

Research Reports of the National Institute  
of Industrial Safety, NIIS-RR-2003 ( 2004 )  
UDC 621.039.587:621.865.8:004.383

## 磁気粘性流体を用いたロボット用アクチュエータと 安全インターロックシステム\*

齋藤 剛\*\*, 池田博康\*\*

### A Robot Actuator and a Safety Interlock System Utilizing Magneto-rheological Fluid\*

by Tsuyoshi SAITO\*\* and Hiroyasu IKEDA\*\*

**Abstract:** An innovative robot system, which aims to perform lift assisting for material handling and assembly tasks by its powered motion in response to forces applied by the user directly to its arm or pay load, is expected to be used not only in manufacturing but also in construction, rescue operations, home care for elders and other areas. This robot is termed a “cooperative material-handling (CMH) robot.” There will no doubt be a bigger demand for the CMH robot than for the conventional robots in the future.

Since it is inapplicable to the CMH robot that the torque output of its actuators required to lift loads is restricted to less than the human tolerance, a safety interlock system for actuator torque monitoring is essential to achieve safe utilization of the robot. Furthermore, the safety interlock system must be so constructed that its failure never causes an accident even if it causes false trips. An interlock system that meets the above requirements, however, still has not been developed due to the difficulties in dealing with the changes of torque limit values according to robot motions.

One solution, a torque-monitoring interlock system composed of antagonistic rotary actuators by means of magneto-rheological (MR) fluid and a 3-channel diverse programmable safety controller, is examined in this paper. This interlock system judges the normalcy of the actuator torque output by referring the amount of dead-weight compensation share included among all outputted actuator torques, and then it enables the active motions of the robot to continue. The antagonistic rotary actuators with MR fluid are adopted to materialize the characteristics of the normally closed type of brakes necessary to safely stop operation.

From results of full-scale testing using a robot arm model, it is confirmed that the proposed interlock system executes the objective interlocking sequence under the condition of the above asymmetrical failure characteristics and achieves safety performance sufficiently to ensure the user's safety.

**Keywords;** Risk reduction, Human-robot cooperation, Actuator, Safety interlock system, Asymmetrical failure characteristics, Magneto-rheological fluid, 3-channel diverse programmable safety controller

\* 平成13年6月日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01, 平成13年9月第19回日本ロボット学会学術講演会, 平成14年6月日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02, 平成15年5月日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03において, 本研究の一部について発表した。

\*\* 機械システム安全研究グループ  
Mechanical and System Safety Research Group

## 1. 緒 言

近年、作業空間を人間の行動空間と共有することを特徴とした新しい形態のロボットが登場しつつあり、産業用ばかりでなく非製造業分野の用途においても、その利用が期待されている。特に、一人の人間には負担となる重量物を運搬する作業は、工場内だけでなく屋外現場や福祉施設でも多く見られ、従来の運搬補助機器に代わる汎用的な支援手段として、人間とロボットが協調して1つの物を運搬する作業形態（以下、これを協調運搬作業と呼ぶ）が広く検討されている<sup>1,2,3)</sup>。

ただし、このような協調運搬作業用ロボットの実現には安全性確保が必須であるが、人間との干渉や衝突を恐れて可動範囲や力出力を制限することはロボット本来の機能を損なうこととなり、安全性と機能性の相反する要求に応える機構や制御が必要となっている。この問題に対し、人間との接触を考慮した柔軟機構<sup>4)</sup>や制御<sup>5)</sup>、危険性解析法<sup>6)</sup>等が研究されつつあるが、いずれも緒についたばかりであり、実用に供している例はほとんどない。

簡易なバランサーや水平多関節（SCARA型）ロボットの水平軸等のように重量補償を必要としない特別な場合では、アクチュエータの出力を設計段階から制限しておくことで本質安全化が可能であるが、汎用性の高い垂直多関節ロボットでは、自重を支えつつ十分な力出力機能を発揮しなければならず、人間の挟圧等の危険を本質的に解消できない。このため、アクチュエータのトルク出力を常に監視し、過大な出力発生時には直ちにトルク出力を停止する安全制御系、すなわち、インターロックシステムの導入が不可欠となるが、構成要素の故障や処理の誤りに対してトルク出力が常に停止する非対称な誤り特性<sup>7)</sup>（安全側縮退故障特性<sup>8)</sup>）を有しつつ、ロボットの複雑な動作に対応できる機能的なインターロックは、多くの技術的課題のためにこれまで実現されていなかった。

本研究では、協調運搬作業に用いられる垂直多関節ロボットを対象に、ロボットのトルク出力に含まれる重力補償分に着目したトルク監視インターロックシステムを提案し、その構成と基礎的要件について検討する。さらに、非対称誤り特性の条件でこれを実現するための手段を開発し、提案するインターロックシステムを構築する。協調運搬作業の実規模実験が可能なロボットアームモデルに構築したシステムを適用し、提案する構成法を検証するとともに、対人環境に応じた動作・停止特性等について考察する。

## 2. トルク監視インターロックシステム

### 2.1 協調運搬作業用ロボット

人間と協調運搬作業を行うロボットの概念をFig. 1に示す。本研究で想定する協調運搬作業用ロボットは、把持した運搬対象物の重量負荷を任意の位置で軽減することを目的とし、ロボットアームの手先に取付けられた力センサによって直接あるいは運搬物を介して人間が加える操作力を検出して、操作力があるときは運搬物を移動させるべき方向を抽出・判断して動作し、操作力がないときは現在の位置を保持するよう各関節が制御されるロボットである。ただし、Fig. 1に示すようにロボットの構成は垂直多関節型とする。以下、このようなロボットを「VCロボット（：Vertical articulated type of Cooperative material-handling robot）」と呼ぶ。

VCロボットのダイナミクスは、一般的な垂直多関節ロボットのダイナミクスに手先に加わる操作力を加えたものとして(1)式で表される。

$$\tau = H_{(q)}\ddot{q} + C_{(q,\dot{q})}\dot{q} + B\dot{q} + G_{(q)} - J^T F \quad (1)$$

ここで、 $\tau$ は各関節のトルクを表すベクトル、 $q$ は各関節の角度を表すベクトル、 $F$ は人間の操作力を表すベクトル、 $H_{(q)}$ は慣性行列、 $C_{(q,\dot{q})}$ はコリオリ・遠心力項、 $B\dot{q}$ は摩擦力項、 $J$ はヤコビ行列であり、 $G_{(q)}$ は重力（自重）の影響を表すベクトル（以下、これを重力補償項と呼ぶ）である。ただし、把持している運搬物の質量やモーメントはアームに含めて考えている。

協調運搬作業の実現に適用できる制御則にはいくつかあるが、例えば、運搬物の位置 $x$ と力 $F$ との関係が(2)式を満たすように制御を行うとする。

$$M\Delta(\ddot{x} - a) + D\Delta(\dot{x} - v) = F \quad (2)$$

ただし、 $a$ と $v$ は各々協調運搬作業実行中に実現し

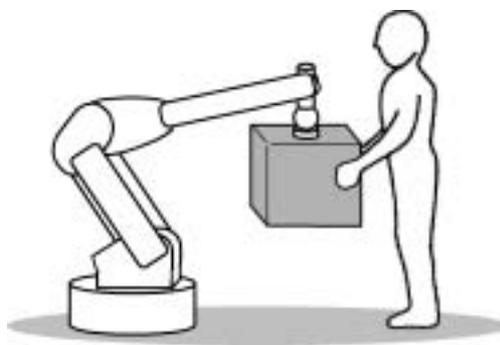


Fig. 1 General concept of cooperative material handling work by robot with human.  
人間とロボットの協調運搬作業

よとする運搬物の加速度と速度を表すベクトル,  $M_d$ と $D_d$ は作業中に人間に感じさせたいダイナミクスである。このとき,  $J$ が正則であるとすれば, 各関節のアクチュエータのトルクは(3)式で表される。

$$\tau = H_{(q)} J^{-1} \{ a - M_d^{-1} D_d (\dot{x} - v) + M_d^{-1} F - J \dot{q} \} - J^T F + C_{(q, \dot{q})} \dot{q} + B \dot{q} + G_{(q)} \quad (3)$$

## 2.2 協調運搬作業の安全条件

協調運搬作業には種々の機械的危険源が想定できるが, そのうち, アームとの衝突による衝撃の危険源と人間を壁等との間に挟む挟圧の危険源は特に重要である<sup>9)</sup>。この2つの危険源に対し, 人間の安全を確保するための条件は, 作業の安全を論理変数 $S \{1, 0\}$ ただし, 安全なとき $S=1$ )で表すと(4)式で表される。

$$S=1: \left( \begin{array}{l} f_r < f_H \\ \dot{x}_r < v_H \end{array} \right) \quad \left. \begin{array}{l} 0: \left( \begin{array}{l} f_r \geq f_H \\ \dot{x}_r \geq v_H \end{array} \right) \end{array} \right\} \quad (4)$$

ここで,  $f_r$ は作業中の人間とロボットの部位(ここでは手先とする)との間で生じる干渉力,  $f_H$ は干渉力 $f_r$ の許容限界値,  $\dot{x}_r$ はロボット各部位のうち最も動作速度の速い部位(手先とする)の速度,  $v_H$ は速度 $\dot{x}_r$ の許容限界値である。

このうち, 速度に関する条件については, 人間がロボットアームを拘束しながら操作できる応答は高々1~2 Hzである<sup>10)</sup>から, アクチュエータの最大回転速度を予め制限し, ロボットの動作を本質的に低速とする方針が採用できる。この方針の採用は, 1) 非対称誤り特性を実現しつつ, 静止状態を含むアナログ的に変化する速度を監視することは一般に大変困難であること, 2) ソフトカバー等の緩衝手段を運搬対象物に装着することは実行上困難であること, 3) 人間が保護具を装着することが必ずしも期待できないこと等の理由からも合理的と考えられる。

これに対し, 力に関する条件を満たすために, アクチュエータの最大トルク出力を人間に危害を及ぼさないレベル<sup>11)</sup>に制限することは, VCロボットに要求される協調運搬作業の特性上, ほとんどの場合採用できない。ただし, (3)式のトルク出力のうち, 重力補償項 $G_{(q)}$ に相当する分はアームの自重と運搬物の重量により自動的に相殺されるから, 人体に損傷を負わせる可能性のあるトルクは, 誤った制御指令に基づいて動作実現(典型的には加減速)のために出力されたトルクのみである。VCロボットの関節数を $n$ 個とすれば, 動作実現のためのトルク $\tilde{\tau}$ は(5)式で表される。

$$\tilde{\tau} = \tau - G_{(q)} = \begin{bmatrix} \tau_1 - G_{(q)1} \\ \vdots \\ \tau_i - G_{(q)i} \\ \vdots \\ \tau_n - G_{(q)n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで,  $\tau_i$ と $G_{(q)i}$ は各々 $\tau$ と $G_{(q)}$ の第 $i$ 番目の要素である。これより, 力の条件を満足する方策として, (6)式に示すように各関節のトルク $\tilde{\tau}_i$ を制限する方策が考えられる。

$$\tau_{Hi} > \tau_i - G_{(q)i} > -\tau_{Hi} \quad (i=1, \dots, n) \quad (6)$$

ここで,  $\tau_{Hi}$ は $f_H$ を満足する第 $i$ 関節のトルクの許容限界値である。低速動作を前提とするならば, トルク $\tilde{\tau}$ を許容レベル以下に抑えることは決して難しくない。しかし, 構造的に決定されているアクチュエータの最大トルク出力をアームの姿勢に応じて変化させることはできないので, ここでは, 姿勢に応じて変化する重力補償項 $G_{(q)}$ を考慮しつつ, アクチュエータのトルク出力(能動的動作)を監視する機能的なインターロックシステムが必要となる。また, VCロボットでは, 新たに落下の危険源を生成しないために, 安全確保のための動力遮断時(あるいは故障時)においても重力補償項 $G_{(q)}$ は継続して出力されなければならない。以上の条件を加え, (6)式のトルクの条件を改めて各関節のアクチュエータのトルク $\tau_i (i=1, \dots, n)$ についてまとめると(7)式で表される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{動作時} \quad : \tau_{Hi} + G_{(q)i} > \tau_i > -\tau_{Hi} + G_{(q)i} \\ \text{動力遮断時} : \tau_i = G_{(q)i} \end{array} \right\} \quad (7)$$

動力遮断時の重力補償は, ノーマルクローズ型(: Normally closed type, 以下NC型)ブレーキの特性でしか達成できず, アクチュエータの構造に要求される。

## 2.3 インターロックの構成要件

一般に, 安全確認のためのインターロックシステムは, 安全確認用センサとセンサ情報に基づいて出力許可の判断を行う論理要素(ANDゲート)から構成され, 各々の要素は非対称誤り特性を有することが条件である<sup>7, 12)</sup>。VCロボットのインターロックシステムは, (7)式に基づいてアームの姿勢に応じたトルクの大きさを判断して出力許可を行うことになるので, センサ情報として関節のトルクと角度を非対称誤りの条件で検知することが必要である。また, 論理要素として通常はウィンドウコンパレータ<sup>12)</sup>等の素子が利用されるが, 関節角度に応じたトルク演算とそれに基づく判断を既存のハードワイヤードな回路<sup>13)</sup>で実現することは一般に大変困難である。

以上をまとめると、VCロボットのインターロックシステムは、現時刻での各関節トルクの検出、現時刻での各関節角度の検出、非線形演算を含む検出値の比較を非対称誤りの条件で実行し、アクチュエータのトルク出力の正常性を判断し、トルクが許容幅にあることを確認できないときはNC型ブレーキの特性で各関節を保持するものとして実現される必要がある。上記4つの機能のうち、本研究では、機能及びを磁気粘性流体<sup>14)</sup>を用いた拮抗回転型アクチュエータユニットによって、機能をVCロボットの関節構造を活用した角度検知方式によって、機能を異種三重化プログラマブル安全コントローラ<sup>15)</sup>によって各々実現可能なことを示す。

### 3. 拮抗回転型MRアクチュエータユニット

#### 3.1 NC型MRクラッチの開発

(4)式の安全条件を満足できるアクチュエータとして、筆者らは、磁気粘性流体(：Magneto-Rheological fluid, 以下、MR流体)を動力伝達媒体とするクラッチ機構を組み込んだアクチュエータを開発してきた<sup>16)</sup>。

MR流体は、合成油等の流体中に直径数 $\mu\text{m}$ 程度の強磁性粒子を分散させた懸濁液である。無磁場の状態では低粘度の液体として振る舞うが、外部より磁場を印加すると分散していた粒子が互いに連結してクラスターと呼ばれる架橋構造を形成し、磁場強度に応じて見掛けの粘度が増加する特性をもつ。前述のアクチュエータは、この特異な流動特性を利用し、受動要素的に過大な力の発生を防止しつつ、回転速度に依存せず電磁界の制御電流(コイル励磁電流)のみに応じたトルク制御が可能である。

しかし、このMRアクチュエータは、コイル励磁電流に比例して伝達トルクが増すノーマルオープン型であるため前述の機能を満足していない。また、MR流体を用いたクラッチ機構に関する従来の研究<sup>17,18,19)</sup>においても、総じてノーマルオープン型のみが対象とされ、NC型MRクラッチについてはこれまで報告されていない。

そこで、機能を満たすアクチュエータを得るため、本研究では、永久磁石と電磁コイルを組み合わせた磁気回路を考案し、Fig. 2に示す構造のNC型MRクラッチを開発した。左右の磁気回路部と出力軸・円盤の外観をPhoto 1に、また、主な諸元をTable 1に各々示す。

開発したNC型MRクラッチは、永久磁石と電磁コイルをヨークによって接続した磁気回路部を出力円盤の両面に互いに対面するよう配置した構造であり、内側・外側の円筒磁極と出力円盤との間にMR流体が

充填されたものである。左右の磁気回路部とタイミングベルトプリーは機械的に結合されており、これらを回転させることで外部から動力が入力される(以下、これらを回転入力部と呼ぶ)。コイルが励磁されていない状態では永久磁石の作る磁場によって充填されたMR流体が固化し、出力円盤にトルクが伝達される。これに対し、コイルが励磁(本機では約0.6Aで励磁)されるとその磁場によって永久磁石の磁場が打ち消され、

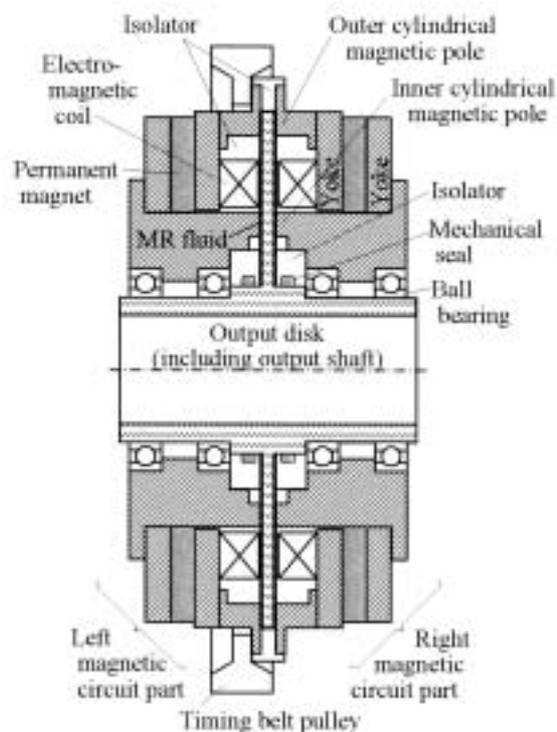


Fig. 2 Schematic structure of normally closed type of MR clutch.  
ノーマルクローズ型MRクラッチの構造

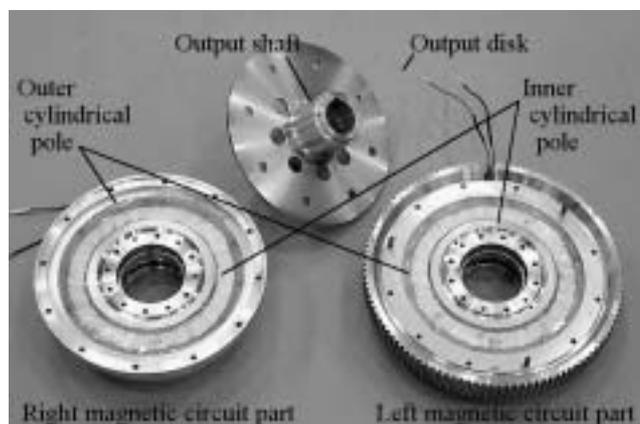


Photo 1 Component parts of normally closed type of MR clutch.  
NC型MRクラッチの構成部品

Table 1 Specification of normally closed type of MR clutch.  
NC型MRクラッチの主な諸元

Magnetic circuit part	
Material	SS400
Outer diameter	248 mm
Inner diameter	80 mm
Length	47 mm
Mass	10.5 kg
Width of magnetic poles	10 mm
Gap between pole and disk	0.3 mm
Permanent magnet part (composed of 3 sector-shaped permanent magnets)	
Material	Barium ferrite
Outer diameter	215 mm
Inner diameter	137 mm
Thickness	10 mm
Electromagnetic coil	
Number of turns	570 Turn
Wire diameter	0.55 mm
Electric resistance	25.3Ω
Output disk (including output shaft)	
Material	SS400
Outer diameter	220 mm
Inner diameter	75 mm
Disk thickness	5 mm
Mass	2.8 kg

MR流体が流動性を回復してクラッチが開放状態となる。なお、この構造では、コイルの磁場が永久磁石の磁場に重畳する向きに励磁電流を流す（本機では負の電流を印加する）ことで、無励磁状態よりもさらに大きなトルクを伝達できる。

また、Fig. 2 において、磁気回路部を出力円盤両面に設けた理由は、出力円盤と磁極との間で生じる磁気吸引力を互いに打ち消し、両者が直接接触することを防ぐためである。一般に磁場の向き（N極/S極の違い）は磁気吸引力に影響しないが、解析の結果、出力円盤を挟んで対面する磁極の極性の違いにより、MR流体にかかる磁場が大きく異なることがわかった。Fig. 3 (a) に示す対面する磁極同士を外側・内側とも同じ極性とした場合（以下、この配置を対称配置と呼ぶ）とFig. 3 (b) に示す対面する磁極同士の極性を逆向きに配置した場合（以下、この配置を非対称配置と呼ぶ）とを比較すると、励磁電流が0.6Aのときは両者とも同様に磁場が打ち消されているが、-0.6Aでは、非対称配置で、より多くの磁束がMR流体に集中しているのがわかる。これは、対称配置の磁気回路が、磁束が出力円盤を半径方向に通過する回路であるため、薄い円盤部で磁気飽和が生じることに起因したものであり、円盤部がより薄くなれば両者の違いはより顕著となる。

磁気回路の動作を検証するため、MR流体が充填されていない状態での励磁電流に対する磁場の変化を測

定した。左右の磁気回路部と出力円盤との間に銅板を挿入し、外側円筒磁極の外周から2.0mm内側の円周上での磁束密度を測定した結果をFig. 4 に示す。また、比較のため、この条件での磁場解析結果を同図に丸印で示す。実測値と解析値はほぼ一致しており、目的とした磁気回路が得られた。特に、対称配置では無励磁状態（0A）付近から飽和の傾向にあるのに対し、非対称配置では励磁電流にほぼ比例して磁束密度が増加し、磁氣的に有利なことが実測値からも確認された。

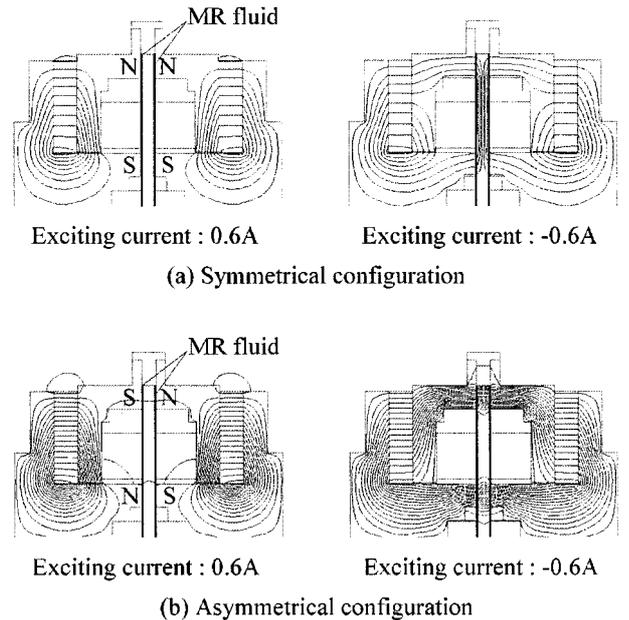


Fig. 3 Difference of magnetic flux density distribution caused by the alignment of magnetic polarity. 磁極の極性配置による磁束密度分布の違い

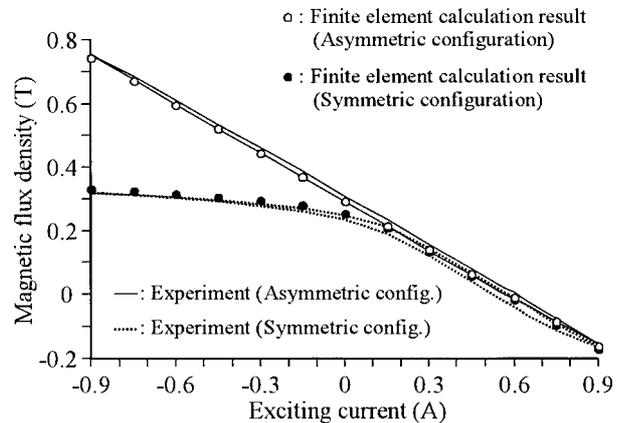


Fig. 4 Relationship between magnetic flux density and exciting current of coils. 励磁電流と磁束密度の関係

次に、回転入力部（磁気回路部）を0.6rad/sの一定速度で回転し（このとき円盤中央部でのずり速度は約 $100\text{s}^{-1}$ となる）、励磁電流を0.9A - 0.9A 0.9Aと変化させ、励磁電流に対する伝達トルクの変化を測定した。1ループ当たり30sで5ループ変化させたときの結果をFig. 5に実線で示す。また、同図には、設計時に算出した伝達トルクの推定値もあわせて示す。非対称配置では推定値よりもトルクが大きく、励磁電流が小さい程その差が広がる傾向にあり、無励磁時に約90Nm、最大で約200Nmの伝達トルクが得られた。この結果は、比較的大きな磁場下では磁極面上にあるMR流体だけでなく、その近傍にある本来磁場のかからない流体からも磁性粒子が引き寄せられ、より強固なクラスタが形成されたためと考えられる。

また、設計では約0.6Aの励磁電流で無磁場の状態になるはずが、対称配置と非対称配置のいずれにおいても予め測定したドラグトルク（約5 Nm）のほぼ倍の伝達トルクが測定された。左右の磁気回路の特性のバラつきやMR流体の残留磁化等の影響により、磁場を完全には打ち消していないためと推察される。

### 3.2 拮抗回転型構造の必要性

開発したNC型MRクラッチでは、所用のNC型の特性ばかりでなく、最大約200Nmの伝達トルクも得られた。しかし、NC型MRクラッチと他の回転型アクチュエータを単に組み合わせたユニットでは、正負方向にトルクを出力する際に回転入力部の回転方向の切り替えが必要となり、0 Nm付近で滑らかなトルク出力を

実現できなかった。特に、前節で述べたように、励磁電流の調節だけではMR流体にかかる磁場を完全に打ち消せず、約11Nmのドラグトルクが不感帯として残った。例として、NC型MRクラッチを電動サーボモータに取り付けた簡易型アクチュエータユニットのトルク制御性をFig. 6に示す。制御方法の詳細は割愛するが、トルク出力を正負方向に切り替える必要のある励磁電流が $0.3\sin(0.8\pi t) + 0.6\text{A}$ の場合には、トルク出力波形に大きなひずみを生じている。

そこで、互いに逆方向に同速度で回転させた2つのNC型MRクラッチの出力軸を接続し、これらの伝達トルクの差を出力として取り出す構成（以下、この構成

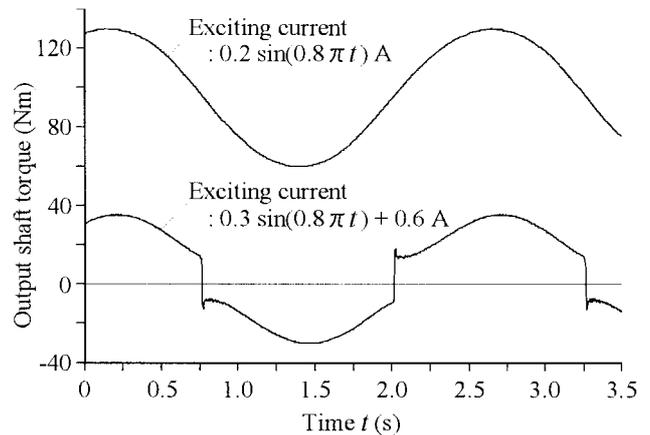


Fig. 6 Torque control performance of simplified actuation unit.  
簡易型アクチュエータユニットのトルク制御性

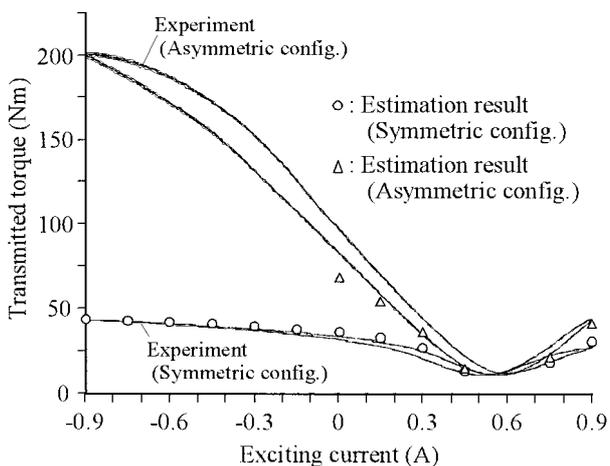


Fig. 5 Hysteresis loop of transmitted torque versus exciting current.  
励磁電流に対する伝達トルクのヒステリシスループ

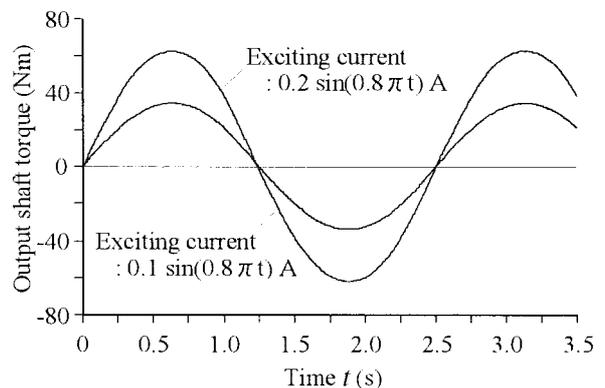


Fig. 7 Torque control performance of antagonistic rotary type of MR actuation unit.  
拮抗回転型MRアクチュエータのトルク制御性

を拮抗回転型と呼ぶ)を採用することとした。これは差動増幅器等で見られるA級push-pull回路を模した構成である。具体的な構造と制御特性は後述するが、この構成によって0 Nm付近においても滑らかなトルク出力が可能になる (Fig. 7 参照)。

### 3.3 拮抗回転型MRアクチュエータの構造

開発した拮抗回転型MRアクチュエータ (以下、単にMRAAと呼ぶ) の外観をPhoto 2 に、その構造をFig. 8 に各々示す。ギヤユニットとタイミングベルトを介して、1つの減速付きサーボモータで2つのNC型MRクラッチを互いに逆方向に同速度で回転させる構成であり、各々のMRクラッチの伝達トルクを励磁電流で変化させ、出力軸のトルクと運動を制御する。また、ギヤユニットには保持用電磁ブレーキが設置されており、モータの動力遮断時には両方のNC型MRクラッチの回転入力部が機械的に固定される。ただし、後述するVCロボットの実験モデルに接続する際は、Photo 2 に示すように、タイミングプリーを用いて出力軸をさらに減速してトルクを増大させている。

MRAAの実験システムの概略をFig. 9 に示す。ロボットモデル駆動時に用いるプリーは外し、出力軸には鉄製のブームを介してロードセル (共和電機製LTZ-200KA) を取り付け、これにより出力軸トルクを計測する。サーボモータ (神鋼電機製BM-1020E3) の回転速度はドライバを介してコントローラにより制御される。なお、特に断らない限り、以下では、正方向にトルク出力するNC型MRクラッチの回転入力部の回転速度をMRAAの回転速度と呼ぶ。MRAAの出力軸に任意

のトルクを発生させるためには、各NC型MRクラッチのコイル励磁電流を適切に制御する必要がある。ここでは、クラッチに常に同じ大きさで互いに逆方向の電流を印加する。すなわち、

$$C_{ex+} = -C_{ex-} \quad (8)$$

ここで、 $C_{ex+}$ 、 $C_{ex-}$ は各々正方向、負方向にトルクを伝達するクラッチの励磁電流である。ただし、Fig. 9 に示すように、この励磁電流は入力された電圧と等しい電流を出力する電流アンプ (高砂製作所製BPS 40-15) によって供給される。ここで、電流アンプの

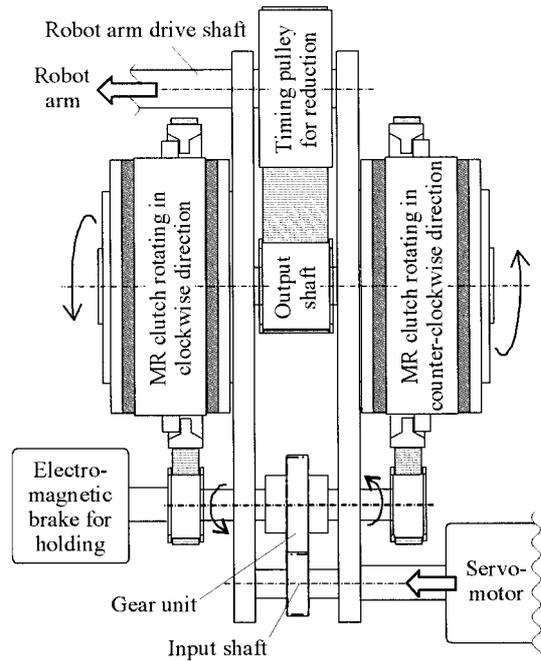


Fig. 8 Schematic structure of MRAA. MRAAの構造

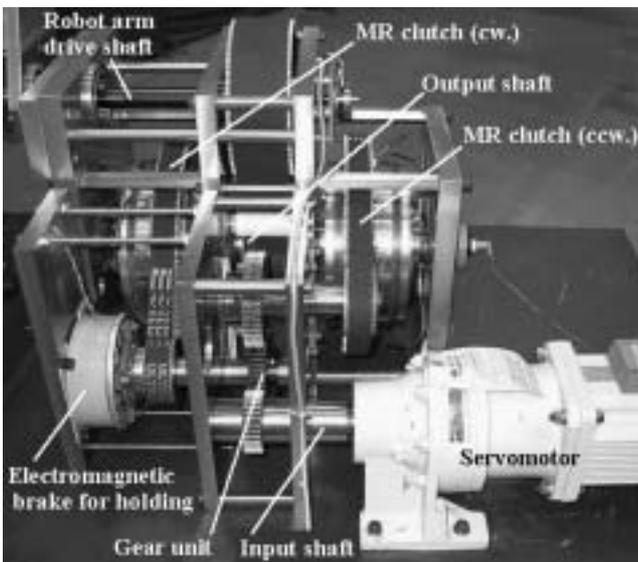


Photo 2 Antagonistic rotary type of MR actuator. 拮抗回転型MRアクチュエータ (MRAA)

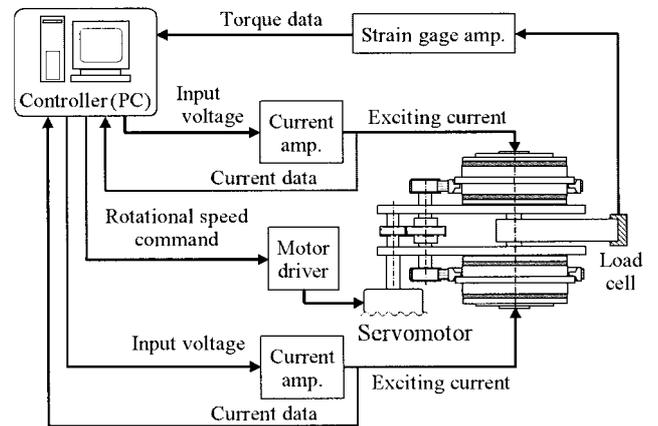


Fig. 9 Configuration of experimental system. 実験システムの構成

入力電圧を $V_{in}$ とすると、 $C_{ex+}$ と $C_{ex-}$ は各々 $C_{ex+} = V_{in}$ 、 $C_{ex-} = -V_{in}$ と表される。以下では、この入力電圧 $V_{in}$ を基準にMRAAの基礎的な制御特性について述べる。

### 3.3 出力軸トルクの静特性

MRAAを0.6rad/sの一定速度で回転した状態で入力電圧 $V_{in}$ を変化させて出力軸トルクの制御性を調べた結果をFig.10に示す。トルクの飽和や増減の反転を生じずに、 $V_{in}$ にほぼ比例したトルクが得られる制御範囲として、 $V_{in}$ の制御幅を $0.5 > V_{in} > -0.5V$ と定めた。これに対応する出力軸トルク $T_o$ は約 $140 > T_o > -140Nm$ である。

次に、MRAAの回転速度を変えながら上記の実験を行い、出力軸トルクの回転速度依存性を調べた。その結果をFig.11に示す。回転速度の影響を受けず、出力軸トルクが $V_{in}$ （等価的に、励磁電流の大きさ）のみで決定されているのが分かる。このため、励磁電流を許容値以下に制限すれば、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、実際に接触する以前に予め保証できる。特に、 $V_{in}$ が0V（すなわち、励磁電流0A）の場合は、両MRクラッチの伝達トルクがつり合い、回転速度に依らず出力軸がフリーな状態となる。

なお、サーボモータ停止時には、両MRクラッチの伝達トルクとも出力軸を保持するように働く。このため、出力軸トルクは単体のNC型MRクラッチの伝達トルクの倍となり、無励磁状態で約180Nmの保持トルクが得られた。

### 3.4 出力軸トルクの動特性

MRAAを1.0rad/sで一定回転させた状態で $V_{in}$ をステップ状に変化させ、出力軸トルクの応答性を測定した。 $V_{in}$ の変化幅を0.1V、0.2V、0.3V、0.5Vとしたときの結果をFig.12に示す。各 $V_{in}$ ともに、約0.25sでほぼ整定値に達しているが、ヒステリシスの影響のため、立ち上がり時の整定値は $V_{in}$ の変化幅に依存する結果となった。

他方、入力電圧 $V_{in}$ に対する出力軸トルク $T_o$ の周波数応答を測定し、 $V_{in}$ から $T_o$ までの伝達関数モデル $R(s)$ として(9)式のモデルを導出した。

$$R(s) = \frac{T_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{316.1}{0.065s + 1} e^{-0.005s} \quad (9)$$

周波数応答の実測値と $R(s)$ に基づくシミュレーション結果とを比較したボード線図をFig.13に示す。ヒステリシスの影響に起因して低周波で大きな位相遅れの

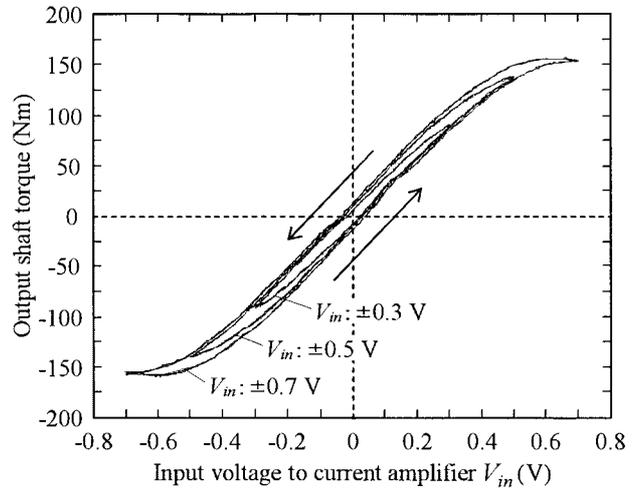


Fig. 10 Hysteresis loop of output shaft torque versus input voltage.  
出力軸トルクのヒステリシスループ

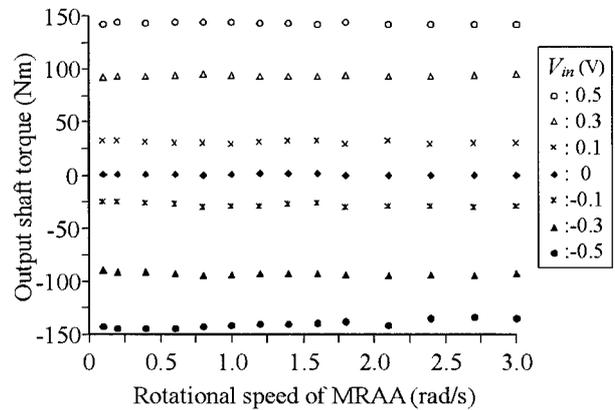


Fig. 11 Relationship between output shaft torque and rotational speed of MRAA.  
MRAAの回転速度と出力軸トルクの関係

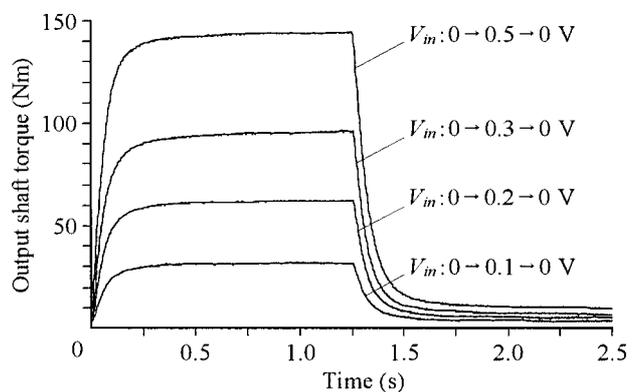


Fig. 12 Step response of output shaft torque.  
出力軸トルクのステップ応答

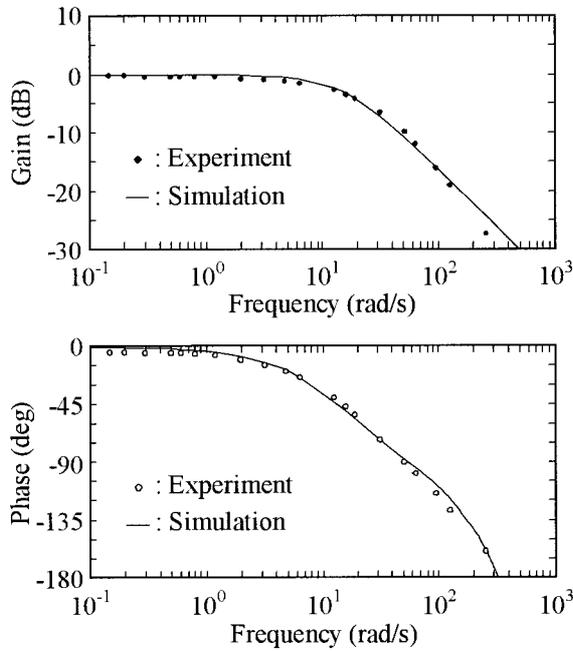


Fig. 13 Comparison between simulation result and open-loop frequency response of output shaft torque.  
周波数応答の実測値とシミュレーション結果との比較

特性が測定された。この部分を除き、(9)式のモデルの計算結果は実測値とほぼ一致した。

### 3.5 制御系の構築

得られた伝達関数モデル $P(s)$ を用いて比例先行型PIコントローラ（以下、I-Pコントローラと呼ぶ）を設計し、MRAAの閉ループトルク制御系を構築した。なお、この制御系は、4.1節に述べる実験用ロボットアームモデルの制御系としても利用される。

制御系設計では、フィードバック制御の導入によってヒステリシスの影響は無視できると仮定し、 $P(s)$ の1次遅れ要素成分のみに着目した。構築するI-Pコントローラのブロック線図をFig.14に示す。ここで、 $T_r$ は目標トルク、 $K_P$ は比例ゲイン、 $K_I$ は積分ゲイン、また、 $A$ 、 $B$ は各々 $P(s)$ の定常ゲインと時定数である。目標トルク $T_r$ から出力軸トルク $T_o$ までの伝達関数は(10)式で与えられる。

$$\frac{T_o(s)}{T_r(s)} = \frac{K_I A}{B s^2 + (1 + K_P A) s + K_I A} \quad (10)$$

系の安定度を比例ゲイン $K_P$ によって、速応性を積分ゲイン $K_I$ によって与えることが設計方針となる。ここでは、 $T_r$ に対する $T_o$ の応答特性が(11)式の2次遅れ系の特性となるように設計し、各制御ゲインを $K_P = 0.001$

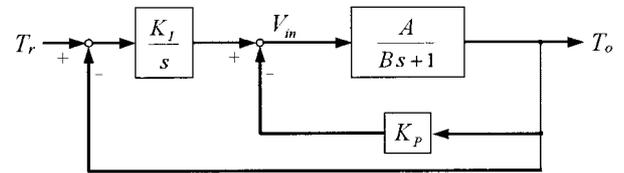


Fig. 14 Block diagram of I-P controller.  
I-Pコントローラのブロック線図

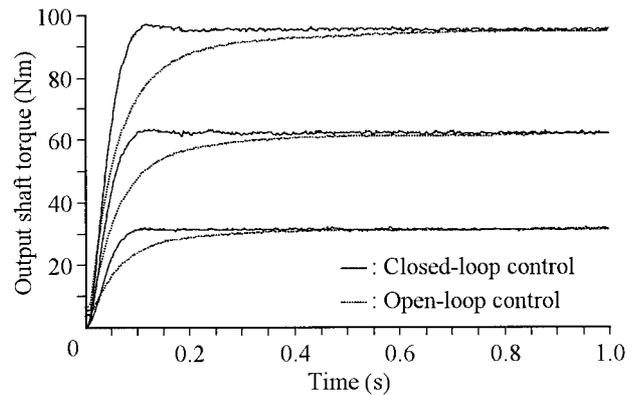


Fig. 15 Step response of closed-loop torque control system with I-P controller.  
閉ループトルク制御系のステップ応答

$V/Nm$ 、 $K_I = 0.033V/(Nm \cdot s)$ と定めた。

$$\frac{T_o(s)}{T_r(s)} = \frac{40^2}{s^2 + 64s + 40^2} \quad (11)$$

Fig.12で示した応答波形の整定値を目標トルクとし、これをステップ状に入力して閉ループトルク制御系の応答を測定した。両者を比較した結果をFig.15に示す。開ループの場合に比べて約半分の応答時間で整定値に達しており、I-Pコントローラの有効性ととも、伝達関数モデルの妥当性を確認できた。

## 4. 協調運搬作業用ロボットの実験モデル

### 4.1 構成と仕様

協調運搬作業を実行する垂直多関節ロボットの実験モデルとして、Photo 3 に示すMRAAによって駆動される2自由度ロボットアーム（以下、実験用アームと呼ぶ）を製作した。実験用アームの構造をFig.16に示す。ここで、 $\tau$ は関節トルク、 $\theta$ は関節角度、 $g$ は重力加速度であり、 $m$ はリンク質量、 $l$ はリンク長で、添字 $sh$ 、 $el$ は各々肩関節、肘関節を表す。また、 $M$ は運搬物の質量、 $F$ はアーム先端に加わる人間の操作力である。重力補償項 $G(q)$ を肘、肩の関節トルク $\tau_{el}$ 、 $\tau_{sh}$ について解くと各々(12)、(13)式で表される。

$$\tau_{el} = (0.5m_{el} + W)g \cdot l_{el} \cdot \cos(\theta_{el} + \theta_{sh}) \quad (12)$$

$$\tau_{sh} = (0.5m_{sh} + m_{el} + W)g \cdot l_{sh} \cdot \cos\theta_{sh} + \tau_{el} \quad (13)$$

5.3節で述べるように、構築するインターロックシステムは、各関節角度に応じて20ms周期で(12),(13)式を演算し、(7)式の監視を実行する。

一方、実験用アームの仕様については、現在の産業用ロボットの一般的な性能を参考とし、実規模での実験が行えるようTable 2 に示す値に決定した。ただし、前章で述べた状態のMRAAの性能に対して、実験ロボットモデルの関節を直接駆動する方式ではトルク出力が不足するため、Photo 2 に示したようにMRAAの出力軸と実験用アームの関節軸との間にタイミングベルト

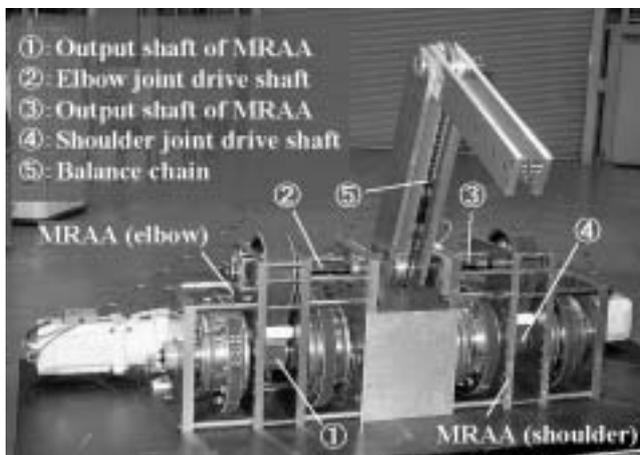


Photo 3 Experimental model of cooperative material handling robot.  
協調運搬作業用ロボットの実験モデル

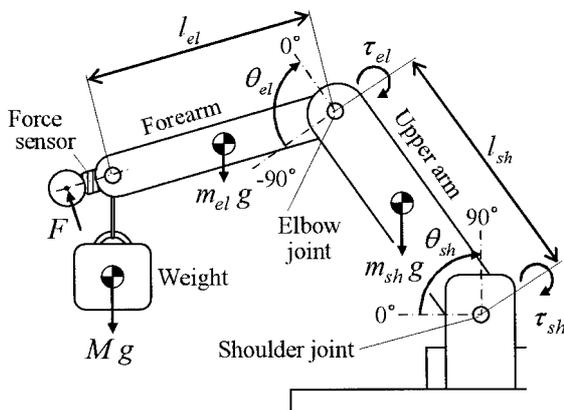


Fig. 16 Schematic structure of experimental robot arm.  
実験用アームの構造

Table 2 Specification of experimental robot arm.  
実験用アームの仕様

Degree of freedom: 2
Payload: 20 kg
Link length: 0.55 m (Primary link), 0.45 m (Secondary link)
Link mass: 12.0 kg (Primary link), 6.0 kg (Secondary link)
Maximum axis torque: 280 Nm
Axis motion range: 0 ~ 2.0 rad (Shoulder), -2.0 ~ 0 rad (Elbow)
Maximum axis speed: 1.0 rad/s

を用いた減速機構を設け、MRAAのトルク出力を2倍に増大させた。

なお、実験用アームでは、肩関節と肘関節がそれぞれMRAAにより駆動される構成であるが、Photo 3 に示すように、肘駆動用MRAAの出力軸（以下、肘駆動軸）が肩駆動用MRAAの出力軸（以下、肩駆動軸）と同軸上に配置されており、肘関節にはバランスチェーンを介して動力が伝達される構造になっている。このため、実験用アームが動作する際、肘駆動軸は、肘関節の角度と肩駆動軸の角度を合わせた分だけ回転する必要がある。後に詳述するが、この構造上の制約は、垂直多関節ロボットの姿勢を非対称誤りの条件で計測するため（機能の実現）に特に重要である。

#### 4.2 協調運搬作業実験

実験用アームを用いた協調運搬作業実験の様子をPhoto 4 に示す。制御手法の詳細については割愛するが、前腕先端に取付けられた力センサによってオペレータが加える操作力を検出し、この力が指定された値となるように前章で述べたトルクI-P制御系をベースとした関節トルク制御系によってMRAAを制御する。これにより、吊り上げる重りに関わらず、任意の位置でオペレータは指定された大きさの力のみを感じ、協調運搬作業が実現される。ただし、動作の検証を容易にするため、実験では、制御・検出対象とする前腕先端の力を肩関節軸に対して接線方向の力のみとし、さらに、実験ロボットモデルの肘関節角度を常にPhoto 4 に示す角度（0rad）に固定した条件で各状態量の測定を行った。

協調運搬作業の実現を確認するため、実験ロボットモデルに約15kgの重りを吊り上げさせる実験を行った。ただし、重りの下に適切な高さの台を設け、アームが水平状態となったときには重りが着床し、かかる荷重が無くなるようにした。実験結果の一例をFig. 17 に示す。アームの自重を含めれば重りを持ち上げる時



Photo 4 Experiment of cooperative material handling using experimental robot arm.  
実験用アームを用いた協調運搬作業実験

(肩関節角度が増加する時)には250N程度の力が必要であるが、このときにオペレータに加わる力は約12Nとなり、目標とした協調運搬による作業負荷軽減が実現できた。また、オペレータが静止した(肩関節角度が一定値に留まっている)状態では荷重の有無に係わらず力が0N近傍に保たれており、良好な力制御機能が実現できている。

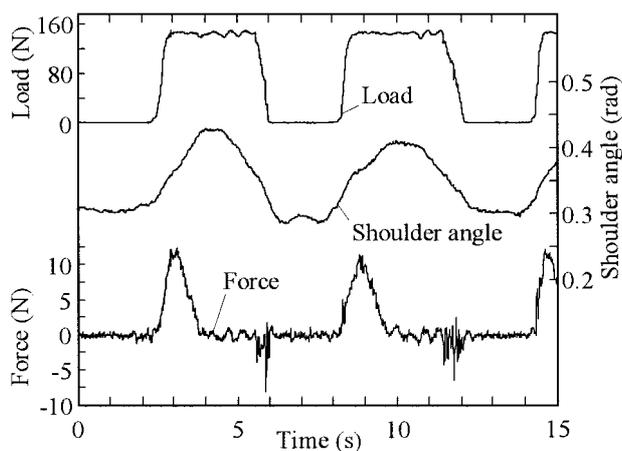


Fig. 17 Example of experimental result of cooperative material handling.  
協調運搬作業実験結果の一例

## 5. インターロックシステムの構築と検証

### 5.1 安全コントローラの導入

すでに述べたように、関節角度に応じたトルク演算

とそれに基づく判断が必要な(7)式の監視を、既存のインターロック素子<sup>13)</sup>で実現することは大変困難である。そこで、(7)式の監視を非対称誤りの条件で実行できる演算処理装置として、異種多重化論理に基づく三重化プログラブル安全コントローラ<sup>15)</sup>(Pilz社製 PSS-3100, 以下、単に安全コントローラと呼ぶ)を用いることとした。

安全コントローラは、3つの独立したCPUが独立に処理を行った後、照合用メモリを介して相互に比較し、全ての結果が一致した場合のみ許可信号を出力する構成である。メモリ・バスライン・クロック回路等も3重化され、各チャンネルで相互にセルフチェックが実行される。このため、同時多重故障によって演算処理が危険側に誤る可能性が著しく低く(公称値では $4 \times 10^{-20}$ 回/h)<sup>16)</sup>、機能的演算処理を非対称誤りの条件で実行できる(機能の実現)。

### 5.2 システムの構成と非対称誤り特性

MRAA及び動作制御用汎用コントローラを含むトルク監視インターロックシステムの概要をFig. 18に示す。図中太線で示す部分が安全コントローラを核とする安全関連系である。

ここでは、MRAAの出力軸トルクとして、MRAAの励磁電流が抵抗を介して安全コントローラに入力され、直接監視される。ただし、励磁電流の入力ラインはMRAAの電流供給ラインを共有する形で結線されており、このため、MRAAのコイルを含む配線途中で断線が生じた場合においても励磁電流と検知信号との一意性は失われない。他方、アームの姿勢として、肘関節角度、肘駆動軸角度及び肩駆動軸角度が各軸の基部に設置されたポテンシオメータを介して入力される。ただし、外部電源からの一定のオフセット電圧の重畳と実験用アームの構造に基づく角度信号の連動を検定することで、断線や軸基部からの脱落といった異常が安全コントローラの処理実行毎にチェックされる。以上の工夫により、信号配線等のハードウェアの障害でインターロックシステムの非対称誤り特性が失われる可能性は排除されている(機能の実現)。

なお、これら信号のアナログ-デジタル変換(AD変換)は、CPUモジュールと同様の3重化構造が採用されたモジュールにより行われる。入力された信号は3つの独立したAD変換回路を介して各々のCPUで処理され、変換結果が一致しなければ、許可信号は出力されない。さらに、モジュール内部のDA変換回路でテスト入力を生成し、AD変換機能を一定周期で検定しており、機能異常時には処理が中断される。

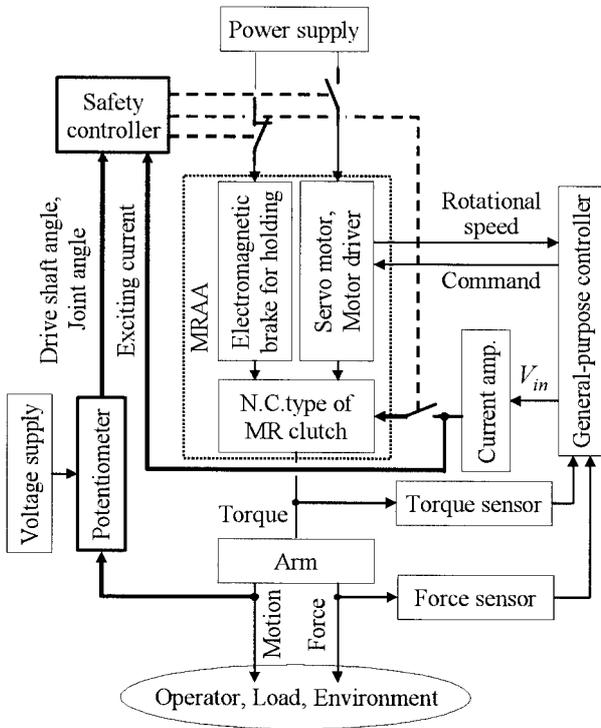


Fig. 18 Schematic configuration of interlock system for torque monitoring.  
トルク監視インターロックシステムの構成

5.3 トルク監視シーケンス

安全コントローラに構築したトルク監視シーケンスの概要をFig. 19に示す。ポテンショメータの角度信号が入力される上段が、各関節の角度変化に応じて重力補償項に相当するトルク値より参照電流値を導出する部分であり、コイル励磁電流値が入力される下段が比較判断を行う部分である。なお、実験では、駆動用サーボモータの電源遮断、保持用ブレーキの作動及びMRAAの励磁電流の遮断の3つを緊急停止シーケンスと設定した。

トルク監視シーケンスでは、まず、関節角度情報の正常性を検定する。3つのポテンショメータの角度信号が変換された段階で(8)式の演算が実行される。

$$\alpha + C_{off} = \beta + \gamma \quad (14)$$

ここで、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ は各々肘駆動軸角度、肩駆動軸角度、肘関節角度の角度信号の変換データ、 $C_{off}$ は角度信号に重畳されたオフセット電圧の変換データに相当する定数である。4.1節で述べたように、実験用アームの構造上の制約より、肘駆動軸が肩駆動軸角度と肘関節角度を合計した角度を必ず回転するので、3つの角度信号のうち、少なくとも2つは常に連動して変化

しなければならない。このため、いずれかのポテンショメータに断線や脱落が生じた場合、あるいは、バランスチェーンの破断等によって肘関節と肘駆動軸の拘束関係が成立しない場合には(14)式が偽となり、緊急停止シーケンスに移行する。また、信号に重畳されるオフセット電圧が変動すると定数 $C_{off}$ との間に差が生じ、同様に緊急停止シーケンスに移行する。なお、実験では、ノイズ等の測定誤差を考慮し、(14)式の検定に $\pm 25mV$ の許容幅を設けている。

正常に関節角度情報が取得できた後、(12)式(13)式を用いて重力補償項に相当する関節トルクが計算される。ただし、ここで用いた安全コントローラが浮動小数点演算機能を有していないことから、演算毎にその結果の有効桁数に配慮するとともに、関節角度の余弦については角度に応じて係数が変化する非線形近似式を用いて計算している。計算方法の詳細については割愛するが、これらの工夫により、動作範囲での真値との相対誤差は0.5%以下に抑えられている。

以上を経て、得られた重力補償項に相当するトルク値から参照電流値を導き、入力された実測電流値との比較を行う。両者の差が設定した許容幅を超える場合は、これを汎用コントローラ又は電流アンプの異常と見なして緊急停止シーケンスに移行する。

なお、用いた安全コントローラの演算速度の限界より、シーケンス処理周期は20msである。

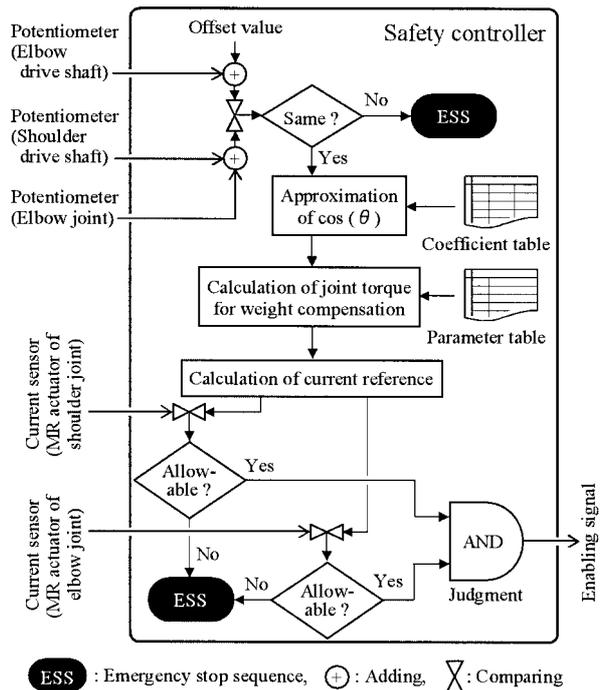


Fig. 19 Torque monitoring sequence established in safety controller.  
安全コントローラのトルク監視シーケンス

## 5.4 シミュレータを用いた性能評価

実験用アームと同じ信号入出力が可能なシミュレータを構成し、これに想定可能な種々の異常を模擬させて、安全コントローラ単体の性能評価を行った。結果の一例として、肘関節を固定したまま肩関節が約1.0 rad/sで回転しているときに、励磁電流値が許容上限値を超えた場合を想定した実験結果をFig. 20に示す。ここでは、模擬電流入力としてシミュレータから安全コントローラに入力された電圧の換算値を、電流の上下限界は測定された肩・肘関節角度より別途計算された値を、許可信号として安全コントローラのリレー接点出力を各々示している。また、電流の許容幅は適正電流値を中心に $\pm 20\text{mA}$ （力の許容幅として約28Nに相当）と設定した。Fig. 20では模擬電流が上限値を超えてから24ms後に許可信号がOFFとなっており、模擬電流の超過を精度良く捉えてほぼ1周期分の遅れで緊急停止が実行できている。

一方、肘のポテンシオメータ出力に相当する模擬角度入力が、周期的に0V（図では関節角度に換算している）に低下した場合の結果をFig. 21に示す。ただし、通常は復帰のために別途リセット操作が必要であるが、実験のため、模擬角度入力が再び(14)式を満たすと許可信号が自動復帰する設定としている。Fig. 21からわかるように、許可信号の遮断と復帰の遅れは約25msであり、励磁電流の検出機能と同様、ほぼ1周

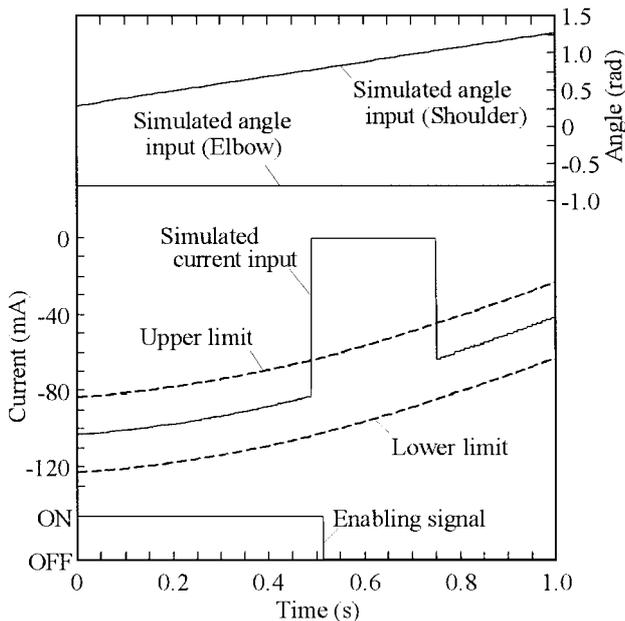


Fig. 20 Performance test result of safety controller in case of excessive exciting current input. 性能評価実験結果（過大な励磁電流が入力された場合）

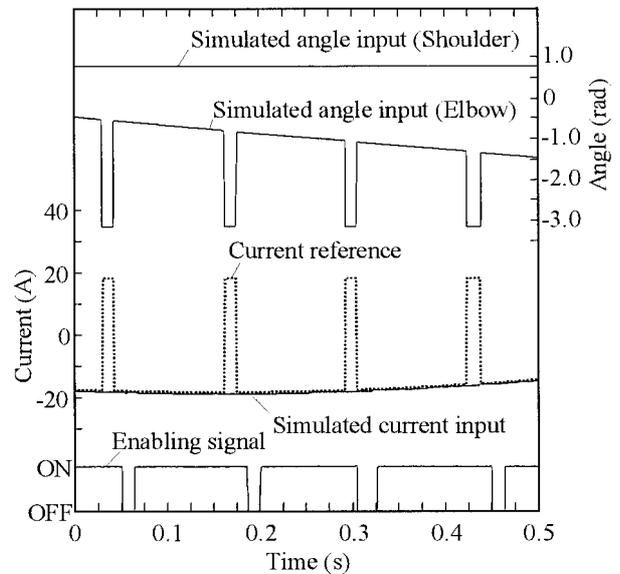


Fig. 21 Performance test result of safety controller in case of failure of potentiometer signal. 性能評価実験結果（ポテンシオメータ信号の異常の場合）

期分の遅れで異常状態の検出が実現されている。

## 5.5 励磁電流許容幅の設定と指標

重力補償項に相当する適正電流値と実測電流値との許容差は、人体に及ぶ干渉力の許容限界値に基づいて設定される。この干渉力の許容限界値とは、ロボットとの接触が傷害のリスクを生じない判断を干渉力で表現したものであり、作業空間を人間の行動空間と共有するロボットが注目されるにつれ、共存のための安全指標の一つとして評価され始めている。例えば、高知能化支援機器の安全性に関するANSI規格<sup>21)</sup>では267N、産業用ロボットに関する安全衛生規則<sup>22, 23)</sup>では200Nという値が成文化の際に各々参照された。ただし、これらは比較的重篤な傷害の回避を対象としたもので、人間とロボットとの接触が頻繁に行われる場合の指標として65~146Nという値も知られている<sup>11)</sup>。

本研究では、この許容限界値の値自体については人間工学の研究分野で別途扱われるものとして特に検討を行わないが、以上の値を参考にして干渉力の許容限界値を $\pm 100\text{N}$ と設定し、また、別途測定した励磁電流に対する実験用アームの力出力の静特性に基づき、これに対応する励磁電流の許容幅を $\pm 0.14\text{A}$ と設定して協調運搬作業実験を行った。

第2章で述べたように、本インターロックシステムの許可に基づくVCロボットでは、加減速動作は許容幅内に収まる励磁電流によって達成されなければならない

い。したがって、現実の許容幅の設定においては、干渉力の許容限界値ばかりでなく、ロボットの機械的定数や動作特性及び各状態量の検出誤差についても考慮に入れる必要がある。

### 5.6 協調運搬作業実験の結果と考察

実験用アームを用いた協調運搬作業実験を行い、構築したインターロックシステムの動作を検証した。結果の一例をFig.22に示す。実験では、通常の作業動作を実行中のオペレータに突発的に急加速動作を行ってもらうよう指示した。実験ロボットモデルはこの動作に追従しきれないので、通常の動作では現れない過大な電流がMRAAに印加され、インターロックシステムによって緊急停止の状態となる。なお、通常の作業ではこのような事態が生じないように予め制御量を抑制する操作が行われるが、実験では無効化している。

Fig.22では、まず、肩角度変化からわかるように大きな動作をしているが、オペレータに加わる力が0N付近に保たれており、力制御機能の効果が確認できるとともに、このときに生じた参照電流値と実測電流値との差が最大でも30mA程度（約20Nmの関節トルクに相当）であり、通常動作で必要となるトルク出力の大半が重力補償分であるという第2章で述べた協調運搬作業の特性が示されている。

他方、励磁電流が下限値に達すると、インターロックシステムの緊急停止操作が実行されている。このときにオペレータに加わった力は、許可信号OFF時で41.9Nであった。同様の実験を繰り返した結果、この値は10N程度のバラつきに収まり、励磁電流によるトルク監視の精度を確認できた。ただし、力出力の静特性に基づいて設定した100Nに比べて半分以下となっており、前述した電流許容幅の設定方法では安全側のマージンが大きめとなる結果となった。また、記録された力のピーク値はオペレータの力加減に依存して変わり、再現性に乏しかった。

一方、作業実行中に肘関節のポテンシオメータ信号を外部より遮断した場合の結果をFig.23に示す。5.4節で示した検証実験結果と同様の迅速な緊急停止シーケンスへの移行が確認できる。

## 6. 結 言

NC型クラッチの特性を有するMR流体を用いた拮抗回転型アクチュエータユニットを開発し、ロボットの関節トルクを監視する安全インターロックシステムへの応用を検討した。人間とロボットが協調して1つの重量物を運搬する作業形態においては、垂直多関節口

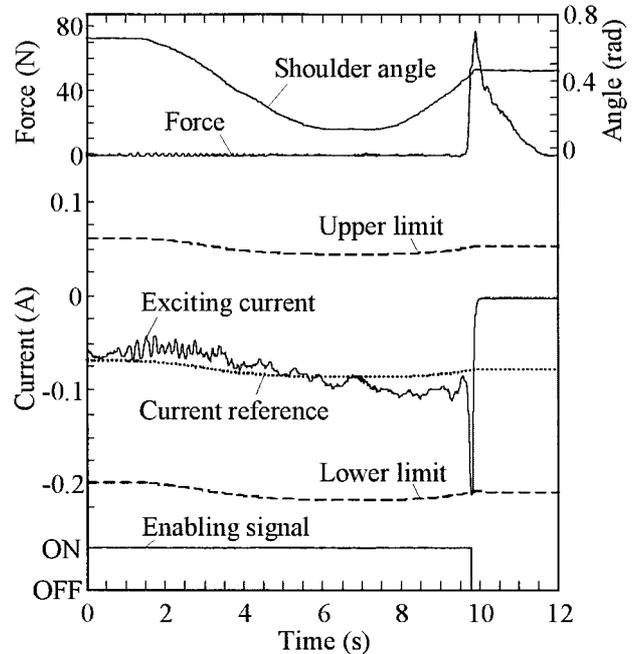


Fig. 22 Evaluation result of interlock function in response to unacceptable exciting current.  
インターロック機能の検証結果  
(励磁電流が許容値を超えた場合)

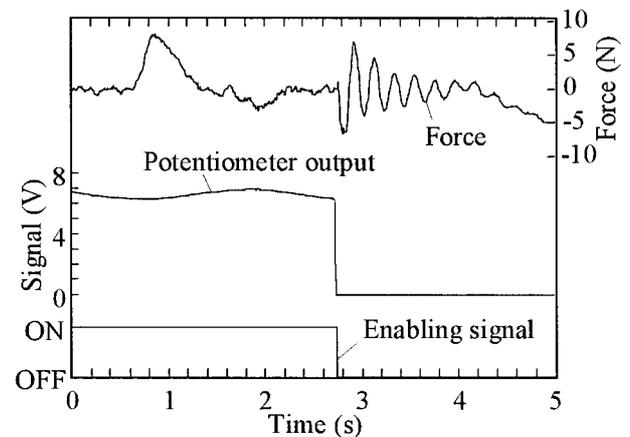


Fig. 23 Evaluation result of interlock function in response to disconnection of potentiometer.  
インターロック機能の検証結果  
(ポテンシオメータが断線した場合)

ロボットのトルク出力に含まれる重力補償項に対応したトルク監視機能が必要である。これを非対称誤りの条件で実現する手段として、開発したアクチュエータユニットをロボットの駆動源に利用し、その励磁電流を異種3重化安全コントローラによって確認するインターロックシステムを構築した。実規模実験の結果から、所用の緊急停止性能が達成され、過大なトルク出力を

防止できることを確認した。

構築したインターロックシステムの検知精度と処理速度の向上は、安全性能の余裕を増すと同時に、励磁電流の許容幅を広げてアクチュエータの能動的動作を拡張する。このため、本インターロックシステムは、ロボットの安全性と機能性を高い次元で両立可能であり、この意味で、ロボットの標準的な安全方策となり得る可能性をもつといえる。

ただし、今回開発したアクチュエータユニットは、その機能検証のために単純な構造を採用したため、スケールメリット等については十分検討されていない。今後、更なる小型化・軽量化・高効率化を目的として、多板構造や円筒構造等の導入を検討していきたい。

#### 参考文献

- 1) 池浦良淳, 小沢治明, 水谷一樹: 人間とロボットによる協調運搬動作の実験的評価, 機講論, 98-4 (1998) 2A11.3(1)(2)
- 2) 池浦良淳: 人間とロボットによる協調作業, システム/制御/情報, 44-12 (2000) pp.682-687.
- 3) 林原靖男, 園田幸伸, 田窪朋仁, 他: 人とロボットによる長尺物の協調運搬, 機論, 67-653, C (2001) pp.162-169.
- 4) 例えば, 森田寿郎, 菅野重樹: ソフトロボティクス - メカニカルソフトネスとコンプライアンス調節 -, 日本ロボット学会誌, 17-6 (1999) pp.790-794.
- 5) 例えば, J.Heinzmann, A.Zelinsky: A safe-control paradigm for human-robot interaction, Journal of Intelligent and robotic systems, 25 (1999) pp.295-310.
- 6) 例えば, 生田幸士, 野方誠, 石井英毅: 福祉ロボットの制御に関する危険性評価法の提案, 日本ロボット学会誌, 19-1 (2001) pp.81-90.
- 7) 齋藤剛, 池田博康, 杉本旭: 非対称誤り特性を有するガス検知システムの基礎的要件と構成法, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-No.27 (2002) pp.63-76.
- 8) ISO12100, Safety of machinery - Basic concepts, general principles for design - Part 2: Technical principles (2003) p.12.
- 9) ISO14121, Safety of machinery - Principles of risk assessment - (1999) pp.11-15.
- 10) 齋藤之男: 福祉ロボット, 日本ロボット学会誌, 21-4 (2003) pp.6-11.
- 11) 山田陽滋, 吹田和嗣, 池田博康, 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, 63-612, C (1997) pp.2814-2819.

- 12) 蓬原弘一, 向殿政男: 窓特性をもつフェイルセーフ論理素子を使ったインタロックシステムの一構成法, 電学論, 109-9, C (1989) pp.676-683.
- 13) 桑川壮一, 杉本旭, 深谷潔, 他: 安全制御のための基本要素, 産業安全研究所特別研究報告, RIIS-SRR-90 (1990) pp.46-49.
- 14) J.D.Carlson, D.M.Catanzarite, K.A.St.Clair: Commercial magneto-rheological fluid devices, Proc. 5th int. conf. Electro-rheological fluids, Magneto-rheological suspensions and associated technology (1995) pp.20-28.
- 15) 池田博康: コンピュータを利用した安全制御技術の実態調査, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-No.19 (1999) pp.5-8.
- 16) T.Saito, N.Sugimoto, H.Ikeda: Nonlinear robot control system including controllable passive element using magnetorheological suspension, Proc. 7th int. conf. new actuators (2000) pp.445-448.
- 17) D.Lampe, A.Thess, C.Dotzauer: MRF clutch design - considerations and performance -, Proc. 6th int. conf. new actuators (1998) pp.449-453.
- 18) 武居直行, 古荘純次, 坂口正道, 他: MR流体アクチュエータの開発とその制御実験, 機論, 67-633, C (2001) pp.3825-3830.
- 19) 藤田豊久, 島田邦雄: MR流体の特性とその応用, 日本応用磁気学会誌, 27-3 (2003) pp.91-100.
- 20) Guide to Programmable Safety Systems, Pilz Automation Technology, Vol. 2, Ed. 1 (2002) p.39.
- 21) BSR/T15.1 (Draft standard for trial use for intelligent assist devices - Personnel Safety Requirements), Robotic industrial association (2002) p.4.
- 22) 労働安全衛生規則第36条第31号.
- 23) 労働省告示第51号 (1979)

(平成16年1月13日受理)