研 究

電磁弁駆動空気圧シリンダ位置サーボ系の積分補償*

小 山 紀**, 山 口 清**
原 田 正 一**

Integral Compensation on pneumatic Cylinder position Servo System Driven with Solenoid Valve

Osamu OYAMA, Kiyoshi YAMAGUCHI, Masakazu HARADA

In this report, usefulness of seal elasticity for high accuracy positioning in a pneumatic cylinder is shown. When piston moves to desired position, the seal slides and attaches to cylinder wall. If the elastic seal attaches near the desired position, the slight displacement is corrected by its compliance with increasing or decreasing cylinder pressure, before the seal slides again. The slightly displaced operation is suitable for executing a integral compensation to reduce steady positioning error. The usefulness of seal elasticity for intergral compensation to high accuracy positioning is tested in a pneumatic servo system which uses solenoid valves and the valve opening duration is operated by integrating the position error, theoretically and experimentally.

1. 諸 言

空気圧シリンダのシールはゴム等の弾力性のある材質が一般に用いられている。シールは摺動時に剪断力による弾性変形を起こし、位置決めされたピストンの戻りの原因となる。また摺動時の摩擦力も一定ではなく、これらの特性は精密な位置制御にはあまり好ましくないと考えられてきた。しかし定点に対する位置決めにおいて目標位置の近傍で摺動が停止して（この状態を粘着と称することにする）、目標位置がシールの弾性変形によるピストン変位の領域に収まる場合は、摺動摩擦力に起因する困難さを回避することが可能になると考えられ、偏差に応じてシリンダ内圧力の操作をおこなうことにより高精度位置決めが比較的容易となる。空気圧による位置決めに弾性体を利用する試みはあるが¹⁾、空気圧シリンダの弾性特性に着目した研究はまだおこなわれていない。

空気圧シリンダの位置決めに電磁弁を使う方法はいくつかに報告されており²⁾³⁾、著者らも高速応答電磁弁を使ってシリンダの給排気を直接制限する方式の位置決め機構が、非常に高い再現性精度を持つことを明らかにしている⁴⁾。高精度位置決めをおこなう場合、シリ

ダの給排気空気量を精密に操作する必要があり、目標位置近傍では弁の開放時間を限りなく零に近づけなければならない。高速応答の電磁弁でも開放時間には制限があるが、実際に示された位置決め精度は比例制御弁を用いたものに対して同等以上であった。これはシール弾性特性に起因すると考えることが妥当である。すなわち目標位置近傍では電磁弁を通過した空気体積だけピストンが摺動するのではなく、シリンダ内の圧力変化に対応して、シールが弾性変形を起こしピストンが微小移動すると考えられるからである。

一方目標位置近傍では電磁弁の弁開時間が非常になくなるため、電磁弁が動作しない不感帯が生じ定常偏差が残ることがある。定常偏差を減少させるには弁開時間を偏差により積分補償するのが有効である。この場合もシールの弾性特性が有利に作用することを本報で理論および実験により確認する。通常の空気圧シリンダが粘着時に弾性特性を持ち、このシリンダを高速応答電磁弁を使った位置サーボ系に用いたとき、弁の開放時間を偏差の積分値を使って操作すれば定常偏差を低減できる。一方、弾性特性を持たないシリンダを同様に操作したときは目標位置近傍で不安定になり、高精度位置決めが困難であることを示す。

2. 使用記号

A_1A_2 : シリンダのヘッド側, ロッド側有効面積 (m^2)

C : シリンダのキャパシタンス (m^3/Pa)

*平成3年4月19日 原稿受付

**明治大学

(所在地 〒214 川崎市多摩区東三田1-1-1)

- D_s : シールの粘性摩擦係数 (Ns/m)
 $K(y)$: ピストンの力-変位係数 (N/m)
 M : 可動部質量 (kg)
 P_s : 電磁弁の供給圧力 (Pa)
 P_c : ロッド側一定圧力 (Pa)
 R : 電磁弁の流体抵抗 ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)
 W : 負荷外力 (N)
 Y_d : 目標位置 (m)
 $y(i)$: サンプル i 時刻のシリンダ位置 (m)
 y_0 : シール粘着時からのシリンダの変位 (m)

Fig. 1 Scheme of testing set-up of cylinder

Fig. 2 Pressure-displacement characteristics of cylinder "a"

Fig. 3 Pressure-displacement characteristics of cylinder "a"

Fig. 4 Pressure-displacement characteristics of cylinder "b"

Fig. 5 Pressure-displacement characteristics of cylinder "c"

3. シリンダの弾性特性

供試空気圧シリンダは異なった材質のゴム製シールを用いた市販品 a, b と, 比較のため試作したテフロン製シールを用いた c の計 3 種類である. いずれも内径 40mm で行程 100mm の片ロッド形であり, 可動部質量はすべて 0.40kg である.

シール粘着時の圧力変位特性を調べた実験装置を Fig. 1 に示す. 台座に水平に固定したシリンダ内圧力をピストンが摺動を起こさない範囲で変えて, シール変形によるピストンの変位を 0.001mm の分解能を持つ光学式ピックアップで計測した.

Fig. 2 は供試シリンダ a のヘッド側に徐々に圧力を加えてゆき, 再び圧力を下げたときのピストン変位を示している. シール変形の初期条件は行程端より 50mm の位置でロッドを引張ったのち放置したものとした. ロッド側は大気開放しているためピストンが摺動した場合元の方向に戻ることはない. ヘッド側圧力が下がると再び変位が小さくなるので, この領域でヒステ

リシのある非線形弾性特性をもつことがわかる。ピストンが摺動を開始するまでに0.15mm程度変位する。Fig. 3はシリンダaを50mmの位置で押し込んだのち放置し、圧力と変位の関係を調べた結果である。Fig. 2と比較して同じ圧力での変位はやや異なるが、ヒステリシスや圧力変位特性の傾向などは同じである。

Fig. 4は供試シリンダbを50mmの位置でロッドを引張ったのち放置し、以後同様な測定をした結果である。圧力変位特性はaと異なるが、やはり弾性特性をもち、ピストンが摺動を始めるまで1.0mm程度変位する。

テフロン製シールを用いた試作シリンダcを50mmの位置でロッドを押し込んで放置した後、同様の測定をおこなった場合の結果をFig. 5に示す。圧力を下げたときピストン位置は元の方向に戻ることなく、弾性特性のない塑性変位をしている。変位量も最大0.02mm程度とゴム製シールのシリンダと比較して小さく、実験範囲より圧力を高くすると急激に摺動を始めてしまう。

4. 積分補償の理論

実際の位置決め動作ではシールの接触側は摺動と粘着を繰返すと考えられる。粘着時のシールの初期変形量は不明だが、前章で示されたような圧力変位特性曲線上のどこかになると予想される。目標位置で停止したとき弾性特性はピストン戻りの原因となり好ましくないと考えられた。しかし目標位置までの距離が弾性による変位の領域に収まれば、シリンダ内圧力を偏差により積分操作して偏差の除去が可能となる。もし変位の領域に収まらない場合は、積分補償により最大静止摩擦を越えてシールが摺動した後、新たな粘着場所から再び弾性変位がはじまる。弾性変位のない固体摩擦であれば、このような圧力の操作には平衡点がないため、やがてシリンダの行き過ぎの原因となり高精度

位置決めは困難である。

位置サーボ系の概略図をFig. 6に示す⁴⁾。シリンダのロッド側には一定圧力を印加して単動式とし、ヘッド側を高速応答電磁弁で給排気して位置決めをおこなう。

前報⁴⁾で示したように弁の開放時間はある範囲では比例制御弁の弁開度に相当するので、積分補償は時刻*i*にサンプルされたピストン位置*y(i)*により、つぎのように電磁弁の開放時間*T_o*を操作しておこなった。

$$T_o = F_y(Y_d - y(i)) + F_i(i) \sum_{k=0}^i (Y_d - y(k)) \quad (1)$$

*T_o*が正ならAの弁を*T_o*時間、負ならBの弁を−*T_o*時間開放する。ただし0.3msより短い時間では弁は実際には開かない。弁開放後におこなう弁閉鎖時間*T_c*は5ms一定とし、*y(i)*のサンプルは弁閉鎖時間終了時におこなう。右辺第2項が積分補償項に相当するが、加算は偏差に応じてサンプリング周期が変わるため、目標位置近傍での重みが大きくなっている。*F_y*は位置帰還係数であり*F_i(i)*は積分帰還係数で整定位置で零となる任意の関数である。本報では $|Y_d - y(i)| < Y_0$ では

$$F_i(i) = F_{i0} |Y_d - y(i)|^a \quad (2)$$

とし、他では*F_i(i) = F_{i0}Y₀²*一定としている。シール粘着後の弁開放時の状態方程式は次式で示される。

$$x(i+1) = \exp(A_o T_o) x(i) +$$

$$\int_0^{T_o} \exp(A_o(T_o - \tau)) B_o [P_s \quad P_c \quad W \quad y_0] d\tau \quad (3)$$

$$y(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(i) \quad (4)$$

$$A_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D_s}{M} & \frac{A_1}{M} \\ 0 & \frac{A_1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$B_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{A_2}{M} & -\frac{1}{M} & -\frac{K(y)}{M} \\ \frac{1}{RC} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

つぎに弁閉鎖時は次式となる。

$$x(i+1) = \exp(A_c T_c) x(i) +$$

$$\int_0^{T_c} \exp(A_c(T_c - \tau)) B_c [P_c \quad W \quad y_0] d\tau \quad (5)$$

$$y(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(i) \quad (6)$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D_s}{M} & \frac{A_1}{M} \\ 0 & \frac{A_1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

Fig. 6 Scheme of pneumatic cylinder servo system

$$B_c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{A_2}{M} & -\frac{1}{M} & -\frac{K(y)}{M} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

D_s はシールの粘弾性特性に起因する非線形粘性摩擦係数であるが、粘性による影響は無視できると仮定して零としている。

5. 実験結果

供試シリンダaを使ってストロークエンドから50mmの場所に繰返し位置決めしたとき、整定時のピストン位置とヘッド側圧力の測定結果のヒストグラムの例をFig. 7に示す。ただし F_{i0} は零として積分補償はおこなっていない。釣合い圧力の標準偏差は平均値に対して2.8%にもなり、釣合い圧力はかなり分散している。摩擦力のばらつきが原因だが、ロッド側圧力は一定に保たれているので、先に示されたような圧力変位特性に伴いシールは弾性変形をしていると予測される。定常偏差はこの例では約0.04mmであり、これは電磁弁の動作しない不感帯領域に相当する。位置決め誤差の標準偏差は0.012mmと小さく保たれている。釣合圧力の分散の原因はまた、それぞれ異なる偶発的な粘着位置からシールの弾性変形の範囲で、ピストン位置が電磁弁の不感帯に入るまで圧力の操作が行われたためと見ることもできる。本報の論議の範疇ではないが、釣合い圧力がこのように分散することは安定化補償制御には留意すべきである。

シールが弾性特性をもつならば、シリンダ内圧力の増減により、停止位置近傍でピストンの微小な移動操作が可能である。目標位置近傍でピストンが停止した後、電磁弁を後に述べる積分補償により開閉操作したとき、初期偏差と2s後の偏差との関係をFig. 8に示す。 F_{i0} は積分の強さを表す係数である。初期偏差が小さいときは2s経過してもピストンは移動していない。使用した電磁弁は0.3msより短い開放はできなく、偏差の2s間の積分では弁開時間がこの時間に満たないためである。初期偏差がある程度以上の場合、2s後には目標位置の方に移動しており積分補償により定常偏差が減少できる可能性が示されている。

弁を(1)式で与えられる開放時間で操作した場合のピストン移動の様子を計算により確認する。Fig. 9はピストンが49.9mmに停止した後に50mmの目標位置を与えた例である。ピストンと測定部の合質量1.43kgによる慣性および重力負荷が加わる場合であり、供給圧力は300kPa、ロッド側一定圧力は150kPaとした。 $K(y)$ の

Fig. 7 Distributions of position and pressure on positioning

Fig. 8 Effects of integral compensation

Fig. 9 Theoretical positioning process

値はFig. 2に示されたシリンダaの特性の傾斜部を直線近似して使用した。最大静止摩擦力はシリンダaの実験結果から23.03Nとしている。実線により示す弾性特性のあるシールを使った場合の例では、積分補償による圧力変化に対応してシールが変形し目標位置に確

Fig. 10 Experimental positioning process

Fig. 11 Experimental positioning process

実に位置決めされる。(2)式は2乗関数または1/2乗関数を用いたが、1/2乗関数のほうが目標位置近傍での収束性が良好である。破線に示すシールが変形しない場合には、圧力差による力がやがて最大静止摩擦力を越える結果、目標位置を越えて大きく移動する。シールの弾性特性が積分補償に有効であることが理論的に確認できた。

実験では(2)式はすべて2乗関数を用いている。制御用に使用した言語(C言語)の1/2乗関数の計算時間が条件により大きく異なり不都合であったためである。また、 Y_0 は1mmとしている。積分補償の効果を確認するため、同時に弁開時間の操作を必要とする安定化補償⁹⁾をおこなっていない。そのためピストンがオーバーシュートを起こさない比較的低い供給圧で試験をおこなった。

Fig. 9とほぼ同様の条件の実験結果をFig. 10に示す。実線で示すシリンダaを使った結果では、積分補償によりシリンダ内圧力が操作されるため目標位置にピストンは安定してゆく。一方シールが弾性特性を持たなく粘着時の最大変位量が小さいシリンダcを使った場合、ピストンは急激に移動して大きくオーバーシュートを起こす。

行程端からの実験結果をFig. 11に示す。シリンダaを使った結果では目標位置に速やかに安定している。シリンダcでは積分補償をおこなうと、目標位置で停止することなく前後で振動する。この傾向は F_{i0} が大きいほど顕著であるが、どんなに小さな F_{i0} でもピストンは安定しない。シールの弾性特性が積分補償に有効に作用していることが確認できた。

下側の行程端から50mmの目標位置に繰返し位置決めしたときの実験結果を次に示す。ピストン位置はすべて移動開始2s後に測定している。積分補償の強さにより安定時間が変わるため、測定されたピストン位置は

安定前の結果も含まれる。定常偏差は同じ条件の5回の繰返し位置決めで平均値で表している。5回では十分ではないと考えられるが、この回数でも明らかな傾向が示されることと全体としての実験回数が膨大となるので、シールやその他の条件の均一性を考慮したためである。

シリンダaの質量負荷条件に対し、 F_{i0} を変えて定常偏差を調べた結果をFig. 12に示す。 F_{i0} に関する安定限界はシールの静止摩擦特性と粘弾性特性に依存するため、理論による評価は困難だが実験の条件でピストンが必ず安定することを確認している。位置の帰還係数 $F_y=0.5\text{s/m}$ の条件では $F_{i0}=0$ として積分補償をおこなわない場合0.6mm程度の定常偏差が残るが、積分補償をおこなうと0.02mm程度まで定常偏差を減少できる。 F_{i0} を大きくすると再び定常偏差が大きくなる傾向が示されている。ただし安定限界を越えてはいないのでさらに F_{i0} を大きくするか、より長い安定時間を置けば定常偏差は再び減少する。積分補償の効果が条件により異なるのは負荷質量により摺動時のピストン移動速度が異なるため、粘着時からピストンが目標位置に達するまでのシール変形量が異なることと、(1)式第2項の加算値が異なることが原因と考えられる。

シリンダbを用いた同様の実験結果をFig. 13に示す。bのシールも弾性特性を持つものであり、積分補償により定常偏差が0.02mmまで減少する効果が示されている。 F_{i0} に対する定常偏差の大きさはやはり負荷質量により異なり、条件に応じて適当な F_{i0} の値が存在し、一般にシールの変位特性によっても異なる。安定までに許容される時間も考慮した上で適当な F_{i0} の値を選択する必要がある。現状では F_{i0} の一般的な設計指針を得ることは困難である。しかしより高速応答の電磁弁が開発され不感帯が狭くなれば、 F_{i0} の設計が容易になると考えられる。

Fig. 12 Effects on reducing steady state error

Fig. 13 Effects on reducing steady state error

Fig. 14 Effects on reducing steady state error

位置の帰還係数 F_y を変えたときシリンダ a を用いた実験結果を Fig. 14 に示す。 F_y が小さい方がピストン位置の剛性が小さいので、 $F_{i0} = 0$ で定常偏差が大きくなるが、積分補償をおこなうと F_y が小さい方が同じ F_{i0} の値で定常偏差が小さくなる逆転現象が起きている。定常偏差の初期量が大きい方が、(2)式第2項の加算結果が早く大きくなるため、(2)式を定義する領域 Y_0 の値にも依存する。シリンダ b を用いた同様の実験結果の傾向も同じであった。

6. 結 言

空気圧シリンダ位置サーボ系の駆動に電磁弁を用いた場合、電磁弁の弁動作時間による不感帯があることに起因する定常偏差を積分補償により除去できることを示した。弾性特性をもつシールを使ったシリンダでは、積分補償により確実に定常偏差が低減できた。しかし弾性特性をもたないシールでは、積分補償をおこ

うとピストンが目標位置前後で振動し精密な位置決めは不可能だった。シールの弾性特性が積分補償に有利に作用することを電磁弁で駆動する場合について確認できたが、比例制御弁等で駆動する場合でも同様であると思われる。

さらに積分補償の積分の強さを与える係数の効果について調べた。適当な係数の値は負荷や圧力などの条件に依存し、シールの初期変形といった偶然的な要因にも異存すると考えられるため、現状では最適な係数の一般的な設計資料を得ることは難しい。シールの粘弾性特性による影響の解析も含めて今後検討が必要である。従来、空気圧アクチュエータの高精度制御には制御機器のみの特性が着目されがちであったが、ヒステリシスが少なく弾性変形領域の広いシール材の使用などが試みられる必要があると思う。

参 考 文 献

- 1) 杉本ほか：弾性変形を利用した高位置決め装置の圧力フィードバックによる性能改善，昭和59年秋季油圧講演会講演論文集，45/48 (1984)
- 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) 小山ほか：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，油圧と空気圧，20巻—6号，525/530 (1989)
- 5) 小山ほか：高速応答電磁弁により駆動される空気圧シリンダサーボ系の安定化補償，油圧と空気圧，21巻—7号，696/701 (1990)