

学術・技術論文

ER アクチュエータの開発および
その力制御に関する基礎研究坂口 正道^{*1} 古 莊 純 次^{*1} 章 国 光^{*1} 魏 志 丹^{*2}Development of ER Actuator and
Basic Study on its Force Control SystemMasamichi Sakaguchi^{*1}, Junji Furusho^{*1}, Guoguang Zhang^{*1} and Zhidan Wei^{*2}

We developed a high-performance actuator using particle-type ER fluid. This ER actuator have high torque/inertia ratio, and can respond quickly. In this paper, the force control properties of this actuator were examined experimentally. Firstly, we developed the model of ER actuator based on experiments. Then the feedback control system is designed by H_∞ control theory. Lastly, the proposed control system is examined by experiments.

Key Words: ER Fluid, Actuator, Robotics, Force Control, H_∞ Control Theory

1. は じ め に

メカトロニクス機器の高速高精度化をはかるためには、アクチュエータの低慣性特性および高速応答性が要求される。また、バーチャルリアリティ、テレオペレーション等において重要な力感覚の提示では、自由空間における自由な運動感覚や、衝突などにおける高周波成分を含む力覚の提示が重要な技術課題となっている。このような要求を満たす力覚提示装置の実現には、低慣性かつ応答性の良いアクチュエータの開発が望まれている。そこで、本研究では、ER 流体 (Electro-Rheological Fluid) を用いた低慣性特性および高応答特性を持つアクチュエータ (以後 ER アクチュエータと呼ぶ) の開発を行い、その制御方式について検討する。

ER 流体とは、電場をかけることによって見かけの粘性 (正確にはレオロジー特性) が制御できる流体である。その特徴としては、粘度の変化範囲が広い、応答性が良いこと等が挙げられる。各種機械システムへの応用を目的として現在盛んに開発が進められているのは、粒子分散型、および液晶を用いた均一系の ER 流体である [1]~[4]。この 2 種類の流体はまったく異なる性質を示す。このうち、粒子分散型 ER 流体 (以降、粒子系流体と呼ぶ) に関する研究は 1940 年代後半に Winslow [1] によって始められている。

本研究で開発する ER アクチュエータは粒子系流体の特性を利用したものであり、電場によって伝達される力 (トルク) が制御でき、伝達トルクが安定に、しかも高速に制御できる一

種のクラッチである。この分野の研究は近年徐々に増えつつあり [5]~[9], ロボットへの応用や [7], そのモデル化 [6] [8] [9] などについて検討が行われている。

本論文は、まず 2 章で粒子系流体の特性について述べ、開発した ER アクチュエータの原理、構造、特徴について述べる。3 章では、その力制御特性について検討し、4 章で線形化補償を行う。5 章では、ER アクチュエータおよび線形化補償器よりなるシステムを制御対象と考え、そのモデルおよび振動を導出する。6 章ではその力制御方式について検討を行い、ロバスト制御理論の導入による系統的かつロバスト性の高い力制御系設計法を与える。

2. ER アクチュエータの開発

2.1 ER 流体

ER 流体とは、電場をかけることによって見かけの粘性 (レオロジー特性) が変化する流体の総称である。ER 流体は、大きく分けると粒子系と均一系に分類でき、それぞれ Fig. 1 (a) および Fig. 1 (b) に示すような特性を持つ。本研究で提案する

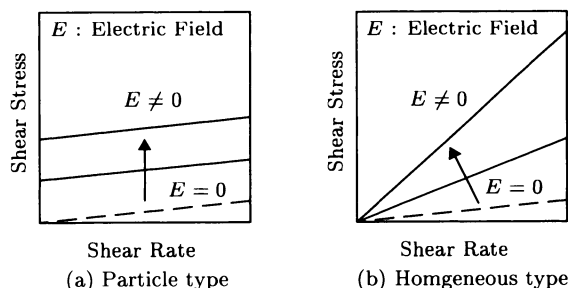


Fig. 1 Properties of ER fluids

原稿受付 1997 年 12 月 26 日

^{*1}大阪大学大学院工学研究科^{*2}中外炉工業 (株)^{*1}Osaka University^{*2}CHUGAI RO CO., LTD.

アクチュエータには、粒子系 ER 流体を使用している。この流体は、無電場時にニュートン流体の特性を示すが、電場を掛けるときに粒子が鎖状に繋がり、Fig. 1 (a) に示したようなビンガム流体としての性質を示す。この特性は次式で表せる。

$$\tau = \eta_0 \frac{du}{dy} + \tau_E(E) \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断応力、 η_0 は無電場時の粘性係数、 $\frac{du}{dy}$ はせん断速度、 $\tau_E(E)$ は電場によって変化する誘起せん断応力であり、 E は電場の強さである。一般に、粒子系 ER 流体においては右辺第 1 項の影響は小さい。そこで、この種の流体はせん断速度の影響をほとんど受けずに、電場によってせん断応力を制御することができる。本研究では、旭化成工業（株）より提供を受けた非含水系の粒子系 ER 流体 [2] を用いている。

2.2 ER アクチュエータの原理

Fig. 2 に ER アクチュエータの動作原理を示す。三つの主要構成部分よりなり、出力回転円筒と入力回転円筒の間に ER 流体が充填されている。出力回転円筒と入力回転円筒はそれぞれ負と正の電極となる。入力回転円筒は、常に一定の回転速度で駆動され、モータからの入力トルクは二つ円筒の間に充填した ER 流体のせん断応力を介して出力回転円筒に伝達される。出力トルクは、電極となる二つ円筒の間に印加する電場によって制御される。

2.3 ER アクチュエータの構造

本研究では、Fig. 2 で示した原理図と同じ構造を持つ単一円筒形方向出力 ER アクチュエータを開発した。その写真を Fig. 3 に示す。出力円筒は外径 149.6 [mm]、高さ 50 [mm]、出力回転円筒の電極部分の厚さは 2.6 [mm] である。出力円筒の慣性モーメントがこのアクチュエータの出力軸から見た慣性モーメントをほぼ決定する。アクチュエータの応答速度を速くするためには慣性モーメントを小さくする必要があるため、本研究では円筒の材料としてアルミ合金を用いた。入力円筒部は 1/30 の減速比を持つ減速機を介してサーボモータにより駆動される。

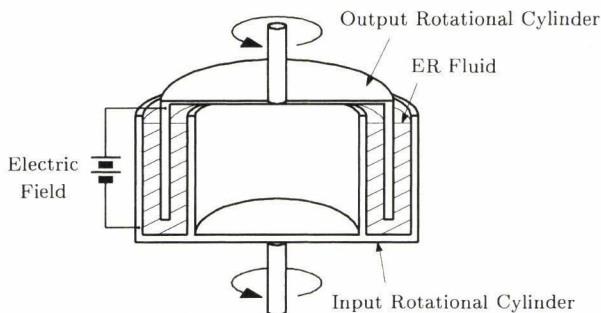


Fig. 2 Principle of ER actuator

2.4 ER アクチュエータの特徴

ER 流体はトルクの伝達回路に介入するため、ER アクチュエータに次のような特徴をもたらす。

- (1) ER 流体はトルク伝達の経路において、入力円筒も含めそれ以前の部分にマスクを掛けるように働き、ER 流体の特性によってその部分の固有特性を置き換える。
- (2) ER アクチュエータの慣性モーメントは出力円筒の部分だけとなる。また、出力軸はシンプルな円筒構造であるため、軽量で、強度のある材料を使うことで、慣性モーメントを非常に小さくすることが可能である。
- (3) 粒子系 ER 流体はビンガム流体としての特性を持つため、入力円筒や出力円筒の速度変動の影響は出力トルクにほとんど影響しない。

なお、ER アクチュエータは表面に発生する力の効果を用いるため、小型化によって、トルク／慣性モーメント比を大きくすることができ、速応性がさらに良いものとなる。

3 章で示すように、粒子系 ER 流体においては、印加電場によるレオロジー特性の変化が非常に高速である。そこで、その低慣性モーメント特性と合わせて、ER アクチュエータは制御に非常に好都合なアクチュエータといえる。Table 1 に、トルク／慣性モーメント比が高く、高性能と考えられているパウダ

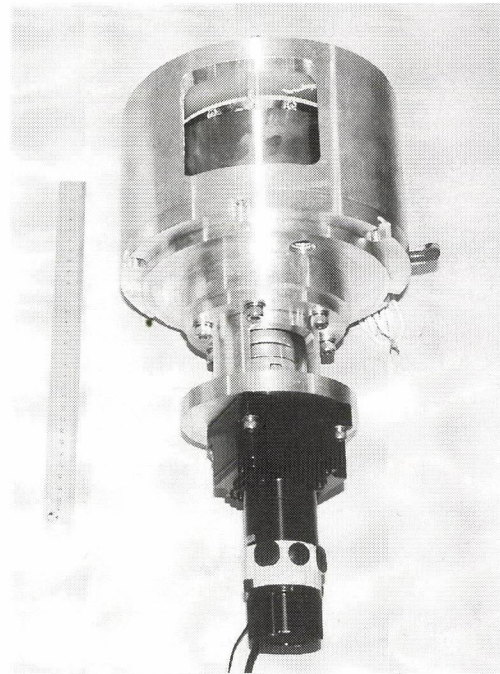


Fig. 3 ER actuator

Table 1 Comparison of ER actuator and powder clutch

Actuator	Torque/Inertia Ratio [s ⁻²]	Response Time of ER Fluid and Powder [ms]	Demerits
ER Actuator	$2 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$	3 ~ 5	Usage of High Voltage Power Supply
Powder Clutch	$3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$	30 ~ 300	Slow Response of Magnetic Powder

クラッチとの比較を示す。パウダクラッチは、トルク／慣性比の大きなアクチュエータとして電線などの巻き取りの張力制御に用いられているが、磁気粉体の特性によりトルクの立ち上がりがありがあまり良くない。これに対し、ER アクチュエータはパウダクラッチと同程度のトルク／慣性比を実現し、さらにトルクの応答は非常に速い。

3. ER アクチュエータの電場による力制御特性

3.1 実験システムの構成

Fig. 4 に ER アクチュエータの力制御実験システムを示す。ER アクチュエータの出力軸に取り付けたリンクの先端において、力センサにより出力トルクが測定される。印加電場の指令値は、コンピュータより高電圧アンプへ与えられ、ER アクチュエータに電場を印加する。高電圧アンプの動特性は、ほぼ次の伝達関数で表すことができる。

$$\frac{1}{0.0002s + 1} \quad (2)$$

3.2 静特性

ER アクチュエータの静特性実験結果を Fig. 5 に黒丸で示す。粒子系 ER 流体の特性により、ER アクチュエータの発生トルク T は印加電場 E の二次関数でほぼ表される。そこで、電場 E と発生トルク T の関係を最小二乗法を用いてパラメータを決定し、二次関数で表すと次式で表される。

$$T = 0.18E^2 + 0.099E + 0.16 \quad (3)$$

Fig. 5 中の実線は、この関数を示している。

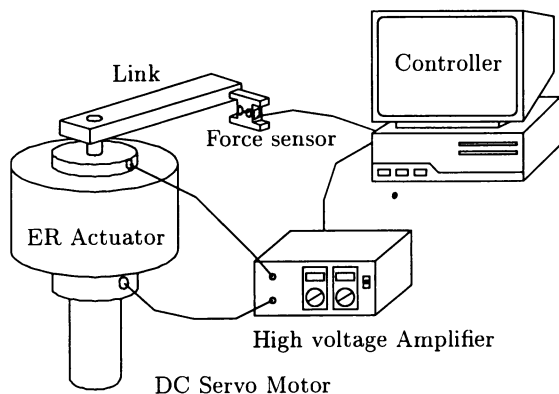


Fig. 4 Control system of ER actuator

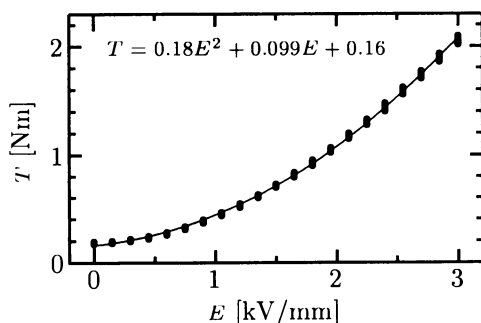


Fig. 5 Relation between torque and electric field

3.3 ステップ応答実験

コンピュータより、ステップ状の信号を高電圧アンプの入力に与えたときの、発生トルクの応答を Fig. 6 に示す。印加電場を 1.0 [kV/mm], 1.8 [kV/mm] および 2.6 [kV/mm] から、それぞれ 0.2 [kV/mm] だけ上昇させた三つの場合の応答が示されている。発生トルクの 63% までの立ち上がり時間は、電場の大きさによらずすべて 3~4 [ms] 程度である。また、各実験における発生トルクの変化幅は、電場の上昇と共に増加している。

3.4 周波数応答実験

ER アクチュエータへの印加電場を変化させた際の周波数応答実験の結果を Fig. 7~Fig. 9 に示す。ただし、入力である印加電場の指令値は、1.0 [kV/mm], 1.8 [kV/mm] および 2.6 [kV/mm] を中心として 3 種類の入力振幅について実験を行った。各図のゲイン特性の比較から分かるように、印加電場の中心が 2.6 [kV/mm] である Fig. 9 の場合がゲインが最も大きく、1.0 [kV/mm] である Fig. 7 の場合が最も小さくなっている。これは、Fig. 5 で示した電場と発生トルクの間の二次関数関係による。ただし、周波数に対するゲイン特性の様子はそれほど変わらず、ほぼ平行移動の関係になっている。また位相特性も高周波域を除いて似たものになっている。入力振幅の大きさの影響が、ゲイン特性、位相特性の両者に若干みられる。

3.5 入力回転円筒の速度変動の影響

本節では、入力回転円筒の速度変動が発生トルクに与える影響について検討する。Fig. 10 に入力回転円筒の回転速度を

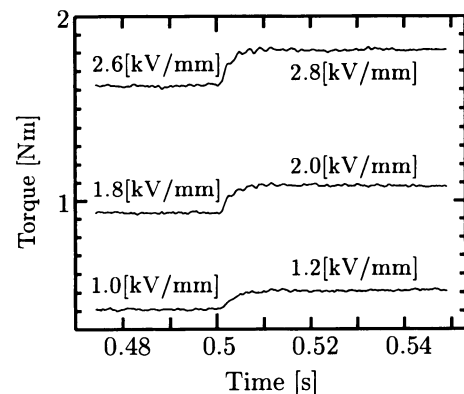


Fig. 6 Step responses of ER actuator

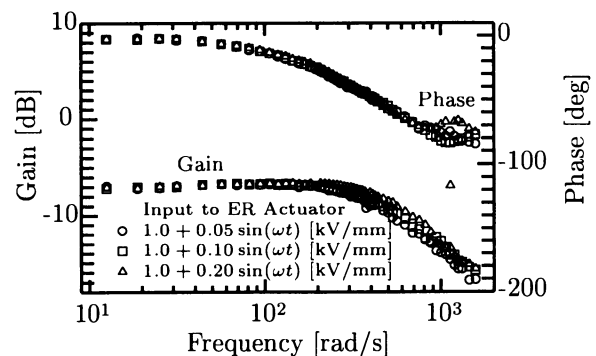


Fig. 7 Frequency responses ($\bar{E} = 1.0$ [kV/mm])

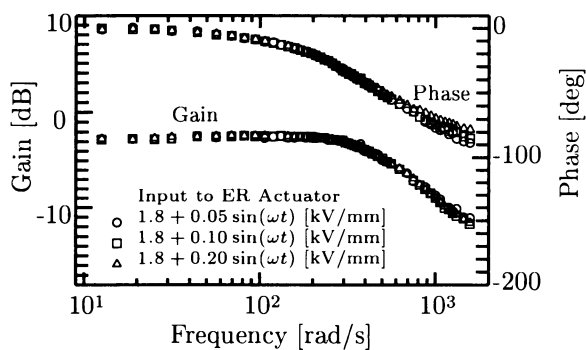
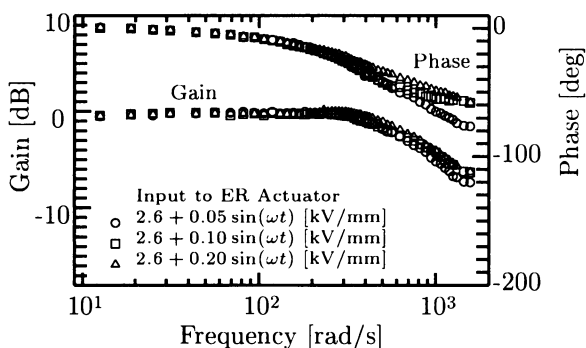
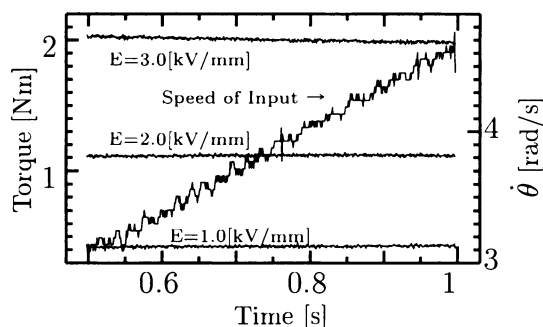
Fig. 8 Frequency responses ($\bar{E} = 1.8$ [kV/mm])Fig. 9 Frequency responses ($\bar{E} = 2.6$ [kV/mm])

Fig. 10 Effect of velocity variation of input cylinder

3.1 [rad/s] から 4.7 [rad/s] にランダムに変化させたときの発生トルクの様子を示す。図から分かるように、印加電場を 3 通りに変化させているが、発生トルクに対する入力回転円筒の回転速度の影響はほとんどみられず、各電場に対応した安定なトルクを発生している。

これらの実験結果から分かるように、入力回転円筒の回転速度をそれほど正確に制御しなくても、ER アクチュエータの力制御特性にほとんど影響はない。よって、入力回転円筒の駆動は誘導電動機などで十分である。

4. ER アクチュエータの線形化補償

3.2 節に述べたように、ER アクチュエータの発生トルクは印加電場の 2 乗にほぼ比例する。そこで、式 (3) を用いて線形化補償を行う。Fig. 11 に示すように、前置線形化補償器、高

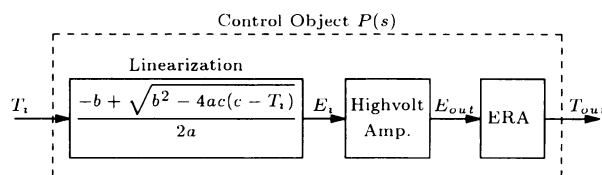


Fig. 11 Block diagram of control system for linearization

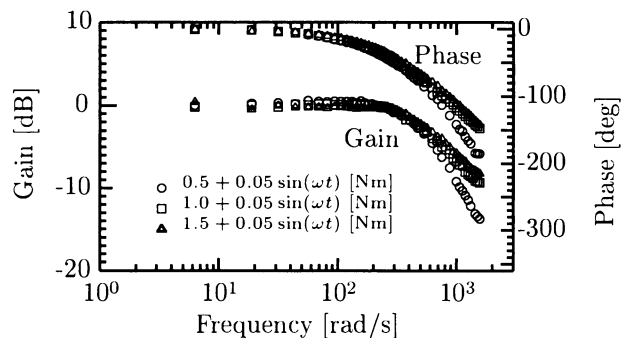


Fig. 12 Frequency responses of linearized control object

電圧アンプおよび ER アクチュエータを含むシステムを制御対象と考える。図中の T_i は制御対象への参照トルク入力、 E_i は高電圧アンプへの入力電圧、 E_{out} は高電圧アンプの出力電圧、 T_{out} は出力トルクを表す。また、線形化補償器の a 、 b および c の各係数は、式 (3) の二次、一次の係数および定数項に対応する。

T_i を入力、 T_{out} を出力とする図の破線で囲まれた部分を制御対象 $P(s)$ とする。線形化補償後の線形性は、周波数応答実験を用いて確認する。参照トルク入力 T_i から出力トルク T_{out} までの周波数応答実験結果を Fig. 12 に示す。図中の式はそれぞれ参照トルク入力 T_i の時間変化を示しており、これに基づき式 (3) を用いて入力電圧 E_i を求める。実験結果より、式 (3) を用いた線形化補償を行った。制御対象は、中心電場の変化にかかわらずよく似た応答を示すことが分かる。

5. ER アクチュエータシステムのモデリング

Fig. 11 に示す線形化補償後の制御対象のモデル化を行う。出力トルクが 1.0 [Nm] 付近の特性を公称モデルとして、その伝達関数を同定する。Fig. 13 に、実験結果および同定した三次の公称モデルの周波数応答を示す。同定した公称モデルの伝達関数 $P_0(s)$ は次式で表される。

$$P_0(s) = \frac{1}{(0.0012s + 1)(0.0013s + 1)(0.0002s + 1)} \quad (4)$$

Fig. 12 から分かるように、中心電場が変化すると低周波域におけるゲイン特性のばらつき、および高周波域におけるゲイン・位相特性のばらつきが見られる。このばらつきを乗法的摂動で表すと、制御対象 $P(s)$ と公称モデル $P_0(s)$ の関係は次式のように表せる。

$$P(s) = P_0(s)(I + \Delta_m(s)) \quad (5)$$

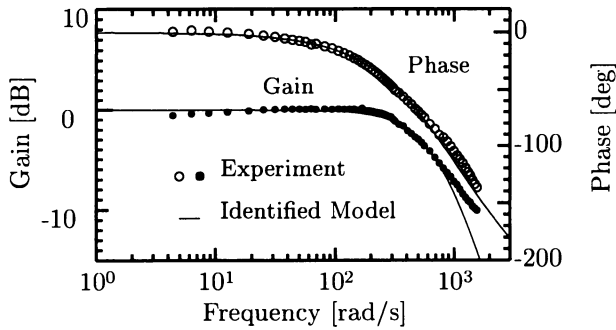
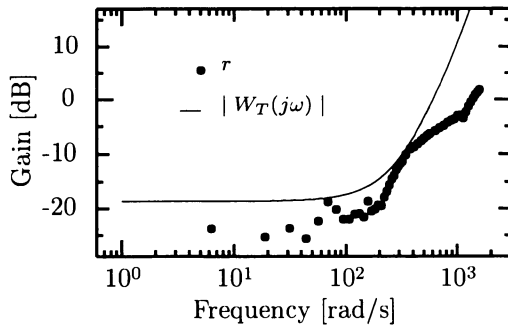


Fig. 13 Frequency characteristic of ER actuator

Fig. 14 Maximum values of normalized perturbation, r

参照トルク入力を中心値および振幅の大きさの変化によって周波数応答実験の結果が変化する。そこで、トルク振幅を公称モデルを同定した際の1/2から2倍の間で変化させ、さらに、周波数応答の中心値を0.5 [Nm]から1.5 [Nm]の間で変化させて周波数応答実験を行い、摂動を求めた。各周波数における乗法的摂動の最大値

$$r \equiv \max |\Delta_m(j\omega)| \quad (6)$$

をFig. 14に黒丸で示す。後に示すロバスト理論による補償器設計では、この摂動に対して系の安定性を補償する補償器を求める。図中の W_T は、乗法的摂動の最大値を抑え込むように与えた三次の多項式で表される重み関数である。

6. カフィードバック制御系の設計

6.1 力制御系の構成と用いる設計手法

ERアクチュエータを用いた開ループ力制御系においては、次のような問題が存在する。

- (1) 出力トルクには、アクチュエータの製作精度に起因する周期的なトルク変動が発生する。
- (2) 線形化補償に用いる式(3)は、全領域においてトルク-電場の関係と正確に一致しないため、線形化補償後の出力トルクに誤差が存在する。
- (3) 入力電圧の中心値が変化すると、ステップ応答も周波数応答も変化する。

設計法としては、 H_∞ 制御の混合感度設計法を取り入れ、製作精度などによる影響を低減すると同時に、モデル化誤差が

あっても安定な力応答を実現できるロバスト制御系を設計する。設計仕様を以下に示す。

- [s1] 外乱の影響の大きい低周波数での低感度特性を実現する。
- [s2] ある範囲においてモデル誤差があっても、安定な力応答を実現できる。

ロバスト安定化と感度最小化を同時に満たすには、次式を満たす補償器 K を求めればよい。

$$\left\| \begin{bmatrix} W_s S \\ W_T T \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \quad (7)$$

ここで、

- $S = 1/(1 + PK)$: 感度関数
- $T = PK/(1 + PK)$: 相補感度関数
- P : 制御対象
- K : フィードバック制御器
- W_s : 感度関数に対する重み関数
- W_T : 相補感度関数に対する重み関数

6.2 重み関数の設定

重み関数 W_s は、設計仕様[s1]の低感度化に関連する重みである。補償器の次数を最小限に抑えると同時に低周波数で外乱の影響を抑えるため、感度関数 $S(s)$ のゲインが低周波数で小さくなるように積分特性に近い一次遅れ要素として式(8)のように選ぶ。パラメータ ρ は、安定化補償器の存在する範囲でできるだけ大きくなるように選ぶ。

$$W_s(s) = \frac{\rho}{(s + 0.001)} \quad (8)$$

重み関数 W_T は、設計仕様[s2]のロバスト安定性に関連する重みである。5章で求めた乗法的摂動の最大値を抑え込むように、重み関数 W_T を次のように選ぶ。

$$W_T(s) = \frac{(0.002s + 1)(0.003s + 1)(0.004s + 1)}{8.5} \quad (9)$$

Fig. 14の実線は上式のゲイン特性を示す。

6.3 ロバスト補償器

MATLABのRobust Control TOOLBOXを用いて、次式で表されるロバスト制御器を得た。

$$K(s) = \frac{0.1038(s + 778)(s + 818)(s + 5341)}{(s + 0.001)(s + 834.5 + 660.5i)(s + 834.5 - 660.5i)} \quad (10)$$

Fig. 15は、ロバスト制御器の周波数応答を示す。低周波数領域では、積分要素が強く働き、一巡伝達関数 PK のゲインを上げて低感度化を実現している。モデル誤差の大きい高周波数領域では、ゲインが小さくなり一巡伝達関数 PK のゲインを下げて、相補感度関数 $T(s)$ を小さくし、ロバスト安定性を上げている。

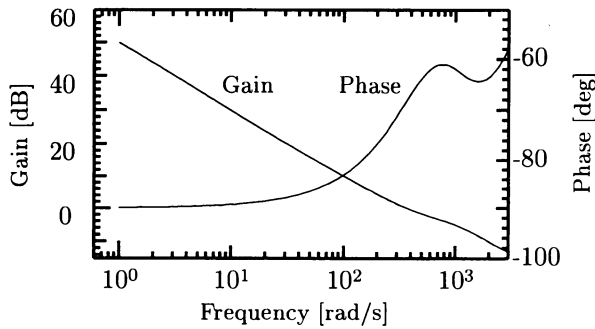
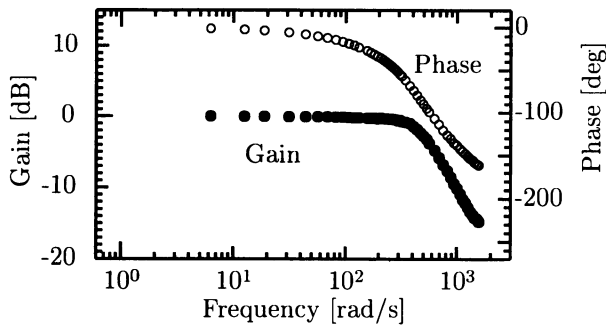
Fig. 15 Frequency characteristic of H_{∞} controller

Fig. 16 Frequency characteristic with control

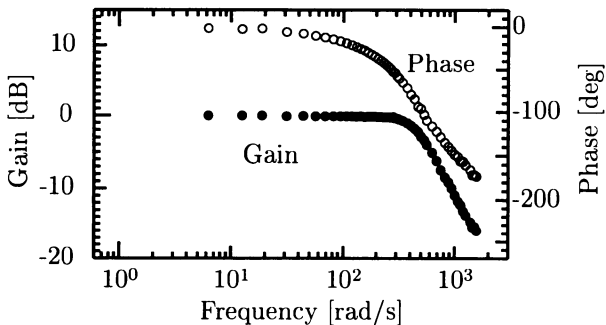


Fig. 17 Frequency characteristic with control

6.4 制御実験

6.4.1 周波数応答

式 (10) に示すロバスト制御器を用いて制御実験を行った。実験では、まず公称モデルの同定時と同じ状態である 1.0 [Nm] を中心として周波数応答実験を行った。実験結果を Fig. 16 に示す。次に、モデルの不確かさが大きいと見られる出力トルクが 0.5 [Nm] 付近での周波数応答実験の結果を Fig. 17 に示す。

制御後の帯域は、公称モデルより高周波域へと伸びている。また、Fig. 12 の開ループ特性では見られた低周波領域におけるゲインの低下現象も見られなくなっている。

6.4.2 ステップ応答

1.0 [Nm] の付近におけるステップ応答実験の結果を Fig. 18 に示す。図中の破線は公称モデルの規範応答、点線は開ループにおける応答である。また、出力トルクが 0.5 [Nm]、1.0 [Nm] および 1.5 [Nm] の付近におけるステップ応答実験を行った。

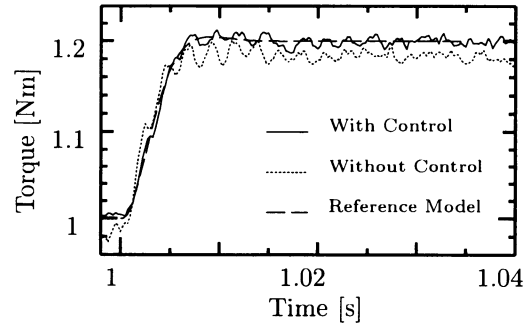


Fig. 18 Step responses with control

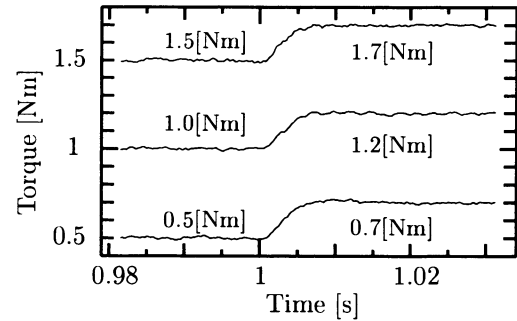


Fig. 19 Step responses with control

Fig. 19 にその実験結果を示す。図中の右側の数字は目標トルクを示す。開ループ実験に見られる定常誤差やよるトルク変動はほぼなくなり、応答が速く行き過ぎのない力応答が得られている。

7. ま と め

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) ER 流体の特性を活かした高応答速度、低慣性モーメントの ER アクチュエータを開発した。
- (2) 開発した ER アクチュエータは、電場制御による応答が速く、安定な力制御特性を有し、時定数は 4 [ms] 以下である。また、入力円筒の速度を変化させる実験を行い、ER アクチュエータの出力トルクが入力円筒の速度変化の影響をほとんど受けないことを示した。
- (3) ER アクチュエータに対してトルク—電場の線形化補償を行った。次に、線形化補償後の ER アクチュエータの数学モデルを同定した。
- (4) ER アクチュエータを用いた力制御系設計にロバスト制御理論の混合感度設計法を導入し、力応答性のさらなる改善を行った。

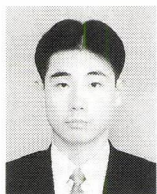
参 考 文 献

- [1] W.M. Winslow: "Induced Fibrillation of Suspensions," J. of Applied Physics, vol.20, pp.1137-1140, 1949.
- [2] ER 流体の開発と応用 (小山清人編). シーエムシー, 1994.
- [3] 古荘純次: ER 流体を用いたメカトロニクス機器の制御, 計測と制御, vol.34, no.9, pp.687-691, 1995.
- [4] 古荘純次, 坂口正道: "電気粘性流体を用いたアクティブ制御", ト

ライボロジスト, vol.41, no.6, pp.512-517, 1996.

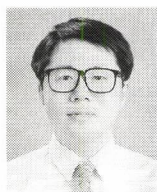
- [5] W.A. Bullough et al.: "ER Shear Characteristics: Volume Fraction, Shear Rate, Time Response," Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.118, pp.221-225, 1996.
- [6] N. G. Steven, J.L. Sproston and R. Stanway: "An Experimental Study of Electro-Rheological Torque Transmission," Trans. of ASME, J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, vol.110, no.2, pp.182-188, 1988.

- [7] 杉本旭: "ウインズロ効果を利用したアクチュエータについて", 潤滑, vol.30, no.12, pp.859-864, 1985.
- [8] W.A. Bullough: "Requirements and Targets for Electro-Rheological Fluid in Electrically Flexible High Speed Power Transmissions," Polym. Prepr., vol.35, no.2, pp.327-328, 1994.
- [9] D.J. Brookfield and Z.B. Dlodlo: "Transfer Function Identification of an Electro-Rheological Actuator," Proc. of the 5th. Int. Conf. on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology, pp.300-317, 1996.



坂口正道 (Masamichi Sakaguchi)

1970年6月29日生。1995年3月電気通信大学大学院電気通信学研究科機械制御工学専攻博士前期課程修了, 1995年10月同大学大学院博士後期課程退学。1995年日本学術振興会特別研究員。電気通信大学助手を経て, 1996年4月より大阪大学工学部助手。機能性流体を用いたメカトロニクス機器とその応用に関する研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本バーチャルリアリティ学会, バイオメカニズム学会などの会員 (日本ロボット学会正会員)



章 国光 (Guoguang Zhang)

1964年1月4日生。1985年中国ハルビン船舶工程大学卒業, 1991年湖北工学院修士課程修了, 1996年電気通信大学大学院博士課程修了。同年より同大学助手, 1997年より大阪大学工学部助手。工学博士。ロボットの振動制御, 力制御, 精密位置決め制御, サーボ制御システムの設計などの研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会の会員。 (日本ロボット学会正会員)



古荘純次 (Junji Furusho)

1947年3月22日生。1970年大阪大学工学部機械工学科卒業, 1975年同大学大学院博士課程単位取得退学。大阪大学助手, 岐阜大学助教授, 電気通信大学教授を経て1996年より大阪大学工学部教授。工学博士。ロボットおよびメカトロニクス機器の制御に関する研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, バイオメカニズム学会, 日本バーチャルリアリティ学会などの会員。 (日本ロボット学会正会員)



魏 志丹 (Zhidan Wei)

1963年12月1日生。1995年電気通信大学電気通信学部機械制御工学科卒業, 1997年同大学大学院電気通信学研究科機械制御工学専攻博士前期課程修了。現在, 中外炉工業(株)に勤務。