ケイ素鋼板を用いた高速応答・高出力 MR アクチュエータの研究開発*

山口 雄平^{*1}, 古 莊 純 次^{*1}
菊 池 武 士^{*2}, 木 村 真 也^{*3}

Development of High-Speed/High-Torque MR Actuator Using Silicon Steel Sheet

Yuhei YAMAGUCHI^{*4}, Junji FURUSHO,
Takehito KIKUCHI and Shin'ya KIMURA

^{*4} Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

There are a lot of robot systems that directly touch and transmit the power to the users. Though it is very important that such robot systems are developed on consideration of safety, most of them are developed without argument or with abstract argument about safety. In this paper, firstly, we insist that safety of a robot system using MR Actuator can be estimated quantitatively and ensured mechanically. Secondly, the development of the High-Speed/High-Torque MR actuator is described. Response characteristics of the developed MR actuator are improved by using flat rolled silicon steel sheet. And lastly, basic characteristics of the new MR Actuator are demonstrated.

Key Words: Actuator, MR Fluid, MR Actuator, Safety, Human-Machine-Coexistent Mechatronics, Laminated C-Type-Yoke, Robotics

1. は じ め に

ロボットに関する認知度の高まりに伴い、作動中に人間と空間を共有するロボット(人間共存型ロボット)に関する研究が活発に行なわれている。特に超高齢化社会における老老介護問題は顕在化しつつあり、介護や医療の現場で用いられるリハビリテーション装置やパワーアシスト装置の開発が求められている。これらのロボットは人間と接触し、大きな力を人間に及ぼすシステムであるが、その安全性についてはほとんど考慮されていないか、抽象的に主張されており、定量的に安全性を確保する配慮がほとんどされていない。

古莊研究室では、人間と接触しながら働き、相互に力のやり取りを行う人間共存型ロボットの安全性を定量的かつ機構的に確保する方法として、クラッチ型アクチュエータの使用を提案し、ER流体を用いたクラッチ型アクチュエータ^{(1)~(5)}、MR流体を用いたクラッチ型アクチュエータ^{(6)~(9)}、およびそれらを用いたメカトロニクスシステムの開発を行なってきた⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁹⁾。ER流体は電場、MR流体は磁場を印加することで、そ

のレオロジ特性を制御できる機能性流体である。人間共存型ロボットにおけるクラッチ型アクチュエータの安全性に対する利点は、システムがアクチュエータ側から駆動される際にはクラッチ入力軸の速度で最大速度が制限されることにより安全を確保し、人間側から駆動する際には速度制限を受けず自由に運動できる点にある。古莊はこの利点を提唱し、ERアクチュエータを用いた力覚提示システムおよびリハビリ訓練システムの開発を行った⁽²⁾⁽³⁾。

本研究では、パワーアシスト装置などの高出力カーボ系人間共存型ロボットに搭載可能なMRアクチュエータを開発する。MR流体はER流体よりも最大せん断応力が大きく、またER流体より基底粘度に起因する抵抗力と最大発生力との比が大きいという利点を持つ。これらは、MRアクチュエータの出力部の慣性および粘性抵抗を小さくする効果を持ち、その結果、操作者からアクチュエータをバックドライブした際の慣性力による抵抗および粘性抵抗を小さくできる。これは、パワーアシスト装置のような人間と接触しながら働き、相互に力のやり取りを行うタイプの人間共存型ロボットにとって、大きな利点である。

MRアクチュエータの問題点として、(1)磁気回路

* 原稿受付 2004年1月19日。

^{*1} 正員、大阪大学大学院工学研究科(☎565-0871 吹田市山田丘2-1)。

^{*2} 大阪府立産業技術総合研究所(☎594-1157 和泉市あゆみ野2-7-1)。

^{*3} 大阪大学大学院工学研究科。

E-mail: y-yuhei@dyna.mech.eng.osaka-u.ac.jp

の高速化が必要, (2) 大きな磁気回路が必要, (3) 流体と粒子の比重差が ER 流体よりも大きいため, 粒子が沈降しやすいなどが挙げられる。本研究では, 磁気回路にケイ素鋼板を積層した C 型ヨークを用いることで, 磁気回路の高速化を目指す。また磁気回路の大きさを出来るだけ低減し, 沈降した粒子が再分散できる構造となるように MR アクチュエータを設計した。

本論文では, 2 章で, クラッチ型アクチュエータを用いたロボットの安全性が定量的かつ機構的に確保できることを述べ, またクラッチ型アクチュエータにおける MR アクチュエータの優位性について述べる。3 章では, 設計の指針と磁気回路の大きさを出来るだけ低減する設計方法について述べ, 4 章で設計された磁気回路が設計仕様を満足することを示す。5 章では, 開発したアクチュエータの詳細な構造について述べる。また 6 章では, アクチュエータの基礎特性を調べる実験システムおよび実験結果について述べる。

2. MR アクチュエータの有する利点

2-1 各種クラッチ型アクチュエータ これまで伝達トルクが制御できるクラッチ機構として, 電磁クラッチやパウダークラッチが多く用いられてきた。しかし, これらの応答時定数は数十ミリ秒から百数十ミリ秒であり, 高速応答が要求されるサーボシステムに用いられることは少なかった。一方, ER アクチュエータや MR アクチュエータの応答時定数は数ミリ秒と速く, 高速応答が要求されるサーボシステムに用いることも期待できる。

MR 流体^{(15)~(18)}は油性分散媒の中に数 $[\mu\text{m}]$ オーダの磁性体金属粒子を混ぜた非コロイド溶液である。磁場印加下でビンガム流体の特性を示し, 発生せん断応力が数十~100[kPa]におよぶ。また数ミリ秒で応答するという優れた特性を持っているため, 機械システムに利用する新素材として注目を集め, 多くの研究^{(16)~(26)}が行われている。

MR クラッチの原理図を図 1 に示す。入力部と出力円盤の間に MR 流体が充填されており, その周囲には電磁コイルが設けられている。電磁コイルに流す電流によって MR 流体に印加される磁場を制御し, 磁場の強さに応じて MR 流体が発生するせん断力が変化する。その結果, 入力部から出力部へ伝達されるトルクが制御される。すなわち, 電磁コイルに印加する電流によって伝達トルクは制御される。

入力部はモータや減速器等から構成される入力駆動システムにより, 一定回転方向にほぼ一定速度で回転

される。MR クラッチとその入力駆動システムで構成されるアクチュエータシステムを MR アクチュエータと呼ぶ。

Fig. 1 Mechanism of MR Clutch

2-2 クラッチ型アクチュエータによる安全の確保 人間共存型ロボットの一つであるパワーアシスト装置に対するニーズは, 特に介護や医療の現場で大きい。その意味で, こうした人間共存型ロボットは高い安全性が要求される。さらにパワーアシスト装置のように, 人間と接触しながら働き, 大きな力が出せるロボットは, 暴走時に操作者や周囲の人間に対して大きな脅威となるため, 安全性をいかに確保するかがますます重要な問題となる。

ロボットが確保すべき安全規格を公的に定め, またその規格に準じてロボットを開発することは, 使用者やその周囲の人間の安全性が確保されるだけでなく, 開発者がロボットの安全性について使用者や関係行政機関に対して行なう説明を容易にする。

しかし, 人間共存型ロボットの安全性に対する法整備は遅れており, 安全な機構についての指針や産業ロボットにおけるいくつかの制限値が奨励されているに留まっている。表 1 は産業ロボットの安全性に関する国際・国内規格である。

Table 1 Safety standard in international and domestic standard

- ・暴走時の低運動エネルギー特性
ISO14121: Safety of machinery
-Principles of risk assessment
- ・機構的に安全を確保する必要
ISO12100: Safety of machinery
-Basic concepts, general principles for design
- ・アクチュエータの出力は80W以下
労働省告示51号(昭和58年6月25日)
- ・機械の手先速度は25cm/s以下
ISO10218: Manipulating industrial robots - Safety

人間共存型ロボットの安全性において, ロボットと

人間との不用意な接触がもっとも重要なポイントとなる。産業安全研究所の研究者ら⁽¹²⁾⁽¹³⁾は、人間共存型ロボットの使用目的、使用状況に応じて、力、速度、エネルギー、出力、動作範囲等の上限値を法的に定め、これに従ってロボットシステムを構築する必要があると指摘している。

特に運動エネルギー、運動量、速度、出力は、ロボットが人間と不用意な接触をした際の衝突エネルギーや激力に直接影響する。これらは全てアクチュエータの速度あるいは速度の自乗に比例するため、出力側最大速度を任意に設定することができるアクチュエータを搭載したロボットは、安全性について定量的に議論することができる。

クラッチ型アクチュエータでは、アクチュエータ側から駆動する場合、クラッチの入力駆動部の速度が、出力軸の最大速度となる。そこで、クラッチ入力部の回転に一定電圧で駆動する直流モータ等を用いれば、アクチュエータ駆動力による出力側最大速度を構造的に制限できる。以上のことから、クラッチ型アクチュエータを用いることで、機構的かつ定量的に安全が確保できると言える。また、これは表1の「暴走時の低運動エネルギー特性」や「機構的に安全を確保する必要」という規準を満たす。

3. アクチュエータの基礎設計

3-1 設計の指針 開発目標は、パワーアシスト装置などの高出力サーボ系人間共存型ロボットに搭載可能なMRアクチュエータの実現である。高出力化のためには、単純に出力円盤を大きくし、トルク発生部である磁極と出力円盤との重なり部分を増やせば良い。しかし、渦電流発生による反抗磁場の影響も大きくなり、応答性は著しく悪化すると考えられる。

図2は平成11年度に古荘、林、浅岡⁽⁶⁾によって開発されたMRアクチュエータの断面図である。MR流体そのものの応答速度は数ミリ秒といわれている^{(18)~(20)}。しかし、このMRアクチュエータのトルク応答性はそれほど速いものではなく、その時定数は数十ミリ秒であった。そこで、応答性を悪化させる支配的な要因として磁気回路における遅れを生じさせる反抗磁場に注目した。そして、反抗磁場を低減するため、磁気抵抗が大きくなるように形状寸法を変更し、その結果、時定数を数ミリ秒とした⁽⁷⁾。これは磁気応答の高速化における有効な方法であるが、一方で発生トルクが低減するという欠点を持つ。本研究では、高速応答かつ高出力のMRアクチュエータを目標とするた

め、積層したケイ素鋼板によるC型ヨークを用いることで高速応答を実現する。また実用性の面から、アクチュエータ全体の大きさや製作コストを考慮した設計を行った。

Fig. 2 Cross section of MR Actuator (1999)

3-2 磁気応答の改善 反抗磁場の原因である渦電流は、導体に鎖交する磁束が変化することによって生じる。この渦電流は、導体の幅が大きいほど良く流れるので、図3に示すように薄い鉄板を積層し、積層板間の絶縁が十分ならば渦電流を低減することが出来る。そこで図4に示すようなケイ素鋼板(厚さ0.65[mm])を積層したC型ヨークを用いて渦電流の発生を抑える。

Fig. 3 Laminated Silicon Steel Sheet

Fig. 4 Laminated C-Type-Yoke

3-3 磁気回路法に基づく設計 MRアクチュエータの設計は、1) 最大伝達トルクに関する設計要求と、2) MR流体に印加する磁場の強さに関する設計要求を同時に満足させる必要がある。これら2つの設計要求は、互いに独立ではなく、特にC型ヨークの形状、個数および配置は、2つの設計要求に対して大きな影響を及ぼす。そこで、設計の簡便化のため、いくつかの仮定を設定し、MR流体に印加する磁場の強さ

を磁気回路法によって簡略計算する。発生トルクの理論値が設計仕様を十分満たすように設計を行い、その後、有限要素解析による磁場解析を行って設計の十分性を確認した。以下に、設計目標と設計に用いた仮定を示す。

- 目標 (1) 最大発生トルクは 35[Nm] 以上
- 目標 (2) クラッチ部に外接する円の直径をできるだけ小さくする。
- 目標 (3) ヨーク総重量をできるだけ小さくする。
- 目標 (4) ヨーク数をできるだけ少なくする。

高出力化のための出力円盤や C 型ヨークの増大に伴い、アクチュエータ全体の大きさも必然的に増大する。実用性を考慮して、アクチュエータ全体の大きさや製作コストが出来るだけ小さくなるように設計を行うことが望ましい。そのため目標 (2) から目標 (4) を設定した。

- 仮定 (1) 1[T] の磁束密度下で、MR 流体が発生する最大せん断力は 74[kPa]
- 仮定 (2) コイルに印加する電流は最大 2[A]
- 仮定 (3) 出力円盤とヨークとの間隔は 0.4[mm]
- 仮定 (4) 図 4 に示すような C 型ヨークを用いる。

仮定 (1) は、使用した MR 流体 (MRF-132LD: LORD 社⁽¹⁷⁾) が約 1[T] 以上の磁束密度下で磁気飽和を起こし、さらに強い磁場を与えてもせん断応力が増加しないことに由来する。仮定 (3) については、出力円盤とヨークとの間隔が大きすぎると、磁気抵抗の増大にともなって発生できる磁束密度が小さくなり、逆に間隔が小さすぎると、粒子のすりつぶしや出力円盤とヨークの接触などが考えられる。これまで行ってきた MR ブレーキおよび MR アクチュエータの開発で得られた知見を参考にしながら、間隔を 0.4[mm] とした。

上記の仮定の下で、設計目標を満足するように繰り返し計算を行った。その結果、ヨーク数が 4 のとき目標 (2) から目標 (4) を最も満足することが分かった。また、ヨークの配置を図 5 に示すものとした。図 5 の斜線部は、出力円盤と磁極の重なり合う部分であり、計算上のトルク発生部となる。

4. 磁 場 解 析

設計した MR アクチュエータに対して、汎用有限要素解析ソフト ANSYS/University Low Option, Ver.

Fig. 5 Arrangement chart of C type York

6.1 を用いて 3 次元磁場解析を行った。解析対象は図 6 に示す MR クラッチの 1/4 部分である。

Fig. 6 Model of Analysis

材質は、軸、円盤およびその締結部品、ベアリングホルダには SS400 を、ヨーク部分にはケイ素鋼を用いる。円盤とヨークのギャップには MR 流体を充填している。その他のケーシング部分にはエンジニアリングプラスチックを用いる。SS400, MR 流体およびケイ素鋼についてはそれぞれ B-H 曲線を与え、計算を行った。また、エンジニアリングプラスチック部分およびコイル部分は比透磁率が 1 で一定として計算した。解析結果の例を図 7、図 8 に示す。図 7 は磁束の流れを示したものであり、図 8 は出力円盤に印加される磁場の大きさを示したものである。図 8 から、磁極と円盤

が重なり合う部分の磁場がほぼ 1[T] 以上であることが分かる。解析結果から、磁束密度 1[T] を発生させるには一つのヨークあたりコイル巻き数を 400[turn] とし、印加電流を 2[A] とする必要があることが分かった。

Fig. 7 Result of Analysis (Vector Drawing of Magnetic Flux on the Yoke)

Fig. 8 Result of Analysis (Contour Drawing of Magnetic Flux Density on the Disc)

5. アクチュエータの構造

新 MR アクチュエータの主要諸元を表 2 に、写真を図 9 に示す。新 MR アクチュエータの応答はかなり高速になると予測されたため、高速な応答に際して機械振動が発生しないように、システム全体が十分な剛性をもつように設計した。コイルは入力部と共に回転するため、コイルへの電流供給にはブラシを用い、回転部と固定部の電気的結合を行った。

これまでに開発された MR アクチュエータと比較すると以下の特徴がある。

1. 磁気回路に C 型ヨークを用いた。
2. ヨークをケイ素鋼板で構成し、渦電流発生時の低減を図った。
3. 最大伝達トルクが 35[N・m] と大きい。

Table 2 Specification of New MR Actuator

Diameter of Casing	300[mm]
Height	190.5[mm]
Diameter of Disc	120[mm]
Gap	0.4[mm]
Num. of Yoke	4
Mass	18.0 [kg]
Max. Current	2[A]

Fig. 9 Picture of New MR Actuator

5.1 クラッチ部の構造 設計した MR アクチュエータのクラッチ部の構造を図 10 に示す。C 型ヨークの磁極と出力円盤のギャップは 0.4[mm] あり、このギャップに MR 流体が充填されている。出力円盤は、慣性モーメントを減らす目的で、出力軸取付け部である円盤中心部に比べ、トルク発生部である円盤外周部の厚さを薄くしている。

5.2 入力駆動部の構造 サーボモータ (Harmonic Drive Systems Inc 製, Hi-T Drive, RFS-25-3818-EI24AL-SP) を用いて、クラッチの入力側を駆動する。サーボモータには減速比が 1/80 のハーモニックギアおよびロータリエンコーダが内蔵されている。エンコーダの分解能は 4 連倍して 4096[pulse/rev] であり、減速機の出側での分解能は 1.92×10^{-5} [rad] である。角度情報はエンコーダカウンタボードを介してコンピュータに入力され、モータの速度制御に利用される。

6. アクチュエータの基礎特性実験

6.1 実験システム 開発した MR アクチュエータの基礎特性実験装置の概略図を図 11 に示す。MR アクチュエータが発生するトルクは、出力軸にアームを取付けロードセルで計測した。

コンピュータからの電圧指令値は、DA ボードを介して入力駆動部制御用サーボアンプ (サーボランド製, SMCM6-AI) とコイル電流用サーボアンプ (サーボラ

Fig. 10 Clutch Part of New MR Actuator

ンド製, SMCMI0-AI) に入力される。

コイル電流はコイル電流用サーボアンプによって供給される。4つのコイルは並列に結合され、一台のアンプにより電流を供給される。

Fig. 11 Schematic Diagram of Experimental Set-Up

6-2 基礎特性実験 アクチュエータの応答性を調査するために印加電流ステップ応答実験を行った。このとき、MR アクチュエータの入力部は $0.5[\text{rad/s}]$ で回転させた。印加電流のステップ幅を $0.2[\text{A}]$ としたときのステップ応答の実験結果を図 13 に示す。応答速度を時定数 (定常値の 63% に達するまでの時間) で

Fig. 12 Picture of Experimental Set-Up

評価すると、立上り・立下りとも 3~5 ミリ秒で応答している。

MR アクチュエータの静特性を図 14 に示す。最大トルクは $36[\text{N}\cdot\text{m}]$ であり、ほぼ設計通り ($35[\text{N}\cdot\text{m}]$) の最大トルクが得られた。

コイルに電流を印加していない時の発生トルクは、基底トルクと呼ばれ、MR 流体の基底粘度に起因するものである。入力部の回転速度が $0.5[\text{rad/s}]$ のとき、基底トルクは $0.1[\text{N}\cdot\text{m}]$ であった。すなわち、基底トルクと最大トルクのダイナミックレンジは 360 であることがわかる。

以上から、新 MR アクチュエータは、高速応答 (数ミリ秒)、高出力 ($36[\text{N}\cdot\text{m}]$) を実現したと言える。

Fig. 13 Step Responses to Input Current Change

6-3 他のアクチュエータとのトルク慣性比における比較 開発した MR アクチュエータと従来のサーボ系アクチュエータとの比較を表 3 に示す。トルク/慣性比は、出力トルクを回転部の慣性モーメントで割ったもので、この値の大きなアクチュエータは、機械的な遅れが少なく高速な応答が可能である。表 3 より、MR アクチュエータが従来のサーボ系アクチュエータに比べ約 40 倍のトルク/慣性比を持つ優れたアクチュエータであることがわかる。

Table 3 Comparison between MR Actuator and conventional actuators

		MRA	AC Servo	DD Motor
Rated Torque	[N·m]	36	35.1	45
Inertia of Output	[kg·m ²]	3.2×10^{-4}	1.3×10^{-2}	2.6×10^{-2}
Torque/Inertia Ratio	[1/s ²]	1.1×10^5	2.7×10^3	1.7×10^3

AC Servo Sanyo Denki Co., Ltd S20V205K5BXE30:5.5[kW]

DD Motor Yokogawa Electronics Manufacturing Corporation DR1045B

Fig. 14 Static characteristic of New MR Actuator

7. お わ り に

本論文では、以下の事柄について検討を行った。

1. 人間共存型ロボットの安全性を定量的に確保する必要性と、それに対してクラッチ型アクチュエータの一つである MR アクチュエータが有用であることを述べた。
2. 人間共存型ロボットの制御性の要求から、高出力・高速応答 MR アクチュエータの開発を行い、その設計過程を示した。
3. 応答遅れの原因となる渦電流を低減させるために、ケイ素鋼板を積層して製作した C 型ヨークを開発し、MR アクチュエータを構築した。
4. 開発した MR アクチュエータに対して基礎特性試験を行い、最大トルク 36[N·m]、時定数数ミリ秒の高出力・高速応答性能を実現したことを確認した。また、この MR アクチュエータは従来のサーボ系アクチュエータに比べて約 40 倍のトルク/慣性比をもつ。

今後は、このアクチュエータを用いて、安全性を定量的に評価し、機構的に確保できる介護用パワーアシストシステムやトレーニング装置などの開発を行う予定である。

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(展望), 計測と制御, 30 巻, 9 号, (1995), pp.687-691
- (2) 古荘純次, 坂口正道, 魏, 余語, 井上, ER アクチュエータのバーチャルリアリティへの応用, 第 39 回自動制御連合講演会講演論文集, (1996), pp.359-332
- (3) 古荘純次, ER 流体を用いたメカトロニクスシステム(解説), フルードパワーシステム(日本油空圧学会誌), 32 巻, 6 号, (2001), pp.54-59.
- (4) 古荘純次, 坂口正道: ER 流体を用いたニューアクチュエータ, 日本ロボット学会誌, 15 巻, 3 号, (1997), pp.323-325.
- (5) 古荘純次, 小柳健一, 笠, 井上: NEDO プロジェクト「身体機能リハビリ支援システム」での上肢動作訓練支援システムの開発(第 2 報:ER アクチュエータを用いた安全な機構), 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, (2002), 3L31
- (6) Lin, J., Asaoka, H., Sakaguchi, M., Zhang, G. and Furusho, J., Applying Study Connected with Development of New Actuator Using MR Fluid, Proceedings of the 2000 Japan-USA Flexible Automation Conference, (2000), pp.413-416.
- (7) 武居直行, 古荘純次, 坂口正道, 清田友礎, 高速応答 MR 流体アクチュエータに関する研究, 機論, 69-681, C(2003), pp.1342-1349.
- (8) 古荘純次, 山口雄平, 清田友礎, 菊池武士, MR 流体を用いた高性能アクチュエータに関する基礎研究, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, (2002), 3F34.
- (9) 山口雄平, 古荘純次, 木村真也, 小柳, MR アクチュエータの開発およびそのヒューマンインターフェースシステムへの応用(安全性に関する国際・国内基準に基づく研究開発), 日本ロボット学会第 21 回学術講演会予稿集, (2003), 3D36.
- (10) M.C. Bonney and Y.F. Yong Ed., Robot Safety, IFS Publications, (1985).
- (11) 「平成 8 年度先導研究フレンドリーネットワークロボティクス」報告書, 3.3 節 人間共存型ロボティクス技術, (1997), pp.118-186, 財団法人国際ロボット・エフ・エー技術センター.
- (12) 池田, 斎藤, 杉本, 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-, システム制御情報学会論文誌, 13 巻, 12 号, (2000), pp.575-584.
- (13) 山田, 吹田, 今井, 池田, 杉本, 痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出および停止機能を有するロボッ

- トシステム, 日本機械学会論文集 (C) 編, 63 巻, 614 号, (1997), pp.232-237.
- (14) 森田, 鈴木, 川崎, 菅野, 人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御, 日本ロボット学会誌, 16 巻, 1 号, (1998), pp.102-109.
 - (15) Rabinow, J., The Magnetic Fluid Clutch, AIEE Transactions, Vol.67, (1948), pp.1308-1315.
 - (16) Carlson, J., Catanzarite, D. M. and Clerk, K. A. St., Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices, Proceedings of the 5th international conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology, World Scientific, (1995), pp.20-28.
 - (17) <http://www.lord.com>
 - (18) J. David Carlson, Mark R. Jolly, MR fluid, foam and elastomer devices, Mechatronics, Vol.10, (2000), pp.555-569.
 - (19) Jeon, D., Park, C., Park, K., Vibration suppression by controlling an MR damper, Proceedings of the 6th international conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and their applications, (1997), pp.853-860.
 - (20) Muriuki, M. and Clark, W. W., Design issues in magneto-rheological fluid actuators, Proceedings of the SPIE Conference on Passive Damping and Isolation, 3672, (1999), 55-64
 - (21) Ashour, O., Rogers, C. A. and Kordonsky, W., Magneto-rheological fluids: materials, characterization, and devices, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 7-2, (1996), pp.123-130.
 - (22) Bölter, R. and Janocha, H., Design rules for MR fluid actuators in different working modes, Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 3045, (1997), 148-159
 - (23) Choi, S. B., Hong, S. r., Cheong, C. C., Comparison of Field-Controlled Characteristics Between ER and MR Clutches, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 10-8, (1999), pp.615-619.
 - (24) Yalcintas, M., Magneto-rheological Fluid Based Torque Transmission Clutches, Proceedings of The International Offshore and Polar Engineering Conference, 4, (1999), pp.563-569.
 - (25) 斎藤剛, 池田博康, MR アクチュエータの制御系設計用モデル, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, (2001), 1A1-D9.
 - (26) 横田雅行, 白石俊彦, 土屋高志, 森下信, MR 流体を用いたクラッチの特性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, (2001), 1A1-D10.