研究論文

負 空 気 圧 サ ー ボ 系*

ウィトリスナント スィー ヌルシロ**, 二 見 達 也***
 荒 井 太四郎****, 木 村 誠*****

Negative Pressure Pneumatic Servo System

Witrisnanto. S.N., T. Futami, T. Arai, M. Kimura

Our negative pressure pneumatic servo system operates in the region ranging between atmospheric pressure and negative pressure produced using a vacuum pump. A labyrinth sealed power cylinder is used as a very small friction actuator because the working force on the piston of ordinary size is comparatively small. The air is regulated by a couple of 3 ports solenoid valves with on-off actions. Accordingly, limit cycles appear naturally. However, the limit cycles can be suppressed by proper feedback compensation, and around the stationary states, the control will be nearly equal to the PWM mode. The negative supply pressure is set at -0.052MPa . The bandwidth is estimated to be about 1.8Hz from the frequency response. Stiction hardly occurs against slow velocity inputs.

Key words: Negative pressure, On-off control, Low friction power cylinder, Limit cycle, Feedback compensation

1. 緒 言

負空気圧サーボ¹⁾は、真空ポンプによって負圧状態を作り、この状態と大気圧との間の圧力領域でサーボを動作させるものである。このようなサーボは、まわりの環境条件にもよるが、クリーンルームなどでの使用に好適であろう。例えばマイクロマシン製作などに本サーボを使用する場合、作動空気をクリーンルーム外に排気でき、室内の清浄度を損なわないからである。このような分野を中心に発展の可能性がある負空気圧サーボを、主として実験的見地から提案するものである。

本サーボシステムは作動力が比較的小さいため²⁾、アクチュエータとして低摩擦のラビリンス構造メタル

シールパワーシリンダ³⁾を採用する。

作動空気は2つの3ポート電磁弁によってオンオフ制御される。このような単純なサーボ系は安定であるが、パラメータをいかに修正してもリミットサイクルが発生する。リミットサイクルの抑制⁴⁾はいくつかの方法があり、その有効な方法としてPWM^{5),6)}がある。本システムではオンオフ動作に対して、適当なフィードバック補償^{4),7),8),9)}を用いる事でリミットサイクルを抑制し、またかなりの減衰特性を与えることができる。この制御は、定常状態の極く近傍でほとんどPWM方式になっていると考えられる。

本報告では、主としてフィードバック補償回路において、弁電流から得られる信号の整形方法とフィードバック補償回路の安定化方法、本サーボ系において最も重要なパラメータであるフィードバック補償回路の時定数を、コンパレータのヒステリシスおよび弁の応答性とは関係づけて実験的に範囲を決める方法などを明らかにし、さらに同定した制御対象特性を用いて定常状態付近のシミュレーションをも行った。

2. 使用記号

e	: 偏差信号 $r-y$	[m]
e_c	: 増幅された偏差信号	[V]
F	: 摩擦力	[N]

*平成7年3月29日 原稿受付

**Lab. for Strength of Materials, Components and Structures, Tangerang 15310, Indonesia

***東海大学工学部大学院

(所在地 〒259-12 平塚市北金目1117)

****日本空圧システム㈱

(所在地 〒141 品川区西五反田5-20-2)

*****東海大学工学部

(所在地 〒177 練馬区富士見台1-1-7)

- $G_m(s)$: MOS-FETの伝達関数
 $H_c(s)$: フィードバック補償ループの伝達関数
 i : 電磁弁の電流 [A]
 K_c : フィードバック補償ループのゲイン
 K_p : 前置増幅器のゲイン
 M : 負荷 [kg]
 p_1, p_2 : 右と左シリンダ室の圧力 [MPa]
 r : 入力信号 [m]
 R_c : MOS-FETのソース側の抵抗 [Ω]
 T_1 : 時定数 [sec]
 v : ピストンの速度 [m/sec]
 V_s : 加算器出力 [V]
 V_f : FDB信号 [V]
 V_c : コンパレータ出力 [V]
 y : ピストン変位 [m]

3. システムの構成

本システムの構成の概略図をFig. 1に示す。弁と真空ポンプの間には、負の供給圧の安定のために適当な容量のタンクを設ける。

ラビリンス構造メタルシールパワーシリンダの構造をFig. 2に示す。その摺動部は、流体潤滑が行なわれるため低摩擦である。従って本システムに適している。

Fig. 1 Compensation of negative pressure pneumatic servo system

Fig. 2 Structure of labyrinth sealed power cylinder

シリンダの内径は 20×10^{-3} m, ロッド径は 10×10^{-3} m, 行程は0.2mである。

4. 制御方式

制御方式のブロック線図はFig. 3に示す。増幅された偏差信号 e_c を入力するコンパレータのオンオフ信号は、2つのMOS-FETに入って交互に電磁弁を駆動する。これだけでは、先に述べたようにリミットサイクルが発生する。しかし2つのMOS-FETに流れる電流 i (弁の駆動電流) を適当な大きさの電圧に変換して、これをFig. 3の波線およびFig. 4に示すように、MOS-FETのソース側から適当な伝達関数 $H_c(s)$ を通してコンパレータにフィードバックすると (フィードバック補償, 以下はFDB補償と略称), リミットサイクルを抑制できる。 $H_c(s)$ としては、色々の定位性の遅れ系が考えられるが、ここでは最も単純な1次遅れ系

$$H_c(s) = \frac{K_c}{T_1 s + 1} \quad (1)$$

とする。時定数 T_1 およびゲイン K_c は制御対象の特性と弁の時間遅れなどによって決めるべきものである

定常状態の付近では、コンパレータをゲインの非常に高い素子とみなせば、 $i(s)/e_c(s)$ の伝達関数を次のように近似することができる。

$$\frac{i(s)}{e_c(s)} \approx \frac{1}{R_c H_c(s)} \quad (2)$$

式(2)は強い減衰特性を示している。またFDB回路において、偏差信号 e_c から一定の形状と大きさのFDB信号

Fig. 3 Block diagram of servo system

Fig. 4 Feedback compensation circuit

V_f が引かれてオンオフ振動するため、出力側の時間平均値 $\bar{y}$ は e_c に比例する。これは、制御がPWMとほとんど同等であることを示している。

5. 実験結果

5.1 パワーシリンダの摩擦特性

パワーシリンダのピストンをリニアガイドに結合した時の摩擦特性をFig. 1に示す。(負荷 $M=2.46\text{kg}$ および 4.11kg)。これは、負圧領域でピストンを駆動し、一定速度に対するシリンダ内の圧力 P_1 , P_2 の測定から求めたものである。同図に示す直線(a)³⁾および(b)²⁾ (内径30mm) のゴムシールシリンダの同様な実験結果と比較して、動摩擦および粘性摩擦が小さいことがわかる。

5.2 FDB補償のない場合

この場合のステップ応答の一例をFig. 6に示す。オ

Fig. 5 Friction force vs. velocity of piston

Fig. 6 Limit cycle

Fig. 7 Step response with feedback compensation 1 ($K_p=1.81$, $K_c=10.49$, $T_1=0.05$)

ンオフ制御特有のリミットサイクル (2.4Hz) が現れる。圧力源は、真空タンクにおいて負圧0.052MPa、負荷は2.46kgである(以下同じ)。このリミットサイクルを除去するために次のFDB補償を用いる。

5.3 FDB補償がある場合のステップ応答

FDB補償を行う場合、可変パラメータは、前置増幅器のゲイン K_p , FDB補償回路の式(1)のゲイン K_c , の時定数 T_1 である。これらのパラメータを経験的に調整することでFig. 7に示すようにリミットサイクルを完全に除去することができる。またパラメータの調整次第で、ほとんどオーバーシュートを無くすることができFDB補償方式の一つの特徴となる^{4,9)}。

しかし、しばしば出力応答が目標値に一致しないことがある。これは、左右の弁やFET等の特性のアンバランスに由来するものと考えられる。この定常時のコンパレータ出力は、一方の幅が極端に小さい波形となり、それに対して電磁弁が十分作動しない。

Fig. 8 Open loop response of FDB ompensation

Fig. 9 Open loop improved response of FDB ompensation circuit (y , i , V_s , V_f)

Fig. 10 Step response with feedback compensation 4 ($K_p=4.97$, $K_c=34.2$, $T_1=0.099$)

Fig. 11 Step response with feedback compensation 5 (r , y , V_f , V_c)

目標値と不一致をもたらすPWM波の改善には、FDB回路内のアンプに適当なバイアスを加えることに加え、コンパレータのヒステリシスの調整が有効である。これを適当に大きく取る事で、ノイズによるコンパレータ作動を除けるためである。ただし後述するようにその大きさに制限がある。

またFDB補償における各量をオープンループにして測定すると、Fig. 8のようになる。過渡時に特異な落ち込みのある電流 $i^{(0)}$ が弁に入力される。その影響が加算回路出力 V_s 、FDB信号 V_f にも現れ、これもまたコンパレータの適正な動作を妨げている。そのためFig. 9に示すように弁電流に比例する電圧を飽和するまで増幅して、さらにNOT素子でレベル調整することで V_s 、 V_f 等の信号を著しく整形できる。

以上の2つの基本的改善を行うことによって、例えばFig. 10, 11 (ヒステリシス10%) に示す応答が得られた。コンパレータ出力のキャリア周波数は約26.0Hz

Fig. 12 Response to velocity input

Fig. 13 Frequency response of servo

であるから、電磁弁 (最高応答周波数40Hz) も十分動作している。定常状態ではコンパレータの出力波形から制御はほとんどPWM方式となっていることがわかる。またゲイン K_p 、 K_c の調整が以前より容易に行うことができる。この方法は V_s 、 V_f 等の立上りを改善し、低雑音化をもたらして、コンパレータを安定するのみならず、応答を0.01秒前後早めることができた。

5.4 速度入力への応答

Fig. 12は $v=8.4 \times 10^{-3}$ m/sec.の低速度入力に対する応答を示すものである。ほとんどスティックスリップが現れない。これは低摩擦のラビンスシリンダの効果によるものである。

5.5 サーボのバンド幅

出力変位 y の周波数応答の実験結果をFig. 13に示す。本サーボのバンド幅はゲインと位相曲線から約1.8Hzと推定できる。

5.6 時定数の範囲決定の実験

FDB補償回路の時定数 T_1 の大きさによっては、他のパラメータをいかに修正しても、小振動を完全には除去できないことがある。このことから時定数の値には適当な上下の制限があると考えられる。

先ず $T_1=0.33$ 秒の場合のステップ応答を Fig. 14 に示す。ここでは、コンパレータのキャリア周波数 20.1 Hz、ヒステリシス 7% であり、これ以上時定数を大きくするとコンパレータ周波数が小さくなり、定常状態の小振動が目立つ。

次に $T_1=0.0094$ 秒の場合のステップ応答を Fig. 15 に示す。ここでは、コンパレータのキャリア周波数 33.7 Hz、ヒステリシス 25% である。これ以上時定数を小さくすると、キャリア周波数が 40 Hz を越え、電磁弁が十分作動しなくなる。この周波数を少しでも小さくするにはヒステリシスを大きくすることが有効であるが、ヒステリシスを 25% 以上にすると、不感帯が大き過ぎて、コンパレータが正常に働かなくなる。

以上のように T_1 の範囲としては、ヒステリシスの範囲を 5～20% として約 0.01～0.33 秒である。一般にコンパレータのキャリア周波数が高い程、出力波形が滑らかになって望ましいが、これは弁の応答性能に依存する。

Fig. 14 Step response with feedback compensation 6 ($K_p=4.97$, $K_c=28.85$, $T_1=0.33$)

Fig. 15 Step response with feedback compensation 7 ($K_p=3.66$, $K_c=31.1$, $T_1=0.0094$)

6. 定常状態付近のシミュレーション

6.1 制御対象の同定

線形化した制御対象の特性 $G(s)$ を同定するため、コンパレータに擬似インパルスを入力した時の速度応答を弁電流 i とともに Fig. 16 に示す。空気圧システムは圧縮性があるため、 $G(s)$ は無駄時間 L の弁動作遅れを含めて次式で近似することが妥当であろう。

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2 e^{-sL}}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3)$$

速度応答と式(3)を比較し、 ζ は 0.4～0.6、 ω_n は 40～60 と推定することができた。

Fig. 16 Response of valve current and Velocity to a pseudo impulse

Fig. 17 Block diagram of the neighborhood of stationary state

Fig. 18 Simulation in case of the neighborhood of stationary state

また無駄時間を次の2次のベッセルフィルタ関数で近似する。

$$e^{-sL} \approx \frac{3\omega_o^2}{s^2 + 3\omega_o s + 3\omega_o^2} \quad (4)$$

ここに $\omega_o = 1/L$ であり、無駄時間は実験より得られた $L=0.06$ 秒を用いる。

なお反対方向についても当然、式(3)のモデルのパラメータを推定すればよいが、実際あまり差が見られなかった。

6.2 シミュレーション結果

定常状態付近は、Fig. 17に示すブロック線図で表わされると考えられる。その数値計算によるシミュレーション結果をFig. 18に示す。時定数の比較的大きい時の応答はダンピングが悪いが、時定数の比較的小さい時の応答はダンピングが良く、小振動もほぼ完全に抑えることができています。これらの結果は、時定数の範囲については言及できないが、定性的に実験結果と一致している。

7. 結 び

負空気圧サーボは、差圧によって駆動される点で従来の空気圧サーボとは——低供給圧ならば一層——本質的に差異は無いが、対環境条件が大いに違う。緒言で述べたように、サーボを作動させた空気を部屋の外に排気でき、室内の清浄度を損わない。

- (1) 負空気圧サーボは、小動作圧であるため、瞬間的に比較的大きな操作力が得られるオンオフ制御が向いていると考えられ、低摩擦力のラビリンスシリンダを用いると、負空気圧サーボは十分にサーボとして作動する。速度入力に対する応答においてもスティックスリップはほとんど現れない。
- (2) 単純なオンオフ制御であるが、オンオフ動作への適当なフィードバック補償によってリミットサイクルを抑制することができ、過渡特性がよく、パラメータの選定によっては最短時間制御⁴⁾の達成の可能性がある。定常状態の極く近傍では、この制御はほとんどPWM方式になる。
- (3) 弁電流を整形してFDB補償入力に使用すること、およびコンパレータのヒステリシスを適当に調整することによってコンパレータ出力波形を改善できた。そのためゲイン K_p と K_c の調整が以前より比較的容易にでき、応答を0.01秒前後速める事ができた。
- (4) FDB時定数 T_1 のとりべき範囲をコンパレータ周波数およびヒステリシスの大きさから実験的に明らかにできた。その時、電磁弁の応答性能が一つの制

限条件となる。

- (5) 制御対象の同定および無駄時間の適当な近似から定常状態付近のシミュレーションをすることができた。これらは実験に対しての定性的な裏付けとなっている。
- (6) FDB補償方式は、オンオフ弁を用いる空気圧サーボに有効な方法であるが、油圧サーボに対しては未経験であるので、効果について明言できない。それについては他日を期したい。負空気圧サーボもPWM方式でもよいが、(2)に関連して、両者の比較を今後の検討課題としたい。
- (7) 制御対象モデルにおける ω_n , ζ , L に対する時定数 T_1 およびゲイン K_c との関連性について、最短時間制御などの最適化の観点からさらに理論的および実験的検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) Y. Morita, M. Shimizu, Y. Yoshikawa, S. Mamiya, "PWM and Its Application of a Manipulator", Fluid Control and Measurement, FLUCOME TOKYO '85, Vol. 1, 3-8, (1985).
- 2) 辻岡, 荒井, 木村: ガラスシリンダを用いた低空気圧サーボ, 東海大学紀要工学部 Vol. 32 (1992), No 2, 175-178.
- 3) 小山 紀, 香川利春, 藤野謙司, 清水優史: ラビリンスシールシリンダを使った空気圧サーボ系の駆動について, 計測自動制御学会論文集, Vol. 28, No 6, 690/696 (1992)
- 4) 日本機械学会: オンオフ制御, 1968.
- 5) 中田 毅: パルス幅変調器の非線形除去効果と周波数特性, 計測自動制御学会論文集, Vol. 10, No 3, 348/354 (1974)
- 6) 光岡豊一: 離散時間パルス密度変調空気圧サーボの開発, 機械研ニュース, No 3, 1976.
- 7) 米沢, 五郎丸: フィードバック補償オンオフ制御の実験的研究, 計測自動制御学会論文集, Vol. 3 (1967), No 2, 142-148.
- 8) 米沢, 五郎丸, 石橋: フィードバック補償オンオフ制御装置の調整条件, 計測自動制御学会論文集, Vol. 4 (1968), No 3, 242-247.
- 9) Witrnsanto, Arai, Kimura: Negative Pressure Pneumatic Servo System, Proc. FLUCOME '94, Toulouse, 107, (1994).
- 10) M.M. Schooter, "Fast response Multiple Solenoids", SAE, Feb., pp. 27-38, 1982.