研究論文

空気圧シリンダシールの摺動・非摺動状態の判別と制御*

吉 満 俊 拓**, 小 山 紀***

Discrimination and Control of a Pneumatic Cylinder under Stick or Slide mode of seal

Toshihiro YOSHIMITU, Osamu OYAMA

The pneumatic cylinder has internal rubber seals. When the piston moves toward the desired position, the seal sticks and slides and then attaches itself to the cylinder wall or piston rod, near the final position. Therefore the viscoelastic formation of the seal occurs, which has effects on control performances, such as positioning accuracy, stability and settling delay in this region. Combination of stick and slide mode control models is necessary to execute highly stable and accurate control of a pneumatic cylinder, but these modes can not be observed directly.

In this report, a method is proposed for discriminating whether the seal sticks or slides in real time and for its control by choosing and switching between slide or stick modes. The control performance is specified experimentally.

Key Words: Pneumatic cylinder, Position servo system, Piston seal, Viscoelasticity, Modeling, Optimal control

記 号

G : ゲイン
 T : 時定数 (s)

本報告で用いる記号をまとめて示す.

A_v, b_v : 摺動モデルの特性を表す行列,
 A_s, b_s : シリンダの受圧面積 (m^2)
 D_v : 摺動モデルの粘性摩擦係数 (Ns/m)
 D_s : 粘弾性モデルの粘性摩擦係数 (Ns/m)
 $e(h)$: 目標位置とシリンダ位置の誤差 (m)
 f_o : 最適フィードバック係数行列
 F_r : 摺動モデルの摩擦力 (N)
 F_e : 粘弾性モデルの摩擦力 (N)
 k : ばね定数 (N/m)
 K_p, K_i : 比例動作, 積分動作の係数
 M : ピストン可動部質量 (kg)
 $R(h)$: 目標位置 (m)
 $v(h)$: シリンダ速度 (m/s)
 $u(h)$: サーボ弁への制御入力 (V)
 $x(h)$: シリンダ位置 (m)
 $S_i(l)$: ニューロン
 $W_{ij}(l)$: シナプス結合
 d_i : 教師信号

1. 緒 言

空気圧シリンダは軽量コンパクトで大出力が得られることからさまざまな分野で使用されている。しかし、使用方法はシリンダストロークの一部あるいは全体を用いた2点間PTP (Point To Point) の使用方法がほとんどである。しかし、エレクトロニクス技術の発達と空気圧サーボ弁の開発によって、フィードバック制御を用いた空気圧サーボシステムが実現化された¹⁾²⁾。空気圧シリンダの変位はシリンダの内圧に支配されており、サーボアクチュエータとして高精度な位置・速度動作をさせるためには高精度・高応答な圧力制御が必要となる。このような目的でサーボ弁は幾種類かのものが開発されており精度や応答性が改善されてきている。これらのサーボ弁を用いた研究として、フィードバック系を用いたWONGら³⁾や適応制御を用いた竹下ら⁴⁾、外乱オブザーバを用いた則次ら⁵⁾や、サーボ弁と人工筋アクチュエータを開発した青木ら⁶⁾がある。サーボ弁を用いた場合制御系の次数が高くなりサーボ弁自体および空気圧のシリンダの摩擦や特性の非線形などの影響を強く受け易い。このため橋本ら⁷⁾、早川ら⁸⁾、栗田ら⁹⁾富沢ら¹⁰⁾のように非線形摩擦に対応するものや、前田ら¹¹⁾のようにディザを使用するなどの方法がある。いずれにしても制御系は機器特性の数学モデルを組み込んで設計される。しかし、空気圧シリンダによる位置・速度制御は依然として旧来の方法がとられ、これらの多くの有用な研究が実用化されたとは認めがたい。アクチュエータ形式の棲み分け論議が過熱してきたこともあるが、空気圧シリンダの制御

*平成13年8月1日 原稿受付

**神奈川工科大学福祉システム工学科
 (所在地 〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030)
 yosimitu@ne.kanagawa-it.ac.jp

***明治大学
 (所在地 〒214-0033 神奈川県川崎市多摩区東三田1-1-1)
 oyama@isc.meiji.ac.jp

性能に対する正しい評価や性能改善が必要であることに変わりはない。シリンダの高度な制御を困難にしているのは、空気圧シリンダの特性モデルを正確に得ることが困難であることによる。シリンダの定速移動時については KAGAWA¹²⁾らにより有用なモデルが提案されているが、位置制御精度に決定的な影響を与える停止位置近傍における確立されたモデルは皆無である。一般的な空気圧シリンダの内部には、空気漏れを防止するためのシールが取り付けられているが、従来から空気圧シリンダのモデルはシールが滑っている状態（摺動状態）に対してのみ考えられてきた。しかし空気圧シリンダによる位置決めの場合、その行程においてシールがシリンダ内部を滑っている状態（摺動状態）と滑らずシリンダの内壁に固着し弾性変形している状態（非摺動状態）があり、それぞれの状態では異なった特性を有す。

荒木ら¹³⁾がシールの摩擦がシリンダに与える影響について調べているが理論的な裏づけがされていない。従来シールに起因する特性を積極的に用いたものは皆無であったが、小山ら¹⁴⁾により粘弾性領域におけるピストン変位の特性モデルの解明およびこれを用いた制御性能の向上が報告された。

前報¹⁴⁾ではシールの非摺動状態のみを対象としていたが非摺動状態の制御と従来の摺動状態のみを考慮した制御を効果的に組み合わせて行うことができれば、シールとシリンダ間の摩擦力に起因する位置決めの困難さを回避することができ、空気圧シリンダの低コストを活かしながら、精度の良い位置決めが期待できる。

以上の観点から本研究では、摺動状態と非摺動状態のどちらの状態であるかをリアルタイムに判別する手法を明らかにしこれにより2つの特性モデルを切り替えて有効な制御を実行する。

2. シリンダ変位の特性モデル

従来、空気圧シリンダの特性モデル（摺動モデル）として必ずFig. 1のものが用いられる。

このモデルはシール部で発生する粘性摩擦係数 c' により生じる粘性摩擦力を表したものとなっている。しかし、位置決め点近傍ではシールが粘着するため粘弾性モデル（非摺動モデル）を考慮する必要がある。この場合、摺動モデルと大きく異なる点は、シール弾性の影響が現れてくると、粘性がシールの物理的性質に起因するものであるから摺動時と特性値が全く異なることである。

粘弾性モデルとして複数のばねとダンパの組合せが使われることもあるが、実用的なモデルとしては単純なものほど有用であるため、Fig. 2に示すような1個のばねダンパからなるKelvinモデルで近似することが有効であることを前報で示した¹⁴⁾。

ここでは、シール特性が持つヒステリシスによる動作点

Fig. 1 Conventional model of pneumatic cylinder

Fig. 2 The Kelvin model

のずれおよび不感帯を表すため、等価的なクーロン摩擦力 F_r を導入している。ただし、直列ばね2個とダンパによる3素子モデルとも比較し、有為な違いがないことを確認している。

3. 実験装置

本研究で使用した実験装置の概略をFig. 3に示す。この装置は空気圧シリンダと2つの3ポートサーボ弁より構成され、コンピュータからの電気信号をD/A変換器により電圧に変換し、サーボ弁を駆動させて流量を制御するこ

Fig. 3 Scheme of experimental setup

とにより圧力を変え、シリンダ駆動力としている。この時、シリンダのロッド側の圧力は一定とし、ヘッド側室内圧力は任意の圧力となるよう、半導体圧力センサーを設置し、この値をA/D変換器を介して、コンピュータにフィードバックしている。シリンダ変位は、デジマイクロカウンタ（分解能 $0.1\mu\text{m}$ ）を使用し計測している。試料としては従来から一般に使用されているニトリルゴムをシール材にしたシリンダを用いて実験を行った。またシリンダ内径は 40.0mm 、ストローク 100.0mm である。

4. 制御モデルのパラメータ同定

実験により求められた摺動・非摺動モデルの各パラメータ、バネ係数 k と粘性摩擦係数 D 及び最大静止摩擦力 F をTable 1に示す。非摺動モデルではシールが粘着していることを確認しながら、圧力を目標値 $10\mu\text{m}$ までランプ状に変化させたときのシリンダ変位より求めた。摺動モデル

Table 1 Seal characteristics

	バネ係数 $k[\times 10^3\text{kN/m}]$	粘性摩擦係数 $D[\text{kNs/m}]$	最大静止摩擦力 $F[\text{N}]$
非摺動時	7.34	632	0.894
摺動時		0.326	0.894

では、圧力を目標値 20mm までランプ状に変化させたときのシリンダ変位より求めた。

5. 摺動・非摺動状態の判別法

シールの摺動・非摺動状態を制御中にリアルタイムに判別する方法として、シリンダの速度による判別と、ニューラルネットによる判別の2種を採用しその有効性を検討した。

5.1 摺動および非摺動モデル

前報¹⁴⁾で示された様に位置決め点近傍ではシールの伸びに起因するバネ特性は線形となり、また速度が遅いので容積変化も微小であるなどにより制御モデルは線形系で近似する。状態変数を、サーボ弁入力を $x(t)=[x(t), v(t), p(t)]^T$ 、サーボ弁入力を $u(t)$ として、状態方程式は摺動モデルでは

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D_v}{M} - \frac{A}{M} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G}{T} \end{bmatrix} u(t) - \text{sgn}(v(t))F_c \quad (2)$$

非摺動モデルでは

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{M} - \frac{D_v}{M} - \frac{A}{M} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G}{T} \end{bmatrix} u(t) - \text{sgn}(v(t))F_v \quad (3)$$

となる。また、前報で示した様に位置決め点では粘弾性の効果が支配的となるので、摩擦力 F_v 、 F_c は余り大きくないとして無視し零次ホルダで離散化した状態方程式をそれぞれ

$$x(h+1) = A_x x(h) + b_x u(h) \quad (2')$$

$$u_c(h+1) = A_u u_c(h) + b_u u(h) \quad (3')$$

とした。制御は線形最適制御とした1型のサーボ系を構成したとき偏差系

$$\begin{bmatrix} x_c(h+1) \\ u_c(h+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & b \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c(h) \\ u_c(h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(h) \quad (4)$$

に関する評価式

$$J = \sum_{h=0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} x_c(h) \\ u_c(h) \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x_c(h) \\ u_c(h) \end{bmatrix} + r v^2(h) \right\} \quad (5)$$

を最小とする最適サーボ入力

$$u_c(h+1) = v(h) = -f_c \begin{bmatrix} X_c(h) \\ u_c(h) \end{bmatrix} \quad (6)$$

を、摺動時は(2')より非摺動時は(3')より求める。ただし、 $x_c(h)$ および $u_c(h)$ は定常値からの偏差を意味する。

5.2 速度による判別

計測されたシリンダの摺動速度がしきい値以上の時にシリンダは摺動しているものとして摺動モデルを使い、しきい値以下の時に非摺動モデルに切り替えて制御する。しきい値を小さくすると殆どすべて摺動モデルのみで制御され、逆にしきい値を大きくすると非摺動モデルを単独で用いた場合と同じ傾向をとるようになる。前報より、シリンダの非摺動範囲は $0.01 \sim 0.1\text{mm}$ と仮定し、シリンダ摺動速度を $1 \sim 10\text{mm/s}$ の範囲で予備実験を行い、しきい値として 2mm/s を使用する。

$$|v| \leq \alpha \rightarrow \text{Stick model}$$

$$|v| > \alpha \rightarrow \text{Slide model}$$

α : しきい値

5.3 ニューラルネットによる判別

ニューラルネットによりシールの摺動・非摺動状態を推定させ、これにより制御モデルを切り替える。ニューラルネットワークによる摺動・非摺動状態判別システムの構成をFig. 4に示す。

本研究では、アルゴリズムは、バックプロパゲーション学習アルゴリズムを使用しており、入力層・中間層1層・出力層の3層で構成された階層型ニューラルネットを使用している。

Fig. 4 Neural network model

l 層の i ニューロン $s_i(l)$ の状態を示す式は

$$s_i(l) = f(\sum_j w_{ij}(l) s_j(l-1)) \quad (7)$$

であり、 $w_{ij}(l)$ は (l) 層と $(l-1)$ 層のニューロン間の情報をやり取りするシナプス結合、 f は0, 1に飽和する非線形関数である。提示された教師信号と出力との誤差を

$$E = \frac{1}{2} \sum_i (s_i(L) - d_i)^2 \quad (8)$$

と定義する。 L は出力層の番号で $s(L)$ はネットワークの出力を、 d は教師信号を示す。出力誤差 E に最急降下法を適応して得られるBP法のアルゴリズムより

$$\Delta w_{ij}(l) = -\mu \frac{\partial E}{\partial w_{ij}(l)} \quad (9)$$

(9)式に従って出力誤差を減少するようにシナプス結合を変更し収束するまで繰り返す。 μ は学習係数である。ネットワークへの入力層には入手可能な物理データである圧力の変化量 Δp ・シリンダの変位量 Δx の2入力のパラメータを学習パターンとして与え、出力層には教師信号として摺動状態を+1・非摺動状態を-1とする1出力とした。学習データは、摺動時のデータはシリンダ速度が3 mm/s以上の時の圧力・シリンダ変位を用い、非摺動時のデータは目標値を0.01mmとした非摺動状態のシリンダ位置制御時のデータを用いる。入力層と中間層とのシナプス結合には対数シグモイドニューロンを、中間層と出力層とのシナプス結合には正接シグモイドニューロンを用いた。重み係数およびしきい値の修正方法については、重み係数、しきい値の学習係数は0.01とした。出力層には摺動・非摺動状態の判別結果が正（摺動）・負（非摺動）の値として出力される。また中間層は10個20個30個40個の場合で予備実験を行ったところ、ネットワークが収束するのに十分と思われる20個を採用した。ネットワークに学習パターンを1000回ずつ提示して、その時点でのテストパターンに対する識別結果を得た。この学習識別を繰り返し、教師信号に対する平均2乗誤差が最小値に達した時、学習を終了する。学習誤差は学習回数の増加に伴い、いったんは極小値をとりがて小さい値に収束していくが、汎か誤差は10000回で極小値をとりその後若干だが上昇する。10000回以上の学習は過学習と考えられるため、学習回数は10000回とした。

6. 実験結果

目標を20mm、制御モデルを切り替えることなく位置決めを行った場合の実験結果をFig. 5, 6に示す。

摺動モデルをもとに制御した結果では、移動開始後約4秒で収束するが、最大で4 mmのオーバーシュートが発生し定常誤差が最大で0.2mmになりまた測定毎に結果にばらつきがある。最も定常誤差が少ない場合の結果をFig. 6に示す。目標値近傍でシールが摺動と非摺動を繰り返し整定を妨げている。非摺動モデルによる場合は、目標値に対

Fig. 5 Optimal Control using slide model

Fig. 6 Optimal Control using stick model

Fig. 7 Optimal Control using discrimination by velocity

し収束せず振動的となってしまった。

次に、速度によりモデルを切り替えて制御をした場合の結果をFig. 7に示す。

目標値前後で微少な振動が発生している。速度情報のみでは、摺動・非摺動状態の判別が不可能であったためと考えられる。最後に、ニューラルネットにより摺動・非摺動状態を判別した結果を示す。応答に乱れがなくスムーズに切り替えが行われている。立ち上がり時間は、単独モデルを使用した場合に比べ10%短くなり、定常誤差は測定器の検出限界以下となり、良好な制御結果となった。

立ち上がり時間として目標値の90%に達するまでの時

Fig. 8 Optimal Control using neural network

Fig. 9 Rising time

Fig. 10 Steady state error

Fig. 11 Convergence time

間を比較した結果をFig. 9に示す。速度およびニューラルネットにより判別した場合、単独モデルを使用した場合と比較して立ち上がり時間が約20%短縮できた。

次に、目標値 $\pm 2\%$ 以内に収束した場合を安定とし、定常誤差を比較した結果をFig. 10に示す。

非摺動モデルのみを使用した場合は安定せず定常誤差を計測することはできなかった。摺動モデル単独で制御した場合、定常誤差は $48\mu\text{m}$ となったがばらつきが多く測定毎に値が $200\mu\text{m}$ から $40\mu\text{m}$ の範囲で変化する。速度情報のみで判別した場合、一定値に安定しないので誤差の最大値を記載した。ニューラルネットにより判別した場合定常誤差は測定器の検出可能誤差以内となり他と比較して良好な制御結果となった。

最後に、安定するまでの時間を比較した結果をFig. 11に示す。非摺動モデルのみで制御した場合安定しなかったため記載していない。他の3つを比較するとニューラルネットによる判別が最大で約80%の時間短縮結果となった。

7. 結 論

空気圧シリンダの位置決めを行う際、その行程においてシールの状態は、摺動状態と非摺動状態を繰り返す。特に目標位置近傍に着目した場合、その状態はシリンダ速度が十分遅くなっているために非摺動状態であると考えられる。したがって最終的な位置決め精度はシールの伸びにより決定される状態であり、そのシールの粘弾性特性が重要となる。

実用化のために摺動および粘着のふたつのモデルを切り替えて制御をおこなうのが効果的であり、これにはシールの摺動状態、粘着状態の判別が必要となる。粘性摩擦係数を実時間で観測あるいは推定しながら制御を実行したならば、この値が大きく異なることを利用して切り替えを実行することが可能であると考えられ、本研究ではこの判別法としてまずシリンダの速度による判別を試みた。立ち上がり時間の短縮化はできたがシリンダが目標値近傍で収束せずうまくいかなかった。そこでニューラルネットを使用してリアルタイムでのシールの摺動状態、粘着状態を判別が可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 則次：空気圧制御の新しい展開，システム／制御／情報，39-2，67/73，(1995)
- 2) 鹿島：直動空気圧サーボ弁による制御例，油圧と空気圧，26-2，70/74，(1995)
- 3) WONG, PU, MOORE: Methods of Overcoming Friction Effects in the Control of Pneumatic Servo Systems, Am Soc Mech Eng Fluid Power Syst Technol Div, 2, 139/144, (1995)

- 4) 竹下, 田中, 清水, 柴田, 山本: 空気圧サーボ系の最小分散型適応極配置制御, 日本機械学会全国大会講演論文集, 73-4, 300/301, (1995)
- 5) 則次, 高岩: 外乱オブザーバを用いた空気圧サーボ系のインピーダンス制御 計測自動制御学会論文集, 30-6, 677/684, (1994)
- 6) 青木 橋本 今枝 喜羽: ニューラルネットワークによるゴム人工筋アクチュエータの位置・力制御, 平成10年秋季油空圧講演会講演論文集, 112/114, (1996)
- 7) 橋本 松熊 石田: 非線形PID補償器による空気圧シリンダの位置決め制御, 平成9年秋季油空圧講演会講演論文集, 66/68, (1995)
- 8) 早川 鴨山 永瀬: ライディングモード制御を用いた空気圧アクチュエータ, 平成10年春季油空圧講演会講演論文集, 55/57, (1996)
- 9) 栗田 石田: スミス型むだ時間補償器を用いたI-PD型適応極配置, 平成10年秋季油空圧講演会講演論文集, 133/135, (1998)
- 10) 富沢, 橋本, 今枝, 中川: ニューラルネットワーク補償木を利用した空気圧シリンダの制御, 平成13年春季フルードパワーシステム講演会論文集 64/66 (2001)
- 11) 前田 川上 中野: 空気圧リフタの位置制御: 平成9年秋季油空圧講演会講演論文集, 69/71, (1995)
- 12) T, KAGAWA M, SHIMAZU Y, ISHII: AIR TEMPERATURE CHANGE OF PNEUMATIC CYLINDER WITH METER-OUT CONTROL AND ITS EFFECT ON THE VELOCITY, FLUCOME '91 (1991)
- 13) 荒木, 棚橋: 空気圧シリンダの摩擦がストローク特性に及ぼす影響, 昭和55年秋季油空圧講演会講演論文集, 23/26, (1980)
- 14) 小山 紀, 天野景範, 飯塚健太呂, 吉満俊拓: 空気圧シリンダ変位の粘弾性特性と制御性能への影響, 日本油空圧学会論文集, 29-7, 19/24, 1998