

ロック機構をもつ油圧アクチュエータ系の差動 PWM 制御* (負荷系に強制外力が存在する場合)

山 田 宏 尚^{*1}, 末 松 良 一^{*1}
小 寺 秀 明^{*2}, 武 藤 高 義^{*3}

Differential PWM Control of Hydraulic Actuator System with Locking Mechanism

Hironao YAMADA, Yoshikazu SUEMATSU,
Hideaki KODERA and Takayoshi MUTO

In the preceding papers, the authors proposed a method of the differential PWM for a hydraulic actuator operated by two 3-way high-speed solenoid valves. The actuator operated by this method shows good linear characteristics as a controller which achieves accurate positioning. However, when the actuator is connected to a load with large force over Coulomb friction, an oscillatory motion appears in the steady state. Therefore, the actuator control system becomes considerably inaccurate. To solve this problem, a new type of actuator, which has 4 check valves, is designed in this study. The dynamic characteristics of the actuator, which has a spring as a load, are investigated by simulations and experiments. Consequently, it is clarified that the actuator can be controlled with high accuracy, retaining a merit of the differential PWM method, and moreover, that the permanence of the proposed actuator can be improved by adopting a locking mechanism.

Key Words: Fluid Power Systems, Computer Control, Hydraulic Actuator, Solenoid Valve, Differential PWM, Digital Control, Locking Valve

1. ま え が き

電磁弁駆動の油圧アクチュエータに対する新規のパルス幅変調 (PWM) 制御法として、著者らはこれまでに差動 PWM 法を提案した⁽⁵⁾。差動 PWM 法とは、二つの電磁弁の切換えタイミングを調整することにより、ピストン前後の差圧パルスを任意幅で与えようとする方式であり、①微小なデューティ (変調率) に対しても、良好な線形的関係 (差圧-デューティ特性) で系を駆動することができ、②位置決め精度の大幅な改善が可能となるなどの特長を持つ。

しかしながら、クーロン摩擦力を超える大きさの外力がアクチュエータに作用する場合、デューティに比例する時間幅の差圧パルスを間欠的に与えてピストンを駆動する差動 PWM 法では、高精度での位置決めが困難となる。すなわち、アクチュエータに(駆動力としての)差圧が働いていない時間幅では、外力によりピストンの変動が生じうる (このことは、従来の PWM

法により駆動した場合についても同様である)。実際の系では、クーロン摩擦力を超える大きさの強制外力が負荷として作用する場合が少なくなく、このような場合においても高精度での位置決めが可能な PWM 制御系の開発が望まれる。これまでに、田中ら⁽²⁾⁽³⁾は、従来の PWM 法駆動系を対象として、電磁弁の上流側管路に2個のチェック弁を取付けて、ばね負荷が存在する場合においてもロック可能とするシステムを構成している。しかしながらこのシステムは、ロックによる定位置でのアクチュエータ保持を主目的として構成されており、応答波形に微小振動が生じ、制御精度の面でのさらなる改善が望まれる。

そこで、本研究では、アクチュエータ (シリンダ) の上流および下流側管路にチェック弁を取付けることにより、強制外力の存在に対してもロバストな制御特性を持つ差動 PWM アクチュエータ系を提案し、その制御性能について、実験およびシミュレーションにより検討する。

2. 主 な 記 号

A_c : チェック弁の受圧面積

A_s : シリンダの有効断面積

a_{pj} : 管路 j の断面積

* 平成3年3月16日 東海支部第40期総会講演会において講演、原稿受付 平成3年2月21日。

^{*1} 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 名古屋大学大学院。

^{*3} 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

b_c : チェック弁内ポペットの粘性減衰係数
 c_c : チェック弁の流量係数
 D : デューティ (= 弁のオン時間幅/ T_c)
 d_c : チェック弁内の弁座の直径
 f_c : PWM 搬送波の振動数 (= $1/T_c$)
 k_c : チェック弁内ばねのばね定数
 k_l : 負荷ばねのばね定数
 l_j : 管路 j の管長
 m : アクチュエータ (ピストン) の質量
 m_c : チェック弁内ポペットの質量
 p_a, p_b : シリンダ左, 右室内の圧力
 p_{cj} : チェック弁 j のクラッキング圧力
 p_{in} : チェック弁の入口ポート側圧力
 p_{out} : 同出口ポート側圧力
 p_s : 供給圧力 (一定)
 q_j, p_j : 管路 j ($j=1, 2$) 内の流量と圧力
 q_{v11}, q_{v21} : 電磁弁 1, 2 の P \rightarrow A ポート流量
 q_{v12}, q_{v22} : 電磁弁 1, 2 の A \rightarrow T ポート流量
 v_a, v_b : シリンダ左, 右室内の容積
 x : ピストンの変位 (基準長 $x_0=5.0 \times 10^{-3}$ m)
 x_s : 負荷ばねの初期縮み量
 z : チェック弁内ポペットの変位
 z_{oj} : チェック弁 j 内のばねの初期縮み量
 ϕ_c : チェック弁内ポペットの半頂角

3. システムの構成と作動原理

本研究で提案するチェック弁を付加した PWM アクチュエータ系の模式図を図 1 に示す。本システムは、2 個の 3 ポート位置形電磁弁 (以下、弁 1, 2 と略記する)、マイクロコンピュータ (コントローラ)、アクチュエータ (両ロッド式複動シリンダ)、差動トランス (位置検出器) および A/D 変換器を主要要素として構成されている。また、マイクロコンピュータは、入力信号の設定、制御力の演算、およびパルス幅変調などの役割をもつ。本システムでは、これに加えて電磁弁の上流および下流側にチェック弁 I~IV を取付けている。また、アクチュエータには負荷として、強制外力を与えるばねが接続されている。

いま、図 1 のシステムにおいて弁 1 をオン、弁 2 をオフ (すなわち、弁 1 を P \rightarrow A ポート側、弁 2 を A \rightarrow T ポート側に接続) した場合は、両シリンダ室内には $\Delta p (= p_a - p_b) > 0$ の差圧が生じ、これによる駆動力が、ばね力より十分大きければ、ピストンは右方向 ($x > 0$) に駆動される (このとき、チェック弁 I, IV に対しての油の流れは順方向となるため、チェック弁は作動しない)。次に、弁 1, 弁 2 をともにオン

とした場合、外力が存在しなければ両シリンダ室内には差圧は生じずピストンは静止するが、実際には、ばね負が存在するため、ピストンは左方向 ($x < 0$) に移動しようとする。しかし、このとき生じる流れは、チェック弁 I に対して逆方向となるため、チェック弁が作動し、ピストンはロックされて静止する。また、弁 1, 弁 2 をともにオフとした場合には、チェック弁 III のクラッキング圧力を、ばね負荷によって生じる圧力より十分大きく設定することにより、アクチュエータをロックさせることができる。

以上のように、本システムでは、ばね負荷の存在に対しても確実にアクチュエータを動作させることができ、差動 PWM 法の原理を活かした高精度での位置決めが可能となることが期待できる。

4. 系の数学モデルとシミュレーション

図 1 に示す本システムは、電磁弁の上流および下流側管路に 4 個のチェック弁が付加されており、電磁弁の高速でのオンオフ動作に伴って生じる管路内での非定常流動や、電磁弁の切換え特性に加えて、チェック弁の動作特性も、システムの制御性能に重要な影響を及ぼすものと考えられる。

本研究では、電磁弁のおくれ特性、管路要素の存在を考慮に入れ、加えて、チェック弁の動特性をも考慮した系のシミュレーションを実施する。そこで、本章では、そのモデル化の過程ならびに数値シミュレーションの手法などについて概略的に述べ、後述する実験値との比較への準備とする。

系のモデル化に関連したシステム構成図を図 2 に示す。図示の系に対する支配方程式を導くにあたり、次の仮定を設ける。

(1) 油源からの供給圧力 p_s は一定とする。

(2) 管路としては、上流および下流側管路 (図 2 中の l_1, l_2) の影響のみを考慮するものとし、それらの関係を 1 自由度の集中定数系で近似する⁽⁴⁾。

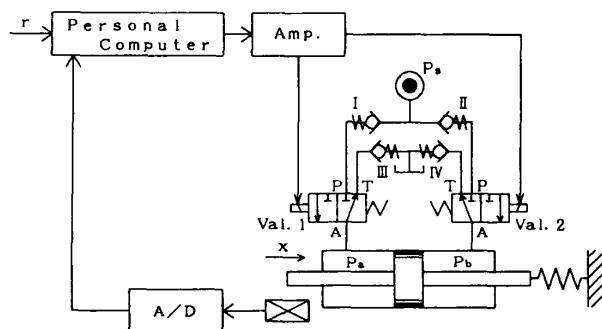


図 1 PWM 油圧アクチュエータ系

(3) 弁の運動 (ポペット部の変位 y と時間 t との関係曲線) に関しては, それを [むだ時間+一次曲線] の関係で表す⁽⁴⁾.

このような仮定に加えて, チェック弁の運動方程式および通過流量に関する式を以下のように構成する. 本システムで用いるチェック弁はアングル形のものであり, その構造図を図3に示す. チェック弁の運動方程式はポペットの質量 m_c を, 十分小さいものとして無視すれば以下になる (ポペット質量 m_c を無視する仮定の妥当性については, シミュレーションによって確認した).

$$b_c \frac{dz}{dt} + k_c(z + z_0) = A_c(p_{in} - p_{out}) \quad \cdots \cdots (1)$$

次に, チェック弁を通過する流量 q_c は, 以下のように表される.

$$q_c = \pm c_c a_c \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{in} - p_{out}|} \quad \cdots \cdots (2)$$

ただし, \pm の符号は, $p_{in} \geq p_{out}$ のとき正, $p_{in} < p_{out}$ のとき負をとるものとする. また, 開口面積 a_c は, 弁変位 z の関数として, 次式で与えられる.

$$a_c = \pi z \sin \phi_c (d_c - z \sin \phi_c \cos \phi_c) \quad \cdots \cdots (3)$$

以上のような仮定およびチェック弁の関係式をもとに系の構成式を導けば, 本数学モデルに基づくシミュレーションが実施できる [式(1)~(3)以外の関係式については文献(5)と同様である].

5. 系の応答性能

本章では, ステップ応答に関する実験値とシミュレーション結果との比較検討をもとに, 本システムの動特性, 制御性能について考察する. 本実験装置の主な諸元および実験条件を表1に, また, チェック弁に関する諸元を表2に示す. なお, コンピュータ制御におけるサンプリング時間は, $t_s = 0.25 \text{ ms}$ として実験を行った. また, 使用した電磁弁は文献(5)で使用したのと同じもので, その諸元および切換え特性値については, 同文献を参照されたい.

まず, 従来法に基づくシステムにおいて, ばね負荷が存在する場合の応答性能を調べるために, 図1のシステムからチェック弁を取り除き, ステップ応答 (目標値 r を $x/x_0 = 0.5$ の大きさとする) の実験を行った結果を図4に示す. 図の(a), (b)にはそれぞれ, アクチュエータの変位 x , および弁への入力デューティ D_1, D_2 と $\Delta D (= D_1 - D_2)$ の各波形が示されている. なお, 本システムにおける制御則は比例制御 (比例ゲイン $k_p = 0.32 \Delta D / \text{mm}$) を用いた. 図によれば, x の応答波形は目標値に至らずに振動を生じていることがわ

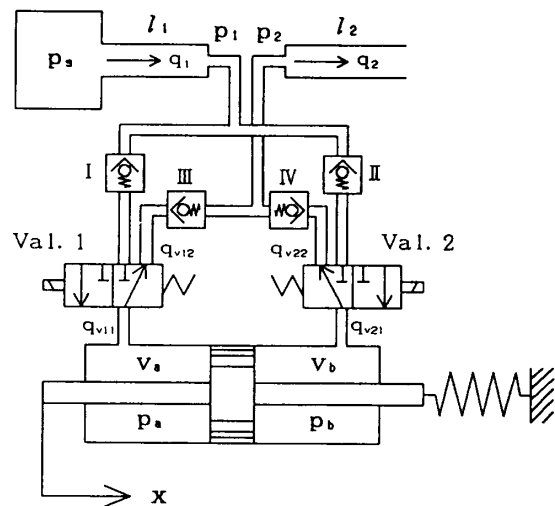


図2 システムの構成図

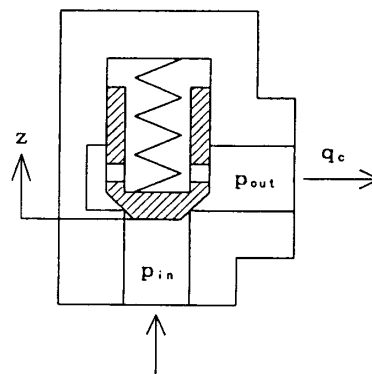


図3 チェック弁の構造

表1 主な実験諸元

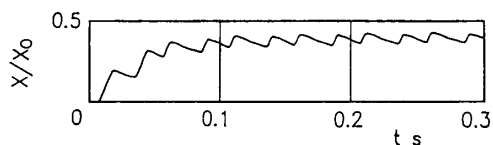
p_s	1.96	(MPa)
f_c	20	(Hz)
A_s	3.85×10^{-4}	(m^2)
m	0.562	(kg)
k_1	5.68×10^3	(N/m)
x_s	7.2×10^{-3}	(m)
l_1	0.10	(m)
l_2	0.15	(m)
a_{v1}	7.85×10^{-5}	(m^2)

表2 チェック弁に関する諸元

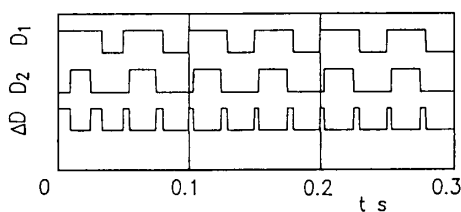
ϕ_c	0.785	(rad)
d_c	1.0×10^{-2}	(m)
m_c	1.9×10^{-2}	(kg)
k_c	1.34×10^4	(N/m)
z_{o1}, z_{o2}	3.0×10^{-3}	(m)
z_{o3}, z_{o4}	5.7×10^{-3}	(m)
p_{c1}, p_{c2}	0.51	(MPa)
p_{c3}, p_{c4}	0.97	(MPa)

かる。これは、差圧パルスが与えられていない時間領域（すなわち弁 1, 2 がともにオンまたはオフとなっている状態）では、ばね力によりアクチュエータは $x < 0$ の方向に変動するためである。

次に、電磁弁の上流側管路のチェック弁 I, II のみを取付けて制御を行った場合についての実験結果を図 5 (a), (b) に示す。これらの図によれば、電磁弁がともにオンとなっている時間幅では、チェック弁が作動し、アクチュエータは静止しているが、ともにオフとなっている時間幅では、ばね力による $x < 0$ の方向への変動がみられ、結果として、応答波形は振動的になっている。電磁弁の上流側のみにチェック弁を持つこのシステムは、田中らが構成したシステム⁽²⁾⁽³⁾に相当するものである。この場合、 x が目標値に達したところで、弁 1, 2 をともにオンにすることにより、アクチュエータをロックさせることができる。しかしながら、その応答波形は、実験結果が示すように振動的となる

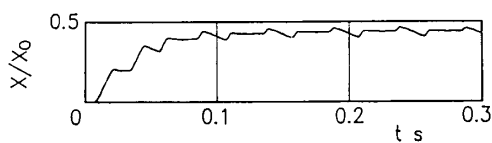


(a) ピストン変位

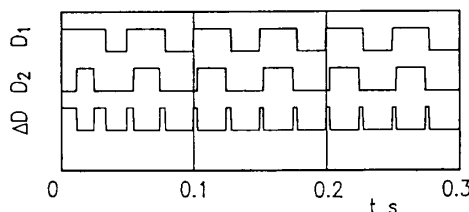


(b) 弁への入力信号

図 4 従来法システムにおける実験結果（比例制御）



(a) ピストン変位



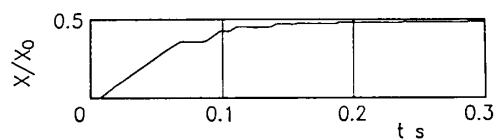
(b) 弁への入力信号

図 5 チェック弁 I, II のみを取付けた場合の実験結果（比例制御）

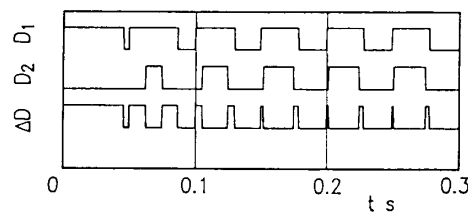
ため、アクチュエータの高精度での位置決めは期待できない（同様のことは、従来の PWM 法を用いて制御した場合についてもいえる）。

次に、本研究で提案する、電磁弁の上流・下流側にチェック弁を取付けたシステムにおける実験結果を図 6 (a), (b) に、また、図 6 (a) に対応するシミュレーション結果を図 7 に示す。ただし、比例ゲイン k_p は、 $k_p = 0.58 \Delta D / \text{mm}$ としている。これらの図によれば、図 5 の結果に現れていた応答 x の振動がなくなり、応答波形は大幅に改善されている。しかし、目標値近傍でわずかな定常偏差が生じている。これは、目標値との偏差に比例する微小な時間幅の差圧パルスが与えられても、アクチュエータがばね負荷に抗して変位し得ないことに主な原因があると考えられる。そこで、定常偏差をなくすために、比例制御に積分補償を加えた PI 制御を用いることを考える。すなわち、サンプリング時間ごとに偏差 $E (= R - X)$ を加算し、これに積分ゲインを乗じたものを制御力に加えて制御を行うことにする。

図 8 (a)～(d), 図 9 (a)～(d) に、PI 制御を用いた場合の実験結果およびシミュレーション結果を示す。ただし、比例ゲイン k_p および積分ゲイン k_i をそれぞれ、 $k_p = 1.02 \Delta D / \text{mm}$, $k_i = 0.31 \Delta D / \text{mm} \cdot \text{s}$ としている。また、これらの図の場合、新たな比較変数とし



(a) ピストン変位



(b) 弁への入力信号

図 6 チェック弁 I～IV を取付けた場合の実験結果（比例制御）

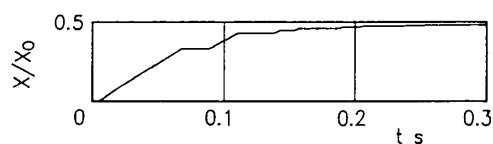


図 7 チェック弁 I～IV を取付けた場合のシミュレーション結果（比例制御）

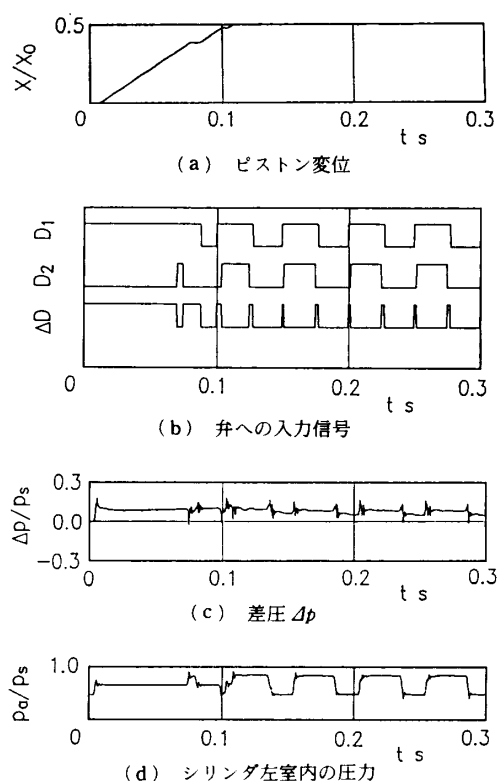


図 8 チェック弁 I～IV を取付けた場合の実験結果 (比例+積分制御)

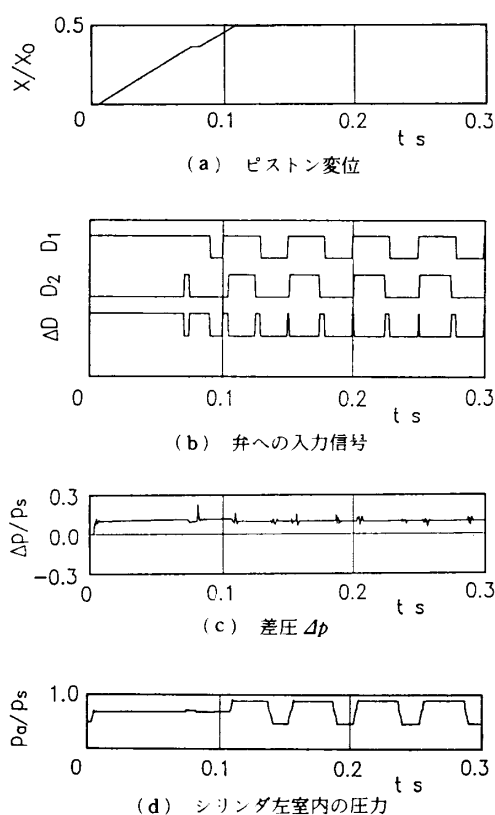


図 9 チェック弁 I～IV を取付けた場合のシミュレーション結果 (比例+積分制御)

で、 Δp , p_a などの各変動波形も同時に示した。これらの図によれば、定常偏差はなくなり、応答 x はより高精度で位置決めされていることがわかる。また、シミュレーション結果の各応答波形は、実験結果とよい一致を示しており、本シミュレーションの妥当性が確認できる。

次に、先と同じ比例および積分ゲインを用いた場合に対して、 $t=0.2\text{ s}$ の時点で目標値 r を、 $r=0.25$ から $r=0.5$ に切換えたときの実験およびシミュレーション結果を図 10, 11 に示す。これらの図によれば、目標値の変化に対しても適度の過渡特性を経てそれぞれの目標値に達している。また、目標値 r を $t=0.2\text{ s}$ の時点で、 $r=0.5$ から $r=0.25$ に切換えた場合の実験およびシミュレーション結果を図 12, 13 に示す。これらの図によれば後半の目標値に対して、わずかなオーバーシュートを生じているが、全体としてほぼ良好な応答性能が得られているといえる。なお、オーバーシュートの原因は、ピストンが $x < 0$ の方向へ駆動される場合、ばね力によりピストン速度が大きくなる（このことは、制御入力に対する出力のゲインが大きくなることに相当する）ためであると考えられる。

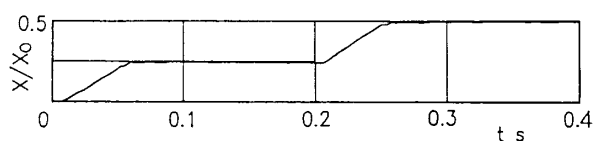


図 10 目標値を切換えた場合の実験結果 (比例+積分制御)

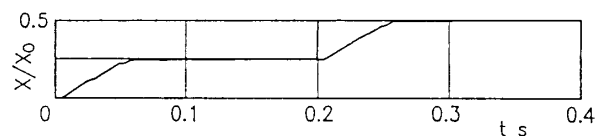


図 11 目標値を切換えた場合のシミュレーション結果 (比例+積分制御)

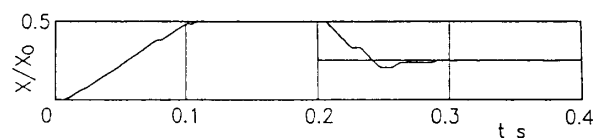


図 12 目標値を切換えた場合の実験結果 (比例+積分制御)

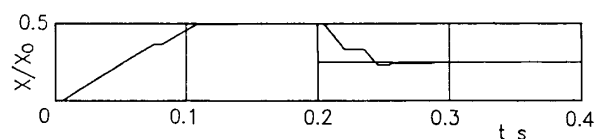


図 13 目標値を切換えた場合のシミュレーション結果 (比例+積分制御)

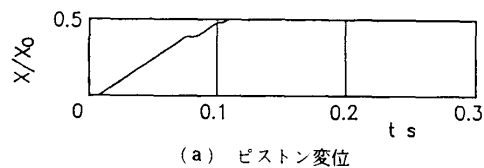
さて、差動PWM法では、その作動原理より、目標値との偏差が零となったとき、弁1, 2のデューティがともに50%で駆動される。このような駆動方式は、オンオフの繰返しにより管路内に圧力脈動が生じることや、電磁弁の耐久性の点からも好ましいとはいえない。そこで、目標値との偏差の絶対値 $|E|$ が許容誤差範囲 ε よりも小さくなると、電磁弁がともにオンまたはオフとなる状態でアクチュエータをロックする方式を取り入れる。この方式の採用下で、図8と同一条件下で得られた実験結果を図14(a)~(c)に示す。ただし、ロックのための許容誤差範囲は、 $\varepsilon=0.04\text{ mm}$ とした。図によれば、応答 x が目標値に達した時点で、弁1, 2がともにオンとなってアクチュエータがロックされ、これに伴って、圧力脈動も消失している。図14(a)の実験結果に対応するシミュレーション結果を図15に示す。

次に図16は、弁1, 2をともにオフの状態でもロックさせる方式における先と同様な実験結果である。図によれば、応答 x が目標値に達した後であるにもかかわらず、

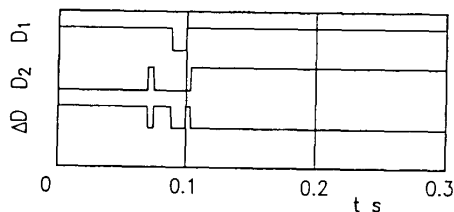
電磁弁が間欠的に動作している様子が現れている。この原因は次のように推察される。すなわち、弁1, 2がともにオフとなったとき、チェック弁IIIのクラッキング圧力によりピストンはいったんロックされる。しかし、電磁弁2のP→Aポートおよびチェック弁IIIに存在する(油の)わずかなリークのため、アクチュエータは $x<0$ 側に徐々に変動し、誤差の許容範囲 ε を超えてしまうものと推察される(この推察の根拠については後に触れる)。図14, 16の実験結果によれば、本システムの場合、ロックによるアクチュエータの定位置保持は、弁1, 2をともにオフとする方式よりもオンとする方式の方が良好であるといえる。

図16(a)~(c)の実験値に対応するシミュレーション結果を図17(a)~(c)に示す。電磁弁およびチェック弁におけるリークを考慮していない本シミュレーション結果によれば、ピストンのロックは完全に行われている。すなわち、電磁弁およびチェック弁におけるリークを極力小さくすれば、弁1, 2をともにオフとしてロックさせる方式も有効となるといえる(なお、電磁弁のリークを考慮したシミュレーション結果によれば図16と同様な波形が得られた)。

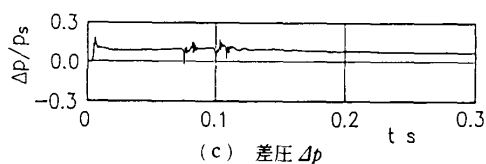
以上により、ばね負荷が存在する場合においても、図1の系に基づいて、差動PWM法の特長である線形性、制御精度に優れた油圧アクチュエータ系の構成が可能となることが明らかにされた。さらに、上述したオートロック機構を備えることにより、制御整定時に



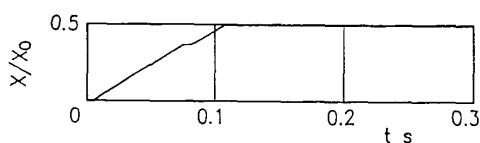
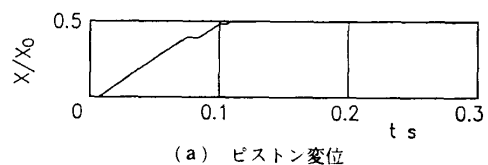
(a) ピストン変位



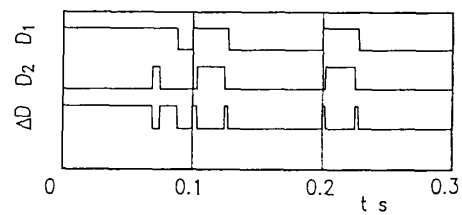
(b) 弁への入力信号



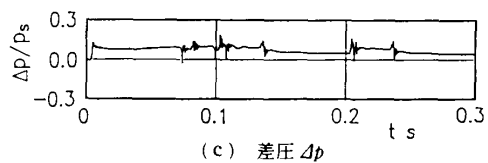
(c) 差圧 Δp

図14 オン状態でロックした場合の実験結果
(比例+積分制御)図15 オン状態でロックした場合のシミュレーション結果
(比例+積分制御)

(a) ピストン変位



(b) 弁への入力信号



(c) 差圧 Δp

図16 オフ状態でロックした場合の実験結果
(比例+積分制御)

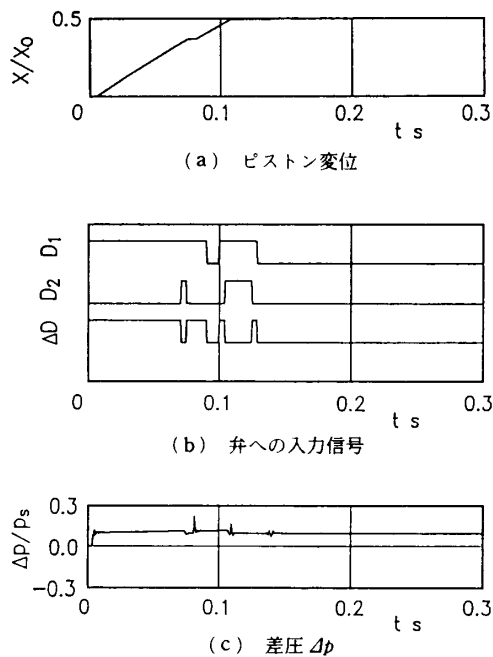


図 17 オフ状態でロックした場合のシミュレーション結果 (比例+積分制御)

おける電磁弁のオンオフ動作回数の大幅な低減が実現され、ひいては電磁弁の耐久性の向上を図ることができる。

6. あ と が き

本研究では、差動 PWM アクチュエータ系の上流、下流側管路にチェック弁を組込んで構成することにより、負荷系に強制外力が存在する場合に対してもロバストとなる制御システムを提案した。強制外力として、その代表的要素であるばね負荷の作用下に、本システムの制御性能について実験およびシミュレーションによる検討を行った。その結果は、およそ以下のように

要約さる。

(1) 制御則として比例制御 (P 制御) を用いた場合には若干の定常偏差を生ずるが、PI 制御を用いることにより、安定性、位置決め精度に優れた制御が可能となり、本システムの有効性が示された。

(2) 変位 x が目標値に達した時点で、弁 1, 2 をともにオン状態でロックする方式を用いれば、オンオフ動作回数および圧力脈動が抑えられ、電磁弁の耐久性の面でも優れた制御システムの構成が可能となる。

(3) チェック弁の動特性を考慮した本シミュレーションの結果は、実験結果と良い一致を示し、本研究で用いた数学モデルの妥当性が確認された。

終わりに、本研究の実験装置の製作に関して、ご便宜をいただいた不二越 (株) の山田博明氏に厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) Lühmann, B. and Vorbrink, W., Elektrohydraulischer Stellantrieb mit Abtastregelung Einsatz eines Mikrorechners, 5th Aachener Fluidtechnisches Kolloquium, (1982), 289-306.
- (2) 田中, 油空圧のデジタル制御, 油圧と空気圧, 16-1 (1985-1), 3-11.
- (3) 荒木・萩浦・浜本, 電子油圧デジタル制御機器 HYDIS について, 不二越技報, 42-1 (1986), 51-66.
- (4) 武藤・山田・末松, 2 方向型電磁弁による油圧アクチュエータの PWM デジタル制御, 油圧と空気圧, 19-7 (1988-11), 564-571.
- (5) 末松・山田・武藤, 差動 PWM 方式による油圧アクチュエータ系のデジタル制御, 機論, 55-516, C (1989), 2053-2061.
- (6) 末松・山田・武藤, 高速 ON/OFF 電磁弁を用いた小型油圧アクチュエータの高精度化, 電磁力関連のダイナミックス講演論文集, (1990-6), 135-138.
- (7) 末松・山田・塚本・武藤, 差動 PWM 法による電気・油圧サーボ系のデジタル制御, 機論, 57-537, C (1991), 1596-1603.