Research Reports of the National Institute
of Industrial Safety, NIIS-RR-95 (1996)
UDC 62.507:62.592:681.523.2

空気圧シリンダの低速度制御に関する研究
—非線形摩擦の影響と電気粘性流体による補償法—

池田　博康*，杉本 旭*

Low Velocity Control of a Pneumatic Cylinder
— The Effect of Nonlinear Friction on Pneumatic Cylinder Motion and the Compensatory Method Using ERF —

by Hiroyasu IKEDA* and Noboru SUGIMOTO*

Abstract: With all the advantages over other actuators, such as high power/weight ratio and intrinsic compliance, the use of a pneumatic cylinder is limited to simple tasks at present. This is because the pneumatic cylinder has stick-slip motions at low velocities caused by a nonlinear friction force due to the mechanical sealing parts. Stick-slip motion has so far been considered not only difficult to control the position or low velocity of the pneumatic cylinder, but potential cause of an accident due to unexpected action of the cylinder.

The electro rheological fluid (ERF) has lately been attracting a great deal of attention as a new functional material. ERF can increase its shearing stress when subjected to an electric field. Therefore, by use of this characteristic, a functional damping device capable of controlling the damping force by controlling the electric signal can be developed.

This paper centers on a development of a compensatory method capable of achieving a constant and slow motion of a pneumatic cylinder by using an ERF damper. This method aims to overcome any decrease in the nonlinear friction force, i.e. the friction force against the increase in piston velocity, which may cause stick-slip motions. In order to achieve this compensatory method, the anthors have used ERF of micro-celulose particles dispersed into silicone oil that can rapidly generate shearing stress in propotion to the approximate square of the applied electric field.

The ER-actuator developed for the study is united with the pneumatic cylinder and the ERF-damper fulled with this ERF. The nonlinear friction characteristics of the piston cylinder is analised by means of lubricant models, and the above compensatory method is examined.

As a result of this study, applying the electric field proportional to the piston velocity as a feedback realizes constant slow motion of the piston, which has been considered hard to realize by usual PD controllers. This compensatory method is proved to be applicable to the pneumatic cylinders in a wide range of velocity controls.

Keywords; Pneumatics, Cylinder, Friction compensation, Velocity control, Stick-slip, Electro rheological fluid, Active damper

1. 緒　　言

高齢化に伴い，高齢労働者による災害の増加が懸念されている。危険作業に高齢者が従事することは控えなければならないが，高齢者を積極的に活用する目的で，加齢に伴う肉体的なハンディキャップを補い，共同して作業を遂行できる機械の開発が求められている。このような機械は，人間に対して過大な力を生じない

*機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety Research Division

ための本質的に安全なアクチュエータを必要とする。

空気圧シリンダのアクチュエータとしての最大の特徴は力を調節できる点にあるといえる。この機能は人間の筋肉に類似するものであり，扱う対象物の壊れやすさに応じて力を調節することが可能である。この機能を利用すれば，人に対しては安全な力となるよう調節し，機械や部材を扱う場合は大きな力で作業ができる安全なアクチュエータが実現可能である。

一方，空気圧シリンダは位置決め制御がほとんど不可能である。その最大の理由は，シリンダのシール部において非線形摩擦[1]の影響が大きく，そのため低速度駆動時に摩擦振動（いわゆるスティックスリップ[2]）が生ずるという点にある。これまで，空気圧制御弁の改善[3]や，適応制御系の適用[4]などの対策が報告されているが，いかなる方法によってもスティックスリップをなくすことは大変難しい。

一方，ER流体（Electro-rheological fluid : ERF）は，外部電界により見かけの粘性が変化する懸濁液として知られ，特にビンガム特性を持つ分散系ERFは降伏応力を電界により制御できる。分散系ERFを作動油に用いるダンパ（以降，単にERダンパ[5]と呼ぶ）は，必要に応じてダンパ係数を自由に変更できる。すでに筆者らは，ERダンパと空気圧シリンダを直列に配置し一体化したERアクチュエータを構成し，位置制御系に適用することで空気圧シリンダの動作特性の改善を行った[6),7]。

安全性の高いアクチュエータとして空気圧シリンダを利用する場合，制御特性が改善されない限り現実に利用することは不可能である。そこで，本研究では，ERFを用いたERダンパにより非線形摩擦力を直接補償し，従来，空気圧シリンダでは困難とされていた低速度領域における速度制御の実現を試みた。

本報では，まず第2章で，速度制御を可能とするための摩擦力の条件を示し，低速で生ずるスティックスリップを防止するための手法を提案する。次に第3章で，開発したERアクチュエータの構造と特性について述べる。第4章では，ERアクチュエータの空気圧シリンダ部の摩擦特性を数値計算と実験によって求め，第5章で，提案した補償法をERアクチュエータに適用し，低速度駆動が実現できることを示す。これらの評価実験によって，端点停止特性で象徴されるような単純な動きしかできなかった空気圧シリンダであるが，サーボマニピュレータやロボットのための安全なアクチュエータとしても利用可能であることを示す。

2. 摩擦力の線形化の基本

物体の受ける摩擦力は摩擦面との相対速度によって変化し，一般に静摩擦力と動摩擦力に大別される。**Fig. 1**に摩擦力の特性を表す顕著な例を示す。**Fig. 1**(a)においては，動摩擦力が静摩擦力より十分に小さいため，物体がいったん動き出すと加速を生じていわゆる逸走状態となる。空気圧シリンダでは，この摩擦の減少特性（非線形性）によってスティックスリップといわれる摩擦振動が生じる。

静摩擦力が存在する場合，外力に対する物体の速度が一意的に定まるためには，摩擦力Fが速度の全領域で次式を満たすことを条件とする。

$$\forall v;\ \frac{dF}{dv} = \mu_0 > 0 \tag{1}$$

ここに，vは物体の移動速度，μ_0は速度に対する摩擦力の変化率（必ずしも一定ではない）である。

したがって，速度$v = 0$におけるFの境界条件をF_S(静摩擦力）とすれば，摩擦力Fには次式の特性が要求される。

$$F = F_S + \mu_0 \cdot v \tag{2}$$

式(2)は，静摩擦力F_Sが速度$v > 0$に対して維持されねばならず，系の速度による動摩擦力がそれに重畳する特性で安定な速度が得られることを示している（**Fig. 1**(b)）。式(2)の特性を実現するには，運動の開始後に消滅する静摩擦力の代わりに，速度によらない特性で改めて摩擦力を生成する手段が必要となる。

一方，**Fig. 1**(c)に，ビンガム流体の流動曲線を示す。ビンガム流体のせん断応力τは，流動を開始した後も降伏せん断応力τ_Sが維持され，粘性によるせん断応力τ_Vがτ_Sに重畳する特性を持つ。これは，一般に次式で表される。

$$\tau = \tau_S + \tau_v = \tau_S + \eta_B \cdot \gamma \tag{3}$$

式(3)において，η_Bはビンガム流体の線形な粘性係数，γはずり速度である。摩擦力Fが式(3)のせん断応力τの特性で実現できれば，速度の全領域で式(2)を満たすことが可能である。

以上により，本報で提案する手法は，ビンガム流体の降伏応力τ_Sが外部電界によって変化するERFを用いた

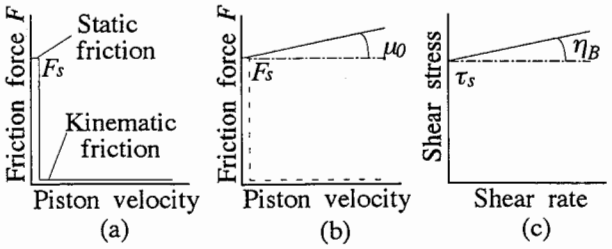


Fig. 1　Conceptual models of friction property.
摩擦特性の概念モデル

ERダンパを構成し，その制動力を制御することによって，摩擦力の非線形性を直接補償し，式 (2) の特性を実現しようとするものである。

3. ERアクチュエータの構造と特性

3.1 ERFの流動特性

ERFは，外部電界によって流動抵抗が著しく増大する流体を指す[8]。電気信号により，直接，機械的出力を制御でき，また応答性が優れているなどの理由から，近年，多方面への応用が期待されている。

本研究では，シリコンオイル中に微結晶セルロースを分散させた分散系ERFを使用した。すでに述べたように分散系ERFは，無電界時にはニュートン流体，電界印加時にはほぼビンガム流体として振る舞う。ここで改めて，せん断応力をτ，無電界時の粘性係数をη_B，印加電界をE，ずり速度をγとすると，その流動特性は次式で近似できる。

$$\tau = \eta_B \cdot \gamma + \tau_E(E^2) \tag{4}$$

なお，$\tau_E(E^2)$は電界の印加によって誘起する降伏せん断応力であり，使用したERFの降伏応力が印加電界の2乗に比例することを表している。**Fig. 2** に使用したERFの電界により誘起する降伏応力を示す。

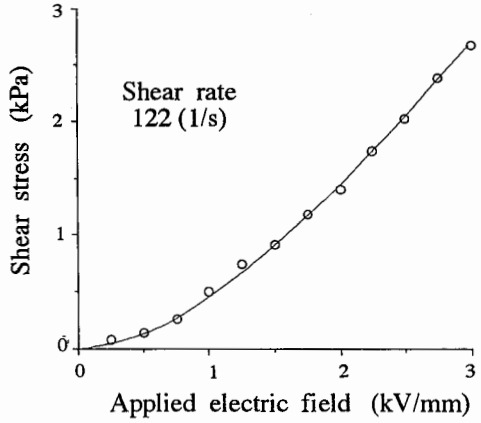


Fig. 2 Induced shear stress of ERF under applied electric field.
電界によるER流体の誘起せん断応力

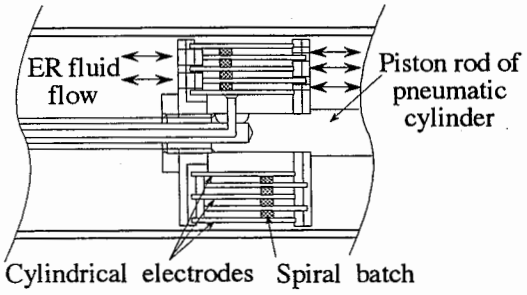


Fig. 3 Mechanisim of ER Damper.
ERダンパの構造

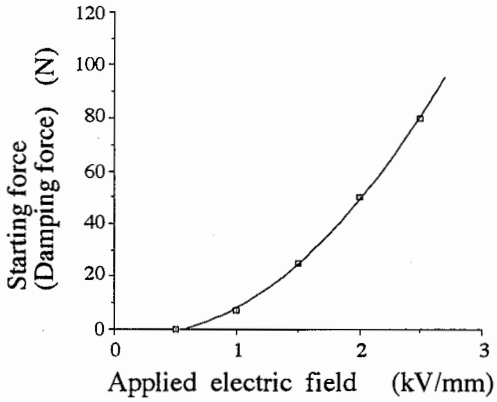


Fig. 4 Damping force of ER Damper under applied electric field.
電界によるERダンパの出力

3.2 ERダンパ

上記のERFを作動油に用いたERダンパの構成を **Fig. 3** に示す。これは，ダンパのピストン部に正負の円筒電極板を交互に2 [mm] 間隔で5層設けたもので，各々の電極間には長い流路長を得るためにスパイラル状の仕切りを設けた。粘性流体を用いる従来の可変ダンパは，ずり速度のごく小さな範囲（0を含む）で制動力を発生することは困難であった。しかし，ERダンパは速度に依存しない制動力の発生が可能である。なお，別途行った測定によれば，ERダンパの応答時間は高電圧電源の遅れと合わせても約10msであり，十分速い応答性を持つと評価できる。

ERダンパの制動力（F_Rで示す）は，式 (4) のERFの流動特性に基づくものとし，各パラメータを実測した結果，次式で近似される。

$$F_R = 123.0v + 13.2E^2 \tag{5}$$

ERダンパに一定電界を印加した状態において，ダンパピストンが動き出すのに必要な力（$v \fallingdotseq 0$における制動力）を **Fig. 4** に示す。使用した高圧電源の制約から印加できる最大電界は2.5 kV/mmであり，そのとき得られる制動力F_Rは82.5Nである。

3.3 ERアクチュエータ

開発したERアクチュエータは，上記ERダンパを復動型空気圧シリンダと同一のロッドに連結することで一体化したものである。**Fig. 5** にその構造を示す。中央のブロックを挟んで，右側が復動型シリンダ部，左側がERダンパ部であり，共にピストン直径50 mm，ストローク50 mmである。なお，復動型シリンダ部は，

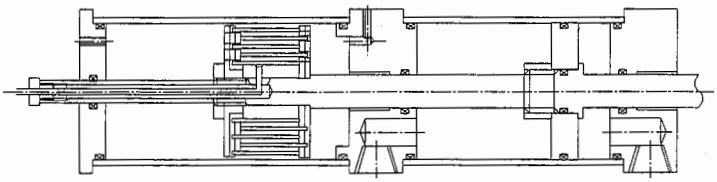


Fig. 5　Construction of ER Actuator.
ER アクチュエータの構造

各々のシリンダ内圧を給気，排気 2 つの流量制御バルブにより制御している[9]。

4. 非線形摩擦補償法

4.1 摩擦特性のモデル化

式 (2) の特性を実現するには，摩擦力を検出してリアルタイムで調整することも考えられるが，本補償法では，事前に求めた摩擦力モデルに基づき，式 (2) を満たすように ER アクチュエータに電界を印加することによって行う。ここでは，対象となる空気圧シリンダ部の摩擦特性を評価する。

現実のピストン部の受ける摩擦力は，**Fig. 6** に示すストリベック曲線に基づいてモデル化できる[10]。このモデルにおいて摩擦力の特性は，速度に対応して次のような潤滑モードを持つ。

① 境界潤滑モード：いわゆる静止摩擦力が継続されていると見なされる速度領域である。摩擦力の大きさは速度によらずに一定であり，微速度動作が実現される。

② 混合潤滑モード：境界潤滑の速度を越える領域では，速度増加に伴って静摩擦から動摩擦へと移るにつれて摩擦力が減少する。

③ 流体潤滑モード：さらに速度の大きい領域では，速度に依存しない動摩擦力となる。しかし，現実には潤滑油などの粘性力が効果を表し，摩擦力は速度に比例する線形摩擦特性を示す。

実測の結果，ER アクチュエータの空気圧シリンダ部において，静摩擦力 125 [N]，動摩擦力 75 [N]，粘性摩擦係数 123 [Ns/m] であった。しかし，**Fig. 6** に示す潤滑モードの変化点α，βについては理論的導出が困難であるため，数値計算と実験結果の比較から解析した。

4.2 低速度動作の数値計算

改めて，**Table 1** に数値解析に使用した記号とその意味をまとめる。潤滑モードの変化点α，βを定めるため，まず，ER アクチュエータの低速度動作について数値計算を行う。空気圧シリンダ部および負荷のモデル

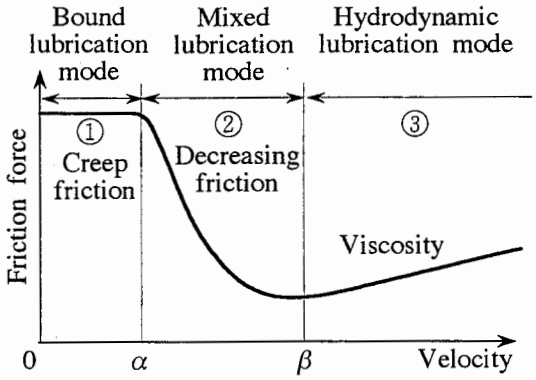


Fig. 6　Stribec curve and lubricant modes.
潤滑モデルとストリベック曲線

Table 1　Meaning of simbols.
記号の説明

記号と意味	記号と意味
F: 摩擦力 (N)	F_A: シリンダ推力 (N)
x : ピストン位置 (m)	v : ピストン速度 (m/s)
P: 空気圧 (Pa)	W : 質量流量 (kg/s)
m: ピストン質量 (kg)	A : ピストン断面積 (m^2)
V: シリンダ容積 (m^3)	R : 気体定数 (J/kg°K))
κ : 比熱比	t : 時間 (s)
T: 温度 (°K)	
添字	"1" : 充填側　"2" : 放出側　"a" : 大気　"s" : 供給 "0" : 基準値　"u" : 上流側　"d" : 下流側

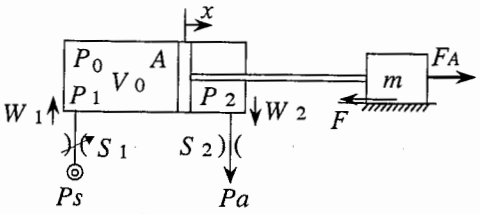


Fig. 7　Pneumatic cylinder model.
空気圧シリンダモデル

を **Fig. 7** に示す。

運動方程式，エネルギ平衡式よりピストンの挙動とシリンダ内圧は次式のように記述される。

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = F_A - F \cdot sgn(v) \tag{6}$$

$$F_A = A(P_1 - P_2) \tag{7}$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\kappa RT}{V_O + A_x} W_1 - \frac{\kappa P_1 A}{V_O + Ax}\frac{dx}{dt} \tag{8}$$

$$\frac{dP_2}{dt} = -\frac{\kappa RT}{V_O - Ax} W_2 + \frac{\kappa P_2 A}{V_O - Ax}\frac{dx}{dt} \tag{9}$$

ここで摩擦力 Fは，**Fig. 6** の摩擦力モデルの特性を持つものである。また，制御弁の有効開口面積 $S_{1,2}$と，通過する質量流量 $W_{1,2}$の関係は次式となる[3]。

$$W_i = S_i P_u \sqrt{\frac{2}{RT}} \cdot f\left(\frac{P_d}{P_u}\right) \qquad (i = 1, 2)$$

$$f(z) = \begin{cases} \sqrt{\left\{\frac{k}{k-1}\right\}\left\{z^{\frac{2}{k}} - z^{\left(\frac{k+1}{k}\right)}\right\}} \\ (0.528 \leqq z < 1) \\ \sqrt{\left\{\frac{k}{k-1}\right\}\left\{\frac{2}{k+1}\right\}^{\left(\frac{2}{k-1}\right)}} \\ (z < 0.528) \end{cases} \qquad (10)$$

ただし，両シリンダ室の初期圧力 P_0は大気圧 Pa に等しいとする。

現実の ER アクチュエータの流量制御系は，供給側，排気側の弁開度を共にコントロールするものであるが，ここでは単純化して考え，供給圧側絞り弁の開口面積 S_1のみを変えてピストンの挙動を解析した。

4.3 数値計算結果

Fig. 8 (a), (b), (c) は，供給圧側弁の開口面積 S_1 をそれぞれ 0.03 [mm^2], 11 [mm^2], 1 [mm^2] と設定したときのピストン位置 x 及びピストン速度 vの数値計算結果である。

Fig. 8 (a) のように $S_1 = 0.03$ [mm^2] では，境界潤滑モードに基づく一定の摩擦力をうけるため，スティックスリップは起こらない。数値計算結果では，速度が高周波で振動しているが，これはピストンを減衰項を持たない系と見なしたためであり，実際の空気圧シリンダでは振動のない微速度動作が実現される[11]。また，**Fig. 8** (b) に示す $S_1 = 11$ [mm^2] では，もはや非線形摩擦力の影響はなく，一定の速度に安定して収束してゆくのが分かる。

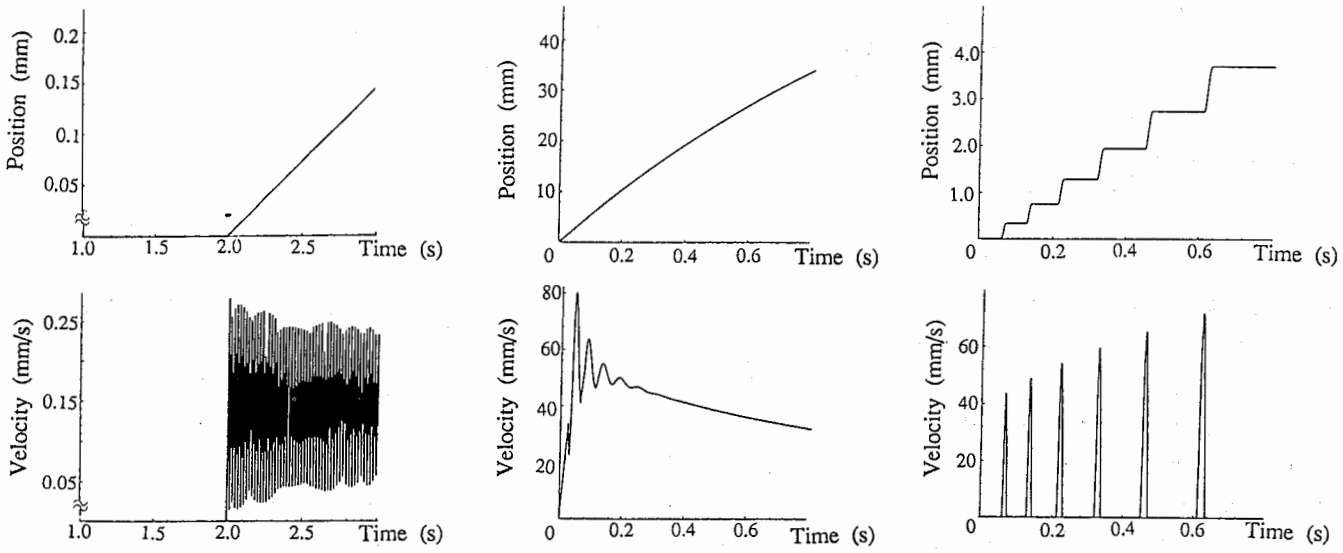
しかし，**Fig. 8** (c) の $S_1 = 1$ [mm^2] ではスティックスリップが発生している。すなわち，平均速度約 5 [mm/s] の振動の中に非線形摩擦領域の速度が含まれている。

この数値計算結果を検証するため，実際に空気圧シリンダのみによる速度制御を行った。**Fig. 9** にシステムのブロック線図を示す。同図における $P(s)$, K/s は，それぞれ流量制御部，位置検出部の伝達関数である。速度制御の結果を **Fig. 10** に示す。数値計算結果と同様，ピストン速度 $v = 0.2$ [mm/s] 及び $v = 100$ [mm/s] では安定して動作しているが，平均速度 $v = 5$ [mm/s] ではスティックスリップが発生し，非線形摩擦の影響を受けている。

以上の結果から，摩擦力モデルは，**Fig. 6** のストリベック曲線においてαを $v = 0.3$ [mm/s], βを $v = 5$ [mm/s] とした。また，静摩擦から動摩擦への減少のパターンは，速度の 3 次曲線で近似した。

4.4 ER アクチュエータによる摩擦補償法

Fig. 11 に低速度制御のブロック線図を示す。**Fig. 11** において B, E_F, D_0は，各々，ER ダンパ部の，速度–電界ゲイン，電界–制動力の変換係数，無電界時のダンパ係数である。また，$C(s)$ は従来の補償法と比較するための PD コントローラである。



(a) $S_1 = 0.03$ mm^2 (b) $S_1 = 11$ mm^2 (c) $S_1 = 1$ mm^2

Fig. 8 Calculation results of friction effect on position and velocity of the piston.
ピストンの位置と速度における摩擦の影響（計算結果）

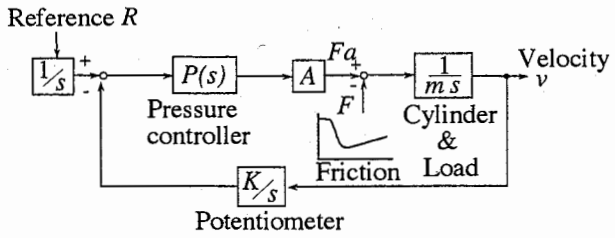


Fig. 9　Block diagram of velocity control system (No ER-damper).
速度制御のブロック線図（ER ダンパなし）

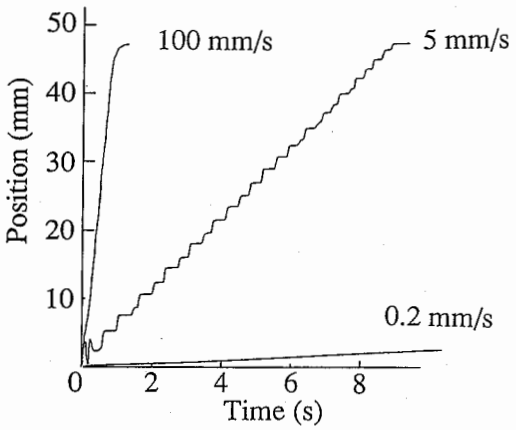


Fig. 10　Results of velocity control of ER actuator (No ER-damper).
ER アクチュエータの速度制御結果（ER ダンパなし）

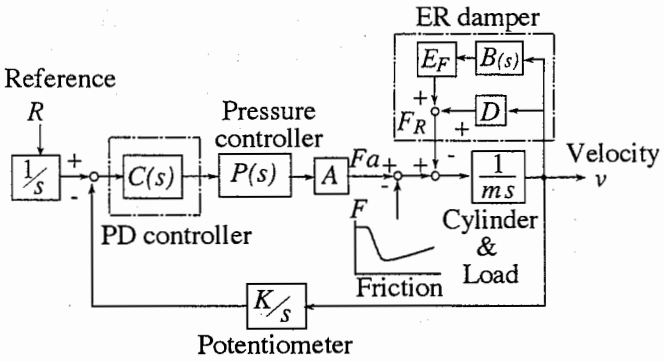


Fig. 11　Block diagram of velocity control system.
速度制御のブロック線図

問題としているのは，混合潤滑モードにおいて摩擦力の速度に対する傾きが負であることである。したがって，ER ダンパ部の発生する制動力がこれを補い，合成された制動力が常に正の傾きを持つように速度–電界ゲイン Bを決定する。ただし，ER ダンパには最大 2.5 [kV/mm] の電界までしか印加できないため，これを考慮する必要がある。

Fig. 12 は ER ダンパ部の速度－電界ゲイン Bを 530 (V·s/mm^2) としたときの摩擦力補償の数値計算結果である。速度の増大に対して摩擦力が一様に増大し，混合潤滑モードの非線形摩擦が改善できている。

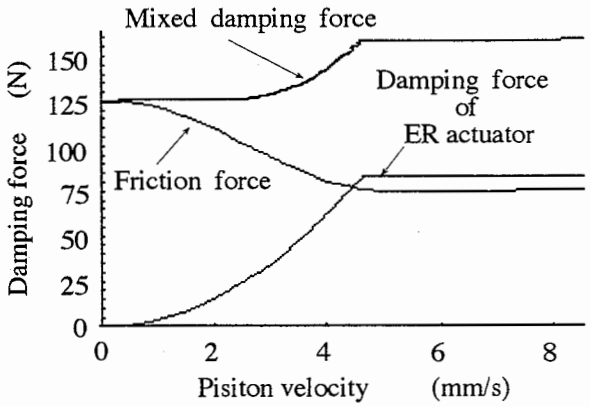


Fig. 12　Calculation result for friction compensation.
摩擦補償の計算結果

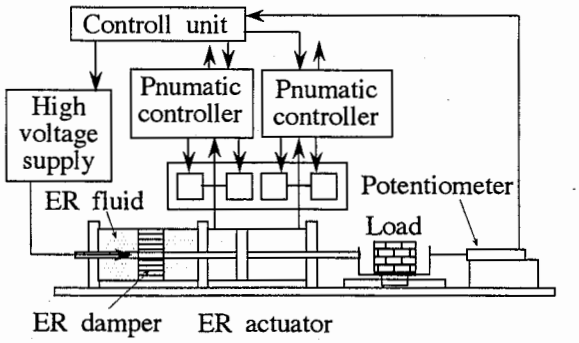


Fig. 13　Velocity control system with ER-actuator.
ER アクチュエータによる速度制御

5.　ER アクチュエータの低速度制御

Fig. 13 に ER アクチュエータの低速度制御システムの構成を示す。

前述の方法に従い，ピストン速度に比例した電界を ER アクチュエータに印加した。ただし，ER ダンパ部はピストンを加速させる側には出力しないため，ピストン速度の正成分のみに比例させた。

Fig. 14 に速度制御結果の一例（速度指令 $R = 5$ [mm/s]）を示す。**Fig. 14** の (a) は特に補償を行わずに速度制御を行った場合，また，(b) は補償用に PD コントローラを加えた場合の低速度制御結果である。PD コントローラのゲイン調整では，混合潤滑モードの影響によるスティックスリップを完全には抑えることはできず，空気圧制御系の限界を示している。PD コントローラを使用せずに ER ダンパ部に電界を印加した場合が **Fig. 14** の (c) である。さらに，このとき ER ダンパに印加した電圧の様子を **Fig. 15** に示す。印加電圧はシリンダの運動開始時に急速に立ち上がり，その後はディザーに類似な信号を呈している。安定した低速度動作が得られていることから，この信号に ER ダンパが追従し，非線形摩擦の影響を補償していることが

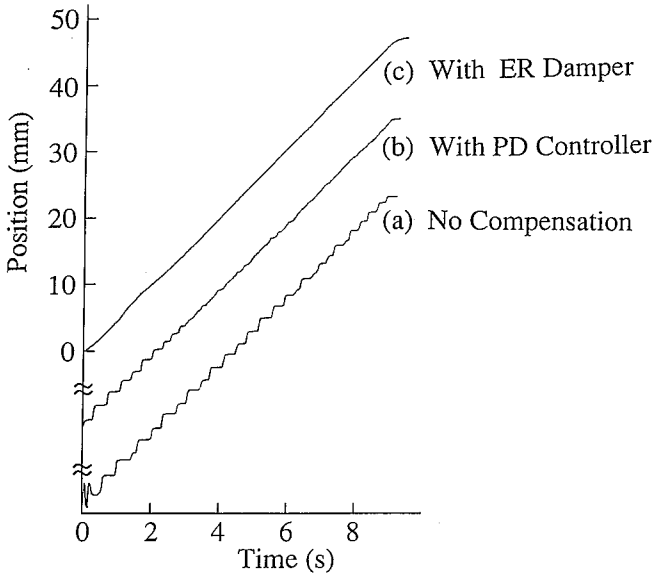


Fig. 14 Comparison of compensation methods (Velosity: 5 [mm/s]).
補償法の比較（速度 5 [mm/s]）

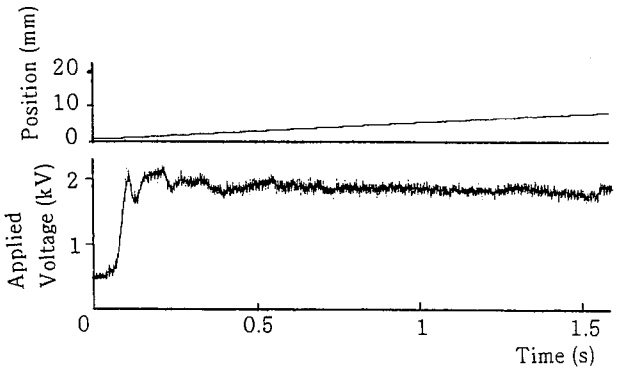


Fig. 15 Aspect of applied voltage to ER-actuator.
ER アクチュエータへの電圧印加の状況

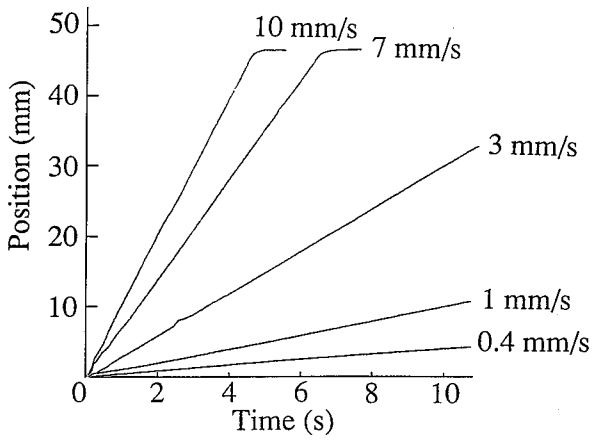


Fig. 16 Controllablity of Velocity of ER-Actuator.
ER アクチュエータの速度制御性能

推察される。

Fig. 16 は，速度指令値 $R = 0.4$ [mm/s], 1.0 [mm/s], 3 [mm/s], 7 [mm/s] 及び 10 [mm/s] での ER アクチュエータの低速度制御の結果である。本補償法により混合潤滑モードの速度領域においても安定した速度制御能力を実現できた。

6. 結　言

空気圧シリンダの低速度動作を実現するために，シリンダの摩擦特性に着目して解析を行った。さらに摩擦の影響を補償する手法を提案し，これを空気圧シリンダに実施した。得られた結果を以下に示す。

1) スティックスリップ動作の原因となる非線形摩擦力を，ER アクチュエータの発生する制動力により補償し，低速度動作を安定して行う手法を提案した。
2) 本手法を用いることにより，広範囲の速度に対してスティックスリップ動作の無い安定した速度制御特性を実現できた。

空気圧シリンダは，もともと力制御は容易であるという特長を持つ。本研究では，さらに電動機サーボに匹敵するような制御性能が得られることが示された。電動機サーボでは本質的に力制御が困難であることから，空気圧シリンダが安全なアクチュエータとして最も優れており，人間と共同作業を行うサーボマニピュレータやロボットに利用可能であると言える。

参考文献

1) Y. KAWAKAMI, Y. MASUDA and S. KAWAI; Some consideration on the position control of pneumatic cylinder, Proceedings of the 2nd JHPS International Symposium on Fluid Power, 563～568 (1993).
2) 岡部，神谷；空気圧シリンダのスティックスリップ運動，精密工学学会誌，Vol. 54, No. 1, 183～188 (1988).
3) 例えば，則次，花房；空気圧シリンダのパルス幅変調方式速度制御，油圧と空気圧，Vol. 14, No. 7, 505～512 (1983).
4) 吉満，小山；非線形適応感度を持つ空気圧シリンダのモデル規範型適応制御，平成 6 年秋季油空圧講演会論文集，105～108 (1994).
5) 池田，杉本；ER ダンパを用いた空気圧ロボットのホールド特性の改善，第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，783～786 (1991).
6) 池田，杉本，齋藤；抑制力発生機構の空気圧アクチュエータへの適用，第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，817～820 (1992).
7) 池田，杉本；空気圧シリンダへの ER 流体の適用，油圧と空気圧，Vol. 24, No. 7, 729～799 (1993).

8) スマート流体に関する調査報告書，スマート流体報告会 (1990).
9) 杉本；空気圧サーボによるマニプレータの開発に関する研究，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 495, 2318～2324 (1986).
10) 曾田；摩擦の話，岩波新書 (1971).
11) 芥田他；微速再起動による空気圧シリンダの精密位置決め制御，日本機械学会・精密工学会東海支部浜松地方講演会講演概要集，103～104 (1988.7).

(平成 8 年 5 月 10 日受理)