

電気粘性流体を用いた入出力装置の研究

河西 伸一・清弘 智昭*・本田日出夫*・榊原 忠嗣*

Research on I/O Devices Using Electro-Rheological Fluid

Shin'ichi KASAI, Noriaki KIYOHRO, Hideo HONDA and Tadashi SAKAKIBARA

要 旨

マニピュレータ操作や仮想操作におけるシミュレーション等を行う場合、仮想操作感で物を握るなどの操作を行うことが必要となってくる。本研究は、流体に電界を印加すると見掛け上の粘性が変わるER (Electro-Rheological) 流体を用いて、流体と極板間に生じるずり抵抗を利用した方法と、流体自体の流れを制御する方法について検討を行った。

その結果、ずり抵抗を利用した方法では、電圧と生じる抵抗力が比例関係にあることが分かった。また、流れを制御する方法では、電圧変化によって電極間に流れる流体の量が比例的に変化することが分かった。これらにより小型軽量かつ人間に安全な方法で、抵抗感を発生できる装置の基本設計が可能となった。

1. 緒 言

人間が外の状況、現象を感知するには、人間が持っている視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚の五感を通じて認識することが一般的である。しかも、人間は一つ一つの感覚で認識するよりも、幾つかの感覚を取り合わせて総合的に状況を認知する。

ところが、現在一般的に使われているマニピュレータを始めとする遠隔操作においては、視覚的要素を充実する方向で機器の開発が進められてきている。また、コンピュータを利用したグラフィックの実現がハードウェア、ソフトウェアの充実によって視覚、聴覚面で現実を超越するところまで技術が高められてきている。しかし、現在の要求は、微妙な操作・作業への対応、また、他の感覚との複合による物事の認識が求められる。中でも触覚に対する感覚フィードの必要性、重要性が言われてきている。

本研究は、仮想現実感における物をつかむなどしたときの仮想的な操作感の必要性から、これらのフィードバック可能な装置の実現について検討を行った。その結果、小型軽量かつ人間に安全で抵抗感を発生できる装置の基本設計を行うことが出来たので報告する。

2. 実験方法

電界を加えると液体の粘性が増す特性のあるER流体を用いて、次の方法について検討を行った。

- ・円盤形状による機構の検討
- ・円筒形状による機構の検討

・シリンダ機構及び流量変化による検討

2-1 ER流体

ER流体とは、電気絶縁性液体（分散媒）の中に直径が $5\mu\text{m}$ 程度の固体粒子（分散相）を分散・懸濁させた流体に外部電場を印加したとき、流体に見掛けの粘度が著しく増大する現象が生じる流体である。実験に供したER流体は、電気絶縁性液体としてシリコン油、固体粒子としてスチレンージビニルベンゼン共重合体からなる、(株)日本触媒製、TX-ER2050のER流体を用いた。

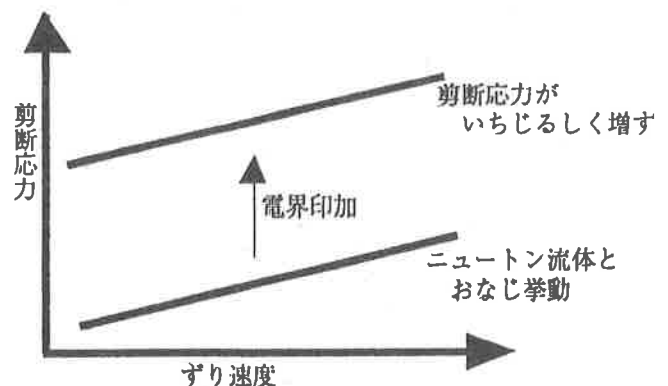


Fig.1 ER流体の電界特性¹⁾

ER流体の見掛けの粘性は、ニュートン流体のように傾きの増加として現われるのではなく、Fig.1に示すように外部電界の増加にともない傾きは変化せず平行移動し、流体の運動を妨げる応力のみが増加する特性を持っている。²⁾

2-2 機器の基本設計

装置の設計には、ER流体の特性である電界によるすべ

* 山梨大学工学部電子情報工学科

り抵抗を利用し、回転力に抵抗感を得る方法で2種類、また、流体の流れを制御する方法1種類について検討を行った。

2-2-1 円盤形状による抵抗感の実現

Fig.2に円盤形状の基本設計図を示す。この方式は二つの円盤を重ね合わせ、それら円盤でER流体を挟み込み、円盤間に電界を加えることによって円盤にすべり抵抗を発生させる構造からなる。ここで、円盤間のギャップhにER流体を挟み、各円盤間に電界を与え、角速度 ω で回転を与えるとER流体と電極円盤間でずり抵抗によるトルクMが発生する。

円板間の距離をhとし、下の円板を角速度 ω で回転した場合を考えると、回転中心軸からrの距離にありしかも上の円板に接する流体の速度は0のとき、下の円板に接する流体の速度は $r\omega$ となる、その部分の流体層の厚さはhであるから、半径rの円板上面の流体のずり速度 D_s は、

$$D_s = f(\tau) = \frac{r\omega}{h} \quad (1)$$

(τ はせん断応力)

また、中心軸から半径がrと(r+dr)との間の円板部にある流体が円板に作用する粘性トルクdMをもとめる。その円筒部の単位面積に作用するせん断応力 τ は、

$$\tau = -\left(\mu \frac{du}{dy} + \tau_y\right) \quad (2)$$

であるから、dMは、

$$dM = \tau(2\pi dr) r = 2\pi r^2 \tau dr \quad (3)$$

よって

$$dD_s = \frac{\omega}{h} dr \quad (4)$$

また、円板の周縁におけるずり速度およびせん断応力を D_{sm} および τ_m とおけば

$$D_{sm} = f(\tau_m) = \frac{R_p \omega}{h} \quad (5)$$

となる。以上を整理すると、

$$dM = \frac{2\pi h^3}{\omega^3} \tau D_s^2 dD_s \quad (6)$$

ゆえに、円板全面に働くトルクMは、

$$M = \frac{2\pi h^3}{\omega^3} \int_0^{D_{sm}} \tau D_s^2 dD_s \quad (7)$$

となり、(7)にて τ を代入して解くと

$$M = -\frac{\mu\pi\omega R_p^4}{2h} - \frac{2\pi R_p^3}{3} \tau_y \quad (8)$$

となる。(μは、ER流体の粘性係数、 $R_p = r+rd$)

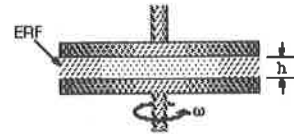
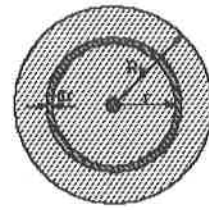


Fig.2 円盤形状による機構図

2-2-2 円筒形状による抵抗感の実現

Fig.3に円筒形状の基本設計図を示す。この方式は外筒の中に内筒を入れ、外筒と内筒の間にER流体を挟み込み、そこに電界を加えることによって、すべり抵抗を発生させる構造である。ここで、円筒の回転中心からの距離r、高さhにあるER流体層に働くせん断応力 τ (τ は円筒流体層におけるせん断応力、hは円筒の高さ)としてトルクMを求めると、円筒の回転中心軸からrの距離にある円筒流体層に働く粘性によるトルクは、 $\tau 2\pi r h r$ となることから

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 h} \quad (9)$$

ゆえに円筒の表面におけるせん断応力 τ_1 は、

$$\tau_1 = \frac{M}{2\pi R_1^2 h} \quad (10)$$

内筒の表面におけるせん断応力 τ_2 は、

$$\tau_2 = \frac{M}{2\pi R_2^2 h} \quad (11)$$

となり、流体内のせん断応力 τ は、円筒の中心軸からの距離の二乗に反比例する。(9)から

$$\frac{d\tau}{\tau} = 2 \frac{dr}{r} \quad (12)$$

また、ずり速度 D_s は、回転角速度を ω とすれば、

$$D_s = f(\tau) = -r \frac{d\omega}{dr} \quad (13)$$

(12), (13)から

$$d\omega = -\frac{f(\tau)}{r} dr = \frac{1}{2} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau \quad (14)$$

となる。

ここで、外筒の角速度を ω_1 (ここでは $\omega_1=0$)、内筒の角速度を ω_2 とすれば

$$W_2 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega = \frac{1}{2} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau \quad (15)$$

これに、

$$\tau = -\left(\mu \frac{du}{dy} + \tau_y\right) \quad (16)$$

として解くと,

$$D_s = f(\tau) = \frac{-\tau - \tau_y}{\mu} \quad (17)$$

求める粘性トルクMは,

$$M = 4\pi\mu h \frac{\omega_2 + \frac{1}{2} \tau_y \log\left(\frac{R_1^2}{R_2^2}\right)}{\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}} \quad (18)$$

となる。

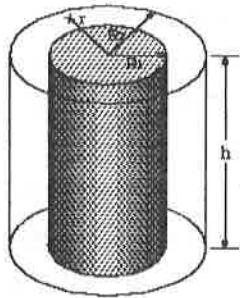


Fig.3 円筒形状による機構図

2-2-3 シリンダに流れる流体制御による抵抗感の実現

Fig.4にシリンダ方式の基本設計図を示す。この方式はシリンダにER流体を入れて、2枚の板の間にこれを流し、板間に電界を加えて流量制御弁としての機能を持たせ、流量の制御を行い、シリンダの動きに抵抗力を発生させる構造である。ここで、流量弁に流れる流速uは、次式で現わされる。

$$u = \frac{1}{2\mu} \left\{ -\left(y - \frac{h}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2 \right\} \quad (19)$$

3. 実験結果及び考察

本報では、円盤方式とシリンダ方式について、ER流体に電界を印加して抵抗感を生じさせる基本的な実験を行った。

3-1 円盤形状による抵抗感の実験

これは、2枚の円盤間にER流体を注入し、電圧（電界）を変えて回転方向に加わるせん断応力に変化を与えて生じた回転方向に反する力をトルクとして測定を行った。

このときの電圧印加方法は、PWM（Pulse Width Modulation）制御により行った。

Fig.5より、電圧を変動させたとき、トルクは電圧に正比例して変化することが分かった。また、PWM制御によって、電圧を変動させてもリニアに電圧変化を与えたとき

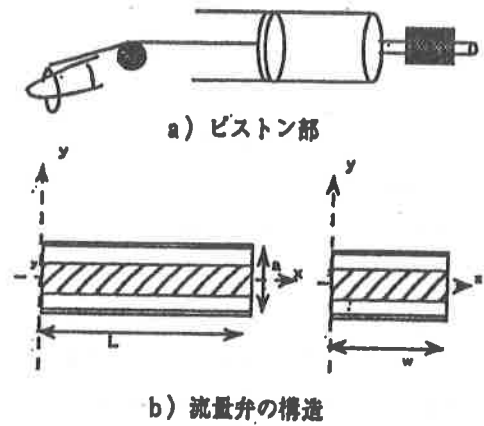


Fig.4 シリンダ機構図

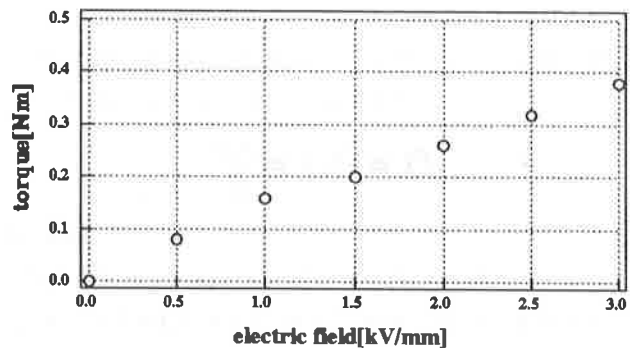


Fig.5 電界—トルク特性

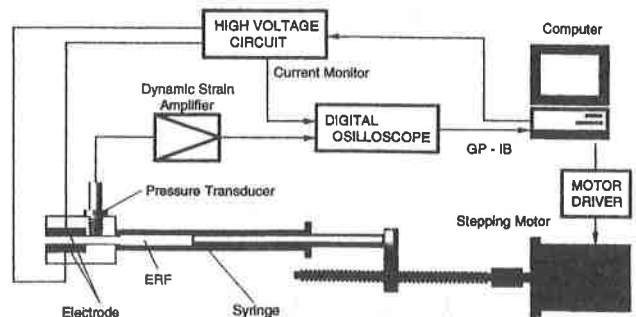


Fig.6 電圧—流量測定装置

と同様にER流体に粘性の変化が確認できた。また、(8)式より発生トルクは円盤の半径rの大きさに比例して増加することが分かる。

しかし、今回の実験で得られたトルクは小さく、人間に感触として伝えるには、トルクの増幅が必要となる。従ってトルクを増大させるには、円盤間のギャップを小さくする方法、ギヤ機構のメカニカル構造の付加などが考えられる。

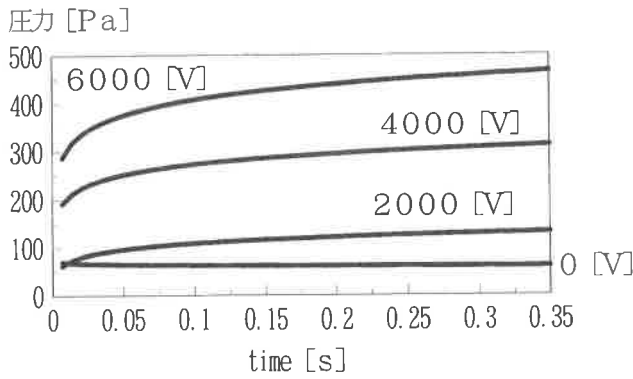


Fig.7 流圧特性

3-2 シリンダに流れる流体制御による抵抗感の実現

3-2-1 流圧特性の実証実験

Fig.6に示す実験機器により、極盤間に電圧を印加したときに、極盤間を流れるER流体に粘性の変化が起き、それに伴い流れているER流体の流圧が変化する。そこでステッピングモータにより、一定圧力で流体を押し出し、極盤間に電界を加えたときの圧力変化を圧力センサにより測定を行った。

この結果をFig.7に示す。これより0.2秒後にはどの電圧においても直線的になることから、極盤間に流れるER流体を、極盤間に、電界を印加することにより流量、流圧を直線的に制御出来ることが分かった。

3-2-2 シリンダによる応力実験

3-2-1により実証したER流体の流圧特性より、Fig.8に示す感覚発生装置を作成し、電圧-荷重特性を測定した。結果をFig.9に示す。これより極盤間に印加した電圧とそれに伴い発生する荷重感は、比例して変化することが分かった。

したがって、極盤間への電界印加が直線性を示すことから、ER流体の流れ制御を利用することにより、小型軽量で、安全性のある感覚フィードバック装置の実現が可能である。また、ER流体の流れを直接制御する方法として、

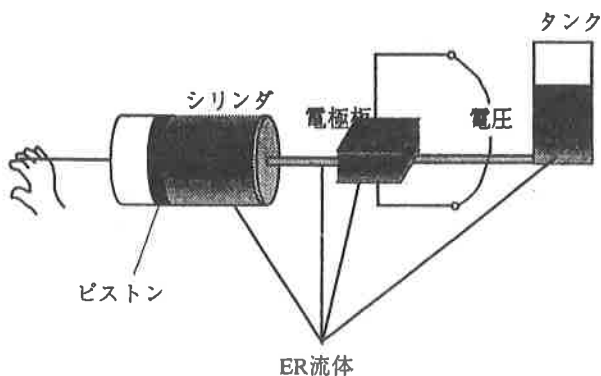


Fig.8 感覚発生装置

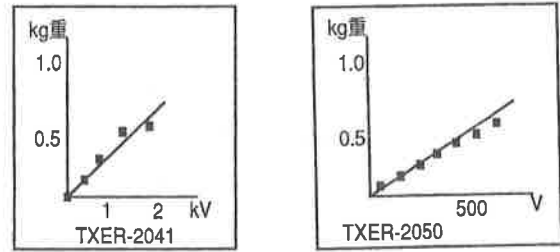


Fig.9 電圧-荷重特性

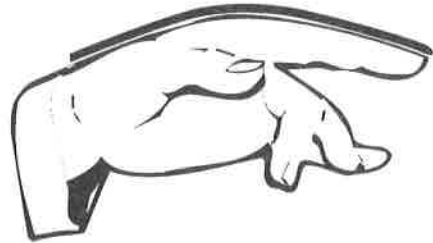


Fig.10 チューブを使用した感覚機構図

Fig.10に示すチューブ内にER流体を入れ、チューブが曲がる時に発生するER流体をコントロールして、感覚を力としてフィードバックする機構が考えられる。

4. 結 言

本実験によりER流体を用いた小型軽量で、かつ安全に仮想操作感を実現する装置の設計方針を3種類の方法から見いだした。また、電圧変化に応じてリニアにトルク変動が生じることから、電圧を変化させることによりトルク制御が簡単に行えることが分かった。

一方、今回は、高電圧を印加したが、電流が数 μ Aと小さいため実際に感電等で人体への影響はないと考えられるが、より安全で使用が容易な電圧レベルに引き下げるためには円盤の面積を広くする必要がある。

そこで、今後の課題として、装置の小型化、トルク増幅のためのギヤ機構の付加などのメカニカル設計の検討、また、今回示したシリンダ構造の実験、検討を進めて小型軽量で安全性の高い装置の追及が必要であるが、ER流体を用いることによって、それらの装置製作の指針が得られた。

また、シリンダ方式の実験から、液体の流れを制御して力を発生させる方法についても検討をする必要があるが、それには、チューブを折り曲げたときに生じるER液体の流れをコントロールして、力を生じさせ仮想操作感を実現する小型軽量で、かつ安全性の高い装置を実現することができると考えられる。

参考文献

- 1) Willis M. Winslow: METHOD AND MEANS FOR TRANSLATING ELECTRICAL IMPULSES INTO MECHANICAL FORCE, US

PAT.2.417.850, (1947)

- 2) 浅子佳延他：スルホン化（スチレン-ジビニルベンゼン共重合体）を用いたエレクトロレオロジー流体の特性，日本レオロジー学会誌(別冊)，第20巻第2号，p61～66,(92)
- 3) 早川幸広：ERFインクジェット用インキの動特性，p32～41，(95)