

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：57101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05016

研究課題名（和文）囲い込み制御理論の進展と安全接触可能な高応答多リンクシステムの開発と応用

研究課題名（英文）Advances in an enclosing control theory and development and application of high-response multi-link systems capable of safe contact

研究代表者

南山 靖博（Minamiyama, Yasuhiro）

久留米工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：20549688

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：市販されているMRブレーキは種類が少なく大型であり、また生産が中止されたため、独自に小型軽量及び組み立て段階でMR流体が漏れない構造で、各実験装置に適したMRブレーキを設計・作製を行った。これまでのMRブレーキの設計を見直し、無駄を省き、最後にねじで締め付けると全体が締まる構造にしたところMR流体の漏れが無くなり、従来のMRブレーキよりも大きなブレーキトルクを発生させることが出来た。アームの持ち上げ装置・拮抗揺動型MRアクチュエータ・空気圧ゴム人工筋・揺動空気圧アクチュエータそれぞれの実験装置において追従制御を行い、良好な結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで人間と機械との接触は危険とされ、工場等では人間と機械とを隔てることで安全を確保してきた。しかし、人間共存型ロボットは人間と接触して仕事をするのが作業の一つとなるため、接触を禁止することはできない。

本研究ではMR流体を利用したブレーキ機構を積極的に活用した新たな駆動システムを開発し、精密な力制御による高剛性（力強い動作）と低剛性（柔らかい動作）との切り換えを可能にし、人間との安全な接触が実現できるロボットアームシステムを構築し、実験により制御性能に関しても問題ないことを確認した。本ロボットアームをスタンダードとして確立させることで、人間共存型ロボットの普及を促進させることが可能

研究成果の概要（英文）：Since there are only a few types of MR brakes on the market and they are large, and production has been discontinued, we independently designed and manufactured an MR brake that is small, lightweight, and has a structure that prevents MR fluid from leaking during the assembly stage, and is suitable for each experimental device. We reviewed the design of previous MR brakes, eliminated waste, and created a structure that tightens the entire thing when the screw is tightened at the end, eliminating leakage of MR fluid and allowing us to generate greater brake torque than conventional MR brakes. Follow-up control was performed on the experimental equipment for the arm lifting device, antagonistic rotary MR actuator, pneumatic rubber artificial muscle, and rotary pneumatic actuator, and good results were obtained.

研究分野：安全工学

キーワード：受動制御 MR流体 MRブレーキ 安全接触 本質的安全設計方策 空気圧ゴム人工筋

1. 研究開始当初の背景

総人口に占める 65 歳以上人口の割合を示す「高齢化率」が先進国を中心に急速に進展しており、日本では 29.1% (2021 年)、世界全体でも 9.6% (2021 年) となり、介護ニーズが世界的に増大している。老々介護などの問題が浮上している中、介護機器やサービスロボットなどのように人間と同じ空間で人間と接触して仕事や生活を支援する人間共存型ロボットの研究・開発が進められており、その実用化や産業化が期待されている。そこでは、高速・高精度・大出力の追求ではなく、より安全な駆動システムが重要とされており、人間共存型ロボットを広く世の中に普及させるためには、誤って(故障しても)人に対して過大な力が出力されないことが要求される。

また、機械安全 ISO12100 における本質的安全設計方策は、機械による挟まれ等を生ずる危険源に対して、力や運動エネルギー等の物理的条件が人間に危害を生じないこと(本質安全)を設計の段階で保証しようとするものであり、機械安全の体系化が進んでいる。

2. 研究の目的

本研究では申請者らが提案している「**囲い込み制御**」理論を進展させることによって、精密な力制御による高剛性(力強い動作)と低剛性(柔らかい動作)との切り換えを可能にし、人間との安全な接触が実現できるロボットアームのシステムを構築することである。そのために、MR 流体 (Magneto-rheological fluid) を利用したブレーキ機構を積極的に活用した、新たな駆動システムを開発する。

「**囲い込み制御**」とは

- a) 本質的安全設計方策に基づく制御
 - b) 安全確認の原理を取り入れた制御
 - c) ブレーキ操作による連続的な制御
- これらの制御を取り入れた
極めて安全性の高い制御手法

3. 研究の方法

令和 2 年度：作製した MR ブレーキの性能評価と空気圧システムへの適用 (MR ブレーキの作製)

囲い込み制御の性能向上にはブレーキ機構の高性能化が必要である。そこでこれまでの経験を基に、強磁性体と非磁性体とを効率的に組み合わせることによって磁束密度を MR 流体に集中させる MR ブレーキを作製する(図 1)。強磁性体には軽量金属有機構造体磁性材料を使用し、非磁性体には樹脂や場合によっては空洞とすることで、軽量化を図る。強磁性体と非磁性体の配置については、磁気解析ソフトを購入し 3 次元的に解析を行う。

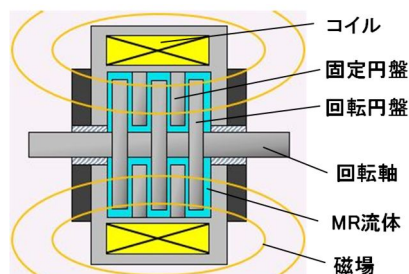


図 1 MR ブレーキ

(空気圧システムへの適用)

空気圧システムは人間との親和性を担う柔らかい動作が可能であるため、人間との安全な接触を確保しやすいシステムであると考えられている。しかし、空気圧システムはコンプライアンス性に優れている反面、

- ・ 空気の圧縮性による低剛性により、圧力の応答に無視できない遅れがあること。
- ・ 摺動摩擦や空気の温度変化によるプラントの特性変動などの非線形要素により、正確な数学モデルを得ることが難しいこと。

など問題があり、サーボ制御のみで高剛性や高精度を求めるのは限界があると考えられる。そこで、空気圧システムに作製した MR ブレーキを取り付け、囲い込み制御を適用することにより、人間との親和性を保ちつつ制御性能を向上させ、囲い込み制御の有効性を検証する。

まず、揺動型空気圧アクチュエータに MR ブレーキを取り付け、囲い込み制御により正弦軌道追従制御を行い、それを 2 軸に拡張し、軌道追従制御を行う。次に、空気圧ゴム人工筋への適用

では、通常 2 リンクマニピュレータは 2 対 4 本の人工筋が必要のところを、2 つの MR ブレーキを各軸に取り付け駆動軸を切り換えることにより、1 対 2 本の人工筋で 2 リンクを制御するマニピュレータを提案する(図 2)。また、連続位置決め制御および円軌道追従制御により、本装置の有効性を検証する。

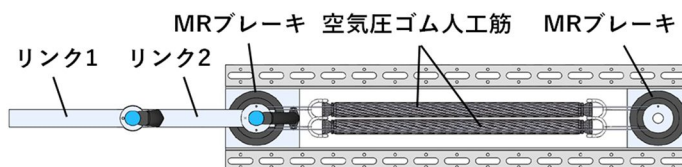


図 2 1 対(2 本)の空気圧ゴム人工筋で 2 軸を制御可能な人工筋 2 リンクマニピュレータ

令和3年度：MRブレーキによるトルク伝達装置

MRブレーキをトルク伝達装置として利用することで、人間が接触しても滑って大きな力が伝わらない安全な装置を提案する。図3のように2つのMRブレーキを上下に重ね、それぞれの軸をモータとかさ歯車によって異なる方向に回転させる。上下のMRブレーキの磁界を電磁石で調整することによってMRブレーキの外側の回転を制御させる。また、2リンクへの拡張も行う。

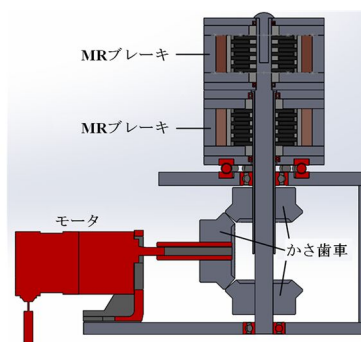


図3 2つのMRブレーキによるトルク伝達で水平方向に回転

令和4, 5年度：安全制御理論の進展

本実験装置が安全な接触を本質的に実現可能かどうか安全検証実験を行う。MRブレーキは許容されたトルク以上ではすべるため、トルクリミッタの役割も果たす。検証結果を基に、安全制御理論をさらに進展させ、将来的に人間との接触を必要とするロボットアームのスタンダードとして確立し、介護機器やサービスロボットの普及を促進させるために必要な課題を明らかにする。

・ 囲い込み制御の理論を基とした、安全制御理論の進展
 囲い込み制御は、本質的安全設計方針の考え方を制御に適用することで、目標軌道からの逸脱を防ぎ、安全な追従制御を実現しようとするものである。研究協力者である杉本旭氏は、危険状態へ至る逸脱を図4のように階層的に回避するシステムを考案し、危険状態回避の目的にて構成された安全制御システムを合目的的制御・安全調整制御・停止制御の3つの制御に分割する新たな安全理論を提案している。この理論を囲い込み制御の理論を基に進展させて、安全制御理論を進展させる。

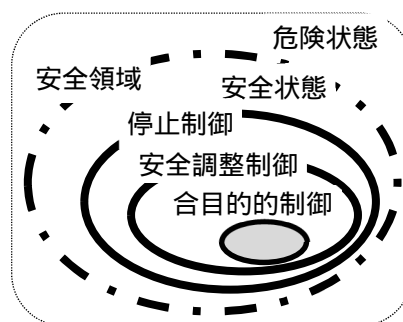


図4 階層構造

4. 研究成果

市販されていたMRブレーキは種類が少なく大型であり、また生産が中止されたため、独自にMRブレーキを設計し、各実験装置に適したMRブレーキの作製を行った。これまで学生に任せていた設計を自分で見直し、小型軽量化を向上させ、組み立て中にMR流体が漏れないよう内側のカーラーでもネジを締めるようにし、そのネジを締めると全体が密着する構造にした。強磁性体と非磁性体を効率よく配置することで、MR流体に磁束密度を集中させた。非磁性体の部品作製に3Dプリンタを使用し複雑な形状の部品を作製した。

そのMRブレーキを使用し、軸を持ち上げ方向に回転させ、本体にアームと錘を取り付けることで、電圧を上げるとアームが持ち上げ方向に回転し、電圧を下げると重力により下げられる実験装置を作成し、連続位置決めと正弦波軌道追従制御の実験を行った。また、2軸に拡張させ円軌道追従と直線軌道追従を行った。

またMRブレーキ2つを作製して組み合わせ、軸に2つの異なる回転をそれぞれに与え、各ブレーキの印加電圧を制御することにより、水平方向の回転を制御する拮抗揺動型MRアクチュエータを作製し、制御実験を行った。さらにこのシステムを2リンクに拡張させ、円軌道追従制御を行った。

揺動型空気圧アクチュエータに作製したMRブレーキを取り付け、2軸に拡張させブレーキ制御による円軌道追従と直線軌道追従制御を行った。

その他、MRブレーキと空気圧ゴム人工筋を使用し、1対(2本)の人工筋で2軸の制御が可能な装置においては、人工筋の強力な張力に耐えられる高い制動力を持つMRブレーキを作製した。通常、1軸に対してそれぞれ1対以上の人工筋が必要なため、2軸を駆動させるためには2対(4本)の人工筋が必要であるが、2つMRブレーキによって駆動させる軸を切り替えることによって1対の人工筋で2軸を駆動させることができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 南山靖博	4. 巻 第65巻 第10号
2. 論文標題 国際安全規格に基づく機械システム制御法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 機械設計	6. 最初と最後の頁 pp.37-42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 南山靖博, 清田高德, 杉本旭
2. 発表標題 開発したMRブレーキを用いた揺動型空気圧マニピュレータ
3. 学会等名 第65回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南山靖博, 岩里旭真, 岡温人, 清田高德, 杉本旭
2. 発表標題 MRブレーキによって駆動軸を切り換える空気圧人工筋2リンクマニピュレータ
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋良志, 南山靖博, 清田高德, 杉本旭
2. 発表標題 MR流体による揺動型2リンクマニピュレータの受動制御
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第76期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江田直希, 南山靖博, 清田高德, 杉本旭
2. 発表標題 MR流体を用いた2リンク持ち上げ操作の受動制御
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第76期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南山靖博, 清田高德, 杉本旭
2. 発表標題 Two-link Manipulator Driven by a Pair of Antagonistic Rubber Artificial Muscle
3. 学会等名 The 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 南山靖博
2. 発表標題 開発したMRブレーキを用いた受動制御によるアームの持ち上げ操作
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南山靖博
2. 発表標題 Application of Basic Passive Dynamic Control Having High Safety to Pneumatic Artificial Muscle Manipulators
3. 学会等名 Proc. of the 2021 International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南山靖博, 村上奨, 清田高德, 杉本旭
2. 発表標題 MR流体を用いた持ち上げ操作の受動制御
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南山靖博, 西津裕一郎, 清田高德, 杉本旭
2. 発表標題 小型MRブレーキによる倒立振子の振り上げ制御
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 轟晴彦, 南山靖博, 清田高德
2. 発表標題 MRブレーキによる揺動型空気マニピュレータの制御
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鬼塚優弥, 石橋拓巳, 南山靖博, 清田高德
2. 発表標題 人工筋とMRブレーキによる直線軌道追従制御
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋拓巳, 鬼塚優弥, 南山靖博, 清田高德
2. 発表標題 人工筋とMRブレーキによる円軌道追従制御
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会・講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関