

## 2. 人間共存型ロボットの安全なトルク制御のための磁気粘性流体を用いた ノーマルクローズ型クラッチの開発\*

齋藤 剛\*\*, 池田博康\*\*

## 2. Development of a Normally Closed Type of Clutch Using Magnetorheological Suspension for Safe Torque Control of Human-Collaborative Robot\*

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

**Abstract;** Recently, a new type robot sharing work space with persons has been under research and development for use in carrying heavy objects not only in factories but also at outdoor working sites and in welfare facilities. Since the general purpose of this robot is to substitute for conventional carriage supporting equipment, a working mode in which a human and a robot carry a heavy object together in a coordinated manner is being widely studied.

Since it is impossible to control the torque output of the load-lifting actuator not to exceed the human tolerance, especially those of vertical articulated type, a safety mechanism that always monitors the actuator torque output and stop the torque output immediately in case of excessive output occurrence is essential to ensure the safe use of robots. In addition, the robot must be capable of maintaining its posture with no supply of energy in emergency stop operation or failure occurrence.

In order to realize the safety mechanism capable of fulfilling the above requirements, a normally closed type clutch using magnetorheological suspension and rare-earth permanent magnets is proposed in this study as a safety device for human-collaborative robots. This magnetorheological clutch functions as a variable torque limiter and a holding brake in robot joint axes. Aiming to achieve both good controllable characteristics and safety performance of the clutch, the magnetic poles of internal permanent magnets are faced asymmetrically for the improvement of magnetic field generation and the multi-sheet rotor structure is adopted for the increase in the amount of torque output.

An experimental result shows that the normally closed type of magnetorheological clutch can transmit driving torque up to approx. 120 Nm by an application of exciting current of -1.0 A and output holding torque of approx. 40 Nm which have enough applicability to the practical robot application.

**Keywords;** Human-Collaborative Robot, Risk reduction, Magnetorheological suspension, Actuator, Safe torque control, Asymmetrical failure characteristics, Emergency stop function.

---

\* 平成17年12月The 36th International Symposium on Robotics (ISR2005), 平成18年6月The 10th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions(ERMR2006)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 System Safety Research Group

## 1. はじめに

作業空間を人の行動空間と共有することを特徴としたロボットは人間共存型ロボット<sup>1)</sup>と呼ばれ、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、一人で重量物を運搬する又はこれに類する作業は、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一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。Fig. 1参照）が広く検討されている<sup>2, 3, 4)</sup>。ただし、このような協調運搬作業に用いるロボットには使用に伴うリスク低減が必須であるが、通常の力や速度の制御機能では危険側故障だけは決して生じないというフェールセーフ性が保証できず、このため、実際の適用事例は極めて限られているのが現状である。

そこで、フェールセーフな対人安全性確保のアプローチの一つとして、関節に組み込んだ電磁摩擦クラッチ<sup>5)</sup>や駆動ベルト・プーリー間の滑り<sup>6)</sup>といった機械要素の受動的な特性を利用して、過大な力出力（関節トルク出力）を制限する方策が試みられている。これらは、負荷側と駆動側の間にトルクリミッタを設けて過負荷に対し電動機を保護する発想と全く同じ考え方で、電動機に代えて人や環境を保護しようとする方策である。特に、この方策のための力出力制限機構に電気粘性流体や磁気粘性流体といった機能性流体の応用が提案されており<sup>7, 8)</sup>、可制御な粘性特性を利用してアナログ的な可変トルクリミット機能が実現できる上に、力制御性能や位置決め性能の向上も同時に図れることが報告されている<sup>9)</sup>。

しかし、機能性流体クラッチ機構のロボットへの適用に関する従来の研究では、ロボットの構造を水平多関節ロボット（SCARA型ロボット）に類する構造、すなわち、ロボットの関節軸にアームの自重を支えることが要求されない場合に限定されてきた。これは、従来、機能性流体クラッチ機構を、電源遮断により電界・磁界の印加が停止すると機械的連結が開放するノーマルオープン型でしか構成できなかったことに依拠する。水平多関節ロボットでは、断線などの典型的な単一障害発生時ならびに非常停止時に、機械的連結が開放されて関節軸がフリーとなることは安全状態である。しかし、より汎用性が高く一般的な垂直多関節ロボットでは、電源遮断時にロボットは非制御下に置かれ、自重を保持するための保持力（保持トルク）が必要になる。従来の機能性流体クラッチ機構はこの要求に応じておらず、関節のトルクが突然失われ、自重によるアームの落下などの新たな危険源を生じる恐れがあった。

そこで、本研究では、人と協調して運搬作業を行う垂直多関節ロボットに適用可能なノーマルクローズ型

の磁気粘性流体クラッチ（：Normally Closed type of Magnetorheological suspension Clutch. 以下、単にNC型MRクラッチと記す）を開発する。本稿では、第2章で、人と協調運搬作業を行う垂直多関節ロボット（：Vertical Articulated type of Cooperative Material-handling Robot. 以下、単にVACMロボットと記す）のリスク低減戦略を一般化して論じ、それを達成するための手段としてNC型MRクラッチの必要性を説明する。次に、第3章で、本研究で開発するNC型MRクラッチの設計コンセプトを示す。ここでは、電源遮断時の磁場発生のために希土類永久磁石を利用するが、さらに、実際の垂直多関節ロボットに適用できる大きさの保持トルクを得る方策として、磁極の非対称配置と内部ロータの多板化を提案する。最後に、第4章で、シミュレーション結果と実測結果との比較から、開発したNC型MRクラッチが所用の特性を実現していることを示すと共に、保護装置としての安全性能を評価する。

## 2. 協調運搬作業を行う垂直多関節ロボットのリスク低減戦略

水平多関節ロボットのように、自重を構造的に補償しているロボットの場合、設計段階から関節トルク出力を制限し、小容量のアクチュエータを採用するという本質安全設計方策によって、押しつぶしの危険源を除去可能である。しかし、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いため、小容量のアクチュエータを採用することは実際のでない。本章では、協調運搬作業に用いる垂直多関節ロボットのリスク低減戦略を一般化して論じ、その中で、これを達成するために不可欠な保護装置としてNC型MRクラッチの必要性を説明する。

### 2.1 VACMロボットの定義

本研究ではVACMロボットを次のように定義する。

#### VACMロボット：

任意の位置で把持した運搬対象物の重量を軽減することを目的とするロボット。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利用者が加える操作力を検出し、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・判断して各関節が制御され、また、操作力がないときは現在の位置を保持するように各関節が制御される。

この定義はこれまでに報告されたVACMロボットに関する研究を俯瞰して一般化したもので、米国ロボット工業会が作成した知能化支援機器（：Intelligent Assist

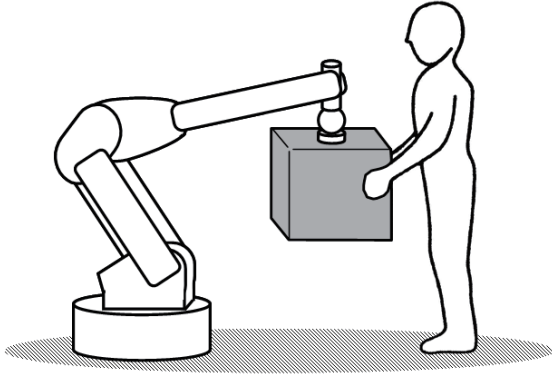


Fig. 1 General concept of the vertical articulated type of cooperative material-handling robot. 協調運搬作業用垂直多関節ロボットの概念

Devices) に関するANSI規格草案<sup>10)</sup>でも同様の定義がなされている。本研究が想定するVACMロボットの概念をFig. 1に示す。

## 2.2 危険源となるトルク成分

第2.1節の定義に従うVACM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 $x$ と人間の操作力 $F$ とが(2)式の関係を満たすよう制御するインピーダンス制御則を仮定する。

$$M_d(\ddot{x}-a) + D_d(\dot{x}-v) = F \quad (2)$$

ただし、 $a$ と $v$ は各々協調運搬作業実行中に実現しようとする運搬物の目標加速度と目標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。この場合、 $J$ が正則であるとするれば、各関節のアクチュエータのトルクは(3)式に従って制御されることになる。

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

文献<sup>11)</sup>が指摘するように、(3)式のトルク出力のうち、重力補償項 $G_{(q)}$ 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トルク成分、すなわち、人体に損傷を負わせる可能性のないトルク成分であることに注意が必要である。したがって、ロボットの関節数を $n$ 個とすれば、トルク出力のうち押しつぶしの危険源となるトルク成分は(4)式で表される。

$$\tilde{\tau} = \tau - G_{(q)} = \begin{bmatrix} \tau_1 - G_{(q)1} \\ \vdots \\ \tau_i - G_{(q)i} \\ \vdots \\ \tau_n - G_{(q)n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $\tau_i$ と $G_{(q)i}$ は各々 $\tau$ と $G_{(q)}$ の第 $i$ 番目関節の要素である。

## 2.3 リスク低減達成の条件

人体に危害を及ぼす恐れがないとできる接触力の値が $f_H$ 、これに対応する関節トルクが $\tau_H$ 、 $\tau_H$ の第 $i$ 番目関節の要素が $\tau_{Hi}$ で表せるとする。ここで、押しつぶしの危険源となるトルク成分 $\tilde{\tau}$ の第 $i$ 番目関節の要素 $\tilde{\tau}_i$ が(5)式を満たすとき、VACMロボットの押しつぶしの危険源に起因するリスクは適切に低減されたこととなる。

$$-\tau_{Hi} < \tilde{\tau}_i < \tau_{Hi} \quad (i=1, \dots, n) \quad (5)$$

(4)式の関係より、各関節トルク $\tau_i$ の条件として書き換えると(6)式となる。

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

$f_H$ を具体的に決定する際の指標として、筆者らは既に人体痛覚耐性限界<sup>12)</sup>を提案しており、例えば、上腕では約57Nとなる<sup>13)</sup>。このような値を参照して(6)式の制約を課しても、協調運搬作業の作業目的に照らして考えれば、作業中の関節トルクはそのほとんどが $G_{(q)i}$ によって占められるので、実際には、VACMロボットの作業性はほとんど低下しないと言える。換言すれば、重力補償項として自動的に相殺されることのない制御動作実現のため(典型的には加減速のため)のトルクを許容限界値以下に抑えることが、VACMロボットのリスク低減をその有用性を犠牲にせず達成する安全設計戦略である。

なお、上述の議論から、一般に $G_{(q)i} > \tau_{Hi}$ であり、し

たがって、 $\tau_i$ は常に $\tau_i > 0$ であることを、次の第2.4節の議論のために改めて注記しておく。

## 2.4 NC型MRクラッチの必要性

構造的に重力補償項を支える水平多関節ロボットの場合には $G_{(q)}$ を考慮する必要がなく、(6)式の $\tau_i$ は $G_{(q)i} = 0$ として(5)式の $\tilde{\tau}_i$ と等しくなり、この値はロボットの姿勢によって変化しない。したがって、従来のトルクリミッタに類する受動的なトルク制限機構を用いることで(6)式を満足することができ、必ずしも機構のトルク制限値が可制御である必要はない。

しかし、VACMロボットでは、姿勢によって著しく変化する重力補償項 $G_{(q)}$ に応じてトルク制限機構の制限値が調節されなければならない。第3.1節で述べるように、磁気粘性流体（: Magnetorheological suspension. 以下、単にMR流体）は磁界を印加すると見掛けの粘度が増加する特性をもち、このため、MR流体を動力伝達媒体とするクラッチ（以下、単にMRクラッチ）は印加磁界を制御することで機構がすべりを生じる負荷トルクの大きさを変化させることができる。この特性から、本研究ではMRクラッチをVACMロボットの保護装置として利用する。

ところで、産業用ロボットの安全要求事項を規定する国際標準ISO 10218:2006<sup>14)</sup>によれば、リスク低減のための保護装置はISO 13849-1:1997<sup>15)</sup>に記述されるカテゴリ3に相当する以下の要求を満足する必要がある。

- 1) 単一の不具合（障害）では保護装置の機能（安全機能）は損なわれない、
- 2) 合理的に予見可能な単一不具合は、すべて安全機能の次の要求時又はその前に検出されなければならない、
- 3) 単一不具合発生時に安全機能が実行され、かつ、検出された不具合が修復されるまでは安全状態が維持されなければならない。

MRクラッチにおいては典型的な単一不具合として、磁界を所要の値に調節できなくなり、例えば、磁界発生源として電磁コイルを利用している場合に励磁電流を供給する配線が断線するなど、最悪、無磁界状態となる状況は当然予見可能であるが、この状況でもリスク低減達成の条件である(6)式が維持されなければならない、このことは、MRクラッチがノーマルクローズ型（: Normally closed type, 以下NC型）の特性を有する場合でしか達成できないことを意味する（ $\tau_i$ は常に $\tau_i > 0$ であることに注意されたい）。

仮に、MRクラッチがノーマルクローズ型で構成され、無磁界状態で十分な大きさの保持トルクを伝達可能であるとすると、単一不具合発生時にVACMロボットの関

節のアクチュエータを停止させ、その保持トルクを伝達してアームの自重を支えられる。このとき、VACMロボットのダイナミクスは、保持トルクによって一切の能動的動作が阻害され、アームに加わるトルクとアームの自重とが強制的に平衡しているという意味で(7)式で表される。

$$\tau_i = G_{(q)i} \quad (7)$$

これは明らかに(6)式を満足する。

## 3. NC型MRクラッチの設計コンセプト

MR流体は、合成油等の流体中に直径が数 $\mu\text{m}$ 程の強磁性粒子を分散させた懸濁液であり、無磁場の状態では低粘度の液体として振る舞うが、外部より磁界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と呼ばれる架橋構造を形成し、磁場強度に応じた降伏値が誘起する特性をもち、MRクラッチは、このMR流体の特異な流動特性を利用したもので、磁界を変化させることでアナログ的に伝達トルクを制御できる機構である。ロボット関節などをMRクラッチを介して動力を伝達する構造とすると、仮に駆動側アクチュエータ（典型的にはサーボモータ）が暴走して過大な動力が加えられても、磁界に応じた大きさのトルク以上に対してはMRクラッチ自らが滑りを生じて、その伝達（外界への出力）を防止する。

本章では、開発したNC型MRクラッチの構造を示すとともに、実際の垂直多関節ロボットに適用できるオーダーの保持トルクを得る方策として、磁極の非対称配置及び内部ロータの多板化を検討する。

### 3.1 提案するNC型MRクラッチの構造

本研究で開発したNC型MRクラッチの構造をFig. 2に、その構成部品をPhoto 1に各々示す。MRクラッチをNC型とするために、本研究では希土類永久磁石が作る磁界を利用する。すなわち、希土類永久磁石（サマリウムコバルト系： $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ）と電磁コイル（直径0.5mm, 600ターン）がヨークを介して各々結合されて磁気回路を構成しており、出力軸に連結された磁性体製のロータ（直径158mm, 厚さ2mm）を間に挟んで各々が対向して配置された構造であり、磁気回路の内外の円筒磁極とロータとの間隙（0.5mm）にMR流体が充填されている。ロータ左右の磁気回路は、タイミングベルトプーリによって機械的に連結されており、これを回転させることで外部から動力が入力される。磁気回路部が回転すると、コイルが非励磁の状態のとき、永久磁石で生成された磁界によって充填されたMR流体が固化し、磁界の大きさ

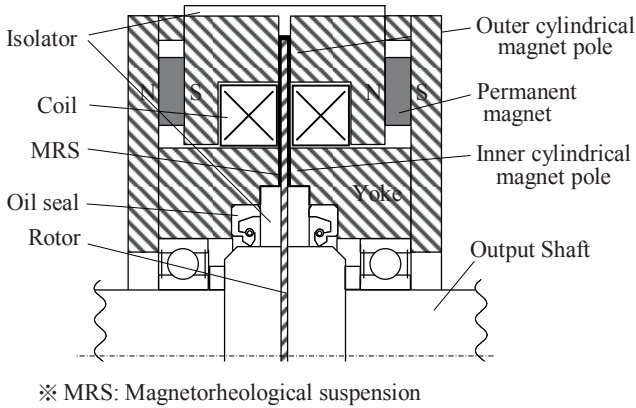


Fig. 2 Schematic structure of NC type of MR clutch.  
NC型MRクラッチの構造

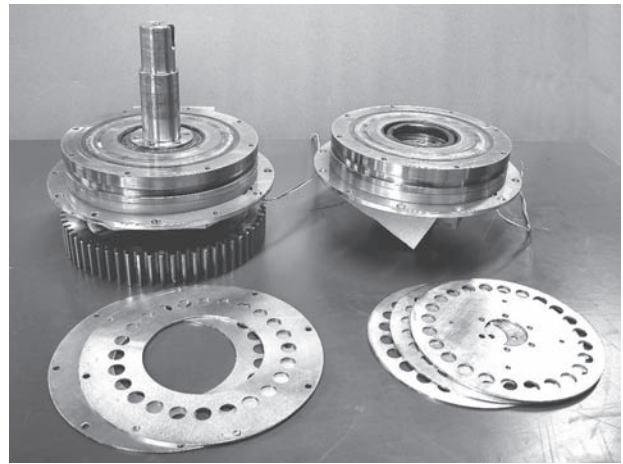


Photo 1 Component parts of NC type of MR clutch.  
NC型MRクラッチの構成部品

に応じたトルクがロータに伝達される。他方、コイルは励磁状態で永久磁石の磁界を打ち消す向きに磁界を発生する。このため、コイル励磁時にはMR流体は無磁界状態におかれて流動し、クラッチが解放される。なお、この構造では、コイルに逆電流を印加して励磁すると、コイルの磁界が永久磁石の磁界に重畳し、無励磁状態よりもさらに大きなトルクを伝達することも可能である。

### 3.2 磁極配置の違いによる磁気飽和の回避

Fig. 2に示した磁気回路配置を採用した理由は、磁性体であるロータと磁極との間に生じる磁気吸引力を表裏で互いに打ち消すことで、特にスペーサなどを用いずとも、ロータと磁極とが接触することを防止できることにある。一般に、磁界の方向は磁気吸引力の大きさには影響しない。しかし、NC型MRクラッチの設計段階で、対抗する磁極のN, Sの違いにより、MR流体を通る磁束の集中が大きく異なることが判明した。

有限要素法シミュレーションによる磁束密度解析結果

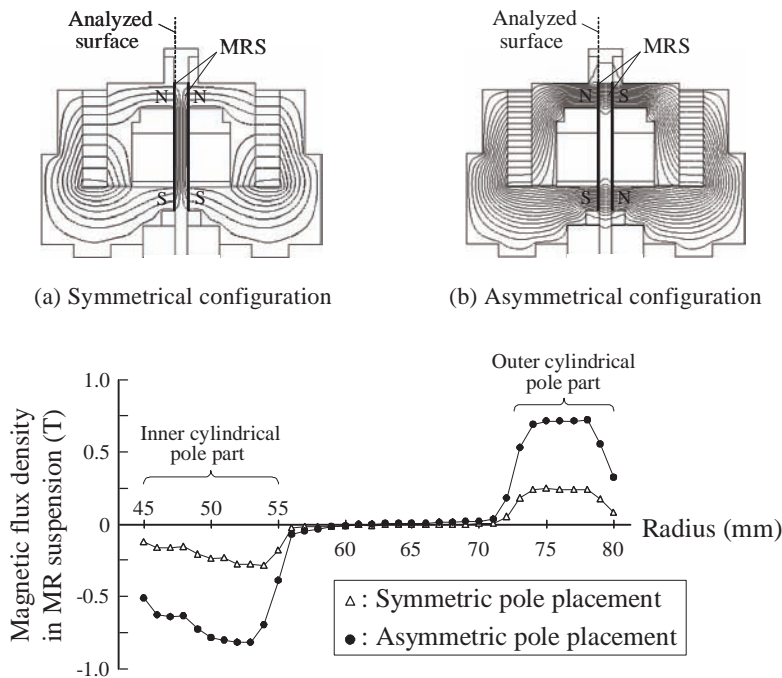


Fig. 3 Simulation result of magnetic flux density caused by different magnetic circuit layouts.  
シミュレーションによる磁束密度解析結果

をFig. 3に示す。Fig. 3において、横軸は解析の対象とした面での出力軸中心からの半径距離であり、内側磁極である半径45~55mm及び外側磁極である半径72.5~80mmの部分に充填されたMR流体に磁場が印加されることが分かる。なお、本研究ではMR流体としてLORD Cooperation製MRF-132DGを使用しており、その磁化特性を考慮している。

Fig. 3に示すように、左右の磁気回路の対向する磁極のNとSを対称に配置した場合（これを対称配置と呼ぶ）に比べ、対向する磁極を逆向きに配置した場合（これを非対称配置と呼ぶ）の方が、MR流体中を通る磁束密度が大きくなっていることが分かる。これは、Fig. 3 (a) (b)に示すように、対称配置の場合には磁束がロータのラジアル方向に流れ、その結果、ロータ内で磁気飽和が生じるのに対して、非対称配置では、ロータのラジアル方向には磁束が流れず、磁気飽和を生じることなくロータ表裏にのみを磁束が通過するためである。ロータの厚さを増すことにより対称配置でも磁気飽和は生じないようにすることは可能であるが、これはMRクラッチの重量増加に直結し、好ましくない。

### 3.3 ロータの多板化による保持トルクの向上

希土類永久磁石により生成される保持トルクをできる限り大きくするためには、ロータの表面積を増やすことが重要である。しかし、単純にロータの直径を増やすことは、ロータの強度確保と機械工作精度確保の観点から好ましくない。そこで、Fig. 4に示すように、同一形状のロータを3枚設ける多板化を検討した。この場合、磁路長の増加に伴って磁気抵抗が増え、MR流体を通る磁束が減少するものの、MR流体に接するロータの表面積が増え、結果的に保持トルクが増加する。

3枚のロータが各々0.5mmの間隙を保つよう2枚のリング状の磁性体製スペーサを挟んで配置された場合（Fig. 4 (b) 参照）で保持トルクを有限要素法により推定

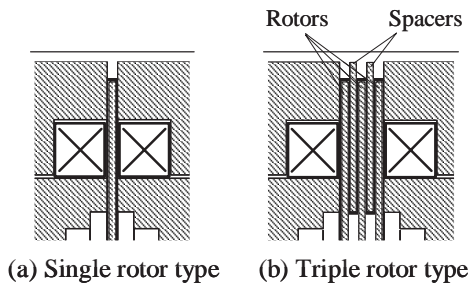


Fig. 4 Changes in magnetic circuit structure caused by the number of rotors  
ロータの多板化による磁気回路構造の変化

し、ロータが1枚の場合と比較した。ここで、本研究で使用したMRF-132DGのデータシート上のせん断応力特性から、磁場 $H$  (kA/m) の影響で誘起する半径当たりのMR流体のせん断応力 (Pa) は (8) 式で近似した。

$$\tau_{MR} = 0.172 H^3 - 0.709 H^2 + 0.361 H \quad (8)$$

したがって、NC型MRクラッチの保持トルク $T$  (Nm) は (9) 式で推定される。

$$T = \sum_{n=1}^{2n} \left( \int_{r_i}^{r_o} \tau_{MR} 2\pi r^2 dr \right) \quad (9)$$

ここで、 $r_i$  は内側磁極の有効内縁半径 (m)、 $r_o$  は外側磁極の有効外縁半径 (m)、 $n$  はロータ枚数である。(9) 式より得られた保持トルクの比較結果をFig. 5に示す。ロータを3枚と多板化したことで、無励磁時 (0A時) のトルクが1枚の場合に比べ約1.5倍になると期待できる。ただし、磁気回路特性の変化のために、ロータ1枚の場合には伝達トルクがほぼ0となっていた0.8A印加時に約2.0Nm程のドラゲトルクが生じることが予想された。

## 4. 実験結果と考察

第3章で述べた設計コンセプトに従い、NC型MRクラッチを試作した。本章では、これを用いた実験結果とシミュレーション結果との比較から、提案するNC型MRクラッチが所用の特性を実現していることを示すと共に、保護装置としての安全性能を評価する。

### 4.1 トルク伝達特性の評価

ロータが1枚の場合と3枚の場合について、第3.2節の推定結果で得られたトルク伝達特性が実現されているか

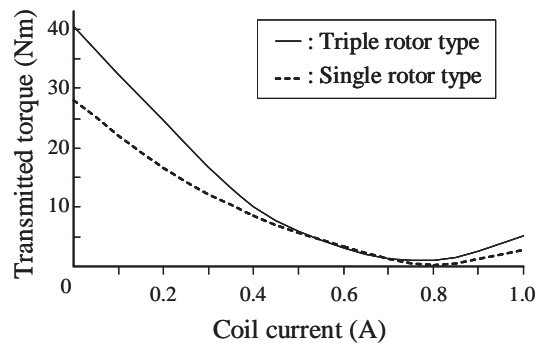


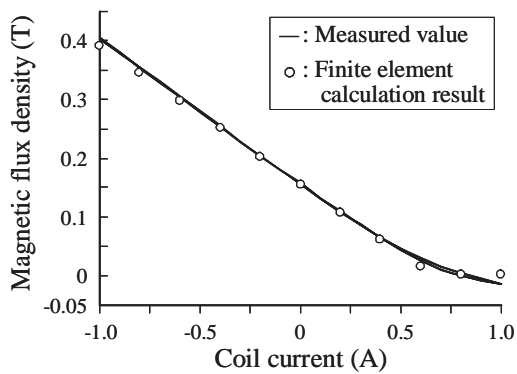
Fig. 5 Estimation results of transmitted torque.  
伝達トルクの推定値の比較

を調べるために、まず、MR流体が充填されていない状態での外側磁極の内縁より1.0mmの位置での磁場をテスラメータで測定し、励磁電流に対する磁場の変化をトルク推定時の解析結果と比較した。その結果をFig. 6に示す。両者とも励磁電流が1.0Aの場合を除き、シミュレーションによる解析値と実測値はほぼ一致しており、所要の磁気特性が試作機に実現されていることが確認できた。

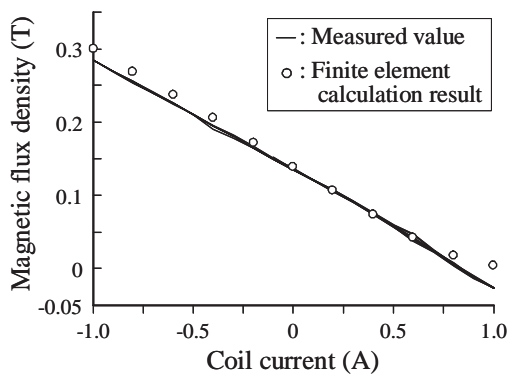
次いで、Fig. 5で推定された保持トルクが実際に発生することを検証するため、Photo 2に示す実験装置を構築して伝達トルクを測定した。測定では、所定の励磁電流を印加した状態でシャフトを回転させて、磁気回路を連結するタイミングベルトプーリに取り付けた長さ200mmの鉄棒を介して、軸が滑り始める瞬間のトルク

をロードセルにより測定した。軸が滑り始める瞬間のトルクは、NC型MRクラッチの保持トルク能力を示すものであり、ピーク値として記録した。ただし、実験では、シャフトを電流印加後10min経過後に回転させた。この理由については後に詳述する。

得られた測定結果をFig. 7に示す。解析結果と同じく、ロータ3枚の場合にはロータ1枚の場合に対し約1.5倍の保持トルクが無励磁時に得られた。また、励磁電流が約0.8Aのときに伝達トルクが最小となり、クラッチが開放された状態が実現されることも確認された。しかし、0.8A印加時を除き、Fig. 5で示した推定値に比べ、各電流でのトルクは全体的にやや小さい値に留まった。なお、Fig. 7では、励磁電流を0Aから-1.0Aまで変化させた場合の伝達トルクも併せて示している。-1.0A印加時



(a) Single rotor type



(b) Triple rotor type

Fig. 6 Comparison of magnetic flux density between estimated and measured value.

磁束密度の推定値と実測値の比較

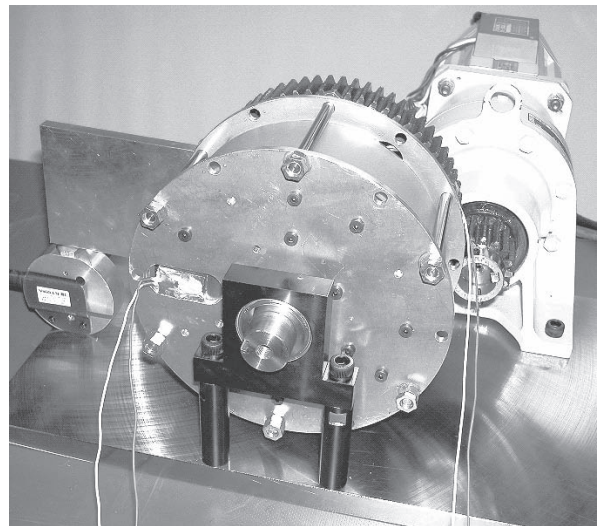


Photo 2 Experimental system to measure transmitted torque.

伝達トルク測定システムの外観

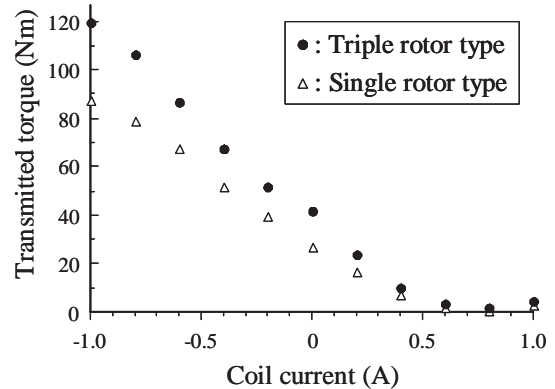


Fig. 7 Relationship between exciting current of coil and measured transmitted torque.

励磁電流に対する伝達トルクの測定結果

では、無励磁時の約3倍のトルクが伝達可能である。なお、本研究では、NC型MRクラッチは常温下で使用されることを意図しており、実験では温度依存性は考慮していない。

#### 4.2 NC型MRクラッチの安全要件と評価

NC型MRクラッチは、ロボット関節軸に内蔵され、可変トルクリミッタと確実な姿勢保持を担う保持ブレーキとして機能する保護装置である。このため、次の3つの特性が要求される。

- ①励磁電流によって指定されたトルクリミット値は、励磁電流が一定である限り、変動してはならない。
- ②同様に、無励磁時に永久磁石により生成される保持トルクは、コイルが再励磁されるまで変動してはならない。
- ③励磁電流遮断時には、保持トルクが速やかに発生しなければならない。

以上の要件を満足していることを検証するため、まず、要件①、②について、一定励磁電流下でのトルクの時間変化を測定した結果をFig. 8に示す。MR流体の特性としてよく知られるクラスタの二次的成長のために、励磁電流の変化後10min経過するまではトルクが徐々に増加している。このため、トルクリミッタとして機能させる

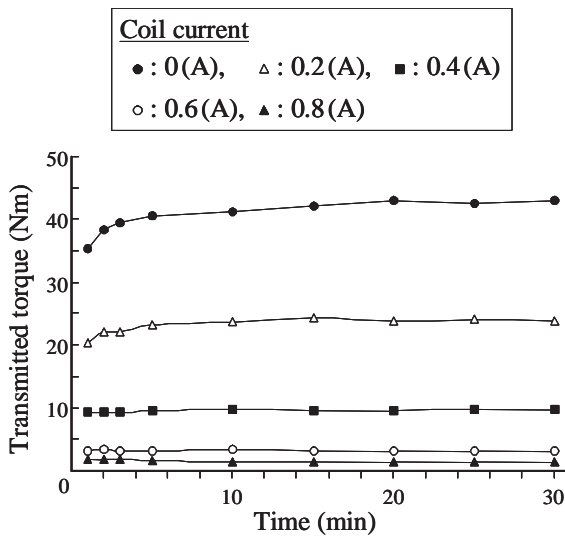


Fig. 8 Transmitted torque change with passage of time under constant exciting currents.  
一定励磁電流下でのトルクの時間変化

場合は、10min経過後の静定値 (Fig. 7に示したトルク値)をリミット値として見なさなければならない。他方、アームの保持を目的とする場合は、静定前の低いトルク値(約80%)を考慮する必要がある。

最後に要件③について、トルク増加時(クラッチ連結時)の応答特性を調べるため、Photo 2に示した測定システムにおいて、シャフトをACサーボモータにより30rpmで回転させた状態で励磁電流を0とし、そのときの伝達トルクのステップ応答を測定した。これは、同時に、緊急時の非常停止で供給電力が遮断されたときの保持トルク発生を検証していることになる。このような場合の最悪条件での応答として、励磁電流を0.8Aから0Aに変化したときの結果をFig. 9に示す。励磁電流の応答波形より、電流アンプの遅れは概ね時定数18msの一次遅れ系として近似できることが分かる。伝達トルクはこの励磁電流の変化にほとんど遅れなく追従した。印加する励磁電流を変えても、一次的なトルク静定時間はほぼ同じで約0.15sであった。

なお、トルク減少時(クラッチ解放時)の応答特性は、上述したMR流体のクラスタの二次成長の影響を受けないため、トルク増加時の特性に比べてかなり優れたものであった。

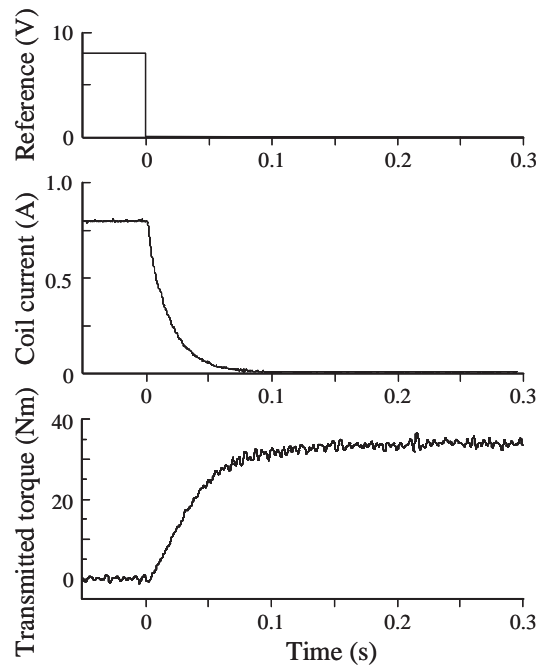


Fig. 9 Step response of transmitted torque (holding torque).  
伝達トルク(保持トルク)のステップ応答



## 5. おわりに

本研究では、人間共存型ロボットの関節軸に必須の安全要求事項を明らかにし、それを満足する方策の1つとして、永久磁石を利用したNC構造のMR流体クラッチを開発し、その評価を行った。

人間と協調して運搬作業を行う垂直多関節ロボットでは、関節軸のトルク出力の制限と非常停止時の姿勢保持という2つの安全機能が必要である。NC型MRクラッチは、この安全要求事項を達成する方策として大変有効であり、さらに本研究では、対向磁極の非対称配置によるMR流体にかかる磁場の効率的な生成とロータの多板化によるトルク出力の向上によって、実際のロボットに適用可能な大きさへ保持トルクの増大が図れることを確認した。

今回開発したNC型MRクラッチは、基本性能検証を第一の目的としたため、実装を配慮した設計が尽くされているとは必ずしも言えず、さらなる小型・軽量化の余地が残されている。また、今後、耐久性についても十分な検証が必要である。しかし、原理的にロボット関節軸に内蔵することが可能な機構であることから、従来リスク低減のために関節軸駆動用アクチュエータの選択に制約を受けていた人間共存型ロボットの設計自由度を大いに拡大する方策として、安全かつ汎用性の高い人間共存型ロボットの実現に寄与するものと期待される。

## 参考文献

- 1) 人間共存型ロボット研究専門委員会：人間共存ロボットシステムにおける技術的課題，日本ロボット学会誌，16-9(1998) pp.288-294.
- 2) 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) pp.2A11.3(1)-(2).
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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，機講論，95-17A(1995) pp.287-290.
- 6) 坂本武志，平田亮吉，松熊研司，他：高齢者・障害者用食事搬送自動ロボットシステム 小型軽量マニピュレータの開発，日本ロボット学会学術講演会予稿集，17th-2(1999) pp.501-502.
- 7) 坂口正道，ZHANG G.，古荘純次：両方向回転形ERアクチュエータのモデリングと運動制御，機論，66-645，C(2000) pp.1551-1558.
- 8) 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.
- 9) T.Saito, N.Sugimoto, H.Ikeda : online robot control system including controllable passive element using magnetorheological suspension, Proc. 7th int. conf. new actuators (2000) pp.445-448.
- 10) BSR/T15.1 (Draft standard for trial use for intelligent assist devices – Personnel Safety Requirements), Robotic industrial association (2002) p.4.
- 11) J.Heinzmann, A.Zelinsky : A safe-control paradigm for human-robot interaction, Journal of Intelligent and robotic systems, 25 (1999) pp.295-310.
- 12) 池田博康，齋藤剛：人間協調型ロボットの本質的安全設計手法と安全設計指標の提案，産業安全研究所特別研究報告，NIIS-SRR-No.33(2005) pp.5-14.
- 13) 齋藤剛，池田博康：人間協調型ロボットの機械的刺激に対する人体痛覚体制限界の測定，産業安全研究所特別研究報告，NIIS-SRR-No.33(2005) pp.15-24.
- 14) ISO10218-1. Robots for industrial environments – Safety requirements – Part 1 : Robot (2006).
- 15) ISO13849-1. Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1 : General principles for design (1997).

(平成20年11月18日受理)