動作を加えた系統の実験を行っており、まだ件数は少ないが良好な結果が得られている。

Table 2に300Hzの周期のPWM方式で同様に位置決めした場合の結果を示す。最悪値の範囲や標準偏差の値はさきの場合よりやや大きくなる。さらに荷重にたいする位置の平均値あるいは最頻値の変化もやや大きくなり、今回提案した方式の有用性が確認できた。

このように電磁弁を使った位置サーボ系でも、位置決め後にピストンが微動する欠点があるものの、繰返し精度は比例制御方式と比べ劣ることはなく、構造の簡便さなどの点でむしろ優位であるともいえる。現在このピストンが位置決め後に時々微動する原因について調べているが、もし空気の漏れかノイズの影響による量子化誤差等が原因であれば解決できるものと思われる。

4. 結 言

2個の電磁弁を使ってシリンダの給排気を、直接パルス状に制限する方式の位置サーボ機構を試作した。3ポートあるいは5ポートの弁を使えば1個ですむことになり、これ以上は考えられない程の簡便な構造をしている。また系全体でも簡便な構成となることを目的とし、8ビットCPUを使ったボードコンピュータや、位置センサにポテンショメータを採用した。弁開時間を調節することにより、通過流量を制御する方式

Table 1 Results of positioning accuracy

Ps=147kPa		Pc=98kPa		unit (mm)	
worst value max	min	deviation	mean	median	most frequent
W=0kg					
50.377	50.370	0.0018	50.375	50.374	50.376
50.391	50.380	0.0028	50.387	50.386	50.387
50.389	50.380	0.0021	50.384	50.385	50.385
50.402	50.391	0.0022	50.397	50.397	50.397
50.399	50.386	0.0026	50.394	50.393	50.395
W=2kg					
50.380	50.357	0.0067	50.368	50.369	50.377
50.390	50.351	0.0091	50.372	50.371	50.375
50.377	50.339	0.0080	50.359	50.359	50.357
50.377	50.351	0.0086	50.366	50.364	50.372
50.377	50.351	0.0086	50.366	50.364	50.372

Table 2 Results of positioning accuracy

Ps=147kPa		Pc=98kPa		unit (mm)	
worst value max	min	deviation	mean	median	most frequent
W=0kg					
50.414	50.401	0.0036	50.409	50.408	50.410
50.409	50.392	0.0039	50.405	50.401	50.406
50.414	50.401	0.0039	50.410	50.408	50.412
50.412	50.403	0.0029	50.407	50.408	50.405
50.412	50.405	0.0022	50.410	50.409	50.410
W=2kg					
50.324	50.302	0.0060	50.314	50.313	50.318
50.333	50.303	0.0072	50.321	50.318	50.322
50.327	50.298	0.0072	50.312	50.313	50.317
50.340	50.310	0.0070	50.326	50.325	50.332
50.324	50.299	0.0052	50.317	50.312	50.321

を提案してまず理論によりその有用性を確認した。その結果現在所有する電磁弁では、あまり高い圧力の領域では整定時間の点で使えないことも理論式を使ったシミュレーションによりわかった。したがって比較的圧力を低くして位置決めをおこなった。定点に繰返し位置決めした結果、その標準偏差は0.0038mm程度となり非常に高い繰返し精度をもっているのが示された。これは高応答電磁弁が極めて短いパルス幅で動作し、細かい流量調整が可能であったためと考えられる。このときセンサの量子化量も問題となった。現在ではより高い分解能をもつセンサが使えるが、ポテンシオメータも価格の点で捨てがたい。

以上で示したように、まだいくつかの解決すべき問題点が残されているが、このように簡便な機構でも精度の点では従来の比例制御方式によるものと同等以上であった。空気式の長所は負荷への柔軟性のみが強調されているが、このような簡便な制御入力にも柔軟に応答する良さが確認できた。さらに大流量の扱える電

磁弁が開発されれば、他に提案されている種々のデジタル方式を含めて、一気に実用化が進むものと思う。

なお電磁弁およびシリンダの機材は、黒田精工㈱より供与を受けた。厚くお礼を述べる。

参 考 文 献

- 1) 小山ほか：：電気空気圧サーボ方式によるピストンシリンダの位置決め，油圧と空気圧，16巻－4号，275/280（1985）
- 2) 花房ほか：空気圧シリンダのパルス駆動に関する研究，油圧と空気圧，7巻－3号，336/341（1976）
- 3) 則次：パルス幅変調方式による電気・空気圧サーボ機構の研究，計測自動制御学会論文集，20巻－8号，754/761（1984）
- 4) 則次：オンオフ電磁弁を用いた空気圧モータの速度制御，昭和59年秋期油空圧講演会講演論文集，1/4，（1984）