

報 文

# ディスクフラップによるオンオフ弁を用いた 空気圧サーボ機構の適応制御

石川職業訓練短期大学校 藤田 壽憲

Adaptive Control of Pneumatic Servomechanism Driven by  
Electro-Pneumatic On-Off Valve with Disk Flapper

Toshinori Fujita

**要 約** 近年、油空圧の分野でサーボ機構に適応制御を用い、その特長を活かした研究が行われ適応制御の有効性が明らかになりつつある。また一方で、オンオフ弁をPWM駆動、PCM駆動することによりサーボ機構を構成する研究も盛んに行われている。そこで本研究では、ディスクフラップを用いたオンオフ弁をPWM駆動することにより空気圧サーボ機構を構成し、それにモデル規範形適応制御を用いることにより、空気圧サーボ機構の動的性能の向上、適応性の改善を試みた。

具体的には、はじめに減衰率の異なる4つの2次系規範モデルに対するサーボ機構の適応性について検討した。次に、比例制御でサーボ機構の特性を支配する計算機ゲイン、慣性負荷、及び供給圧力を変更し実験を行った。その結果、サーボ機構の特性が規範モデルの特性に一致することを確認した。最後に慣性負荷を変化させた場合と、作為的に片側の弁の供給圧力を減少させた場合の応答を測定し、動作中のパラメータ変化に対する適応性について調べたところ実験を行った範囲において適応性は十分であった。

## 1 はじめに

適応制御は古くから研究されてはいるが、その理論はまだ完全に体系化されていない。しかしながら、電動機の高回転制御、振動試験機の制御などの例にみられるように、近年、適応制御があらゆる分野で応用されつつある<sup>(1)</sup>。油圧の分野では適応制御の特長を活かした多数の研究が行われ、供給圧の変化、油温変化に伴う粘性変化などのパラメータ変化に対しても特性が変化しないサーボ系が得られている<sup>(2)(3)</sup>。空気圧の分野においてもいくつかの研究が行われ、適応制御の有効性が明らかになりつつある<sup>(4)</sup>。

また一方で、産業界におけるエレクトロニクス化、メカトロニクス化は著しく、油空圧の分野でもこれらが進展しつつある。コントローラにはマイコンが用いられ、これにともない制御方式もアナログ制御からデジタル制御へと主体が移ってきている。制御がデジタル化さ

れると従来用いられてきたアナログ弁に代わって、オンオフ弁を用いて間欠的な流体パルス列を形成し、これにより平均的な流体出力を制御する流体パルスの制御法が用いられるようになってきた<sup>(5)</sup>。この方法を用いてオンオフ弁をパルス幅変調駆動(PWM駆動)、パルス符号変調駆動(PCM駆動)することによりサーボ機構を構成する研究も油圧、空気圧の両分野で盛んに行われている<sup>(5)(6)</sup>。

筆者らは、先にディスクフラップ形のオンオフ弁を考案し、その設計法及び特性について明らかにした<sup>(7)(8)</sup>。また、試作したオンオフ弁をPWM駆動することにより空気圧サーボ機構を構成できることも示した<sup>(7)(8)</sup>。そこで本研究では、その空気圧サーボ機構にモデル規範形適応制御(MRACと略す)を行い、規範モデル、駆動条件の変化に対するサーボ機構の適応性を調べ、適応制御のPWM駆動される空気圧サーボ機構への有効性について明らかにすることを目的とする。

## II サーボ機構の構成

### 1 PWM駆動による流量制御<sup>(5)</sup>

パルス幅変調法とはオンオフ弁のような出力が2つの値となるものに対して、図1のように一定の時間間隔Tのなかで1つの値と他の値を取る時間の比率を変化させることにより、その平均値が2値の中間の連続的な出力値とする手法である。いま、2方向のオンオフ弁をPWM駆動することを考える。理想的な場合として切り換え時間は零とすると、オンオフ弁が開となる時間 $t_{on}$ とその通過流量 $Q_{on}$ の関係は

$$Q_{on} = t_{on} \times \dot{Q}_p \quad (1)$$

ただし、 $Q_p$ はオンオフ弁の開状態での通過流量である。よって単位時間当りの平均通過流量 $\bar{Q}$ は

$$\bar{Q} = \frac{Q_{on}}{T} = Q_p \times \frac{t_{on}}{T} = Q_p \times m \quad (2)$$

ここで、Tは変調周期、mは変調率である。(2)式より、平均通過流量は変調率に比例することになり、これにより流量制御を行うことができる。

実際には流体の圧縮性やオンオフ弁の切り換え時間が存在するために図2の波線とはならず、変調率に対して流量が変化しない不感帯部や比例的に変化しない部分を生じる。これを改善するためには高速動作可能なオンオフ弁が必要であり、現在、切り換え時間3~5ms程度のものが開発されている。この方法の利点は、安価で構造が簡単なオンオフ弁だけでよいこと、ベクトル制御が行い易くなりロバスト性の高い制御系の構成が可能となること、通常のアナログ弁によるものより位置決め精度の高いものとなりうることなどがあげられる。

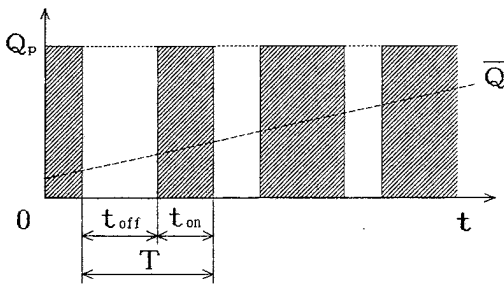


図1 オンオフ弁のPWM駆動

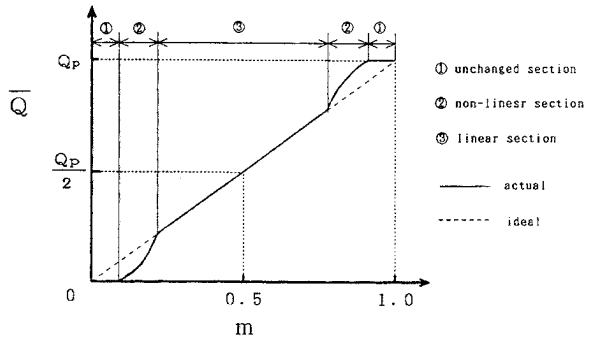


図2 変調率と流量の関係

### 2. サーボ機構の概要<sup>(8)</sup>

サーボ機構の概要を図3に示す。サーボ機構の主な構成要素はコントローラ、ディスクフラップ形のオンオフ弁、空気圧シリンダ及び位置センサである。シリンダはストローク125mm、内径20mmの片ロッドの低摩擦タイプを位置センサとしてエンコーダを使用し、その信号はカウンタを通してコントローラにフィードバックされている。位置センサの分解能9.1 $\mu$ m/pulseである。コントローラとしてはマイコンを用い、駆動方式はPWM駆動で変調周波数は40Hzとした。また、コントローラには位置制御の精度と安定性を調整するため不感帯を設け、最低の出力値をシリンダが動き出す変調率とした。シリンダの非対称性および移動方向によるシーリング部の摩擦特性の違いにより、同一変調率における負方向の移動速度が正方向の約2倍となることから正方向移動時の計算機ゲインを負方向の2倍とした。両方の弁がともにオン状態にあるときはピストンは平衡状態にあり、移動を行うには移動したい方向の弁をオフ状態にすればよく、その移動速度は変調率に応じて設定できる。

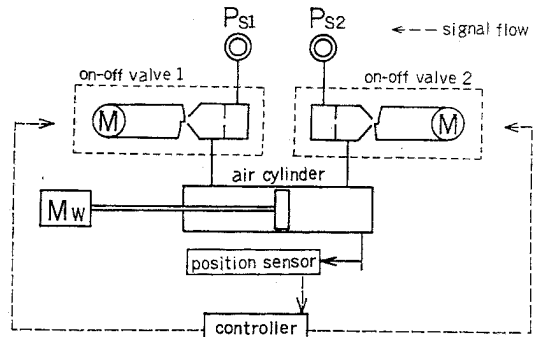


図3 サーボ機構

### III 適応制御系の構成<sup>(1)</sup>

#### 1 規範モデルとサーボ機構の伝達関数

適応制御とは、特性が十分把握されていない制御対象あるいは、動作中に系のパラメータが変化するような制御対象に対して、コントローラの出力を自動調節する制御方式である。本研究では、希望する特性を示す規範モデルを設定し、制御対象の出力をそのモデルに追従させるMRACを用いた。

MRACの設計において規範モデルの次数については適応させる制御対象、本研究の場合は空気圧サーボ機構の伝達関数の次数に等しいという前提条件があるが、3次系の伝達関数の空気圧サーボが2次系のモデルで適応可能であるという報告<sup>(2)(3)</sup>や次数が低くなるに伴い計算時間が短くなることから、規範モデルの伝達関数を次式で示されるような2次の伝達関数とすることにした。

$$G_M(s) = \frac{\omega_M^2}{s^2 + 2\zeta_M \omega_M s + \omega_M^2} \quad (3)$$

オンオフ弁をPWM駆動することから離散的な制御となるので、サンプラと零次ホールドを用いて離散時間系に変換された(3)式のパルス伝達関数を求めると、

$$G_M(z) = Z[G_h(s) \cdot G_M(s)] = \frac{b_{M0}z + b_{M1}}{z^2 + a_{M1}z + a_{M2}} \quad (4)$$

$$G_h(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (5)$$

よって規範モデルの入力 $u_M(k)$ と出力 $y_M(k)$ の関係は、

$$A_M(z^{-1}) y_M(k) = z^{-d} B(z^{-1}) u_M(k)$$

$$A_M(z^{-1}) = 1 + a_{M1}z^{-1} + a_{M2}z^{-2} \quad (6)$$

$$B(z^{-1}) = b_{M0} + b_{M1}z^{-1}$$

$$d=1$$

$d$ はむだ時間を表す既知の正数とする。また、 $A_M(z^{-1})$ は漸近安定多項式とする。(6)式の関係から

$$y_M(k+1) = b_{M0}u_M(k) + b_{M1}u_M(k-1) - a_{11}y_M(k) - a_{22}y_M(k-1) \quad (7)$$

となり、過去の入力値だけから次のステップの規範モデルの出力値が求められることになる。

空気圧サーボ機構の伝達関数は周波数応答からほぼ3次系と考えられ、折れ点法を用いて次式で近似する。

$$G_P(s) = \frac{\omega_3 \omega_4^2 (-s + \omega_1) (s + \omega_2)}{\omega_1 \omega_2 (s + \omega_3) (s^2 + 2\zeta \omega_1 s + \omega_1^2)} \quad (8)$$

$$\zeta = 0.23 \quad \omega_1 = 283 \text{ [rad/s]} \quad \omega_2 = 6.28 \text{ [rad/s]}$$

$$\omega_3 = 9.42 \text{ [rad/s]} \quad \omega_4 = 32.7 \text{ [rad/s]}$$

規範モデルの場合と同様に離散時間系に書き直すと、サーボ機構への入力 $u_P(k)$ と出力 $y_P(k)$ の関係は、

$$A(z^{-1}) y_P(k) = z^{-d} B(z^{-1}) u_P(k)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} \quad (9)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}$$

$$d=1$$

$a_i$ 、 $b_i$ は未知パラメータ、 $b_0 \neq 0$ とする。(9)式の関係から

$$y_P(k+1) = b_0 u_P(k) + b_1 u_P(k-1) + b_2 u_P(k-2) - a_1 y_P(k) - a_2 y_P(k-1) - a_3 y_P(k-2) \quad (10)$$

となり、シミュレーションの際に必要なサーボ機構の応答が得られる。

#### 2 MRACのアルゴリズム

MRACのブロック線図を図4に示す。図中のプラントが空気圧サーボ機構に相当する。MRACのアルゴリズムとして、適応ゲイン一定なもの、適応ゲインを減少させるものなど数種類のものが提唱されている。しかし、どのアルゴリズムが最適ということは決まっておらず、その時々において適切なものを選択する必要がある。適応ゲイン行列のトレース一定としたアルゴリズムは他のアルゴリズムに比して多少計算が複雑になるものの、頻繁に変化するパラメータを同定する問題に適しているという報告<sup>(1)</sup>や、空気圧サーボ機構において収束が他のアルゴリズムに比して速いという報告<sup>(1)</sup>があることから、本研究ではトレース一定のアルゴリズムを用いることにした。以下にMRACを行うのに必要な適応則及び計算手順を簡単

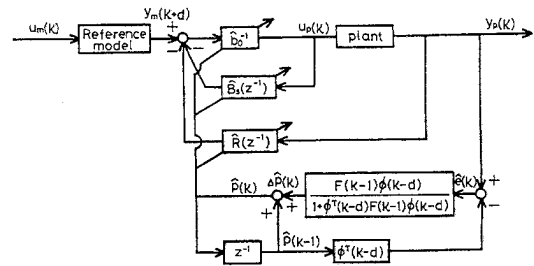


図4 MRACのブロック線図

に説明する。詳細な理論的取扱いは文献<sup>(1)</sup>を参照して欲しい。

まず、プラント変数ベクトル  $\phi(k)$  を次式で定義する。

$$\begin{aligned} \phi^T(k) &= [u_V(k), \phi_0^T(k)] \\ &= [u_V(k), u_V(k-1), u_V(k-2), \\ &\quad y_V(k), y_V(k-1), y_V(k-2)] \end{aligned} \quad (11)$$

推定パラメータベクトル  $\hat{p}(k)$  を次式で定義する。

$$\begin{aligned} \hat{p}^T(k) &= [\hat{b}_0(k), \hat{p}_0^T(k)] \\ &= [\hat{b}_0(k), \hat{b}_1(k), \hat{b}_2(k), \\ &\quad -\hat{a}_1(k), -\hat{a}_2(k), -\hat{a}_3(k)] \end{aligned} \quad (12)$$

適応誤差信号  $e^*(k)$  を次式の様に定義する。

$$e^*(k) = \frac{D(z^{-1})y_V(k) - \hat{p}^T(k-1)\phi(k-d)}{1 + \phi^T(k-d)F(k-1)\phi(k-d)} \quad (13)$$

$$= \frac{\hat{e}(k)}{1 + \phi^T(k-d)F(k-1)\phi(k-d)} \quad (14)$$

ただし、補償器  $D(z^{-1})$  は計算を簡単化するために  $D(z^{-1})=1$  を採用することにした。

制御器の設計の目的は、 $y_V(k)$  が  $y_M(k)$  に漸近的に一致するような制御入力  $u_V(k)$  の発生機構を作ることであり、このことは適応誤差信号を零にすることと同等である。制御入力  $u_M(k)$  が与えられると(7)式により規範モデルの次の出力が算出される。また、プラント変数ベクトル  $\phi(k-d)$  は(11)式に示すように、サーボ機構への過去から現在までの入力信号により与えられる。プラント変数ベクトル  $\phi(k-d)$  が与えられると適応ゲイン行列が次式により更新される。

$$F(k) = \frac{1}{\lambda(k)} [F(k-1) - \frac{F(k-1)\phi(k-d)\phi^T(k-d)F(k-1)}{1 + \phi^T(k-d)F(k-1)\phi(k-d)}] \quad (15)$$

ただし、 $\lambda(k)$  は常に適応ゲインのトレースが一定になるように次式で計算される。

$$\begin{aligned} trF(0) &= \frac{1}{\lambda(k)} tr[F(k-1) \\ &\quad - \frac{F(k-1)\phi(k-d)\phi^T(k-d)F(k-1)}{1 + \phi^T(k-d)F(k-1)\phi(k-d)}] \end{aligned} \quad (16)$$

適応ゲイン行列が算出されると推定パラメータベクトル  $\hat{p}(k)$  を次式により推定する。ただし、 $e(k)$  は(14)式の関係より算出できる。

$$\begin{aligned} \hat{p}(k) &= \hat{p}(k-1) + \Delta \hat{p}(k) \\ &= \hat{p}(k-1) + \frac{F(k-1)\phi(k-d)e(k)}{1 + \phi^T(k-d)F(k-1)\phi(k-d)} \end{aligned} \quad (17)$$

以上の計算を行うと、この制御則の主目的である制御入力  $u_V(k)$  が次式により合成される。

$$u_V(k) = \frac{y_M(k+d) - \hat{p}_0^T(k)\phi_0(k)}{b_0(k)} \quad (18)$$

#### IV 適応ゲイン行列の初期値

MRACでは適応ゲイン行列の初期値が制御系の発散、収束性など性能を大きく左右することになる。しかし、その具体的な値は制御対象によりまちまちであり<sup>(2)(4)</sup>、解析的に求めることもできない。そこで計算機でシミュレーションを行い初期値をいろいろ変化させたときの応答から試行錯誤的に求めてみた。結果の一例を図5に示す。

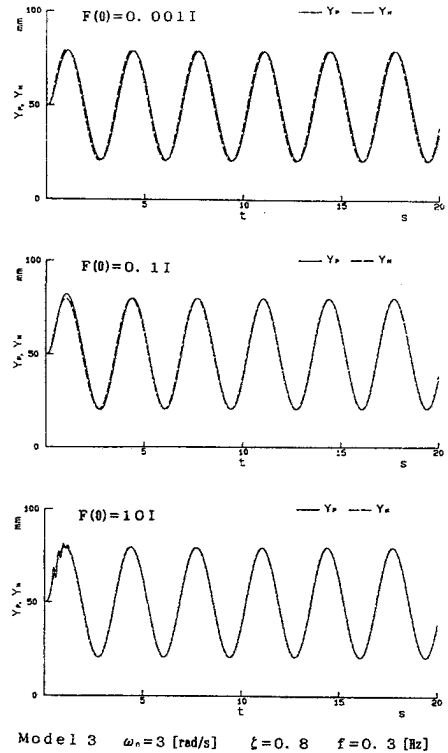


図5 適応ゲイン行列の初期値の影響

初期値が10 I (Iは単位行列を表す) より大きい初期値では発散した。10 I では適応制御を開始してから半周期まで振動的となり、0.001 I では5周期目あたりでもかなり位相が遅れている。シミュレーションから、初期値を0.01 I ~ 1 I に絞り、入力波形や周波数も変化させて実際に適応制御を行ってみた。その結果、0.1 I が最も適当であり、実験には全て0.1 I を用いることにした。

以降はそれぞれをモデル1~4と呼び、各モデルについて実験を行った。

## VI 実験結果

### 1 規範モデル

規範モデルは希望の特性を示すものとするればよいとされているが、サーボ機構の伝達関数の次数との関係、及びその応答性を考慮しなければならない。モデルの次数はIII章で2次と決定した。減衰率は適当な4種類を選定し、それぞれについて固有角周波数を十分大きな値から徐々に小さくして全体の周波数領域で適応可能となる値を実験的に求めた。結果を以下に示す。

- モデル1 :  $\omega_M=2$      $\zeta_M=0.4$
- モデル2 :  $\omega_M=2$      $\zeta_M=0.6$
- モデル3 :  $\omega_M=3$      $\zeta_M=0.8$
- モデル4 :  $\omega_M=4$      $\zeta_M=1.5$

### 2 規範モデルの適応性

適応制御理論の妥当性を確認するために計算機でシミュレーションを行ってみた。モデル3の適応の様相を図

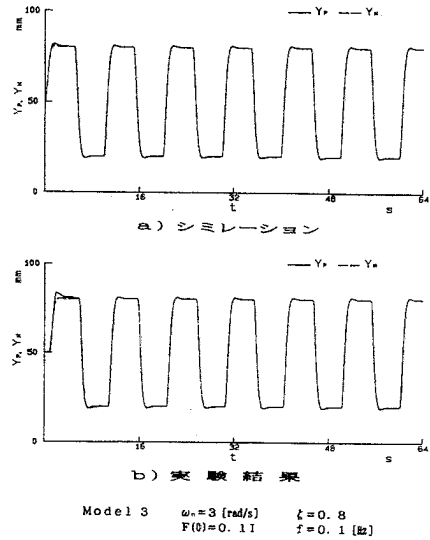


図6 適応の様相

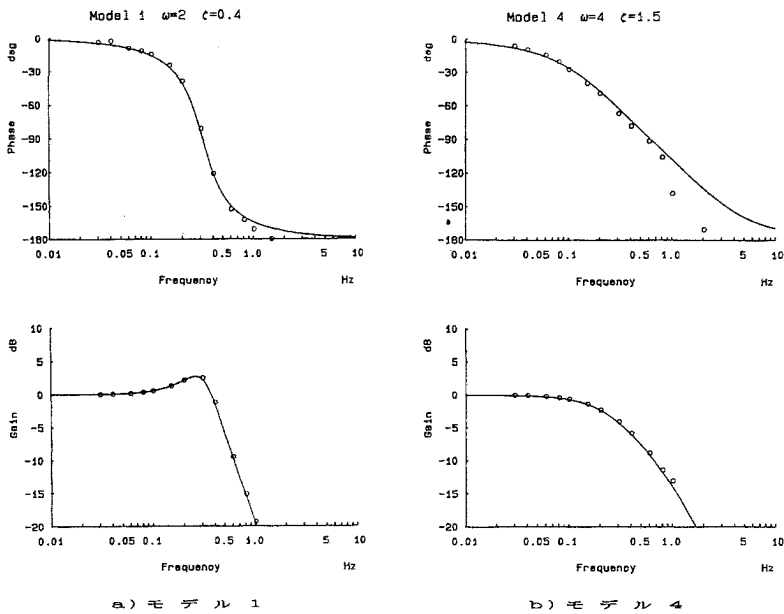


図7 周波数応答

6 a) に示す。これは適応制御を開始してから適応するまでの様子を表したものである。入力波形は高周波成分を含む0.1Hzの方形波とした。応答の初期にはモデル出力より大きくなっているが、2周期以降は規範モデル通りの応答を示している。実際に適応制御を行ったときの適応の様相を同図b) に示す。シミュレーションと同様にうまく適応していることがわかる。

モデル1と4の場合の周波数応答を図7に示す。いずれのモデルも周波数の高い領域を除いてほぼ適応させることができた。ゲイン線図では、ほぼモデルの特性と一致しているが、位相線図では全てのモデルについて入力周波数が0.6Hzより高い周波数領域では位相が遅れる傾向を示した。図8にモデル4の適応の様相を示す。0.1Hzや0.3Hzでは数周期で適応しているが、0.8Hzでは負方向に移動する途中でモデルの出力より多少応答が遅れており、周波数応答の結果に対応している。

### 3 作動条件に対する適応性

サーボ機構の特性は作動条件により大きく変化する。そこで計算ゲイン、供給圧力、シリンダに取り付ける慣性負荷と言った作動条件を変更したときの適応性について調べた。図9に計算機ゲインを、図10に供給圧力を変更した場合の周波数応答を示す。慣性負荷を変更した場合

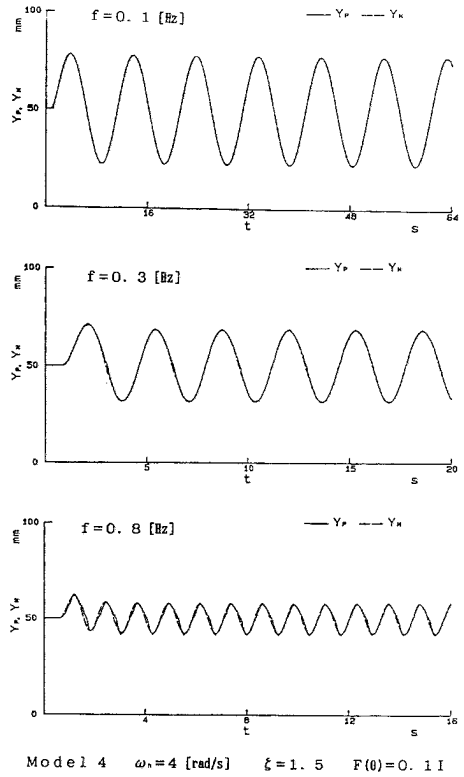


図8 適応の様相

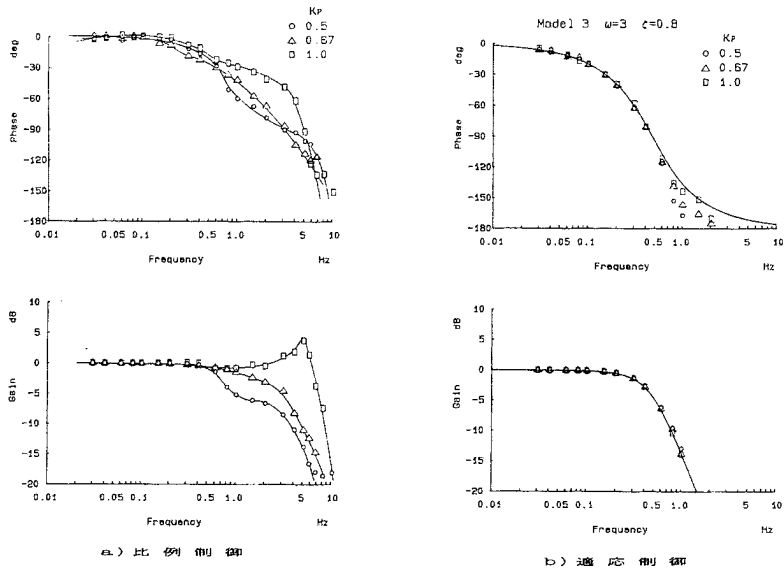


図9 周波数応答(計算機ゲインを変更した場合)

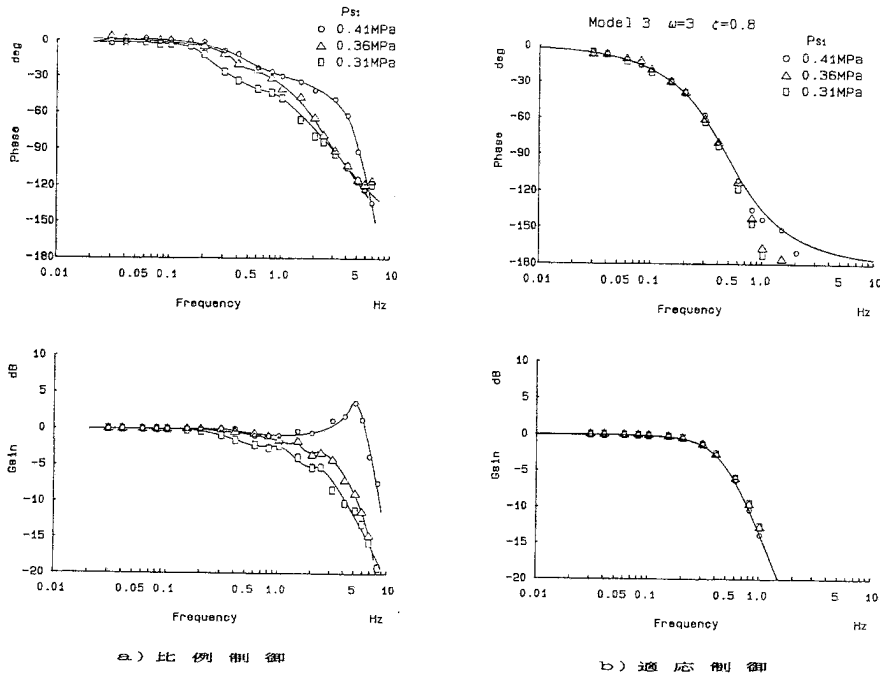


図10 周波数応答（供給圧力を変更した場合）

合や他のモデルの場合も同様に適応させることができた。位相線図では計算機ゲインが小さい場合と供給圧力が低い場合、高周波域においてもゲイン線図は一致しているが、位相ではやや遅れる傾向がみられ適応するまでの時間も多少長くなった。

#### 4 駆動中の状態変化に対する適応性

適応制御のもう一つの大きな特徴であるプラントの状態が変化しても出力が変化しないという自己調節機能を確認する。まず、慣性負荷がない状態で適応制御を行いパラメータが十分適応した後に慣性負荷を付加し、サーボ機能の適応性を調べた。結果を図11に示す。図中矢印を付した所で慣性負荷3.0kgを付加した。比例制御では負荷を付加した後のオーバーシュートの度合いが付加する前より大きくなっているのが、適応制御を行った場合は慣性が付加されてもその応答には全く影響が見られない。

次にオンオフ弁を供給圧力のうちの一方だけを人為的に減少させ、そのときの適応性について調べた。実験結果の一例を図12に示す。上側の図は供給圧力の変化を示している。比例制御では応答波形の中心位置は元の位置からずれを生じている。適応制御では低圧側、高圧側い

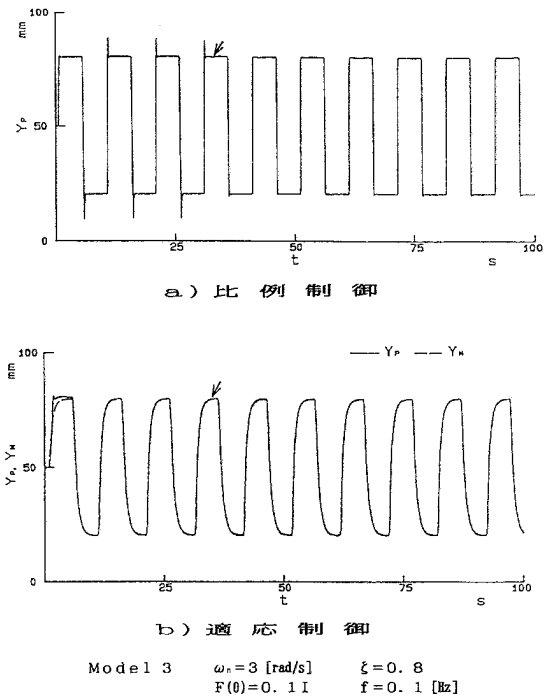


図11 慣性負荷を付加した場合の応答

ずれを数周期程度ではぼ元の状態に復元している。これらの状態変化に対する適応性はある範囲までであり、極端な慣性や圧力の変化がある場合は、完全には元の通りの応答が得られなかった。

Ⅶ まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下になる。

- (1) 適応ゲイン行列の初期値を0.1 I とし減衰率の違う4種類の規範モデルに適応制御を行なったところ、いずれのモデルについても数周期で適応させることができた。
- (2) 供給圧力など特性を決めるパラメータを変更した結果、比例制御では対応できなかったような特性変化に対してもMRACを行うことによって適応させることができた。
- (3) 動作中のパラメータ変化に対する適応性について調べたが、実験を行った範囲では適応性は十分であった。

Ⅷ 参考文献

- (1) I. D. Landau・富塚：適応制御システムの理論と実際，オーム社，1986年。
- (2) 井上・高橋・池尾：モデル規範形適応制御理論の電気・油圧サーボシステムへの応用，油圧と空気圧，18巻6号，1987年9月，p467-474。
- (3) 真田・他4名：電気-油圧サーボ機構の適応制御の特性改善，昭和62年春季油圧圧講演論文集，1987年5月，p49-52。
- (4) 荒木・山本：空気圧サーボ系の固定トレース適応則によるモデル規範形適応制御，油圧と空気圧，20巻3号，1989年5月，p58-65。
- (5) 田中：油空圧のデジタル制御と応用，近代図書，1987年。
- (6) 則次：パルス幅変調方式による電気・空気圧サーボ系の構成，計測自動制御学会論文集，20巻8号，1984年8月，p754-761。
- (7) 佐野・藤田・松島・村本：ディスクフラップによる電気-空気圧オン・オフ弁，日本機械学会論文集（B編），54巻508号，1988年1月，p3457-3461。
- (8) 佐野・藤田：ディスクフラップによる電気-空気圧

オン・オフ弁の改善，日本機械学会論文集（B編），54巻508号，1988年12月，p3457-3461。

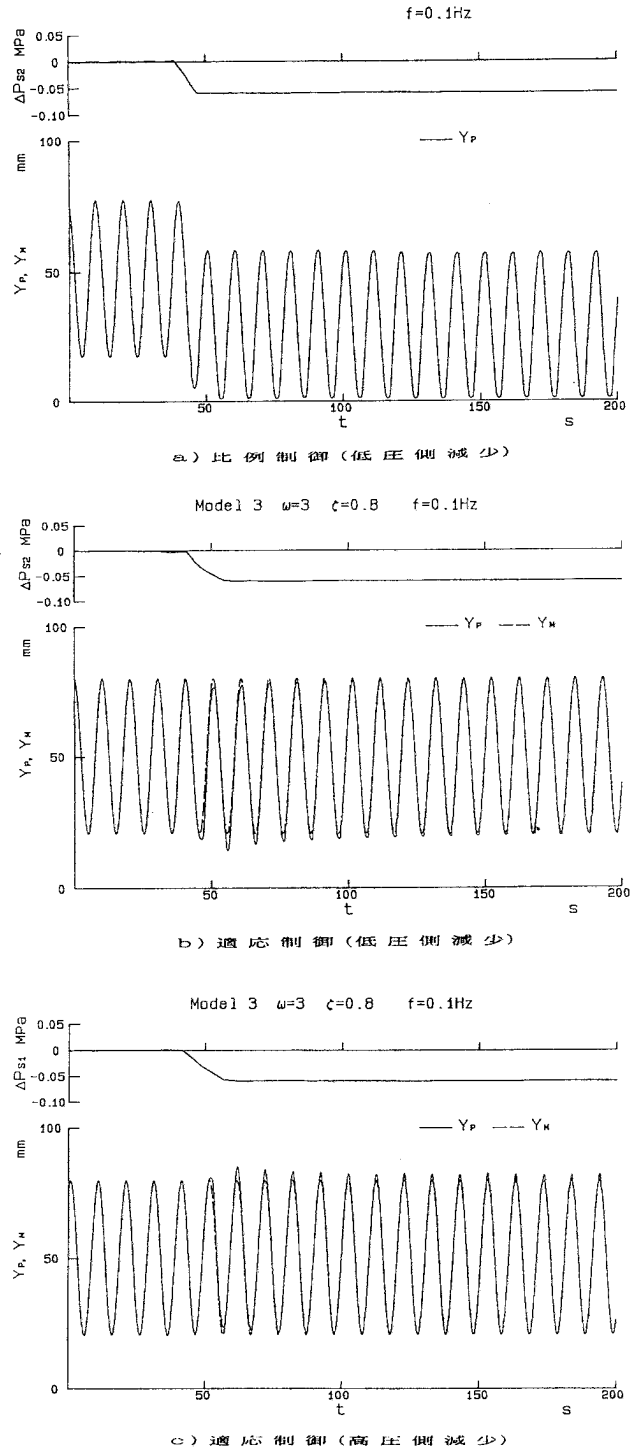


図12 供給圧を変化させた場合の応答