

解説

ER 流体を用いたニューアクチュエータ

New Actuators Using ER Fluids

古 荘 純 次* 坂 口 正 道* *大阪大学工学部

Junji Furusho * and Masamichi Sakaguchi* * Faculty of Engineering, Osaka University

1. はじめに

ER 流体 (Electrorheological Fluids) とは、電場によってそのレオロジー特性を変化させることができる流体であり、粒子分散型 ER 流体 (以降粒子系流体と呼ぶ) および液晶などを用いた均一系 ER 流体 (以降均一系流体と呼ぶ) の 2 種類の流体の開発が現在進められている [1]~[5]. 粒子系流体に関する研究は、1940 年代後半の WINSLOW の研究 [6] をはじめとして多くの応用例があげられる。これに対し、均一系流体 [7] については近年開発が進み、各種制御への応用が検討され始めている [2][8][9].

本稿では、粒子系 ER 流体のアクチュエータへの応用について述べ、さらにその応用の一つである力覚提示システムやロボット等への応用についても述べる。

2. 2 種類の ER 流体

粒子分散型のコロイド溶液である粒子系流体では、電圧をかけない状態では、ばらばらになった粒子が電圧をかけることによってブリッジを形成する (図 1 参照)。この流体は、図 2(a) に示す特性を持つ。横軸はせん断速度、縦軸はせん断応力である。電場 E が零のときはニュートン流体としての特性を示し、電場が印加されるとビンガム流体としての特性を示す。すなわち、電圧印加時にはクーロン摩擦に近い振る舞いをする。

一方、均一系流体としては低分子液晶および高分子液晶が用いられており、図 2(b) に示すような特性を持つ [7]. この流体では、せん断速度にほぼ比例したせん断応力が発生し、電場によってその勾配である粘性が制御できる。つまり、一定の電場のもとで速度に比例した機械的抑制力が得られるので、いわゆる微分制御に相当するものが機械的に実現できる。

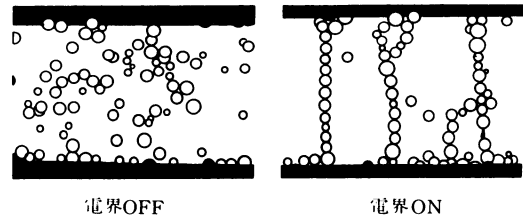


図 1 粒子系 ER 流体

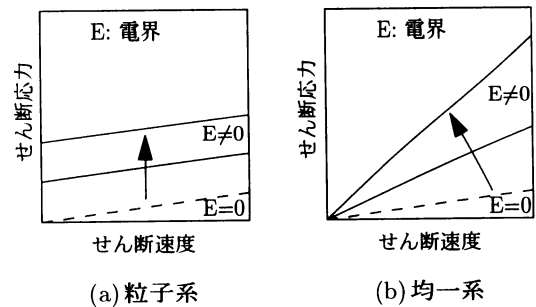


図 2 粒子系と均一系の特性

3. ER アクチュエータ

ER クラッチの原理を図 3 に示す。入力回転円筒は、外部から一定速度で駆動される。入力回転円筒と出力回転円筒の間には粒子系流体が充填されており、両回転円筒はそれぞれ電極となっている。電極間に電圧を印加するとせん断応力が発生し、入力回転円筒から出力回転円筒にトルクが伝達される。すなわち、出力トルクの大きさが印加電圧によって制御される。入力回転円筒を駆動するモータと ER クラッチからなるシステムを ER アクチュエータと呼ぶ。

ER アクチュエータはトルク/慣性比が DD モータよりも大きく応答性がよい。ER アクチュエータは、表面における摩擦効果を利用しているため、他のアクチュエータと比べて小型になるほどトルク/慣性比が高くなる。トルク/慣性比が非常に高いと考えられているパウダクラッチと比較しても、遜色ないトルク/慣性比を実現する (表 1 参照)。また、パウダクラッチのパウダの応答性はあまりよくないが、ER 流体の応答性は極めて優れているので、ER アク

原稿受付 1997 年 1 月 13 日

キーワード: Actuator, ER Fluid, Robotics, Virtual Reality, Force Display Device

* 〒 565 吹田市山田丘 2-1

* Yamadaoka, Suita-shi, Osaka

表 1 トルク/慣性比の比較

アクチュエータ名	トルク/慣性比 [Nm/kgm ²]	トルクの立ち上がり および立ち下がり	問題点
ER アクチュエータ	$2 \times 10^3 \sim 4 \times 10^5$	数 [msec] 以下	高圧電源が必要.
コアレスモータ	$4 \times 10^3 \sim 9 \times 10^4$	数百 [μ sec]~数 [msec]	ブラシの静止摩擦トルク. 回転子の温度上昇.
パウダクラッチ	$3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$	数十 [msec]~数百 [msec]	コイルと磁気粉体特性の制限 でトルクの立ち上がりが遅い.

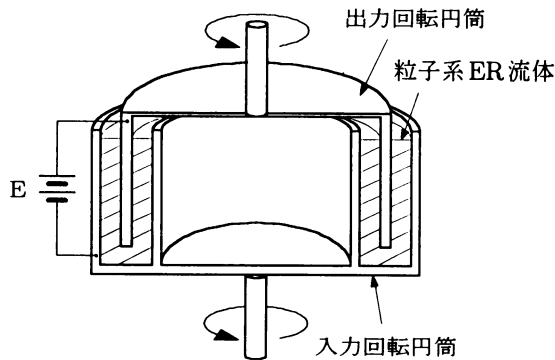


図 3 ER クラッチの原理

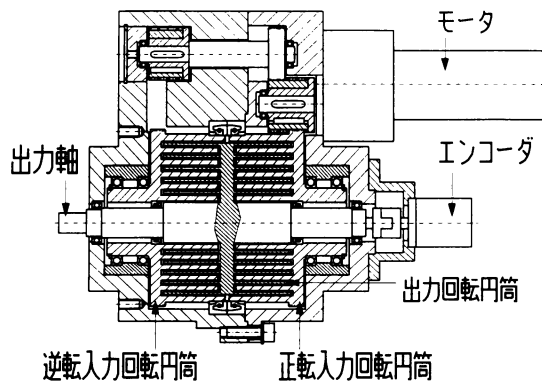


図 4 両回転型 ER アクチュエータ

チュエータは非常に応答性がよいアクチュエータと言える。例えば、細い電線や薄いフィルムの供給装置では、高精度の張力制御が要求される。このような場合、応答性がよくトルク/慣性比の高い ER アクチュエータが有用となる。

筆者らは、図 4 に示す ER アクチュエータを開発した。このアクチュエータは、入力回転円筒として正転および逆転の二つの円筒を持っているので、正逆両方向のトルクを発生することができる。

ER アクチュエータを用いて各種制御実験を行った。実験には図 4 に示す両回転型 ER アクチュエータが用いられ、安定にサーボロックが実現された [10]。また、速度制御、力制御とも良好な制御結果が得られている [10]。

4. 力覚提示・ロボットへの応用

バーチャルリアリティにおける重要な技術的課題として、力覚および触覚の提示がある。力覚提示システムの性能向上という観点から、ER アクチュエータは次のような利点を持つ [2][11][12]。

- (1) 出力側の慣性モーメントが極めて小さく、流体の応答性がよいため、高周波成分を含む力覚の提示が可能である。そこで、他の物体との衝突のような高周波成分を含む状況、さらに自由空間における自由な運動の表現が可能である。
- (2) 大きなトルクを発生できるため、減速装置を用いる必要がない。したがって、力提示部（操作部）からのバックドライバビリティ性に優れる。

力覚提示システムとは、人間に直接力を伝える一種のロボットアームなので、人間に過大な力を与えてはならない。安全性の観点から、ER アクチュエータは次のような利点を持つ。

- (1) 入力部の回転数を適切に設定することで出力部の速度が機構的に制限されるため、必要以上に加速することなく安全である。
- (2) 出力軸側の慣性モーメントが小さいため、操作部の慣性モーメントを小さく設計することで、人との衝突時に発生する衝撃力を小さくすることができる。

筆者らは、図 5 に示す閉リンク型力覚提示システムを開発した。図 5 は、画像と連動した力覚提示実験の様子を示している。このシステムを用いて、自由空間での自由感、壁に衝突する際の衝突感、物体の外形（角部など）を明確に提示することができる。

ER クラッチは、電磁原理を用いないため、重いコイルや磁石を必要としない。また、回転円筒部に複合材料などの軽量な材料を用いてメッキ等により電極を構成すると、パウダクラッチやコアレスモータ等と比べてさらに全体の質量を小さくすることができる。そこで、ロボットの手首や指 [13] などアーム先端部に ER クラッチを用いると、慣性モーメントの非常に小さいロボットアームが構成できる。人間の関節のバックドライバビリティは極めてよく、筋肉の慣性は非常に小さいが、ER クラッチ（アクチュエータ）を用いることでより人間に近いロボットが実現可能となる。

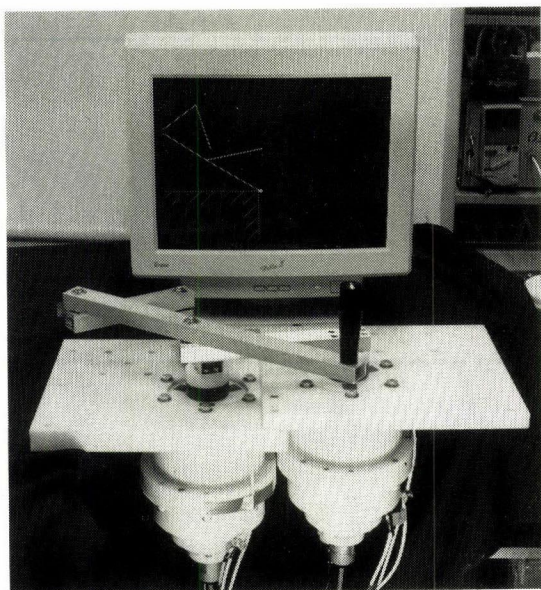


図5 閉リンク力覚提示システム

5. 各種アクチュエータへの応用

機械システムにおいて、摩擦を再現性よく制御することは一般に困難である。しかし、粒子系流体はクーロン摩擦の強さを電場によってほぼ正確に制御できる。 piezo素子など変位の非常に小さいアクチュエータに対してこの特性を応用し、大変位が可能なアクチュエータの開発が行われている。例えば、piezo素子とER流体を組み合わせた超音波モータ[14]、ステップモータ[4]、および振動を利用した直動システム[15]などが開発されている。

6. ERバルブ、マイクロシステムへの応用

粒子系流体は、せん断速度が零の状態でも力を発生できるので、機械的稼働部を持たない流体バルブが構成可能である。この特性を生かし、ER流体を用いたマイクロバルブの試作が行われている[16][17]。

7. おわりに

本稿では、クラッチ、アクチュエータへの粒子系流体の

応用について解説を行った。このユニークな材料を用いた新しいアクチュエータは、メカトロニクス機器への応用に対する大きなポテンシャルを持つものと考えられる。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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（日本トライボロジー学会誌），vol.41, no.6, pp.512-517, 1996.
- [3] ER流体の開発と応用（小山清人編），シーエムシー，1994.
- [4] Proc. of 5th Int. Conf. on Electro-rheological Fluids, Magneto-rheological Suspensions and Associated Technology (Ed. by W.A. Bullough), World Scientific Publishing, 1995.
- [5] “メカトロニクス機器の電気粘性流体を用いた制御に関する研究分科会成果報告書”，(P-SC237 古荘純次主査)，日本機械学会，1996.
- [6] W.M. WINSLOW: “Induced Fibrillation of Suspensions,” J. Appl. Phys., vol.20, pp.1137-1140, 1949.
- [7] 井上昭夫：“均一系ER流体の開発動向”，計測と制御，vol.34, no.9, pp.698-701, 1995.
- [8] 古荘純次，佐野明人，古賀滋雄：“液晶系ER流体を用いたロボットアームの H_∞ 制御に基づく高精度位置決め制御”，日本機械学会論文集（C編），vol.61, no.586, pp.2501-2507, 1995.
- [9] 章国光，古荘純次，坂口正道：“液晶系ER流体を用いたロボットアームの振動制御に関する基礎研究”，日本機械学会論文集（C編），vol.62, no.594, pp.562-569, 1996.
- [10] 魏志丹，坂口正道，古荘純次：“両方向回転型ERアクチュエータの制御”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96講演論文集，vol.B, pp.1267-1268, 1996.
- [11] 古荘純次，魏志丹，古賀滋雄：“ER流体を用いた低慣性アクチュエータの開発とそのバーチャルリアリティへの応用”，日本機械学会第72期通常総会講演会講演論文集，vol.IV, pp.265-266, 1995.
- [12] M. Sakaguchi, J. Furusho and Z. Wei: “Application of Actuators Using Particle-Type ER Fluids for Force Display Devices, Master-Slave Systems, and Medical Treatments and Welfare,” Proc. of the Japan/USA Symposium on Flexible Automation, vol.1, pp.241-244, 1996.
- [13] 杉本旭：“ウィ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.
- [14] 丸山周，上羽貞行，中村健太郎：“電気粘性流体を用いた超音波モータの試作とその基礎特性”，信学技報，US94-67, pp.45-52, 1994.
- [15] 斎藤剛，鍋川尉，杉本旭，酒井圭介：“ER流体を用いた直動および回転機構の原理と評価”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96講演論文集，vol.B, pp.1271-1274, 1996.
- [16] A. Sano, J. Furusho and H. Fujimoto: “Development of Micro Actuator Using ER Fluids,” J. of Robotics and Mechatronics, vol.7, no.6, pp.429-434, 1995.
- [17] 近藤豊，横田真一，吉田和弘：“電気粘性流体を応用した流体マイクロ制御弁”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96講演論文集，vol.B, pp.1231-1232, 1996.



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，バイオメカニクス学会，ASMEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)



坂口正道 (Masamichi Sakaguchi)

1970年6月29日生。1993年電気通信大学電気通信学部機械制御工学科卒業，1995年同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。電気通信大学電気通信学部助手を経て96年より大阪大学工学部助手。遠隔操作システム，歩行ロボットの制御，機能性流体を用いたメカトロニクス機器に関する研究に従事。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）