研 究

ゴム製空気圧アクチュエータの制御性能*

則 次 俊 郎** 和 田 力**

Control Performance of Pneumatically Driven Rubber Actuator

Toshiro NORITSUGU, Tsutomu WADA

A pneumatic actuation is anticipated to be applied to more rigorous servo-type motion controls. Especially, it is possible to construct a novel flexible actuation system using the high compliance due to air compressibility. A newly developed pneumatically driven rubber actuator has been constructed for this purpose. Also, its application to robot manipulators or hands is being actively studied. However, the fundamental control characteristics are yet to be studied in depth, so the knowledge about this actuator is not sufficient for designing a servo system.

In this study, the static and dynamic characteristics are examined experimentally. Also, a position servo system was constructed with this actuator and PWM pressure control valves, of which the control performance is discussed. The principal results can be summarized as follows.

1) Both the displacement and the output force of this actuator are very sensitive to the operating pressure. No dynamic delay exists in the conversion process from pressure to force, and its dynamic characteristic depends only on the operating pressure response. Therefore, to apply this actuator effectively as a servo actuator, a high response and high accuracy pressure control is required.

2) The PWM pressure control valve with the high speed on-off solenoid valve is effective for driving this actuator.

3) Although this actuator has a considerably large hysteresis, even the usual linear controller can provide the almost satisfactory control performance within this experiment.

1. 結 言

近年、空気圧アクチュエータの用途が見直され、従来のローコストオートメーションに対応する単純作業だけでなく、サーボコントロールによるより高度な運動制御への応用にも関心が高まりつつある。特に、空気の圧縮性もたらす大きなコンプライアンスを積極的に利用することにより、柔軟で新しいタイプの駆動系の構築が可能になると考えられる。最近開発されたゴム製アクチュエータ¹⁾はこのような可能性を意図したものであり、ロボットマニピュレータやハンドへの応用研究が盛んである^{2),3),4)}。これに伴い、そのモデル化や制御法に関する研究もいくつか報告されている^{5),6),7)}。しかし、このアクチュエータの基本的な制御

性能に関する研究は不十分であり、現状では、これを用いたサーボ系の応答特性を前もって予測するのは容易でない。

そこで、本研究では、まずアクチュエータ単体の静特性と動特性を調べ、その動作は圧力制御弁の性能に大きく支配されることを示す。つぎに、オンオフ電磁弁をパルス幅変調(PWM)駆動することにより圧力制御弁を構成し、これにより基本的な1自由度サーボ系を試作する。実験によりその制御性能を調べ、ゴム製空気圧アクチュエータを用いたサーボ系の設計指針を明らかにする⁸⁾。

2. ゴム製アクチュエータの特性

2.1 静特性

用いるゴム製アクチュエータは(株)ブリヂストンにより開発された製品名ラバチュエータ、型式SRK-440($\phi 14 \times L400\text{mm}$)であり、Fig.1のような構造を持つ。よりを施した繊維コードを網状に編んだスリー

*平成元年11月29日 原稿受付

**岡山大学工学部

(所在地 〒700 岡山市津島中3-1-1)

Fig. 1 Pneumatically driven rubber actuator
(quoted from Reference 1)

ブでゴム製のチューブを覆い、両端を金具で固定したものである。チューブ内の圧力を上げると半径方向に膨張し、このとき生じる円周方向の張力が繊維コードの力変換作用によって軸方向の収縮力に変換される。

このアクチュエータについて、いくつかの仮定の下に、内圧 P 、収縮力 F および収縮率 ϵ の関係が次式で表されている¹⁾。

$$F = \frac{\pi d_0^2 P}{4 \sin^2 \theta_0} \{3(1 - \epsilon)^2 \cos^2 \theta_0 - 1\} \quad (1)$$

ここに、 d ：アクチュエータ直径、 L ：アクチュエータ長さ、 θ ：繊維コードの巻き付け角度、 $\epsilon = (L_0 - L)/L_0$ であり、添字0は初期状態($P = 0$)における値を示す。

Fig. 2は、図中に示す要領で測定した静特性の一例である。 $P = 0$ 、 $F = 0$ における初期長さ $L_0 = 400\text{mm}$ を基準とする。(a)は圧力 P を一定とした場合の収縮力 F と収縮率 $\epsilon = x/L_0$ の関係、(b)は F を一定にした場合の P と ϵ の関係である。それぞれ、 F および P を変えて $\epsilon = 0 \sim 0.2$ の範囲に対して測定したものである。かなり大きなヒステリシスが存在し、いずれの関係も非線形であるが、収縮率 $\epsilon = 0.1$ 付近を動作点とした場合には線形近似もある程度妥当であることがわかる。

Δx 、 ΔF および ΔP をそれぞれ基準状態からの変化量とすれば、

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial F} \cdot \Delta F + \frac{\partial x}{\partial P} \cdot \Delta P \quad (2)$$

である。 $|\partial x / \partial F|$ がこのアクチュエータのコンプライアンスに相当し、内圧 P が高いほどコンプライアンスは減少する。また、

(a) Relation between displacement and force

(b) Relation between operating pressure and displacement

Fig. 2 Static characteristics of actuator

$$\frac{\partial x}{\partial P} \approx 0.5 [\text{mm/kPa}]$$

$$\frac{\partial F}{\partial P} = -(\partial x / \partial P) / (\partial x / \partial F) \approx 5 [\text{N/kPa}]$$

でありアクチュエータの変位量 x および収縮力 F は内圧 P の変化に極めて敏感である。

図中、実線は $d_0 = 14\text{mm}$ 、 $\theta_0 = 18.5^\circ$ とした場合の(1)式による計算結果である。計算値は実験値と定性的には一致しているが、全体的に収縮力と収縮率を過大評価する傾向にある。これは、(1)式の導出にあたりゴムの弾性、各部の摩擦などを無視したことによると考えられる。

2.2 動特性

2本のアクチュエータを用いてFig. 3(a)のような装置を構成し、内圧 P とプーリの回転角 θ の応答からアクチュエータの応答性を評価する。本装置では、プーリの軸まわりの慣性モーメントおよび粘性摩擦係数は十分小さく、応答に与えるこれらの影響は無視できる。

Fig. 3 Dynamic characteristic of actuator

(b), (c)に示すように両者の立ち上がり時間にはほとんど差がなく約0.1sである。これより、圧力変化に対するアクチュエータの応答は非常に速く、その遅れは無視できる程度のものであることがわかる。

以上のように、ゴム製アクチュエータの動作はその内圧に非常に敏感であり、このアクチュエータをサーボ用アクチュエータとして効果的に利用するためには、速応性に優れた精度の高い圧力制御が必要である。

3. PWM圧力制御弁

供試アクチュエータには電空サーボ弁が付属している。その静特性は十分満足できるものであるが、安定性に若干問題があった。そこで、本研究ではオンオフ電磁弁を用いてPWM方式による圧力制御弁を新たに構成する。オンオフ弁は有効開口面積 1.2mm^2 、応答時間 5ms 以下（いずれもカタログ記載値）の2位置4ポート弁4個を並列結合して、1組のPWM圧力制御弁とした。

Fig. 4(a)は図中に示す回路についてPWM回路も含めた圧力制御弁の静特性を測定した結果である。PWM回路への入力電圧 $V=0\sim 5\text{ volt}$ がデューティ $D=13\%\sim 87\%$ に相当する。搬送周波数 f_c が低いほど、出力圧はより広範囲の入力電圧に対して変化するが、

Fig. 4 Characteristics of PWM pressure control valve

搬送波成分による圧力変動が大きくなる。逆に f_c を高くすると、圧力変動は低減するが、弁の動作遅れの影響により比例域が狭くなる。 f_c はこれらを考慮して適切に設定する必要がある。

Fig. 4(b)は供試アクチュエータの $\epsilon=0.15$ 前後の容積に相当する固定容量 300cc を弁に接続した場合の圧力のステップ応答である。 $f_c=70\text{Hz}$ であり、搬送波成分を無視した平均的な圧力変化に注目すれば、負荷容量を含めた弁の特性は一次遅れで近似できることがわかる。

4. 位置サーボ系の構成

4.1 制御系の構成

2本のゴム製アクチュエータと2組のPWM制御弁を用いて、Fig. 5のような回転型の位置サーボ系を構成する。Fig. 2(a)に示したように $\epsilon<0.05$ では非線形性が強いので、この部分の使用を避けるため、2本のアクチュエータに初期圧力 P_0 をかけた状態で $\epsilon=0.125$ となるようにワイヤの長さを調整し、この状態を基準として $\epsilon=\pm 0.075$ （変位にして $\pm 30\text{mm}$ ）の部分を使用する。プーリの直径は 40mm であり出力軸の可動範囲は基準状態から $\pm 86^\circ$ となる。出力軸は鉛直方向に設置する。

角度の検出にはロータリエンコーダを使用し、カウンタを含めた検出部の分解能は $0.018^\circ/\text{Pulse}$ である。PWM制御弁の搬送周波数は 60Hz とし、2つの弁は逆

Fig. 5 Experimental position servo system

相の搬送波によって差動的に動く。図中に基準状態における各変数の値を示す。計算機からの出力信号 $u = u_0 + \Delta u$ を制御入力とする。デューティ $D_0 = 50\%$ のとき基準圧力 $P_0 = 196 \text{ kPa}$ となる。

4.2 駆動部のモデル化

制御弁、アクチュエータおよび負荷からなる駆動部のモデル化を行なう。アクチュエータは圧力変化に対する応答が非常に速いので、その動特性を無視して静特性のみを考慮すれば、以下の関係が得られる。

$$J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} = 2\Delta F \cdot r \quad (3)$$

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial F}{\partial x} \Delta x \quad (4)$$

$$\Delta x = r\theta \quad (5)$$

また、Fig. 4(b)の結果よりアクチュエータの容量を含めた弁特性は次式で表わされる。

$$\frac{P(s)}{U(s)} = \frac{K_a}{1 + T_a s} \quad (6)$$

(3)～(6)式より駆動部の特性は次式で表わされる。

$$\frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{K\omega_n^2}{(1 + T_a s)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (7)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \omega_n &= -\frac{2r^2 \partial F}{J \partial x} \\ \zeta &= \frac{C}{2\omega_n J} \\ K &= -\frac{K_a \partial F / \partial P}{r \partial F / \partial x} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、 J ：負荷の慣性モーメント、 C ：粘性摩擦係数、 r ：プーリー半径、 θ ：回転角、 s ：ラプラス演算子、 $P(s) = L[\Delta P]$ 、 $U(s) = L[\Delta u]$ 、 $\Theta(s) = L[\theta]$ である。内圧 P が高いほど、アクチュエータの剛性 $|\partial F / \partial x|$ が

Fig. 6 Open-loop static characteristics

増加し、固有振動数 ω_n が高くなる。

4.3 駆動部の特性

Fig. 5において入力 u と出力軸の角変位 θ の関係を調べ、ゴム製アクチュエータとPWM圧力制御弁からなる駆動部の基本特性を明らかにする。2種類の搬送周波数 f_c について、静特性の測定結果をFig. 6に示す。アクチュエータ自体の特性に起因してヒステリシスが見られる。 $f_c = 20 \text{ Hz}$ の場合には搬送波成分による微小振動がアクチュエータに現れ、ヒステリシスに対するディザ効果が期待されたが、Fig. 6を見る限りその効果はない。以下の実験では $f_c = 60 \text{ Hz}$ とする。

Fig. 7は2種類の慣性負荷 J に対する周波数応答であり、低周波数域で回転角変化の振幅が 40° となるような Δu を与えて測定したものである。図中の実線は、(a)では一次遅れ要素、(b)では(7)式の3次系による計算値をあてはめたものである。負荷の慣性モーメント J が小さいときには、駆動部は一次遅れ要素として取り扱うことができ、駆動部の特性は制御弁とアクチュエータの圧力応答特性により決定されることがわかる。また、 J を考慮する場合には、(7)式の3次モデルが有効である。

Fig. 7 Open-loop frequency response

Fig. 8はFig. 7と同じ慣性負荷に対してステップ応答を測定したものである。回転角 θ のステップ幅が 60° となるような制御入力 Δu を与えた場合の、内圧 P と θ の応答を示す。(a)と(b)では J が大きく異なるにもかかわらず応答速度はほぼ同じである。これは、本駆動部においてはFig. 7からわかるように駆動部全体のバンド幅が制御弁とアクチュエータの圧力応答特性によって決定されるためである。

4.4 制御性能

基本的なPID制御を用いて位置サーボ系を構成し、その制御性能を考察する。制御則は離散化した次式を用いる。

$$\Delta u(i) = K_P e(i) + K_I \sum_{k=0}^i e(k) \cdot T + K_D \{e(i) - e(i-1)\} / T \quad (9)$$

ここに、 $e(i) = \theta_R(i) - \theta(i)$ 、 T はサンプリング周期であり、 Δu は計算機より出力されるデジタル量、 θ_R と θ はカウンタにより計数されるパルス数を用いて表わす。

Fig. 7(b)に示した $J = 0.084 \text{ kg.m}^2$ を付加した駆動部を制御する。0.018/Pulseを考慮して、Fig. 6およびFig. 7(b)から読み取った開ループ系の特性（安定限界ゲイン $K_{pc} = 0.21$ 、位相交点周波数 11.2 rad/s ）に基づき、限界感度法を用いて求めた各ゲインの値をTable

Fig. 8 Open-loop step responses

1に示す。

Fig. 9はステップ応答の測定結果である。制御時のサンプリング周期 $T = 5 \text{ ms}$ である。目標角度 $\theta_R = 30^\circ$

Table 1 Estimated gains with ultimate sensitivity method

	K_P	K_I	K_D
P	0.105		
PI	0.095	0.204	
PID	0.126	0.449	0.009

Fig. 9 Closed-loop step responses

であり、P制御のみでは安定でなおかつ精度の高い制御は不可能である。PI制御では非振動的で高精度な制御が実現できる。さらに、PID制御を用いて速応性の改善を試みたが、応答は(c)に示すように振動的となり、整定時間はPI制御の場合と大差ない。Fig. 9で用いた各ゲインの値は試行錯誤により調整したものであるが、これらは限界感度法で定めたTable 1の値にほぼ近い

Fig. 10 Closed-loop step responses for some desired values

ことがわかる。

Fig. 10は目標角度 $\theta_R=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ についてPIおよびPID制御を実施した結果である。PI制御においては目標値を変えても大差のない応答波形が得られており、 $\theta_R=0\sim 50^\circ$ の範囲では同一の制御パラメータでほぼ満足できる制御が実現できる。安定な応答を得るためには、PID制御に比べてPI制御の方が有利である。

なお、速応性に問題があるが、これを改善するためには、制御弁とアクチュエータの圧力応答のバンド幅が少なくとも負荷部のバンド幅を上回るように回路設計する必要がある。このためには、本サーボ系では、PWM制御弁の開口面積（並列結合するオンオフ弁の個数）を大きくすればよい。

アクチュエータの容量部が大きい場合、その圧力応答の遅れがサーボ系全体の制御性能を支配することになるので、駆動負荷のダイナミクスを考慮した制御弁やアクチュエータのサイズ決定が必要である。

5. 結 言

最近注目されているゴム製空気圧アクチュエータについて、その基本特性を調べた後、オンオフ電磁弁によるPWM方式圧力制御弁を用いて位置サーボ系を構成し、その制御性能を調べた。その結果、以下のことが確認できた。

1) このアクチュエータの変位および発生力は内圧にきわめて敏感である。また、圧力から力への変換過程には遅れが存在せず、その動特性は空気室の圧力応答特性に支配される。したがって、これをサーボ用アクチュエータとして効果的に利用するためには、高精度・高応答の圧力制御が必要である。

2) オンオフ電磁弁を用いたPWM圧力制御弁は高速応答が可能であり、この種のアクチュエータ用制御弁として有用である。

3) ゴム製アクチュエータにはかなり大きなヒステリシスが存在するが、本実験の範囲では通常の線形制御則によってもほぼ満足できる制御性能を実現できる。

参 考 文 献

- 1) 宇野：ゴム人工筋とロボットへの応用，油圧と空気圧，17-3，175/180（1986）
- 2) 橋野他：空気圧駆動助ロボットの開発——抱き上げマニピュレータ——，第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集，645/646（1987）
- 3) 佐藤他：ゴム製筋肉を用いたマスタームの開発，第6回同上，413/414（1988）

-
- 4) 吉灘他：ゴムチューブ型人工筋を用いた3指ハンドの開発，第7回同上，843/844（1989）
 - 5) 園山他：空気圧ゴム人工筋のモデル化，第6回同上，273/274（1988）
 - 6) 谷口他：ゴム人工筋を用いた指機構の押し付け力特性，第7回同上，327/328（1989）
 - 7) 宮田他：空気圧ゴム人工筋の特性と制御，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'89講演概要集，142/143（1989）
 - 8) 則次他：ゴム製空気圧アクチュエータの制御，昭和62年秋季油空圧講演会講演論文集，105/108（1987）