

機能性流体を用いた順応型アクチュエータの
制御モデルとサーボ機構の構成

杉本 旭*, 齋藤 剛**

Modeling and Servo System of the Compliant Actuator
Controlled by Field-Sensitive Fluid

by Noboru SUGIMOTO* and Tsuyoshi SAITO**

Abstract: In order to develop such a practical human-symbiotic robot that works in collaboration with human-workers for heavy work, physically helps the aged and the disabled person, and gives a patient rehabilitation training, the risk reduction concerning with the excessive force, which are applied to a part of human body by the contact of the robot with its users, is the most important problem. In accordance with the procedure of ISO/CD12100, positively utilizing of inherently safe actuators capable of limiting their force output and moving speed individually should be considered firstly as a safety measure against this problem. The utilization of the safe actuators with such limiting function, however, has been hard to introduce practically due to their difficulty with motion control and their limited choices of types.

In this report, as a generalized technique to add such limiting function to any types of conventional actuators, it is examined to combine a functional clutch mechanism by means of a field-sensitive fluid, which responds to an applied electric or magnetic field with a change in its yield stress, with an actuator. These materials are commonly referred to electro-rheological (ER) or magneto-rheological (MR) fluids. This report shows results of experimental comparison of control performance of antagonistic rotary actuators using ER and MR fluids, which are so constructed that the torque of two servomotors rotating in the different directions opposite to each other is transmitted to a freely rotatable output cylinder through the clutch mechanisms.

Furthermore, as a control method for the safe actuators, such a new positioning method that makes an active use of their limiting function, is proposed. This method stably achieves an extremely high precision positioning without any complicated algorithms under such a condition that the maximum torque and the rotational speed of the actuator is limited to secure the safe contact between human and the robot. From experimental results, it is shown that the proposed method can be applied to both of actuators using ER and MR fluids. Consequently, it is proved that ER and MR fluids are effective in introducing the limiting function to human-symbiotic robots.

Keywords; Safety control, Mechatronics and robotics, Actuator, Electro-rheological fluid, Magneto-rheological fluid, Inherently safe design, Compliance control, High-precision positioning

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

** 東京工科大学工学部機械制御工学科 Tokyo University of Technology, Department of Mechatronics

1. 緒 言

近年、高齢者や身障者を物理的に支援する医療福祉ロボット¹⁾や建設現場で労働者の作業負担を軽減するための建築用ロボット²⁾など、人と共同して作業を遂行する共存型ロボット³⁾が強く期待されている。しかし、人体との接触における安全が保証できないため、実用化の可能な分野が極めて限定されているのが現状である。共存型ロボットで想定される典型的な危険源は、機械部位との衝突や接触によって人体に及ぼされる作用の発生源、すなわちアクチュエータである^{3,4,5)}。ISO/CD 12100 (機械類の安全性—基本概念, 設計のための一般原則)⁶⁾に示されているリスク低減手順に従えば、これに対する安全方策として、まず最初にロボットの本質安全化⁷⁾、すなわち、設計の段階でこの危険源そのものを除去することを考えなければならない。

一つの方法として、人との接触によって生じる力をアクチュエータの能力によって本質的に抑えることが有効である。ただし、ロボットとの接触によって人体に及ぼされる作用は、その特性の違いから、接触直後に生じる衝撃力と準静的な接触状態で生じる圧力の2つがある。圧力はアクチュエータの力出力によって決定され、また、衝撃力は主に接触直前の相対速度によって決まる^{8,9)}。したがって、上述の目的に合うアクチュエータには、力出力と動作速度が各々の安全範囲内に制限できることが要求される。さらに、ロボットに想定される複雑な作業においては、許容される力の上限値が接触部位や作業環境の違いに応じて変化することが予想される¹⁰⁾。そのため、アクチュエータには力と速度の上限値が容易に変更できることも要求される。

すでに筆者らは、力と速度を独立に制限するアクチュエータの実現方法として、電界によって流体のレオロジ特性(粘弾性特性)が変化する電気粘性流体(Electrorheological Fluid: 以降、ER流体と呼ぶ。)の利用を検討してきた^{11,12)}。ER流体はせん断応力がずり速度とは無関係に変化する特性を有しており、これを媒体として動力を伝達するクラッチ機構を組み合わせれば、前述の要求を満すアクチュエータが実現できる。ここでは、その具体例として、ER流体を用いた拮抗回転型アクチュエータ(以降、ERAAと呼ぶ。)を示す¹¹⁾。

ところで、ERAAは非線形制御要素であり、一般的な制御系設計法を適用するのが困難である。そこで、本報では、ERAAの力と速度を独立に制限できる機能を積極的に利用することにより、比較的単純な操作で高精度な位置決めを実現する新しい制御手法を提案する。本手法によれば、サブマイクロメートルの精度でアクチュエータを位置決めしつつ、仮に制御動作中に人と接触

しても、生じる力を許容限界内に抑えることが可能である。本手法の制御原理を理論と実験の両面から示す。

一方、ER流体と酷似した特性をもつ新しい制御デバイスとして、磁場の影響でせん断応力が変化する磁気粘性流体(Magneto-rheological Fluid: 以降、MR流体と呼ぶ。)が振動抑制技術などに応用されてきている^{13,14)}。MR流体は、磁場印加時に変化するせん断応力がER流体に対して数十倍も大きいことや低電圧で十分に利用できることなど、実用面でER流体にない特長を有しており¹⁵⁾、より広い応用が期待されている。そこで、本報では、ERAAと同様の構造のMR流体を用いた拮抗回転型アクチュエータ(以降、MRAAと呼ぶ。)の動作特性を調べ、力と速度を独立に制限する機能をアクチュエータに付加する方法としてMR流体の利用を検討する。さらに、提案する高精度位置決め手法をMRAAに適用し、実現される性能をERAAの場合と比較する。

2. ER流体の特性

ER流体は、直径が数 μm 程度の誘電体粒子をシリコンオイルなどの絶縁性の高い油に分散させた懸濁液である。Fig. 1に示すように、電界を印加すると、液体中に分散された粒子が互いに連結し、電極間にクラスタと呼ばれる架橋構造を形成する。このクラスタが流れに対する抵抗となり、電界によって降伏値が変化するビンガム流体として振舞う。せん断応力を τ 、せん断ひずみを γ 、電界に依存しない粘性係数を η_{ER} 、クラスタの剛性率を G_{ER} とすると、ER流体の流動特性は次式で近似できる。

$$\tau = \begin{cases} \tau_{ER} + \eta_{ER} \cdot \dot{\gamma} & (\tau > \tau_{ER}) \\ G_{ER} \cdot \gamma & (\tau \leq \tau_{ER}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 τ_{ER} は電界のみに依存して変化する降伏値で、その大きさは電界 E の関数として与えられる。

実験で用いた、シリコンオイルとフッ素性オイルの混合液中に平均粒子径 $9\mu\text{m}$ のスルホン化重合体を体積分率36%で分散させたER流体(日本触媒社製¹⁶⁾)の流動曲線をFig. 2に示す。電場強度に応じて降伏値

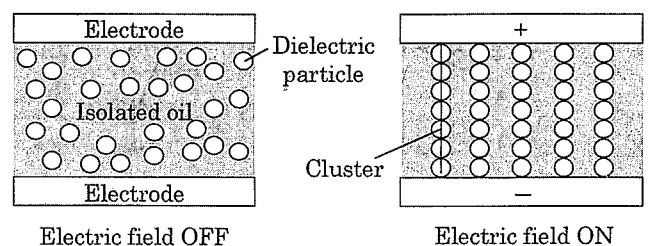


Fig. 1 Mechanism of ER effect.
ER効果のメカニズム

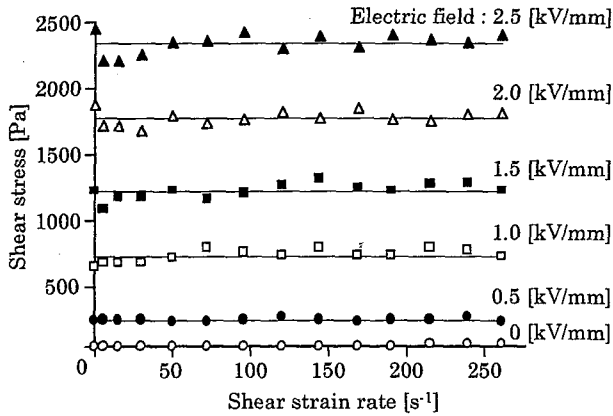


Fig. 2 Flow curves of ER fluid.
ER 流体の流動曲線

が変化するビンガム流体として振舞っており、特に、一般的な流体では粘性力が得られない極微小のずり速度においても、電界に応じたせん断応力が示されている。また、Fig. 2 のずり速度の範囲では粘性係数 η_{ER} の影響が無視できるほど小さく、ずり速度に依らずにせん断応力がほぼ一定となることが分かる。このように、ER 流体の示す可変ビンガム流動特性は、可変な粘性抵抗というより、むしろ制御可能な固体摩擦と見なせるものである。

3. ER アクチュエータの構造と動作特性

ERAA の構造を Fig. 3 に示す。互いに逆方向に同速度で回転する正負の駆動円筒の内側に、自由に回転可能な従動円筒を同軸上に配置したものである。駆動円筒は、各々、タイミングベルトを介してモータによって駆動される。また、駆動円筒の内側と従動円筒の外側が電極を構成しており、これらの間に ER 流体が充填されている。したがって、印加電界を制御することにより、ER 流体を介して伝達されるトルクを変化させて従動円筒（出力軸）の運動を制御できる。モータには保持用のノーマルクローズ型ブレーキが内蔵されており、モータを停止させると駆動円筒は機械的に固定される。

電界の変化に対するトルク伝達の動特性、及び粘性係数 η_{ER} の影響を無視すると、ERAA の運動方程式は次式で表される。

$$J\ddot{\theta} = T_{ER}(E_P) \frac{\omega - \dot{\theta}}{|\omega - \dot{\theta}|} - T_{ER}(E_N) \frac{\omega + \dot{\theta}}{|\omega + \dot{\theta}|} + T_d \quad (2)$$

ここで、 E_P 、 E_N は、各々、正側又は負側電極の印加電界、 $T_{ER}(E)$ は降伏値 τ_{ER} に比例した伝達トルク、 ω は駆動円筒の回転速度、 θ は従動円筒の角度、 J は慣性モーメント、 T_d は外乱（外部トルク）であり、また、

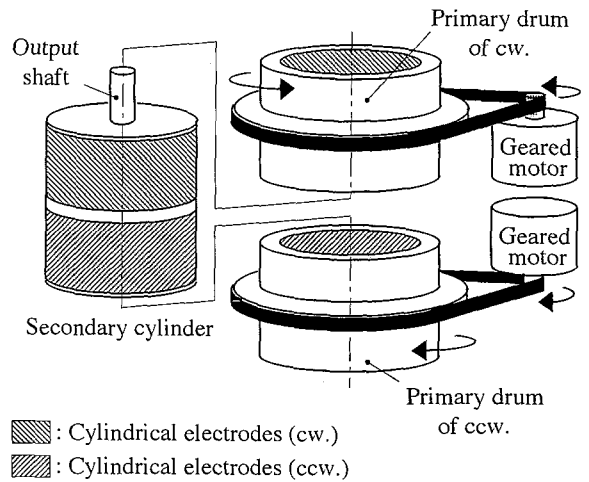


Fig. 3 Schematic construction of ERAA.
ERAA の構造

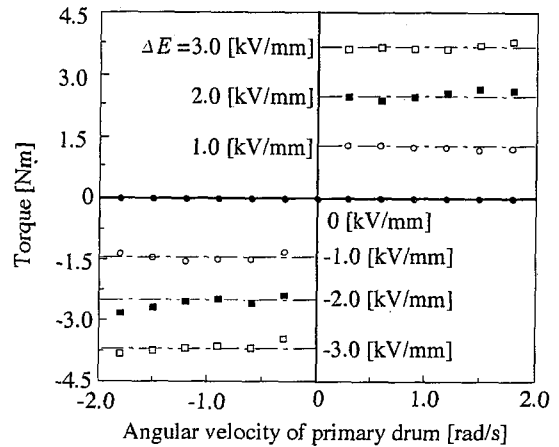


Fig. 4 The mean steady-state torque versus angular velocity of primary drum of ERAA.
駆動円筒角速度に対する定常トルクの平均値

$(\omega - \dot{\theta})/|\omega - \dot{\theta}|$ 、 $(\omega + \dot{\theta})/|\omega + \dot{\theta}|$ は、各々、正側又は負側駆動円筒から ER 流体を介して伝達されるトルクの方角を表す。式 (2) より、まず、伝達トルク $T_{ER}(E)$ の大きさが電界 E のみによって定まることが分かる。このため、電界 E を制限すれば、準静的な接触状態において人体に過大な力（トルク）を及ぼさないことが事前に保証できる。次に、従動円筒が駆動円筒より速く回転すると伝達トルクが制動側に作用するため、外乱 T_d が T_{ER} よりも小さい限り、電界 E によらずに従動円筒の角速度 $\dot{\theta}$ が $\pm\omega$ の範囲に制限されることが分かる。このため、モータの回転数 ω を制限しておけば、人体への接近速度の条件が満足できる。ただし、最も重要なことは、この 2 つの制限機能が互いに干渉せず、その上限値を独立に定められることである。これは、ER 流体の可変ビンガム流動特性によるものである。

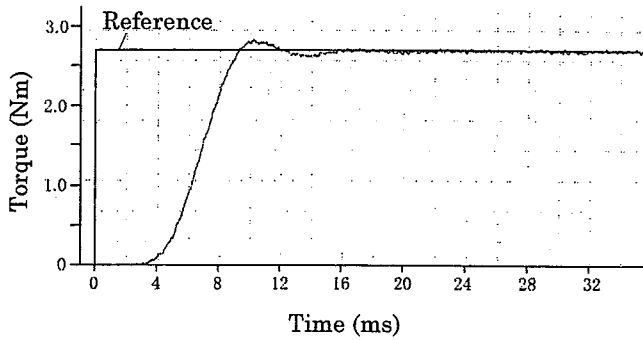


Fig. 5 Step response of torque control.
トルク制御のステップ応答

出力軸を機械的に固定し、正負どちらか一方の電極に一定電界を印加する方法で、静的なトルク制御特性を測定した。その結果を Fig. 4 に示す。ただし、 ΔE は正負電極の電界の差を表す。前述したように、駆動円筒の角速度に影響されず、電界によりトルクを規定できることが分かる。また、モータが停止状態を含む極低速回転の状態にあっても、このときのトルク（保持トルク）を制限できる。

一方、駆動円筒の角速度を一定 (1.0 rad/s) に保った状態で電界をステップ状に印加し、トルク制御の応答性を調べた。実験結果の一例として、電界 2.0 kV/mm を印加したときの結果を Fig. 5 に示す。ステップ入力後約 10 ms でトルクが定常値に達する優れた応答性が実現されており、ER 流体の利用がアクチュエータの危険源除去ばかりでなく、機能性向上にも有効であることが分かる。

4. 高精度位置決め手法の原理と性能

提案する高精度位置決め手法（以降、本手法）は、目標角度 θ_r に対する偏差 $e (= \theta_r - \theta)$ が正のときは予め設定された電界 E_C を正側の ER クラッチ機構に印加し、偏差が負のときは負側の ER クラッチ機構に印加するという ON/OFF 操作を、駆動円筒（モータ）の減速過程で繰り返し行なうものである。Fig. 6 は、以下の仮定の下で本手法を実行したときの電界 E_P, E_N 、伝達トルク $T_{ER}(E)$ 、駆動円筒の角速度 ω 、従動円筒の角速度 $\dot{\theta}$ 、及び角度偏差 e を模式的に表したものである。

仮定① 角速度 ω は一定の割合で減少する、

仮定② 偏差 e の正負の判断は正確に行われる、

仮定③ ON/OFF 操作の遅れ、トルク立上りの遅れは無視できる、

仮定④ 外乱（外部トルク）は無視できる。

本手法の動作を説明する。まず目標角度 θ_r が入力されると、モータが起動され、設定した角速度 ω_C で駆

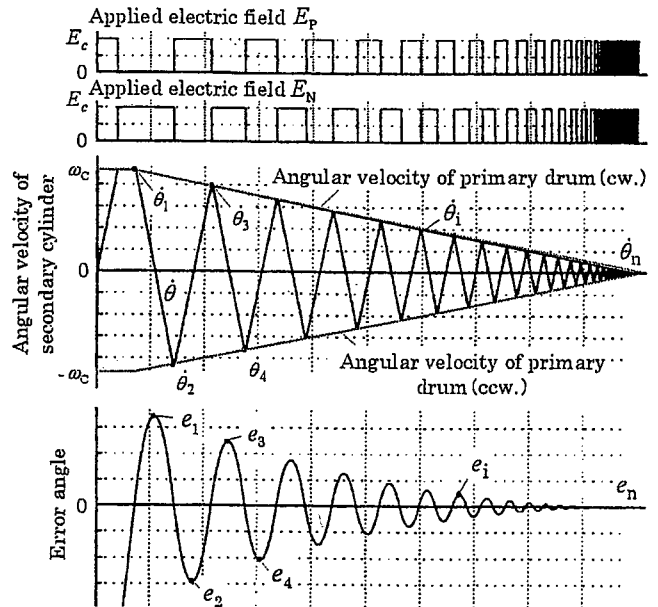


Fig. 6 Typical motion diagrams under the proposed positioning method.
提案する位置決め手法の典型的な動作

動円筒が回転する。これと同時に ON/OFF 操作によってどちらか一方の ER クラッチ (Fig. 6 では正側クラッチ) に電界 E_C を印加し、従動円筒にトルク $T_{ER}(E_C)$ を伝達する（後述の操作①）。ただし、ERAA のもつ速度制限機能により、このときの従動円筒の角速度 $\dot{\theta}$ は角速度 ω_C を決して超えない。次に、従動円筒が目標に到達すると駆動円筒の減速を開始すると同時に、電界を印加する電極を切り替える（後述の操作②）。目標を通過した従動円筒はトルク $-T_{ER}(E_C)$ によって減速され、Fig. 6 に示す e_1 まで行き過ぎて反転する（後述の操作③）。駆動円筒の減速（停止）が従動円筒の反転に比べ十分遅い動作であれば、ON/OFF 操作の繰り返しによって、駆動円筒の減速過程で従動円筒は目標 θ_r を中心に振動する。

改めて、本手法は、駆動円筒が停止するまでの間に次の 3 つの修正操作を繰り返し行っていることと等価である。

操作①：目標の方向に従動円筒を加速する、

操作②：目標通過時にトルクを切り替える、

操作③：従動円筒の角速度が零となる。

この操作をさらに反対側から行って元の位相角に戻るまでを単位サイクルと定義すれば、各サイクルでの偏差 e_i は、操作①の過程で従動円筒に蓄積された運動エネルギーを操作③で熱消散するのに要する制動距離（角度）である。基本的には負方向の動作についても同様の議論が成り立つので簡単のため正方向の偏差だけに注目すると、各サイクルでの偏差 e_i は次式で与えられる。

$$e_i = \frac{J\dot{\theta}_i^2}{2T_{ER}(E_C)} \quad (3)$$

ここで、 $\dot{\theta}_i$ は目標に到達したときの従動円筒の角速度である。ERAA の機能②のために $\dot{\theta}_i \leq \omega$ の関係が成り立つので、

$$e_i \leq \frac{J\omega^2}{2T_{ER}(E_C)} \quad (4)$$

したがって、駆動円筒の減速過程においては各サイクルの偏差 e_i が減少する角速度 ω によって逐一定まり、前のサイクルでの偏差 e_{i-1} も必ず小さくなる。操作サイクルの実行回数が増加する（すなわち時間が経過する）に伴い、従動円筒の運動エネルギー量は次式のように減少する。

$$\begin{aligned} \frac{J}{2}\Omega_{i+2}^2 &= \kappa_{i+1} \frac{J}{2}\Omega_{i+1}^2 \\ &= \kappa_{i+1} \cdot \kappa_i \frac{J}{2}\Omega_i^2 \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n-2) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 Ω は従動円筒が目標に到達した瞬間の駆動円筒の角速度、 κ_i は各サイクル毎の運動エネルギー量の減少の程度を示す変数であり、 $\omega = 0$ となるまでは明らかに $1 > \kappa_i > 0$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n-1$) である。したがって、操作サイクルを実行するに従って各サイクルの偏差 e_i は次式のように減少する（ただし、総ての κ_i を等しく κ とおいた）。

$$\begin{aligned} e_i &= \frac{J\Omega_i^2}{2T_{ER}(E_C)} = \frac{J\kappa\Omega_{i-1}^2}{2T_{ER}(E_C)} < e_{i-1} \\ &= \frac{J\Omega_{i-1}^2}{2T_{ER}(E_C)} \end{aligned} \quad (6)$$

よって、初期偏差を e_0 とおくと、最終的に駆動円筒が停止したときの偏差 e_n が次式で与えられる。

$$\begin{aligned} e_n &\leq \frac{J\Omega_{n-1}^2}{2T_{ER}(E_C)} = \frac{J\kappa\Omega_{n-2}^2}{2T_{ER}(E_C)} = \frac{J\kappa^2\Omega_{n-3}^2}{2T_{ER}(E_C)} \\ &= \dots = \frac{J\kappa^{n-1}\Omega_0^2}{2T_{ER}(E_C)} \leq \kappa^{n-1} \cdot e_0 \end{aligned} \quad (7)$$

駆動円筒角速度 ω は制御開始時には有限な大きさであるから、理論的には $\omega \rightarrow 0$ の過程で $n \rightarrow \infty$ となるので、初期偏差や慣性モーメントの変化に関係なく、偏差 e_n が限りなく 0 に近づく。これは、角速度 ω がどんなに小さくとも、ERAA が電界 E_C に応じたトルクを出力でき、偏差の修正が変わりなく実行されるためである。 κ_i が一定でないことを考慮すると、偏差 e_n の大きさは改めて次式で表される。

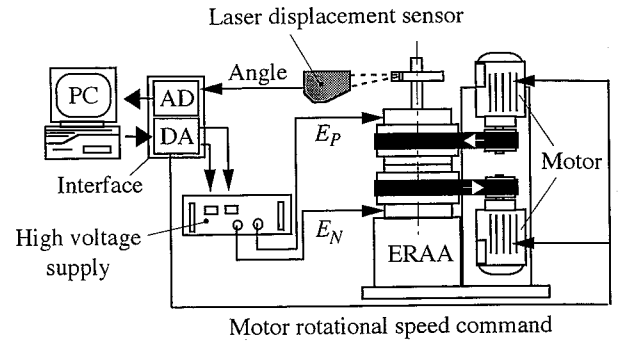


Fig. 7 Configuration of ERAA experimental system.
ERAA 実験システムの構成

$$\begin{aligned} e_n < e_{n-1} &= \prod_{i=0}^{n-1} \kappa_i \frac{J\Omega_0^2}{2T_{ER}(E_C)} \\ &= \prod_{i=0}^{n-1} \kappa_i \cdot e_0 \end{aligned} \quad (8)$$

$n \rightarrow \infty$ が満たされれば、高精度な位置決めの実現が期待できることが分かる。さらに、最終的にモータが停止したとき、駆動円筒はモータに内蔵されたブレーキによって機械的に固定されるが、ON/OFF 操作は継続しているので、固化した ER 流体によって従動円筒を停止位置に保持できる。

以上のことを検証するため、本手法を ERAA に適用し実験を行った。実験システムの構成を Fig. 7 に示す。なお、ここでは微小角度の計測を、目標角度を基点に軸中心より 55 mm 離れた突起部の直線変位をレーザ式変位計で検出し、これを角度偏差に換算する方法で行っている。

駆動円筒を一定の減速度でゆっくりと減速させながら ON/OFF 操作を実行したときの実験結果を Fig. 8 に示す。駆動円筒が減速するに従って各サイクルの偏差が逐次減少しており、式 (7) が成立していることが分かる。

駆動円筒（モータ）をより早く停止させれば制御時間を短縮できる。これには、駆動円筒の減速過程におけるモータの惰性回転を利用するのが合理的である。モータの惰性回転中で本手法を実行した例を Fig. 9 に示す。ただし、ここでは直線変位に換算して $\pm 5 \mu\text{m}$ （角度に換算すると $\pm 9.0 \times 10^{-6}$ rad）のステップ入力を連続的に与えている。制定時間 0.3s 以下で誤差 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以下という優れた高精度位置決めを実現できた。なお、この誤差は、角度検出に用いたレーザ式変位計の有効分解能によるものであり、本手法の実行上の限界を示している。

一方、圧力の条件を満たすように電界 E_C を、また衝撃力（接近速度）の条件を満たすように角速度 ω_C

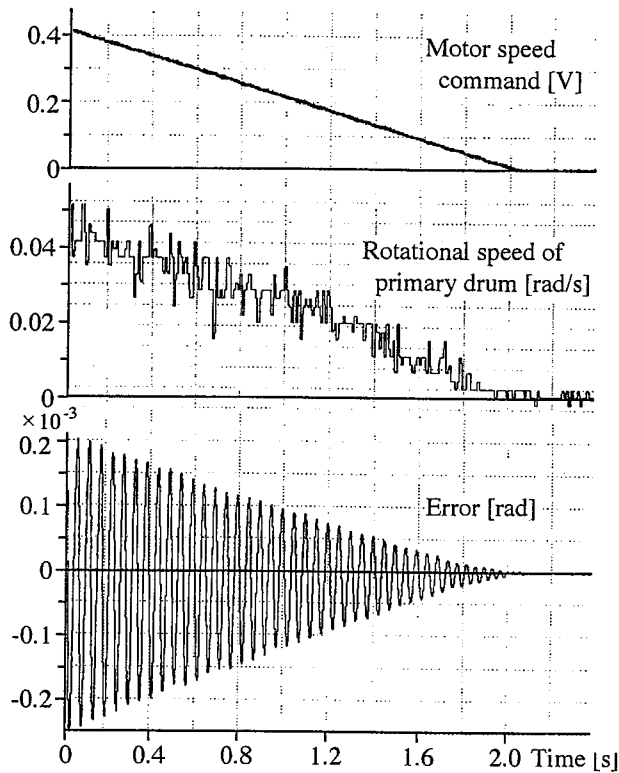


Fig. 8 Experimental results in case that primary drums are decelerated by slow degrees.
駆動円筒を徐々に減速した場合の実験結果

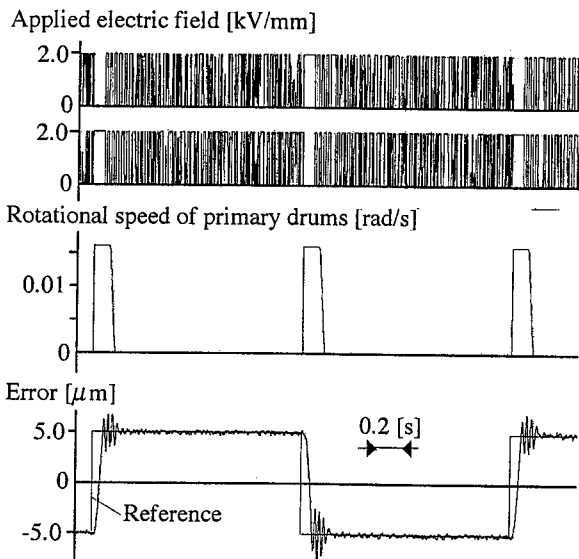


Fig. 9 Step response of ERAA under proposed positioning method.
本手法での ERAA のステップ応答

を定めれば、仮に本手法を実行中に人と接触しても、人体に及ぶ力が許容限界値を越えないことを保証できる。このような動作の例として、以下の作業条件を想定し、ERAA の出力軸にアームを取付け、これを人が保持した状態で位置決めを行なった。

条件① 接触による力が許容値以内である場合には高精度位置決めを行い、力が許容値以内である

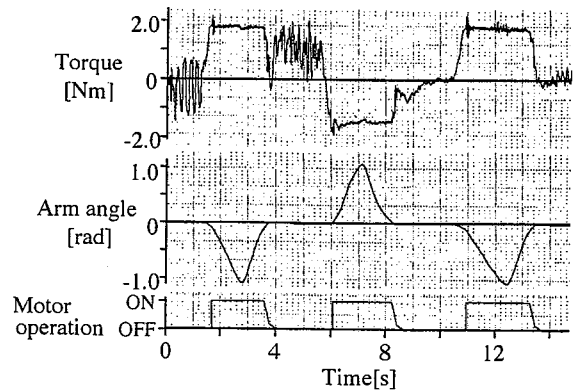


Fig. 10 Experimental results of working in collaboration with person.
人との協調動作実験結果

限り目標位置を保持する、

条件② 力が過大となる恐れのある場合には力を許容値（ここでは 2.0Nm と設定した）以内とするよう受動的に動作する。

目標を 0 rad に設定した位置決め動作において、ERAA が人体に及ぼすトルクとそのときの角度偏差の関係を Fig. 10 に示す。トルクが許容値以下の場合には高精度な位置決めが達成され、さらに、トルクが許容範囲内にある限り目標を保持し続けた。ただし、このときにモータへの電力供給は行われておらず、あくまでもアームは受動的に保持されている。そのため、トルクが許容限界付近に達したときにはアームが移動し、トルクの増大を回避できる。外力が小さくなれば改めて位置決め動作が再開されており、想定した作業条件を満足する動作が実現できた。

5. MR 流体の特性

MR 流体は、数 μm 径の磁性微粒子をシリコンオイルなどの油に分散させた懸濁液であり、外部より磁界を印加すると粒子がクラスタを形成し、ER 流体と同様にビンガム流体の降伏値が変化する特性をもつ。磁界に応じて変化する降伏値を τ_{MR} 、磁場に影響されない粘性係数を η_{MR} 、クラスタの剛性率を G_{MR} とすると、MR 流体の流動特性は次式で表される。

$$\tau = \begin{cases} \tau_{\text{MR}} + \eta_{\text{MR}} \cdot \dot{\gamma} & (\tau > \tau_{\text{MR}}) \\ G_{\text{MR}} \cdot \gamma & (\tau \leq \tau_{\text{MR}}) \end{cases} \quad (9)$$

シリコンオイルに球状鉄粉を重量分率 81% で懸濁した MR 流体 (Lord 社製, MRF-132LD¹³) の流動曲線を Fig. 11 に示す。ずり速度に依存しない特性で磁場強度に応じたほぼ一定のせん断応力が示されており、ER 流体と同様の可変ビンガム流動特性をもつことが分かる。しかし、MR 流体の降伏値の変化は ER 流体の場合

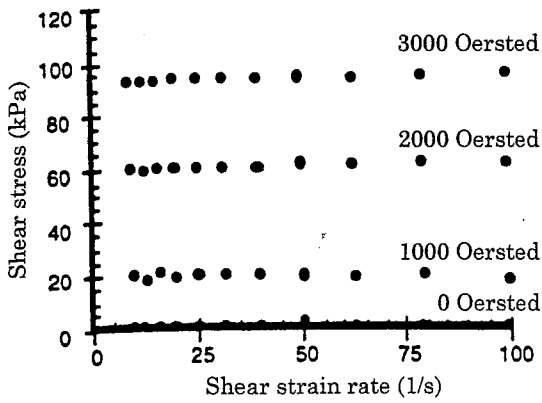


Fig. 11 Flow curves of MR fluid.
MR 流体の流動曲線

に比べて約 50 倍ほど大きく、MR 流体を利用すれば小型でより大きな力を伝達できる装置を構成できる可能性がある。現実にも、ER 流体の利用においては降伏値の変化幅の小さいことが問題となる場面も多く^{13,17)}、このことは MR 流体への関心を高める最も大きな理由となっている。

6. MR アクチュエータの構造と動作特性

ERAA と同様の構造を採用し、Fig. 12 に示す MR 流体を介して動力を伝達するクラッチ (Lord 社製 MRB-2107¹³⁾、以降 MR クラッチ) を 2 つ用いて Fig. 13 に示す MRAA を試作した。

MR クラッチは、入力軸に直結されたロータとそれを覆うハウジングで構成されており、両者の間に MR 流体を充填したものである。コイルを励磁すると磁界が発生してクラスタが形成され、トルクが伝達される。励磁電流の大きさを変化させることで伝達トルクをアナログ的に制御できる。

MRAA では、各々の MR クラッチのハウジングを機械的に接続し一体の従動円筒 (出力円筒及びアーム) とし、各々の MR クラッチの入力軸を正側/負側駆動用モータに接続している。モータは互いに逆方向に同速度で回転し、モータ停止時には MR クラッチの入力軸は機械的に固定される。

ERAA と同じ方法で MRAA の静的なトルク制御特性を測定した結果を Fig. 14 に示す。モータの回転速度と関係なく励磁電流に応じた一定のトルク出力が得られており、ERAA と同様に MRAA がトルクと回転速度を独立に制限できることが分かる。ただし、最大伝達トルクは約 6.0 Nm であり、ERAA の約 2 倍であった。一方、電流アンプにトルク指令値をステップ状に入力したときの励磁電流とトルクの応答を Fig. 15 に示す。コイル負荷に起因する励磁電流の応答遅れが影響し、トルクが定常値に達するまでに約 60 ms を要し、

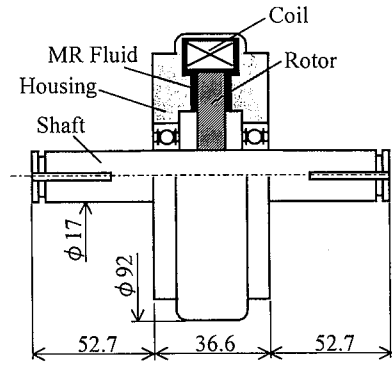


Fig. 12 Clutch mechanism by means of MR Fluid.
MR 流体を用いたクラッチ機構

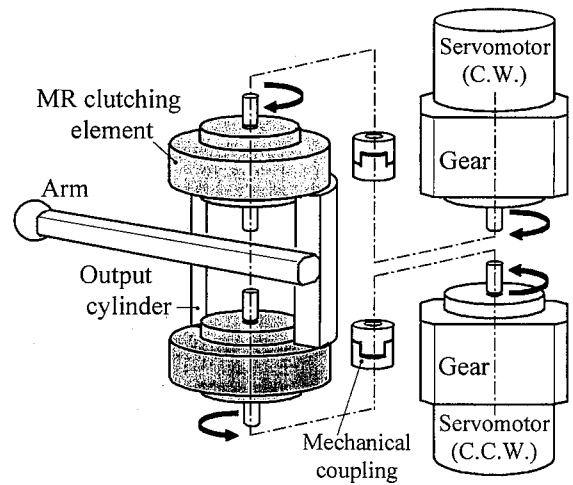


Fig. 13 Schematic construction of MRAA.
MRAA の構造

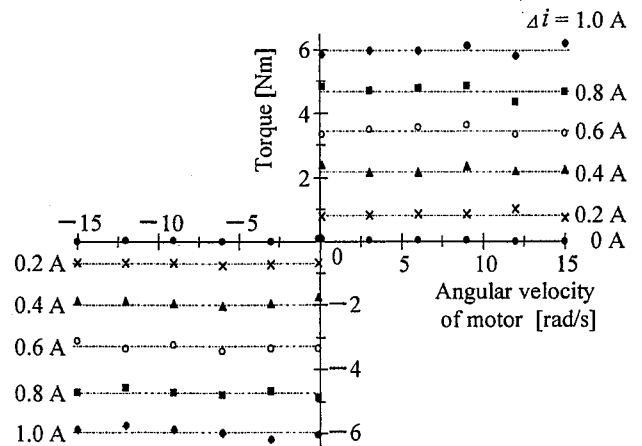


Fig. 14 The mean steady-state torque versus angular velocity of motor.
モータの角速度に対する定常トルクの平均値

また、トルク立ち下げ時には残留磁気の影響のためにさらに長い時間を要した。このため、ERAA と同等の応答性を実現するためには、急速励磁回路などによる補償が必要である。

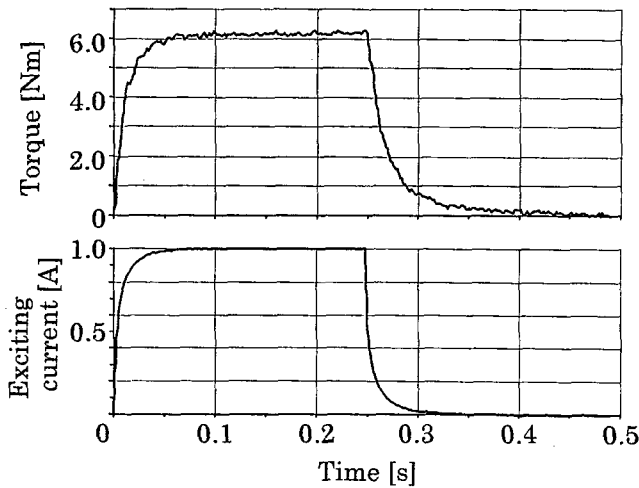


Fig. 15 Step response of torque and exciting current.
トルクと励磁電流のステップ応答

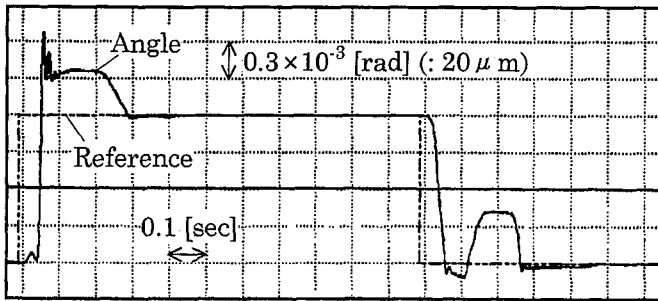


Fig. 16 Positioning performance of MRAA under proposed method.
本手法による MRAA の位置決め性能

7. ER/MR アクチュエータの比較

ERAA と MRAA の主な諸元を Table 1 に示す。本報で示した MRAA は試作機であるため、従動部の大

きさにはその効果が反映されていないが、クラッチ面積の比較から、MR 流体を利用した場合には装置全体をよりコンパクトに設計できる可能性がある。ただし、MR 流体の利用ではトルクを電氣的に制御するためにクラッチ面付近にコイルを設置する必要があり、軽量化が難しい。また、MRAA の単位トルクあたりに必要な電力は ERAA の 2 倍以上であった。一方、MR 流体の利用ではトルク制御に永久磁石を利用できるので、電流遮断状態で保持力が維持できる。しかし、ER 流体では本質的にノーマルクローズ型の装置を構成できない。

ERAA と MRAA の制御性能を比較する目的で、本手法を MRAA に適用した。その結果を Fig. 16 に示す。実験では直線変位に換算して $\pm 20\mu\text{m}$ に連続的に動作させている。ERAA の場合と等しく誤差 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 以下という高精度位置決めが達成され、MR 流体にも本手法が適用可能であることが分かった。ただし、トルク制御の遅れの影響のために、高精度を得るには、よりゆっくりとモータを停止させる必要があり、ERAA ほど制御時間を短くはできなかった。

このように、ER/MR 流体は共にアクチュエータの本質安全化を実現する手段として有効であるが、機能性の面から、実際の利用においては両者の使い分けを十分に検討する必要がある。

8. 結 言

本報では、ERAA の力と速度を独立に制限する機能を積極的に利用した新しい位置決め手法を提案し、その制御原理を説明した。本手法は、ON/OFF 制御則を基本とする単純な制御原理にも拘わらず、従来の手法と比較して以下の優れた特長をもつ。

Table 1 Specification of ER/MR actuator.
ER/MR アクチュエータの主な諸元

	ER actuator	MR actuator
Size of output (secondary) cylinder		
Diameter	110 mm	92 mm
Height	227 mm	217 mm
Moment of inertia	0.017 kgm ²	0.056 kgm ²
Area of clutch surface	285 cm ² × 2	25 cm ² × 2
Maximum output torque	2.8 Nm (@2.0 kV/mm)	6.5 Nm (@1.0A)
Ratio of power and torque	0.6 W/Nm	1.4 W/Nm
Response time	10 ms	60 ms
Control source	High voltage (: 1~5 kV)	Current (: 1~2A) ※ Can be engaged by permanent magnets

- (1) PZT 系圧電素子や液圧による構造歪みなどを利用した従来の高精度位置決め装置と比較して、可動範囲が広く設定できる。
- (2) ON/OFF 制御則を基本とするため、角度偏差をアナログ的に検出するセンサを必要とせず、さらに、モータの僅かな慣性回転を利用して位置決めを実現できることから、システムを簡便に構成できる。
- (3) 目標到達後に外乱トルクが変動しても、固化した ER 流体によって従動部を保持できる。また、外乱や慣性モーメントの変動に対してもロバストな制御性能をもつ。
- (4) 実際に人と接触する以前に、予め人体に及ぼす力の上限値を規定でき、さらに、力の許容上限値が変化しても容易に対応することができる。

さらに、本報では、ER 流体と酷似した特性をもつ MR 流体を用いたアクチュエータに本手法を適用し、実現される性能を比較した。その結果、ER/MR 流体は共に力と速度を独立に制限するアクチュエータを実現する手段として有効であるが、機能性の面から、実際の利用においては両者の使い分けを十分に検討する必要があると結論した。

機械の構造によって危険源を除去するという安全のアプローチに限界があることは明らかであるが、これができる限り達成しようとするのが国際規格の示す考え方である。しかし、アクチュエータの力と速度の上限値が互いに干渉し、設計の自由度が大幅に減ってしまうのであれば、この方策は導入され得ない。この観点から見れば、本報で示した ER/MR 流体の利用は、今後、力と速度を独立に制限する機能を駆動源の特性に依存せずに実現する手法として一般化すると思われる。本研究結果が安全の発展に資することができれば幸いである。

参考文献

- 1) 井手隆俊, 医療福祉ロボットへの期待, 日本ロボット学会誌, 8, 5, pp. 259-262 (1990).
- 2) H. Ikeda, N. Sugimoto, T. Saito and M. Onishi, Safety Control Mechanism for Construction Working in Collaboration with Human Workers, Proc. 17th Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction, pp. 131-136 (2000, Taiwan).
- 3) 人間共存型ロボット研究専門委員会, 人間共存型ロボットシステムにおける技術課題, ロボット学会誌, 16, 9, pp. 288-291 (1998).
- 4) 齋藤剛, 杉本旭: 安全ロボットの基礎的要件と構成に関する研究, 機構論, 95-17, A, pp. 287-290 (1995).
- 5) 山田陽滋, 吹田和嗣, 他: ヒト・ロボット共存のための人間工学実験に基づく痛覚レベルの人体耐性値の解明, 機論 C, 63-612, pp. 238-243 (1997).
- 6) ISO/CD12100, Safety of machinery-Basic concepts, general principles for design (1998).
- 7) 池田博康, 齋藤剛, 杉本旭, 人間と共存するロボットの本質安全化 (国際安全規格に基づく危険源除去のプロセス), システム制御学会論文誌, 13, 12, pp. 47-56 (2000).
- 8) 藤田隆史, 服部忍, 周期衝突振動における衝撃特性, 機論 C, 45, 395, pp. 737-746 (1979).
- 9) 正司康雅, 稲葉忠, 福田敏男, 細貝英実, 衝突を含むマニピュレータの安定制御, 機論 C, 56, 529, pp. 2432-2440 (1989).
- 10) パーソナルロボットの標準化に関する調査研究成果報告書, 日本ロボット工業会, p. 8 (1999).
- 11) 杉本旭, 電気粘性流体 (ERF) 用いた順応型アクチュエータに関する研究, NIIS-RR-96, pp. 1-9 (1997).
- 12) T. Saito and N. Sugimoto, A Study on Electro-Rheological Motion Control using An Antagonistic Rotary Actuator, Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Their Applications, ed. M.Nakano, K. Koyama, pp. 787-796 (World Scientific, Singapore, 1998).
- 13) J.D. Carlson, et al., Commercial magneto-rheological fluid devices, Proc. of the 4th Int. Conf. Electrorheological Fluid (1994).
- 14) 藤井敬文, 山本英樹, 中野政身, MR ダンパの特性とその制御方式, 機講論, 00, 6 (2000).
- 15) D. Kroushl, et al., Experimental performance of a magneto-rheological fluid damper, Proc. of ASME-DETC'97, pp. 1-6 (1997).
- 16) Y. Asako, S. Ono, et al., Properties of electro-rheological fluids containing numerous sulfonated polymer particles, Progress in electrorheology, ed. K.O.Havelka, pp. 147-155 (Plenum Press, New York, 1995).
- 17) 齋藤剛, 杉本旭, ER 流体の制御への応用とその歴史, 計測と制御, 34, 9, pp. 702-706 (1995).

(平成 13 年 1 月 29 日受理)