

**PWM 制御 ER バルブによる
ミニチュアベローズアクチュエータのサーボ特性**

**Control Characteristics of Miniature Bellows Actuator driven by
a pair of PWM Controlled ER Valves**

○萩野 克也 (山形大院), 富手 直喜, 中野 政身 (山形大工)

Katsuya HAGINO, Naoki TOMITE, Masami NAKANO
Dept. of Mechanical System Engineering, Yamagata University

キーワード: ER アクチュエータ(ER Actuator), 分散系 ER 流体(ER Suspension), 3 ポート ER
バルブ(Three Ports ER Valve), PWM 制御(PWM Control), PID 制御即(PID
Control Strategy), サーボ特性(Servo-Characteristics)

連絡先: 〒992-8510 米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学科 中野研究室
中野政身, Tel: (0238)26-3248, Fax: (0238)26-3248, E-mail: nakano@mnaka.yz.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

ER 流体は、電場の印加によって粘性を数ミリ秒のオーダーで可逆的に変化できる機能性流体であり、その特徴により ER 流体を作動流体とする流体回路では、全く可動部を持たない電極部だけからなる ER バルブを用いて流量や圧力を制御することが可能となる⁽¹⁾。このような ER バルブを用いた小型アクチュエータの制御など流体制御機器への応用が試みられてきている^{(2),(3)}。

本研究では、すでに ER バルブの PWM 波電圧による流量制御を提案し、分散系 ER 流体の場合には通常の可動弁と同様な静的流量制御特性を Duty 比を可変することにより実現でき、Duty 比が 1 で全閉状態を、0 で全開状態を圧力差に依存せず実現でき、DC 電圧印加では困難

であると考えられた閉鎖から全開までの連続流量制御が可能であることを示している⁽⁴⁾。ここでは、3 ポートの ER バルブによって駆動される小型のベローズアクチュエータの位置フィードバック制御を行い、このときの制御特性について検討している。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 アクチュエータ

本研究で使用したベローズアクチュエータ(ベローズ有効直径 19.7 mm)とフィン型 ER バルブ(電極間隔 0.8 mm, 電極長さ 30 mm, 通路断面積 25.8 mm²)を図 1 及び図 2 に示す。このアクチュエータは、供給用・排出用の二つの ER バルブと、上部に一つのベローズを有する単一ベローズ型アクチュエータである。ベローズを採用することにより、アクチュエータ駆

動時の摩擦抵抗をなくすことが可能となる。各 ER バルブを PWM 制御することにより、ベローズ内への流入流出流量を変化させ、ベローズの変位を制御するというものである。

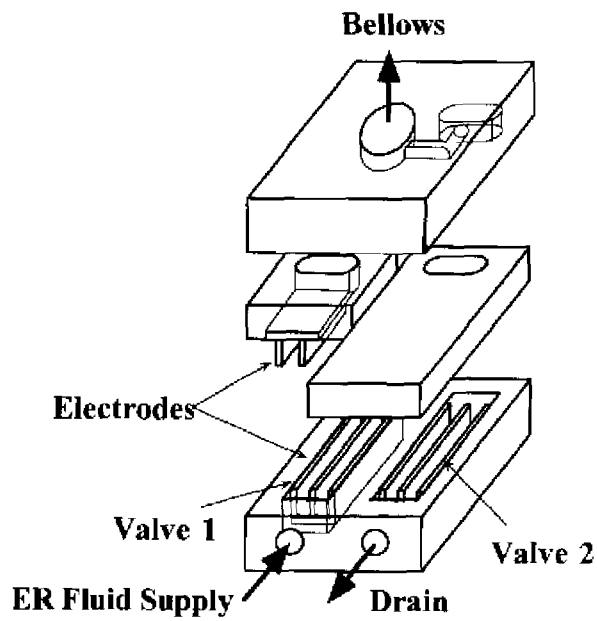


Fig.1 Structure of three ports type ER valve

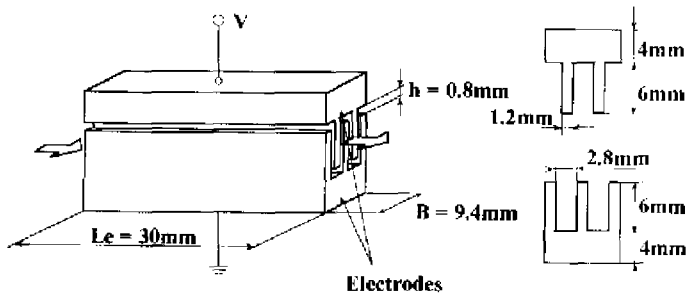


Fig.2 Configuration of ER valve consisting of fin type electrodes

2.2 アクチュエータフィードバック実験装置

アクチュエータフィードバック実験装置及び測定系を図 3 に示す。アクチュエータへの ER 流体の供給は、圧縮空気を用いて ER 流体タンクを一定圧に加圧して定圧力源で行われる。各 ER バルブへは、目標値との偏差に応じた制御電圧がコンピュータより出力され、PWM 回路によって PWM 波電圧（キャリア周波数 100

Hz) に変換し、二台の高電圧増幅器を介して印加される。ベローズ変位は、高精度レーザー変位計によって検出され、コンピュータへフィードバックすることにより、ベローズアクチュエータを制御する。また、制御電圧及びベローズ変位は、アナライジングレコーダによって記録される。なお、使用した ER 流体は、スルホン化重合体の分散粒子（含水率 2.2 %、平均粒子径 $5\mu\text{m}$ ）を 10 cSt のシリコンオイルに体積分率 20 vol% で分散させた粒子分散系 ER 流体（TX-ER2057：日本触媒製）である。

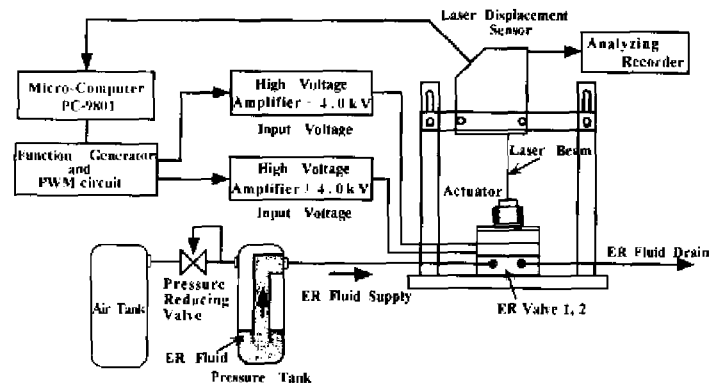
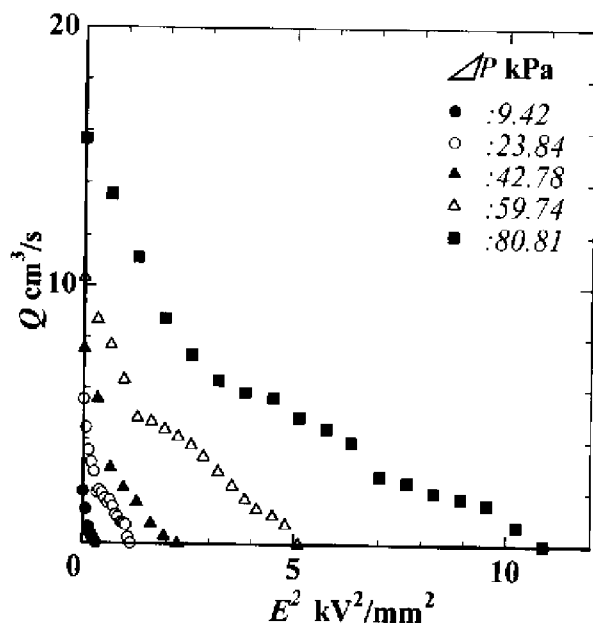


Fig.3 Experimental apparatus for actuator control

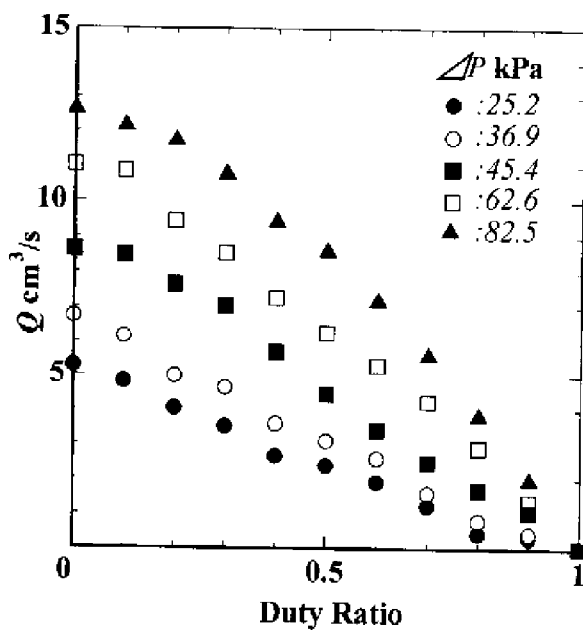
2. ER バルブの PWM 流量制御

PWM 制御は周期的な ON-OFF 制御であるため適用する系の最大圧力差における ER バルブの全閉時の電場強度を振幅にとれば、ER バルブの全閉と全開状態を周期的に実現でき、その時の一周あたりでの開閉率は Duty 比によって変化できるため圧力差の変化に依存せず Duty 比が 0 で全開、1 の時に全閉状態を実現でき、Duty 比によって連続流量制御が可能となる。図 4 には、試作した ER バルブを一定差圧のもとで DC 電圧制御及び PWM 制御（電圧振幅 3.0kv/mm ）を行ったときの静的な流量制御特性

を示す。いずれの制御方法でもバルブの一つの機能である全閉状態を実現できるが、DC 電圧印加時には差圧によって全閉時の電場強度が異なるのに対して、PWM 制御の場合には Duty 比が1の時にいずれの圧力差においても全閉が可能であり、高精度の連続流量制御が可能になると考えられる⁽⁴⁾。



(a) DC voltage control



(b) PWM control

Fig.4 Static flow rate control characteristics of ER valve

3. アクチュエータの

オープンループ制御特性

各 ER バルブへの Duty 比を制御電圧 ΔV に比例して制御しアクチュエータを駆動するオープンループ制御方法を図5に示す。制御電圧 0V において、各 ER バルブの Duty 比を 1 として全閉を実現する方法と、オーバーラップ量 D_{ov} を導入して制御電圧 0V 時の Duty 比が $1-D_{ov}$ となる制御方法について検討している⁽⁵⁾。

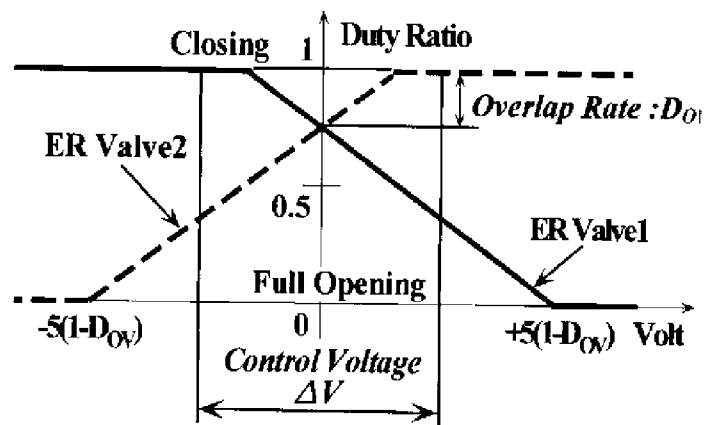


Fig.5 Relationship between control voltage and duty ratios of two pairs of ER valves in PWM control

アクチュエータへの ER 流体の供給圧力を 50kPa とし、このときに ER バルブが全閉を実現できる PWM 電圧振幅として 2.5kV/mm と設定して実験を行った。図 6 には制御電圧範囲 $\Delta V = \pm 2.5V$ と一定にした時のオーバーラップ量 D_{ov} を 0% から 30% まで変化させた時のアクチュエータ変位 x の応答波形を示す。 $D_{ov} = 0\%$ では、応答波形は完全な正弦波とはならず最大及び最小変位近傍で平坦な領域が存在し非線形性が強いことが分かる。最大及び最小変位領域は両 ER バルブが全閉状態から開放へ、逆に開放状態から全閉へ切り替わる領域に対応して

おり、全閉状態で電極間に停留したクラスターによって流量変化に遅れが生じたことに起因しているものと考えられる。そこで制御電圧 $\Delta V = 0V$ においてオーバーラップ量 D_{OV} を設けて早めに ER バルブを開放してやることによる効果を示す。オーバーラップ量が大きくなるにつれて応答波形が正弦波に近くなるとともに変位振幅も増大し、線形性が確保されることが

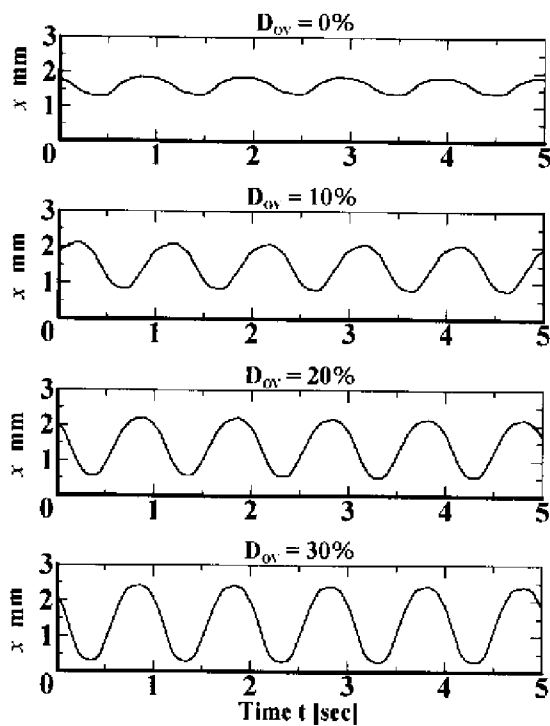


Fig.6 Changes of waveforms of actuator displacement x with overlap duty ratio D_{OV}

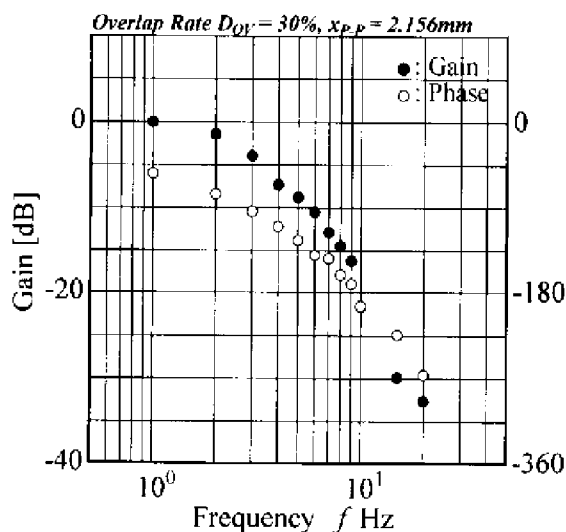


Fig.7 Changes of gain and phase of actuator response with control frequency

分かる。図7には、オーバーラップ量30%のときのアクチュエータの周波数特性を示す。図から分かるように周波数が高くなるにつれてゲイン及び位相共に減少していることが分かる。

4. PWM 制御された ER バルブによる アクチュエータの位置サーボ制御系

ベローズアクチュエータの位置サーボ系のブロック線図を図8に示す。補償要素としてPID制御即を適用する。そのコントローラからの操作量とERバルブへのPWM電圧のDuty比との関係は図9に示すように出力される。PWM回路からのPWM電圧は、二台の高電圧増幅器を介して各ERバルブに印加される。PID制御即を含めたコントローラとしてコンピュータを用いて実現している。そのサンプリングタイムは1msecである。すでに、前項のオープンループ制御系において特に制御電圧が0Vにお

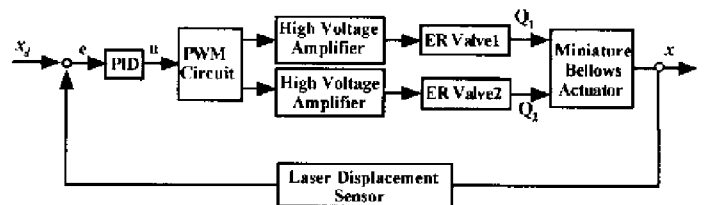


Fig.8 Block diagram of positioning servo-system of miniature bellows actuator

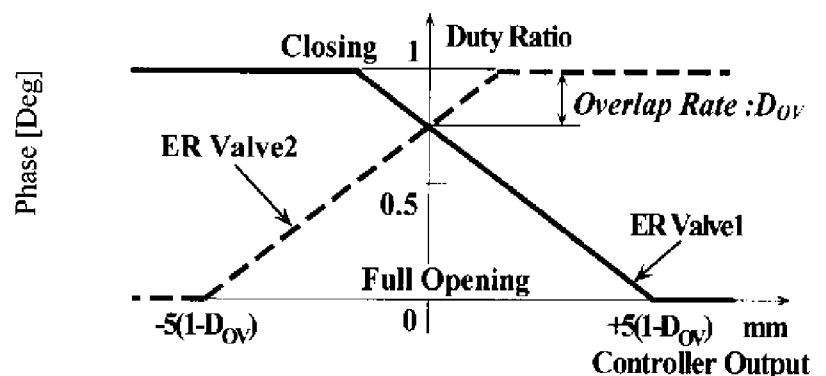


Fig.9 Relationship between controller output and duty ratio of PWM voltage to a pair of ER valves in PWM control

いて両ERバルブのDuty比のオーバーラップ量を30%と設定することにより,系の線形性が確保されると同時に制御特性も改善されることが得られているためオーバーラップ量は $D_{ov} = 30\%$ と設定して制御実験を行う。

5. アクチュエータのサーボ特性

アクチュエータへのER流体の供給圧力を70kPaとし,このときERバルブで全閉が実現できる電場強度としてPWM電圧(キャリア周波数100Hz)振幅を2.5kV/mmとして実験を行った。

ステップ応答及び周波数応答の実験を行い,ベローズアクチュエータの位置フィードバック制御系の制御特性について検討している。

5.1 ステップ応答特性

ステップ応答実験では,ベローズ目標変位を0.5mmから1mmにステップ状に変化させている。このときPIDパラメータ(比例ゲインK,積分時間 T_i ,微分時間 T_D)を変化させて応答

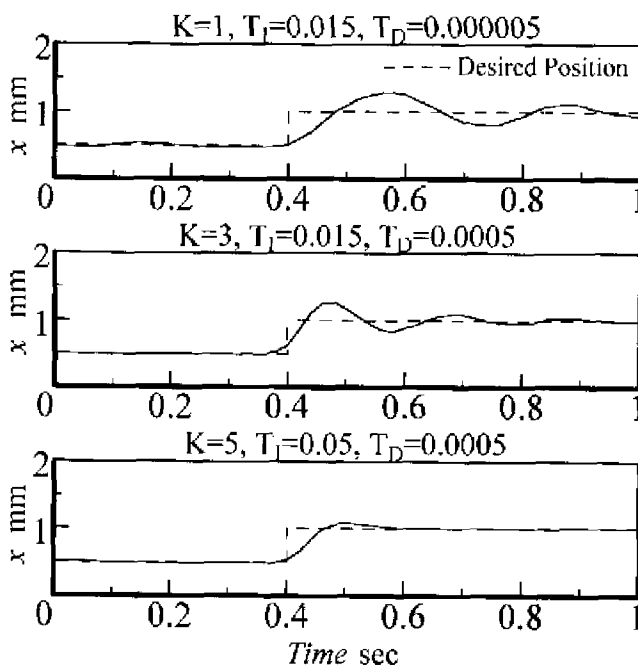
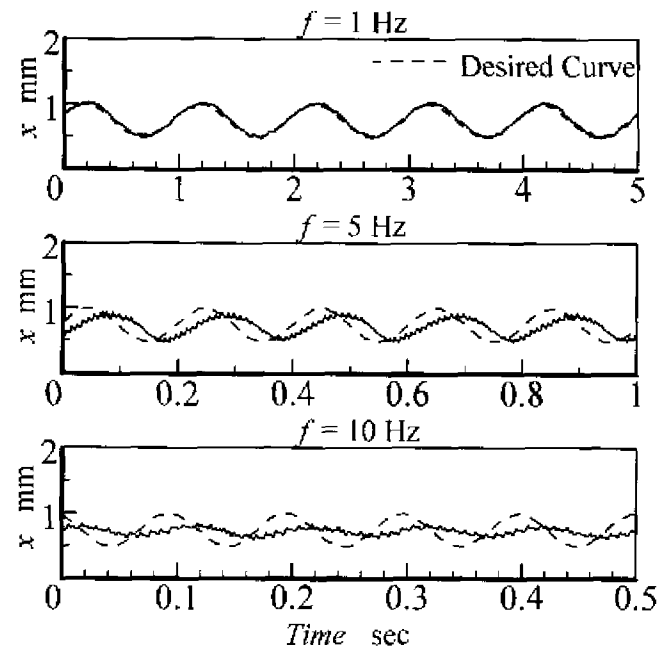


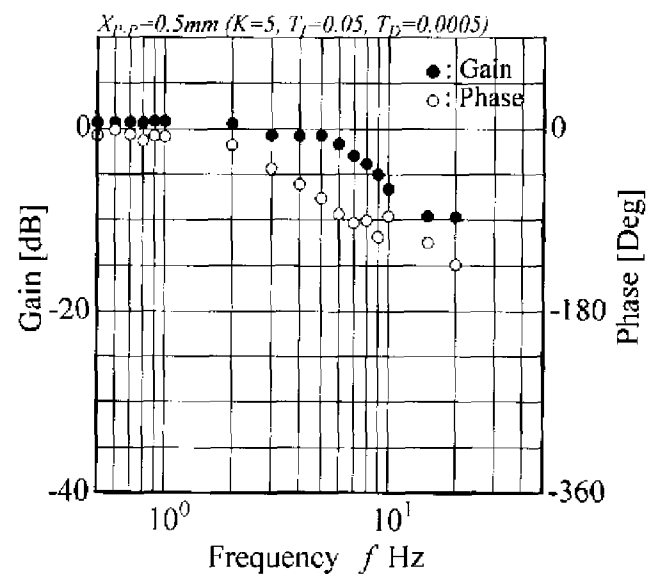
Fig.10 Step response of bellows actuator servo-system

の良いPIDパラメータを求めている。

図10には,PIDパラメータを $\{K=1, T_i=0.015, T_D=0.000005\}$, $\{K=3, T_i=0.015, T_D=0.0005\}$ 及び $\{K=5, T_i=0.05, T_D=0.0005\}$ としたときのアクチュエータの変位特性を示している。K=1及びK=3の時には,振幅が大きく応答が遅くなっていることが分かるが,K=5では振幅が小さく,整定時間は0.2secとなっているため,



(a) Waveforms



(b) Frequency characteristics

Fig.11 Frequency responses of bellows actuator servo-system

この系での適切な PID パラメータであると考えられる。

5.2 周波数特性

周波数特性実験では、入力に一定周波数の振幅 0.5 mm の正弦波状信号を加えて、出力との振幅比及び位相のずれと周波数の関係について実験を行っている。このとき、PID パラメータとしてステップ応答実験において最も応答性のよかった $\{K=5, T_i=0.05, T_D=0.0005\}$ を採用している。

図 11 (a)には、周波数 1, 5, 10 Hz のベローズアクチュエータの入力波形及び出力波形を示している。周波数 1 Hz のときには、ほぼ目標値に追従していることがわかるが、5 Hz では位相が遅れ始め、10 Hz になると振幅が小さくなっていることが分かる。図 11 (b)に示す周波数特性によれば、バンド幅が約 8 Hz となる。

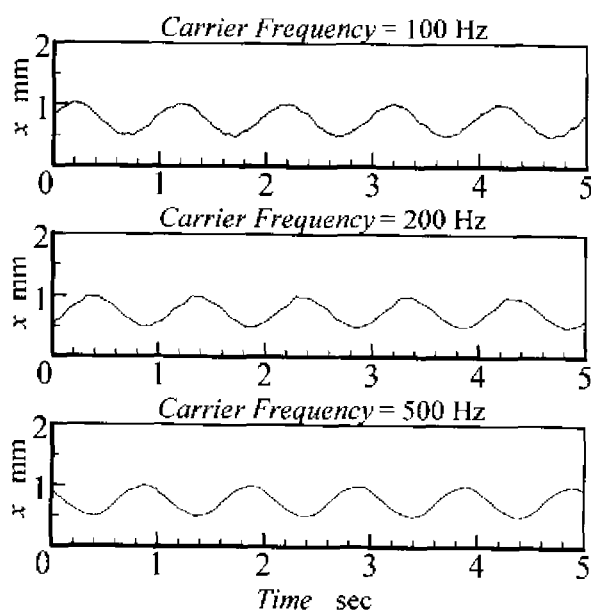


Fig.12 Dependence of bellows actuator servo-system on carrier frequency of PWM waves

図 12 には、入力として 1Hz の正弦波状信号を加えたときの PWM 波のキャリア周波数を 100Hz, 200Hz 及び 500Hz と変化したときのア

クチュエータの出力波形を示す。100Hz の波形では高い周波数の微小振幅の振動が顕著に見受けられるが、キャリア周波数が 200Hz, 500Hz と高くなるにつれて応答波形がかなり改善されていることが分かる。供給圧力の増大や、より適切な PID パラメータやキャリア周波数を設定することにより、周波数特性を改善できる可能性がある。

6. 結言

小型のベローズアクチュエータの位置フィードバック制御系を構成することによって、PWM 制御された 2 つの ER バルブからなる 3 ポート ER バルブによって駆動されるベローズアクチュエータの制御を適切に行えることを示し、ベローズアクチュエータのフィードバック制御を行う際には、制御則として PID 制御則が有効であることを示した。また、供給圧力の増大や、より適切な PID パラメータやキャリア周波数を設定することにより、系の応答速度を更に速める可能性がある。またバルブの流量特性の改善、小型ベローズの選定などにより系の応答速度を更に速められる可能性がある。

参考文献

- (1) 中野, JSME 第 72 期全国大会講演資料集 No.940-30(IV)(1994),251
- (2) C. Walff, Proc. of 5th Int. Conf. On ERF, MRS and AT, World Scientific, (1996), 37
- (3) 横田, 近藤, 機論(C 編), 62-601, (1996),
- (4) 中野, 皆川, JSME 第 73 期通常総会講演論文集 No96-1(III)(1996),209
- (5) 中野, 皆川, JSME 第 74 期通常総会講演論文集 No97-1(IV)(1997),340