

## 電気粘性流体 (ERF) を用いた順応型アクチュエータに関する研究

杉本 旭\*

### A Study on the Compliant Actuators by means of Electro-Rheological Fluids (ERF)

by Noboru SUGIMOTO\*

**Abstract:** As an effective safety measure, many sets of industrial robots and manipulators have been introduced in place of workers who have been suffering from dangerous or detrimental work. Because of their powerful dangerous action, however, industrial robots should be guarded in a remote work area. Recently, computers and other micro-electronics which have been progressing rapid strides, accelerate the progress in automatic control technology. Robots that take care of patients, physically handicapped persons and very old persons will soon be realized, and many people will work together with robots in factories, offices and houses. But, the most important thing must be safe when a robot and human are in contact each other.

This paper considers the problem of actuators for safe conduct of robot in performing cooperation work with human. Compliant manipulation fundamentally requires that controlled robot can not only follow up the input trajectory exactly in free motion space, but also move adaptively in constrained space while making compliant contact with its dynamic environment. However it is difficult to achieve compliant actuator by means of conventional linear control means.

Electro-rheological phenomena is defined as an essentially instantaneous reversible change in apparent viscosity when fluids are subjected to an externally applied electric field. Drive clutches and hydraulic valves for this Electro-Rheological Fluids (ERF) can control the torque and the pressure respectively only by application of high voltage.

This study evaluates the non-linearity and passive function of an ER element from a standpoint of control and pursues motion control strategies suitable for non-linearity of ER elements. An antagonistic rotary actuator system using ERF is proposed and various control strategies are attempted. The system is so structured that output cylinder is set in drums composed of a positive and a negative rotation drum driven by the electric motor and the ERF is filled in a gap. As a result of experiments, proposed control method realizes both force-adaptation (compliance control) and a fine positioning (stiffness) with changing a shear stress of ERF. This ability to regulate compliance/stiffness by means of such a property as changeable plasticity is essential for a safe robot to operate in cooperation with humans.

**Keywords;** Safety control, Smart fluids, Mechatronics and robotics, Actuator, Electro-rheological fluid, Fine position control, Compliance control, Changeable plasticity, Impedance control.

#### 1. 緒 言

機械は、もともと人間の不十分な機能を補完すること

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

によって、人間が豊かな生活を獲得する手段として発展してきた。ロボットは、重量物を扱い、高速で正確な位置決めを実行し、求めればいくらかでも作業を繰り返す。このように人間の不得意な仕事を機械が行うという関係で機械と人間との関係が成立しており、必然

的に機械は高出力・高速化と高精度化が求められる。

機械と共に発展しようとする現代文明は、機械の扱いを間違えると重大な損害を蒙る可能性をはらんでおり、そのため安全に配慮して、機械を人間から隔離し、近づく必要があるときには動力源を遮断するようにしている。

一方、近年、コンピュータの著しい発展に伴って制御技術も高度化してきており、機械が人間の行動空間に進出できる可能性がでてきている。例えば、病院で患者を抱き上げて入浴の介助を行うロボットや身体障害者の食事を介助するロボットなどが提案されてきており、これらはその可能性を示す例である。また、衰えた身体機能を補完することで高齢者に自立した生活や職場復帰を促す機械の必要性も指摘されている。

このような人間と共生する機械は、少なくとも人間と機械との物理的関係として、接触における安全が保証されていなければならない。そのためには、高出力化・高速化・高精度化を指向してきたこれまでの機械とは異なる新しいコンセプトの機械が求められることは明らかである。例えば、Mason ら<sup>1)</sup>はロボットとの接触作業に対して柔らかい動作制御 (Compliant motion) の必要性を強調しており、この「柔らかさ」は、そのような新しいコンセプト<sup>2~4)</sup>の機械が備えるべき条件の1つと考えられている。

しかし、「柔らかい」というのはあくまでも心理学的評価であり、工学の対象として厳密な議論を行うためには、まず、計測可能な物理量によってその「柔らかさ」が表現されなければならない。同様に「安全」も一面では心理学的評価であり、何らかの物理量で示されなければ工学的に扱うことができない。本研究の主たる目的は、安全を「柔らかさ」を表す物理量で表すことにより、「安全な接触」と「柔らかさ」の関係を工学的にまず明らかにし、次いで「安全な接触」のための柔らかさを制御できるアクチュエータを提案することにある。

また、ロボットの運動制御の一手法として、環境から受ける運動学的拘束で生じる干渉力を低下させつつ、目的の動作を実現できるインピーダンス制御が提案されている<sup>5)6)</sup>。しかし、この方式が拘束の対象を人間とする場合に果たして適用できるかは疑問である。本研究では、接触の「安全」を『人間と機械 (アクチュエータ) との間の干渉力が人間の許容できる限界を越えないこと』と定め、むしろインピーダンス制御による「柔らかさ」が必ずしも安全な接触を保証できないことを示し、また線形制御素子による構成では、安全な接触を保証できるアクチュエータを実現することは困難であることを示す。

ところで、干渉力は、目標位置までの誤差を修正する操作力が人体による反力とバランスすることで生ずる。よって偏差を修正するための操作力が安全限界を越えない一定値を維持するようであれば、安全な接触の条件が満たされる。本研究では、操作力が距離 (偏差の大きさ) と無関係に一定となるアクチュエータを理想的アクチュエータと見なし、これを実現するための非線形制御素子の検討を行っている。

この非線形制御素子の実現手段とし、本研究では電気粘性流体 (Electro-Rheological Fluids:以下、単にERF) に注目している。ERFの示すビンガム流動特性は、せん断力がずり速度とは無関係に一定となるという特性を有し、しかもこのせん断力が外部電界によって容易に設定できる。

本研究では、正・逆転する一対の駆動円筒から、ERFを介してトルクを伝達する拮抗式トルク変換装置 (以降ERFアクチュエータと呼ぶ) を開発するとともに、安全な接触を実現できる新しい「柔らかさ制御 (Compliance control)」の方式を提案する。

## 2. ERF (電気粘性流体) の特性

ERFは、外部電界によって見掛けの粘性が変化する懸濁液として知られる。典型的なERFはイオン交換樹脂 (粒子径1  $\mu$ 程度) を絶縁性の高い油 (例えばシリコン油) に懸濁させた分散系ERFであり<sup>7)</sup>、無電界時に分散媒中を自由に浮遊していた分散相粒子が、電界の印加により粒子間引力を生じて電極板間にクラスタ (架橋構造) を形成する。そのクラスタが流れに対して抵抗となるため見掛けの粘度が著しく増大する。この現象が応答性に優れていることから、電気力変換機能性流体<sup>8)</sup>として、流体を媒体として動力を伝達するクラッチ、流量や圧力を制御するバルブ、流体粘性を利用したダンパなどの機械的要素への応用<sup>9)</sup>はもとより、最近ではアクティブな振動制御<sup>10)</sup>、アクチュエータ制御<sup>11)</sup>など広い応用が期待されている。

Fig. 1は、本研究で用いているERFの特性を示す。表面に絶縁処理を行った炭素粒子とシリコン油による分散系ERF (ブリジストン社製<sup>12)</sup>) である。一般に分散系ERFでは、電界によって降伏応力が変化するビンガム流体としての挙動を表す。見掛け粘度がずり速度によって大きく変化するという強い非線形性を示すため、線形制御への適用が難しいという欠点が指摘されている。しかし、本報5章で述べるように、安全な接触には力のリミットを持つアクチュエータが必要であり、それを実現するためにはFig. 1のERFの非線形特性、すなわち電界によって降伏応力が決定されるという特性が不可欠である。

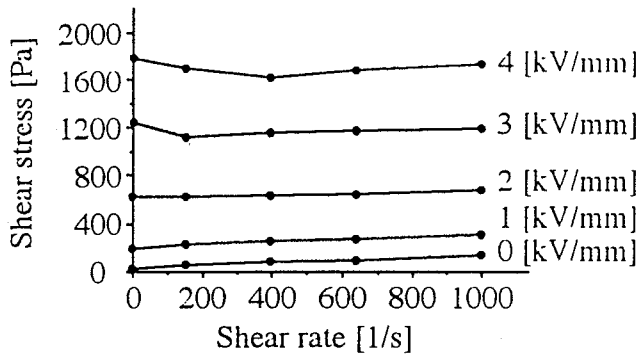


Fig. 1 Characteristics of carbonic ERF.  
炭素系 ERF の特性

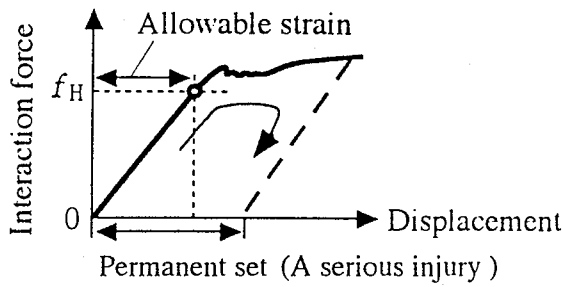


Fig. 2 Interaction force and human damage.  
干渉力と人体の損傷

### 3. 接触時における人の安全

人間と共存できるロボットを実現するには、「接触における安全」を計測可能な物理量で定義する必要がある。そこで本研究では、人とロボットの接触で生じる干渉力  $f$  が人体の許容限界値  $f_H$  を超えない範囲であれば安全と判断するものとする。すなわち「安全の判断」を論理値 1 で示す 2 値の論理変数  $S \in \{1, 0\}$  は、力に関して次の条件で表される。

$$S = \begin{cases} 1 & \text{条件 : } f_H > f \\ 0 & \text{ : } f_H \leq f \end{cases} \quad (1)$$

ここで、力の許容限界値  $f_H$  とは、Fig. 2 のように人体の損傷を構造材料における永久歪みと見なしたときの降伏応力に相当するものであり、許容される損傷の程度によって様々に決定される力の値である<sup>13)</sup>。ここでは  $f_H$  の大きさ自体については別途定められるものとして深く言及しないが、式 (1) の前提として、少なくとも次のことは満たされているものとする。

- ① ロボットの表面に鋭利な突起や感電部・高温部が無く、接触行為自体が人体に危害とならないこと、
- ② 接触初期の衝撃が過大とならないように、作業中のロボットの移動速度が十分低速に保たれていること。

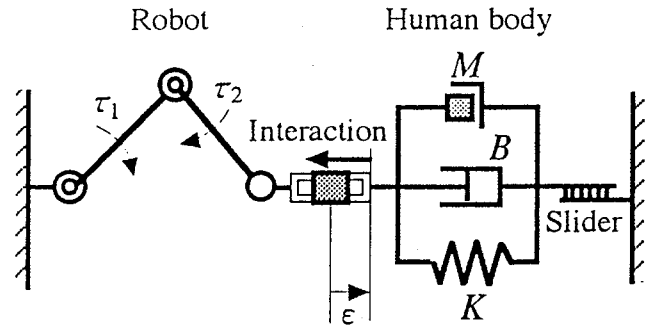


Fig. 3 Impedance model of a work system.  
作業システムのインピーダンスモデル

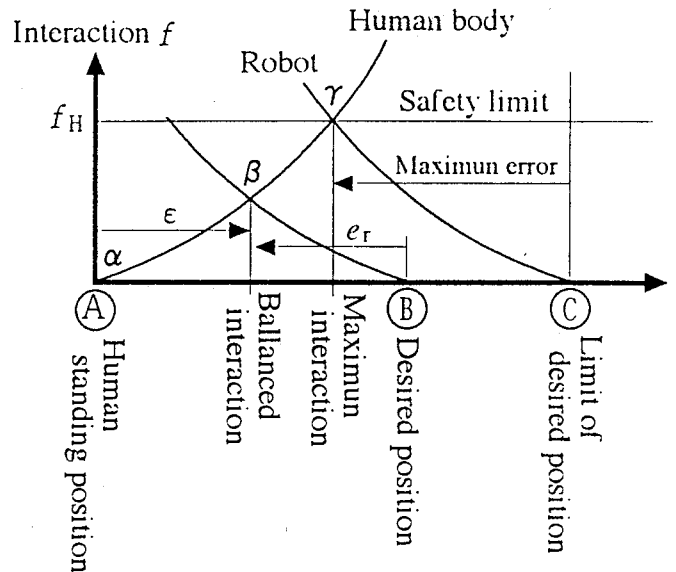


Fig. 4 Interaction space between robot and human body.  
人間とロボットとの干渉状態

作業システムの力学的モデルを Fig. 3 に示す。これは、人とロボットとの接触における最悪の状況として、ロボットと壁の間に人間が挟まれた状況を示している。Fig. 3 において、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$  はロボットの駆動トルク、 $f$  は人間とロボット間の干渉力、 $\epsilon$  は干渉力によって人体に生ずる変位（限界を越えた場合、損傷）を表している。また、人体を質量 (M)–バネ (K)–ダンパ (D) 系と見なしており、式 (1) の安全条件を干渉力が限界を越えると滑りを生ずるスライダで表現している。

### 4. 安全なアクチュエータの特性

Fig. 4 は、人間とロボットの接触状態を示している。この場合の干渉力は、目標位置の修正動作によって生ずる人体からの反力を意味する。従って、干渉力は人間とロボットのコンプライアンスによって大きく異なる。Fig. 4 において、まず人間の位置 A が干渉力を生じないぎりぎりの位置である。さらに、マニピュレータの目標位置を位置 B に定めると、人間とロボットは

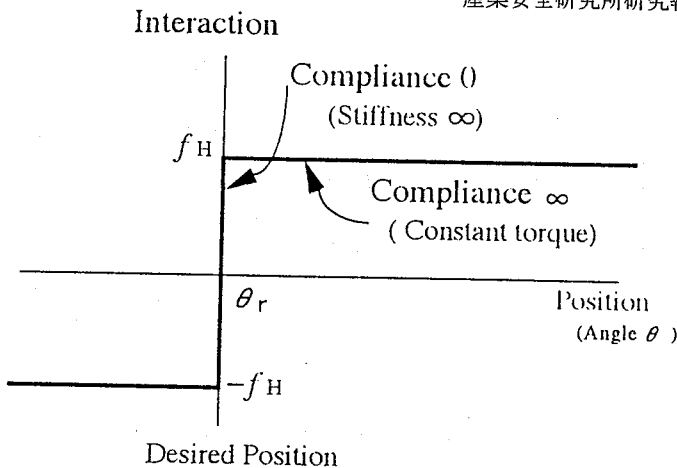


Fig. 5 Idealized model of an actuator.  
理想的なアクチュエータの特性

干渉し、コンプライアンスに応じて、人間は変位 $\epsilon$ を、ロボットは位置偏差 $e_r$ を生ずる (位置 $\theta$ )。

一般に、ロボットのコンプライアンスが高いと大きな誤差に対しても干渉力が小さくなるので、それだけ安全性が高いと考えられている。しかし、制御によって高コンプライアンス状態を実現しても、力の上限が抑えられているわけではなく、誤って目標位置が限界を越えて設定されるなど災害の可能性を否定できない。この問題については後に詳述する。

ところで、位置の誤差を修正するための操作力は安全条件 (式 (1)) を満たす限界まで許容されると考えてよいから、Fig. 5 に示すように、任意の偏差に対して最大の力 ( $f = f_H$ ) で偏差修正を行うのが理想的である。この場合の「柔らかさ」とは、人間に動きを拘束された状態で、さらに目標値を移動させても力が増加しない特性 (力一定) を意味する。ただし、この力一定の特性は、人間の拘束から解放されれば、目標位置で剛性の高い位置決めが実行されることから、力制御によるものではなく、あくまでも位置制御の条件として与えられることに注意せねばならない。

このように、安全の条件に基づく柔らかさをもつロボットは、Fig. 5 で示すように、目標位置で力  $f$  が  $-f_H \sim f_H$  であるときコンプライアンスが 0、 $f \geq f_H$  であるときコンプライアンスが  $\infty$  となる特性を有する。そのため、従来から利用されてきた線形制御素子を用いて実現するのは大変困難である。

## 5. インピーダンス制御系と力制御系の安全問題

前述の「柔らかさ」を実現する具体的方法を述べる前に、まず、これまでに提案された柔らかい動作制御によっては「安全な接触」が困難であることを述べる。

一般に、ロボットが作業対象物との接触作業を行う場合、反力によって制御不能となるばかりでなく、対

象物を破壊させる場合もある。これら为了避免するためには、通常の位置制御だけでなく、作業環境との相互干渉力をも考慮に入れてロボットの制御系を設計する必要がある。羅ら<sup>14)</sup>は、このように環境との幾何学的干渉を考慮すべき対象作業をコンプライアント・マニピュレーション (Compliant Manipulation) と呼んでおり、これに倣って、ここでも CM 作業と呼ぶことにする。

ところで、前出の羅らも指摘しているように、コンプライアンス (Compliance) には、これまで次の 2 通りの解釈がある。a. 本来の「順応」の意味と、b. 物の柔らかさ、または変位と作用力との比 (弾性係数の逆) の意味の 2 つである。そして、Mason<sup>1)</sup>はロボットの接触作業に対して、“Compliant Motion” を「ロボットが作業の環境によって幾何学的な拘束を受ける場合に、環境との接触で生じた干渉力によって手先の軌道を修正するような動作」と定義し、さらに、こうした幾何学的な拘束環境に「順応する」ための方法として、次の 2 つがあることを述べている。

- A. 手先の運動空間を運動拘束のない自由空間と運動学的な拘束のある拘束空間に分けて、自由空間では位置制御をし、拘束空間では力制御をする。
  - B. 同じく自由空間と拘束空間に分け、自由空間では環境に対して硬い剛性を持ち、拘束空間では柔らかい剛性を持つよう力のフィードバックを調整する。
- ここに、A, B の方法は、それぞれ上述の第 1 番目、第 2 番目の “Compliance” の意味に対応する。以下では、それぞれの方法において安全上の問題点を指摘する。

### 5.1 柔らかさを力制御とする方法 (A)

理想的特性を持つアクチュエータ (Fig. 5) は、目標値において最高の剛性で位置決めを行う。しかし、無理をしてその位置を維持できるのは、干渉力  $f_H$  までであり、この後では、 $f_H$  を越えないための力制御に切り替えられる。安全制御についてここでは詳しく述べないが、この場合の力センサは危険検出型<sup>15)</sup>となるためフェールセーフとはならないことに注意を要する。すなわち式 (1) を監視する力センサは、人の拘束がない通常の状態では出力はゼロであるが、この出力ゼロは故障と区別できない。力を検出しても必ずしも力制御に切り替えることができない点で、この方法を人間の安全確保に適用することは避けるべきである。

### 5.2 柔らかさを低剛性制御とする方法 (B)

CM 作業のためのロボット制御に関する代表的な研究として前出のインピーダンス制御があり、スイッチによりモード変換をせずに、自由空間と拘束空間の両空間におけるロボットの運動制御をする一つの統一的

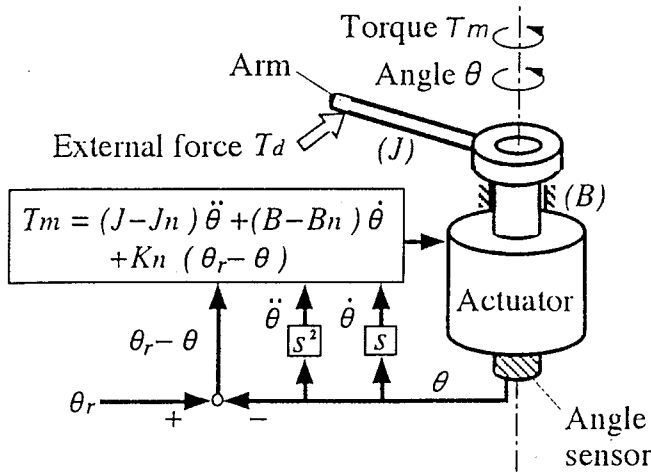


Fig. 6 Robotic arm model for impedance control.  
インピーダンス制御モデル

な手法であると言える。

いま, Fig. 6 に示すように, 1 自由度アームを想定し, インピーダンス制御による上述の  $B$  の “Compliance” について検討を加える。ただし, 1 自由度アームは入力に比例したトルクを発生する理想的なアクチュエータを内蔵するとする。駆動部の慣性モーメントを  $J$ , ダンパ係数を  $B$ , アームの角度を  $\theta$ , アクチュエータが発生するトルクを  $T_m$ , アームを介してアクチュエータに加わる外乱トルクを  $T_d$  とすると, 系の運動方程式は次のようになる。

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = T_m + T_d \quad (2)$$

インピーダンス制御とは, この系を慣性  $J_n$ , 粘性摩擦係数  $B_n$ , 剛性  $K_n$  を持つ系と等価な挙動を示すように,  $T_m$  を制御するものである。すなわち, この系において, アーム角度  $\theta$ , 角速度  $\dot{\theta}$ , 角加速度  $\ddot{\theta}$  をセンサで検出し, アクチュエータの発生トルク  $T_m$  をある目標角度  $\theta_r$  に対して,

$$T_m = (J - J_n)\ddot{\theta} + (B - B_n)\dot{\theta} + K_n(\theta_r - \theta) \quad (3)$$

と制御すると, アームの挙動は次の運動方程式で記述される。

$$J_n\ddot{\theta} + B_n\dot{\theta} = K_n(\theta_r - \theta) + T_d \quad (4)$$

このように, アームは, 慣性  $J_n$ , 粘性摩擦係数  $B_n$ , 剛性  $K_n$  を持つ系と等価な挙動を示す。この場合, 機械的インピーダンス  $J_n$ ,  $B_n$ ,  $K_n$  の値を任意に指定し, 式 (3) に基づいて  $T_m$  を操作すれば, 系の運動を自由に制御することができる。これがインピーダンス制御である。また, 特に静的な状態に注目し,  $K_n$  のみを指定する制御方式を剛性制御 (またはコンプライアンス制御) と呼ぶ。

本報第 2 章で前提としたように, アームが十分低速である場合, 干渉力は  $T_d = K_n(\theta_r - \theta)$  で与えられる。 $\theta_r - \theta$  がある限界を越えると, 安全の限界 (式 (1)) を越える可能性が否定できない。従って, 力の監視を行って, 限界を越えようとするとき力制御に切り替える必要がある点で, 5.1 節の方法 (A) と同じ問題を含んでおり, このままでは人の安全に適用することは難しい。

## 6. 可変粘性負荷による順応位置決め方式

本報が提案する「柔らかさ」を実現する制御方法の原理を Fig. 6 に示した 1 自由度アームを用いて説明する。これは,  $\theta$  を検出して  $\theta = \theta_r$  のとき, 式 (3) の粘性摩擦係数  $B_n = \infty$  とするという特殊な操作である。この操作によってアームは一瞬にして停止するが,  $B_n = \infty$  による停止状態では, 次のような力のバランスが生成される。

$$\begin{aligned} T_m &= -B_n\dot{\theta}, \quad T_d = B_n\dot{\theta} \quad (\dot{\theta} \rightarrow 0) \\ \therefore T_m + T_d &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) の停止状態を等価バネ定数  $K_c$  で表すと,

$$\begin{aligned} T_d &= B_n \cdot 0 = K_c(\theta - \theta_r) = K_c \cdot 0 \\ \therefore K_c &= \infty \end{aligned} \quad (6)$$

すなわち, 剛性が無限大となり, 干渉力  $T_d$  はいくらでも大きくなり得る。しかし, 干渉力が過大となることは許されないから, 式 (1) を満たす限界のトルクを  $T_H$  とすると,

$$T_d = B_n\dot{\theta} = B_n \cdot 0 < T_H \quad (7)$$

でなければならない。任意の速度  $\dot{\theta}$  において, 粘性負荷  $B_n\dot{\theta}$  が一定となる特性は, 後で示す ERF を利用したアクチュエータの特徴である。これについては次章以降に譲るが, 任意の速度で一定の粘性負荷特性を示す制御要素 ( $T_B$  一定で表す) は一般に次式で示される。

$$T_d = B_n\dot{\theta} = T_B < T_H \quad (8)$$

提案する制御方法の原理は, 位置  $\theta$  と速度  $\dot{\theta}$  を検出し, それらが  $\theta - \theta_r < 0$  かつ  $\dot{\theta} < 0$  のとき, または,  $\theta - \theta_r > 0$  かつ  $\dot{\theta} > 0$  のときに式 (8) となる操作を行い, それ以外では  $T_B = 0$  となる操作を行うものである。式 (8) の動作を行っているとき, 等価バネ定数  $K_c$  は次式で与えられる。

$$K_c = \frac{T_B}{\theta - \theta_r} \quad (9)$$

すなわち, この系は, 目標位置  $\theta = \theta_r$  で  $K_c = \infty$  となり, 目標位置から離れるに従って減少する特性の剛性を持つ。

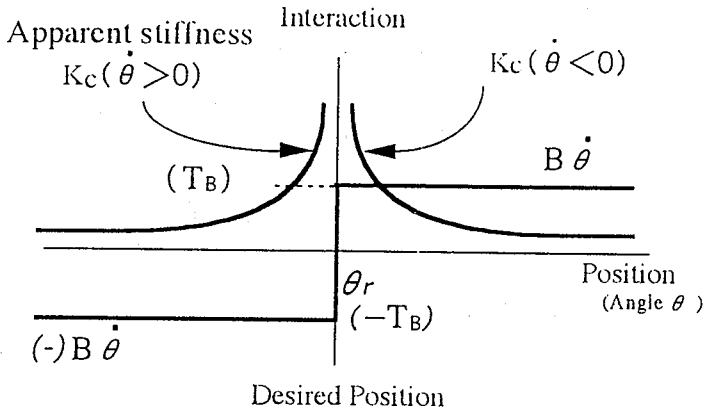


Fig. 7 Apparent stiffness in the viscosity control system.  
粘性制御系における等価バネ定数

Fig. 7 は、式 (8)(9) をまとめて表現している。ここで述べた操作手順は、目標位置から離れようとする動作に対してブレーキを掛け、近づく動作ではブレーキを掛けないという状況に類似している。しかし、Fig. 7 では、このような単純な操作によって目標位置でピークを持つバネ定数の空間的分布が実現されることが示されている。ここで重要なことは、機械的摩擦を利用した摩擦ブレーキや後に示す ERF アクチュエータなど、粘性負荷を無限大にまで変化できる受動制御素子によって極めて高剛性の位置決めが可能であることが示されていることである。

### 7. 粒子系 ERF の流動特性

電界を印加された分散系 ERF は、非線形なビンガム流動特性を示し、せん断応力を  $\tau$ 、無電界時の粘性率を  $\eta_B$ 、印加電界を  $E$ 、ずり速度を  $\gamma$  とすると次式で近似できる。

$$\tau = \eta_B \cdot \gamma + \tau_E(E) = \tau_E(E) \quad (10)$$

ここに、 $\tau_E(E)$  は印加電界に応じて誘起するせん断応力（ただし、 $E = 0$  のとき  $\tau_E(E) = 0$ ）である。Fig. 1 に示したように、無電界時にニュートン流体であるのに対し、電界印加によってほぼ同じ流動曲線の傾きを持つビンガム流体に変化する。また Fig. 1 は、電界によって定まる一定の降伏応力を取り出すことができることを示している。

ERF はビンガム流動特性によって、ずり速度が微小であってもせん断応力  $\tau$  を生じる。ERF の見掛けの粘性率を  $\eta_E$  とすると、式 (10) は次式で表せる。

$$\tau = \eta_E \cdot \gamma \quad (11)$$

$E > 0$  の場合には、 $\gamma$  が限りなく 0 に近い状況におい

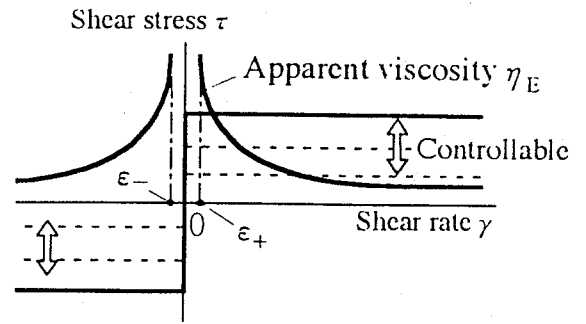


Fig. 8 Flow properties of ERF in presence of applied electric field.  
電界印加時の ERF の流動特性

ても降伏応力  $\tau_E(E)$  が生じるため、このときの見掛けの粘性率  $\eta_E$  は次式で与えられる。

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \eta_E = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \infty \quad (12)$$

このように、電界下の ERF は、ずり速度 0 の極限において無限大の粘性率をもつが、このことは、どのような小さな動き（ずり速度）を生じようとする外力に対しても最大  $\tau_E(E)$  までの反力を遅滞なく発生して動きを阻止しようとするという意味である。この特性を Fig. 8 に示す。

ここで、ERF を介して、平面上に置かれた質量  $m$  をもつ物体  $M$  の運動を考える。ただし、運動の自由度は 1 とする。ERF に電界を印加することで、外力  $f$  の下で、ある位置  $x_r$  に物体  $M$  が停止している状態は、次の運動方程式で表される。

$$m\dot{x} = f - \eta_E(E) \cdot \dot{x} \quad (13)$$

粘性率  $\eta_E = \infty$  による停止状態はあくまでも物体  $M$  が位置  $x_r$  に固定されているわけではなく、厳密には位置  $x_r$  において速度が無限に遅いということである。従って、式 (13) は次式に書き換えられる。

$$m\dot{x} = f - \infty \cdot \dot{x} \quad (14)$$

式 (14) は、外力  $f$  が ERF の誘起せん断応力  $\tau_E(E)$  を越えていない条件で、ERF により行われる極めて強力な速度フィードバックによって物体の動きが阻止されることを示している。計画的に停止位置  $x_r$  を定め、位置の計測を行って、 $x = x_r$  で停止させるとき、この位置決めにおける等価バネ定数  $K_c$  は次式となる。

$$K_c = \frac{\tau_E(E)}{x_r - x} \quad (15)$$

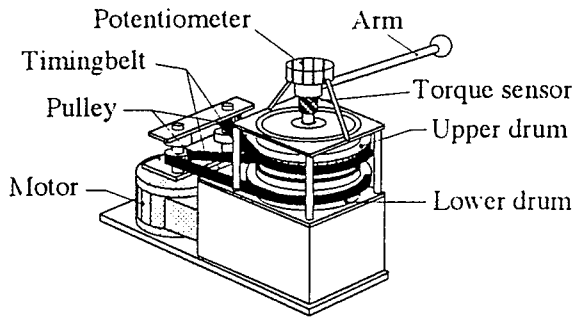


Fig. 9 Antagonistic torque transfer unit using ERF.  
ERF を用いた拮抗式トルク変換装置

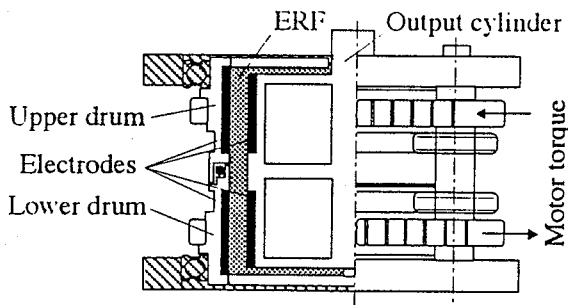


Fig. 10 Structure of ERF actuator.  
ERF アクチュエータの構造

式 (15) は  $x = x_r$  で無限大の剛性を示すことは前節の式 (9) で既に示したとおりである。

このように、ERF のビンガム特性、すなわち粘性負荷  $\eta_E(E) = \infty$  の特性を位置  $x = x_r$  で実行すれば、剛性の高い位置決めが可能である。式 (15) に示したような高応答な力学的平衡状態の生成は、従来の能動的線形制御素子では実現不可能であり、ERF に代表される受動素子を用いることで初めて可能となる。

## 8. ERF を利用した粘性制御系の順応性

### 8.1 粘性制御系の構成

Fig. 7 に示した「柔らかさ」を ERF を利用して実現する機構として、Fig. 9 に示す ERF 拮抗式トルク変換装置を開発した。アクチュエータ部の構造を Fig. 10 に示す。

本装置は、電動モータによって正逆転方向に同速度で回転する上下 2 つの外側駆動円筒と自由に回転可能な内側従動円筒から構成され、両者の間に ERF を充填したものである。各円筒には同面積の電極面が設置してあり、これより充填された ERF に電界を印加することで、任意方向への回転とトルク出力が可能である。また、従動円筒上部にはアームを備えており、特に、人間と接触しつつ、目標角度への位置決めを行うことがで

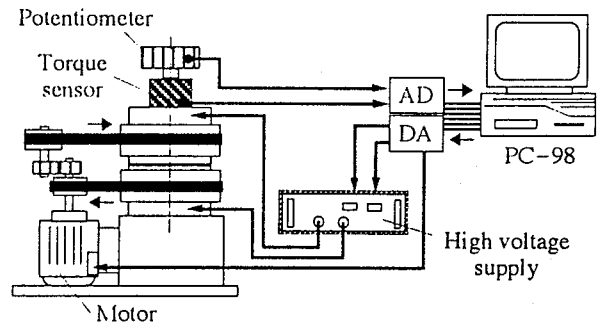


Fig. 11 Configuration of ERF actuator experimental system.  
ERF アクチュエータ実験システムの構成

Table 1 Specifications of ERF actuator.  
ERF アクチュエータの主な仕様

Output cylinder	
Outer diameter	108 mm
Height	138 mm
Moment of inertia	0.002 kgm <sup>2</sup>
Electrode surface area	0.022 mm <sup>2</sup> (×2)
Electrodes gap	1.0 mm
Drum	
Inner diameter	110 mm
Height	85 mm
Moment of inertia	0.155 kgm <sup>2</sup>
High voltage amplifier	
Voltage output	-5 ~ 5 kV
Rated current	±2 mA
Output response	30 V/μs
Driving motor	
Power	200 W
Rated torque	1.57 Nm
Rotational speed	120 ~ 1200 rpm

きる。このときの回転角とトルク出力は、上部に設置されたポテンシオメータとひずみゲージ式トルクセンサにより検出できる。Fig. 11 に、ERF アクチュエータ実験システムの構成を示す。本実験システムでは、ポテンシオメータの電圧出力を AD ボードを介してサンプリングタイム 1 [ms] でコンピュータに入力し、必要な演算処理を行った後、DA ボードを介して高速高圧アンプを制御することで、Fig. 7 の特性を実現する。本実験システムの主な仕様を表 1 に示す。

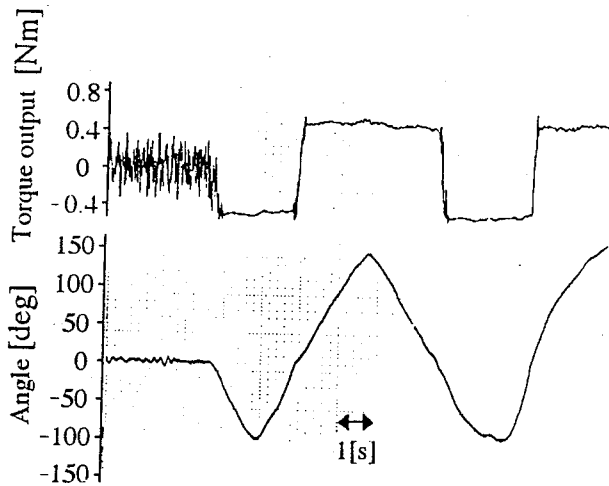


Fig. 12 Experimental results of compliant positioning method using ERF actuator.  
順応位置決め方式の実験結果

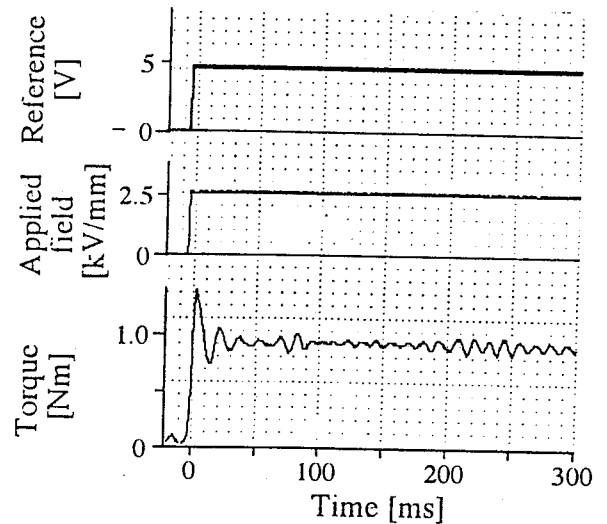


Fig. 14 Step response of torque output.  
トルク出力のステップ応答

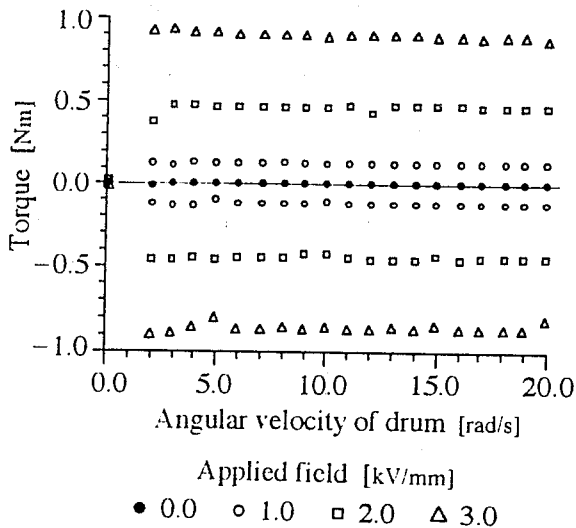


Fig. 13 Relationship between angular velocity of drums and torque output (parameter; applied field).  
駆動円筒の角速度とトルク出力の関係 (パラメータ: 印加電界)

## 8.2 順応位置決め方式の実現と評価

Fig. 7 の特性は、従動円筒の上下電極に印加する電界を偏差  $e(= \theta - \theta_r)$  に対して切り替えることで実現できる。すなわち、次式に従って、上側の電界  $E_1$  と下側の電界  $E_2$  を制御すればよい。

$$\begin{aligned} e < 0 & : E_1 = E_C, \quad E_2 = 0 \\ e = 0 & : E_1 = E_C, \quad E_2 = E_C \\ e > 0 & : E_1 = 0, \quad E_2 = E_C \end{aligned} \quad (17)$$

ここに  $E_C$  は、ある一定の大きさの電界である。

式 (17) の制御則に基づき、印加電界 (1.0 [kV/mm]) の切り替えによる順応位置決めを行った。実験は、アームから人間が外力を加えている状態で、目標角度  $\theta_r = 0[\text{deg}]$  に従動円筒を維持するものである。そのときの従動円筒の角度  $\theta$ 、および、トルク出力 (干渉力に相当する) を Fig. 12 に示す。なお、ここでの駆動円筒の回転速度は 6.3 [rad/s] である。目標からの誤差によらず、干渉力が一定値以下に保たれており、順応位置決めが実現されているのが分かる。特に、 $\theta$  が  $\theta_r$  の近傍にあるときは、高速にトルク出力が切り替えられ、 $\theta_r$  を高剛性に維持しようとしているのが分かる。

従動円筒を機械的に固定し、上側電極と下側電極のどちらか一方に電界を印加する方法で、ER アクチュエータのトルク出力特性を調べた。印加電界をパラメータとしたときの駆動回転数に対するトルク出力を Fig. 13 に示す。印加する電界によって、回転数にほとんど影響されず、トルク出力を任意に調節できることが分かる。なお、Fig. 13 より、駆動円筒の回転速度  $\omega$  [rad/s] が 2.01 ~ 19.7 [rad/s] の範囲において、本装置の印加電界  $E$  [kV/mm] に対するトルク出力  $T$  [N·m] は、次式の実験式で近似される。

$$T = 75.3 \times 10^{-3} E^2 + 0.2 \times 10^{-3} \omega \quad (18)$$

トルク出力の応答性の評価として、ステップ状電界印加 (2.5 [kV/mm]) に対する高速高圧アンプ出力とトルク出力を Fig. 14 に示す。高圧電源の遅れ時間約 1 [ms] を含めても、トルクの立ち上がり時間 (制定値の 90% に達するまでの時間) が 6 [ms] であり、非常に高応答であることが分かった。このため、Fig. 12 示した高速なトルクの切り替えが実現される。なお、トル



クが多少振動的であるのは、回転に伴う軸ぶれ、または、カップリングなどの影響によるものと推察される。

このように、ERF の有する特異な可変粘性特性を利用すれば、高剛性な位置決めを達成しつつ安全な条件で人間との接触を可能とする順応的動作が、角度偏差の正負に応じて印加電界を切り替えるという単純な制御方法で実現できる。

## 9. 結 言

機械と機械とが互いに干渉しあう作業の形態は、一方が剛性高く位置を決定し、もう一方がそれに順応するという関係を基本とする。これまで、人間とロボットとが協調作業を行う場合には、強制的に人間がロボットに順応しなければならなかった。しかし、必ずしも人間がロボットに順応できない場合もあり、機械との間で挟まれて大きな事故が起きている。

これに対し、近年、人間と共通の環境で作業できるロボットの必要性も叫ばれてきており、さらに制御技術も飛躍的に向上したことから、人間に対して柔らかく接することのできるロボットが盛んに研究されている。柔らかい動きを達成するための制御理論も体系化が進み、コンプライアンス制御やインピーダンス制御といった高等な制御手法も比較的安価に導入できつつある。

しかし、いまだに安全が感覚的に扱われている。例えば、ロボットが安全であるためには「柔らかさ」が必要だと言われるが、柔らかいという心理的な判断が安全とどのような関係があるかも明らかにされないままにある。そこで、本研究では、「柔らかさ」について検討を加え、事故防止の観点から、安全な力の限界を越えないよう一定の力に抑えられる機能を「柔らかさ」と解することができる結論した。ただしこの場合、単に力を一定とする制御でなく、あくまでも Fig. 7 に示したように、位置決めの特性が維持されていなければならない。

さらに、本研究では、安全限界の力を制御する安全なアクチュエータとして、ERF アクチュエータを提案した。これは、硬さ・柔らかさが電界によって制御できる特徴を有し、人間と一緒に作業を行うときは柔らかく、また、単独で仕事をするときはパワフルに硬い動作で作業ができる。特に、本研究では、このような機能的な動作を非常に簡単な制御操作で達成できる可能性を示した。

ここで述べた「柔らかさ」は、今後、人間との共存を

指向するロボットには必須の機能となると思われ、本研究結果が安全の発展に少しでも資することができれば幸いである。

## 参 考 文 献

- 1) M.T. Mason, Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, SMC-11-6, (1981) 418-432.
- 2) 武内 他, ゴム人工筋を用いた1リンクのコンプライアンス制御, ロボティックスメカトロニクス講演会 '93 講演論文集, No.930-40, (1993), 62-65.
- 3) 金子・横井・谷江, シリアルリンクアームのコンプライアンス制御 (第1報), 機論 (C編), 54-503, (1988), 1510-1515.
- 4) 横井・前川・谷江, 冗長ロボットアームのためのコンプライアンス制御の一手法, 日本ロボット学会誌, 11-1, (1993), 121-130.
- 5) N. Hogan, Impedance Control -An Approach to Manipulation (Part I, II, III), Trans. the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 107-1, (1985), 1-22.
- 6) 伊藤・辻・杉野, 回転作業における生体運動系のインピーダンス調節, SICE 論文集, 26-4, (1990), 443-450.
- 7) 杉本, イオン交換樹脂分散系によるウインズロ効果, 機論, 43-367, (1977), 1075-1085.
- 8) 小田・井上, 電気粘性流体の開発と動向, 静電気学会誌, 18-6, (1994), 485-490.
- 9) 森下, 電気粘性流体のスクイーズフィルムダンパへの適用, 応用力学連合講演会予稿集, 41, (1992), 73-74.
- 10) 田村 他, 電気粘性流体を用いた回転型可変減衰装置に関する研究, 機講論, 940-26, Pt 1, (1994), 61-64.
- 11) 佐野 他, 粒子系電気粘性流体を用いたマイクロアクチュエータの開発, 機講論, 940-26, (1994).
- 12) 石野 他, 炭素質粒子を分散層とする非水系 ERF, 第41回レオロジー討論会講演予稿集, (1993), 112-115.
- 13) 斎藤・杉本, 安全ロボットの基礎的要件と構成に関する研究, 機講論, 95-17-A, (1995), 287-290.
- 14) 羅・伊藤, コンプライアントマニピュレーションのためのロボットの制御設計, SICE 論文集, 26-4, (1990), 427-434.
- 15) 杉本・蓬原, 安全の原理, 機論 (C編), 56-536, (1990), 2061-2609.

(平成9年1月20日受理)