

令和 6 年 5 月 19 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03941

研究課題名（和文）大移動量を可能とする対向面磁石列配置によるパラメカの高速高精度位置決め装置の開発

研究課題名（英文）Development of high-speed and high-accuracy positioning device using parallel mechanism that enables a large stroke by arranging magnet arrays on opposing side

研究代表者

田中 淑晴（Tanaka, Toshiharu）

大同大学・工学部・教授

研究者番号：70455137

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）：磁気歯車と磁石板を用いた非接触に動力伝達を可能とする直動ジョイントを製作し、パラレルメカニズムを構築した。まず、磁石間での非接触動力伝達時の特性把握の実験を行い、強い非線形性を示すことを具体的に明らかにした。また、磁石板を対向面配置する際に、磁石ピッチなどの組合せにより、特性が大きく変化することを示した。パラメカの位置決め制御時では、非接触であるため剛性が著しく低いため、目標角度位置との偏差に対して飽和特性を設けるなど制御的工夫によって位置決め制御を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的に用いられている三次元座標測定機や加工機の機構は三軸直交座標形であるが、パラレルメカニズムは、直交座標形と比較して高速化や高精度化に有利とされている。そこで、本研究で開発された磁気歯車と磁石板を用いた非接触形パラレルメカニズムでは、非接触による動力伝達によって密閉を必要とする場所や、広い作業領域や、より高速化を必要とする場面に適している。非接触による駆動であるため、動力伝達部の剛性が著しく低く、位置決め制御を困難とするが、本研究では制御を可能とすることができた。

研究成果の概要（英文）：Linear joints by using a magnetic gear and plates are constructed. The joints enables non-contact power transmission in a parallel mechanism machine. At first, an experiment to catch the behavior of non-contact power and angular transmission between the gear and plates carried out. The result is that strong nonlinearity is specifically clarified. Moreover, it is also shown that when the magnetic plates are placed on opposite side, the characteristics change greatly depending on the combination of magnet pitch. As this parallel mechanism has very low stiffness, it makes a positioning control complex and difficult. Therefore, a saturation characteristic is adapted for the deviation between the target angular position and the actual one. This control device makes positioning possible.

研究分野：位置決め

キーワード：位置決め 磁気歯車 パラレルメカニズム

### 1. 研究開始当初の背景

図1のような3軸直交座標形機構が主流である精密測定機や加工機の高速度や高精度化に対する課題を解決するものとして、図2のような平行メカニズムがある。平行メカニズムは、バイオテクノロジー、医療、ナノテクノロジーの分野への応用が期待される微細作業システムから、宇宙用スマート効果器への応用など、非常に広範囲で活用される。その平行メカニズムも位置決め機構として送りねじを用いており、さらなる高速化・高精度化への課題や作業領域が狭いという従来からの問題を抱えており、これらを打破する新しい機構の開発が急務である。

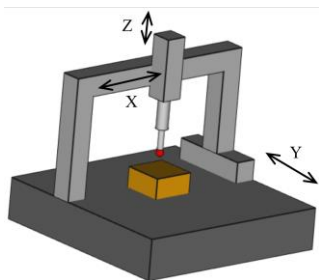


図1 3軸直交座標形機構

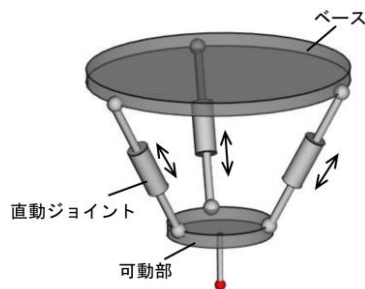


図2 平行メカニズム

### 2. 研究の目的

本研究では、図2に示す平行メカニズムの直動ジョイント部に、図3に示すようなニア磁気歯車の非接触動力伝達機構を適用した装置を開発し基礎的な特性把握を行うことを目的とする。また、磁気歯車対を用いた位置決め装置において、動力(角度とトルク)を伝達する際に、主動側と従動側の双方の反発/吸着の磁力によって強い非線形ヒステリシスを示すことが知られている。そのため、実際の位置決め時に影響を及ぼすと考えられる特性について調査する。

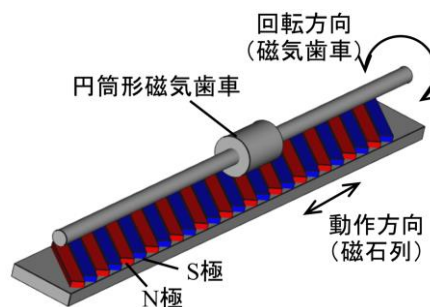


図3 一軸磁石列配置

### 3. 研究の方法

一面磁石列配置の平行メカニズム装置を構築し、位置決め時の挙動(特に磁気力による非線形特性)の把握を行う。そのため、円筒形磁気歯車と磁石列を直動ジョイント部に適用した試験機的设计・製作を行う。試験機のサイズは約600×600×600 mm、可動部の質量は約5 kg、磁石列一列あたりの推力は約100 Nを見込む。実験機による位置決め時の磁気力による非線形特性を測定し、磁場解析シミュレーションを行う。また、運動特性に合わせたフィードバック制御を構築するための実験を行う。

### 4. 研究成果

円筒形磁気歯車と磁石列を直動ジョイント部に適用した装置における伝達時の特性を調査するための試験機を図4に示す。

磁石列を対向面配置した状態においてコギングの影響を調査した結果を図5に示す。磁気歯車と磁石列には、右ねじと左ねじと同様に回転方向の組合せがあるため、その影響を調べた。測定結果より、磁気歯車1個と磁石列1本の標準形では、約0.5Nmのトルクであった。一方で、磁気歯車1個に対して磁石列2本を組み合わせると、トルクが約0.2Nm程度と小さくなった。これは、磁気歯車1個と磁石列1本の組合せでは、磁気歯車が磁石列に引き寄せられることによって、磁気歯車を取り付けられている軸に曲げモーメントが生じたことに因ると考えられる。磁石列を2本とすることによって、この磁力による引き寄せる力が相

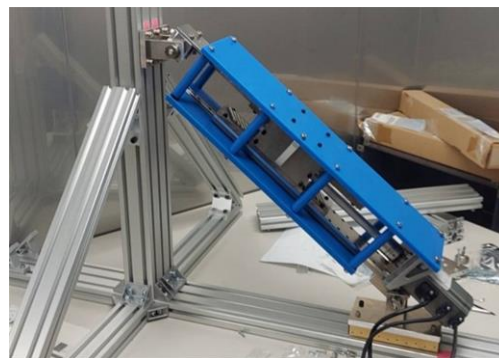


図4 一軸試験用直動ジョイント

殺され、トルクが小さくなったものと推察される。回転方向の異なる磁気歯車2個と磁石列2本を組み合わせた結果では、トルクは約0.5Nmと磁気歯車1個と磁石列1本との組合せと同程度であったことから、本研究における対向面配置での使用に問題ないことが確認された。回転方向の異なる2個の磁気歯車と磁石列1本との組み合わせでは、引き付け力が大きくなったことによりトルクが約0.8Nmとなった。

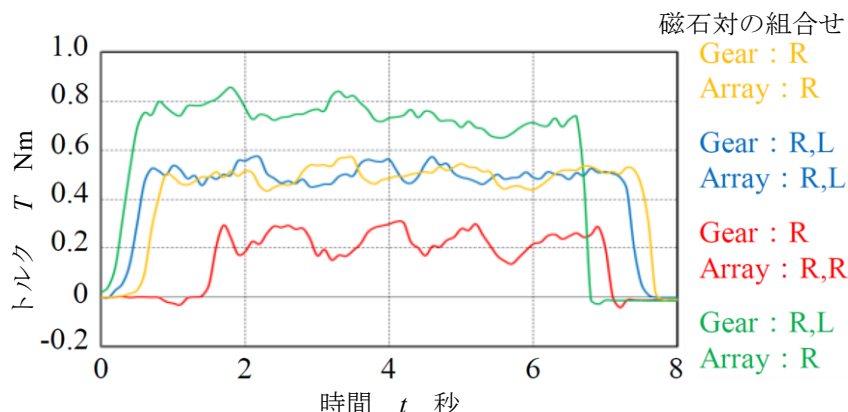


図5 磁気歯車と磁石列組合せの違いによるトルク

磁気歯車と磁石列の間では、磁気力によって動力伝達が行われるため非接触となる。そのため、磁気力による特徴的な特性を把握するために、微小な正弦波動作を行い、そのときのサーボモータの回転角度と磁石列板の変位との関係を調査した結果を図6に示す。本来であれば、サーボモータのトルクと磁石列板の変位がフックの法則に則り、線形の関係であれば位置決め制御が容易となるが、測定結果を示す図のように、実際にはヒステリシスが生じ非線形な関係となることが明らかとなった。

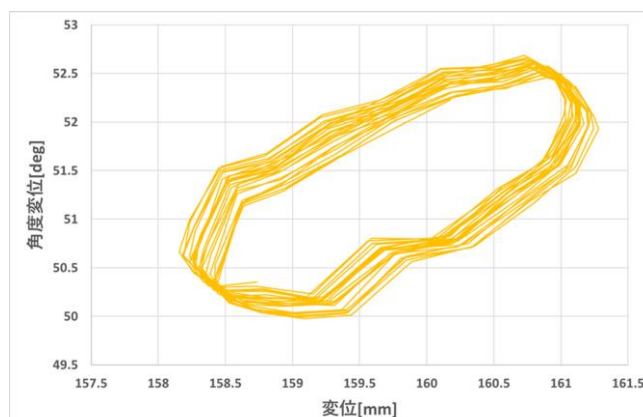


図6 磁気力による非線形特性

磁気歯車と磁石列を組み合わせた直動ジョイントを3本配置したパラレルメカニズムを図7に示す。配置は3等分し120°ごとに直動ジョイントを配置した。また、回転角度30°を目標回転位置とした位置決め実験の結果を図8に示す。パラレルメカニズムでは、姿勢によって、直動ジョイントへの負荷が変化する。特に本研究のように、非接触での動力伝達では剛性が非常に小さいため、同図(a)のように、位置決め制御が困難な状態が生じた。そこで、位置決め制御器に制御的な補正を追加することによって、同図(b)のように、暴走状態を生じることなく、位置決め制御を実施することが可能であることを示した。目標回転角度30°に対して位置決め制御できていることが確認できる一方で、動作開始時や動作終了時に大きな角度偏差を生じている。



図7 磁気直動ジョイントによるパラレルメカニズム

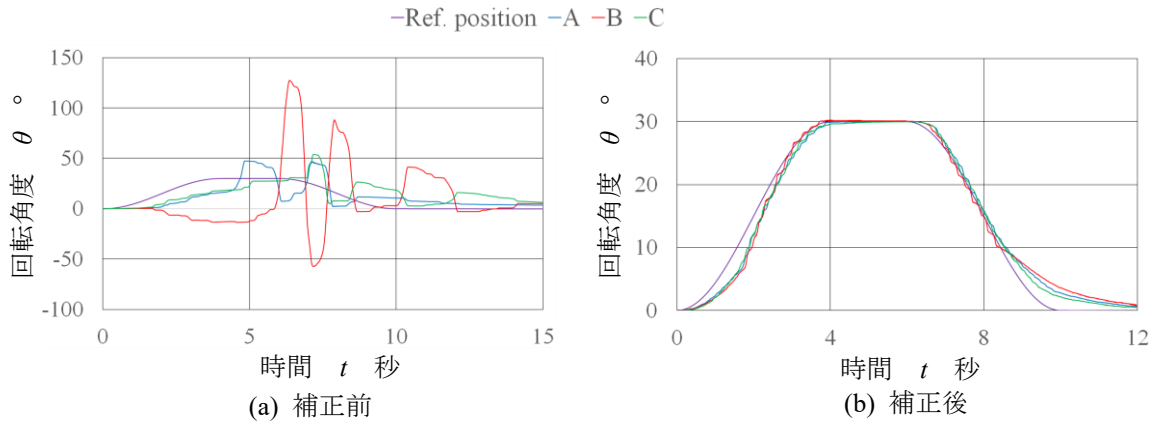


図8 パラメカにおける磁気直動ジョイントの位置決め結果

パラメカでは減速比1の伝達機構を用いた。減速比を伴う磁気歯車の動力伝達特性は不明な点が多い。そこで、減速比3および3/4である減速および増速を伴う磁気歯車の動力伝達性能を実験と過渡応答磁場解析から検討を実施した。図9に磁気歯車の駆動条件を、図10および表1に用いた磁石の形状・寸法の詳細を示す。本研究では駆動回転させる磁石を駆動側磁石、従動回転させる磁石を被駆動側磁石、固定させておく中間磁性媒体を固定中間磁性媒体と呼ぶこととする。駆動側磁石、被駆動側磁石および固定中間磁性媒体寸法は、それぞれ外径100mm、内径30mmとし、板厚は10mmとした。また、空気中への磁気漏れを防止するために外径100mm、内径30mm、板厚5mmのバックアッププレートを両磁石に取り付けることとした。過渡応答磁場解析は日本総研社製 J MAG-Designer を用いて実施した。表2は材料定数を示す。駆動側磁石、被駆動側磁石を N45、固定中間磁性媒体、バックアッププレートを SS400 に設定した。すべての部品に渦電流を考慮して解析を行った。減速比1/3は入力回転速度1000rpm、2200rpm、出力回転速度333rpm、733rpmの減速機、減速比4/3は、入力回転速度250rpm、550rpm、出力回転速度333rpm、733rpmの増速機において、負荷トルク1.0Nm、2.0Nmの解析を行った。

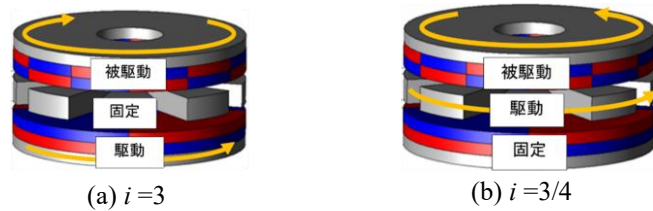


図9 駆動回転方向

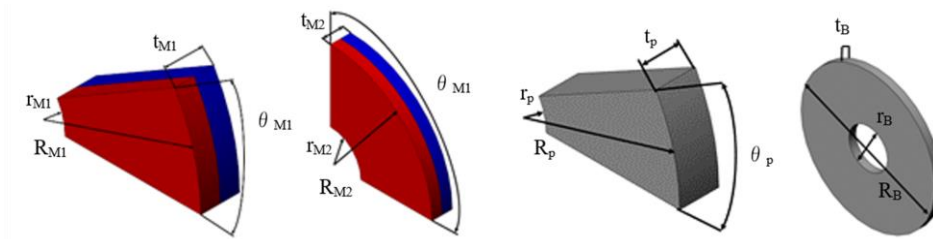


図10 磁石寸法および形状

表1 各部記号に対する寸法

部品	記号	角度 $\theta$ [°]	厚み $t$ [mm]	内径 $r$ [mm]	外径 $R$ [mm]	個数
駆動側磁石	M1	90	10	30	100	4
被駆動側磁石	M2	30				12
固定中間磁性媒体	P	30	5			8
バックアッププレート	B	360				2

表2 材料定数

部品	材料	保磁力[A/m]	伝導率	相対透過率	密度[kg/m <sup>3</sup> ]
駆動・被駆動磁石	N45	995000	—	1	7500
固定中間磁性媒体 バックアッププレート	SS400	—	12000000	3000	7780
Air	Air	—	—	1	—

図 1 1 に平均入力動力と平均伝達動力と伝達効率の関係を示す。図 1 2 に各伝達動力条件における渦電流損失を示す。減速比 3 より減速比 3/4 (増速) における伝達効率をみると、減速条件では伝達効率が 16.6~39.3% (平均 27%) を示す。一方、増速条件では 68.8~80.1% (平均 75.7%) と減速条件と比較すると、2.8 倍高い伝達効率を示す。増速条件において高い伝達効率を示した原因として、図 1 2 に示したように減速比 3/4 と比較して、減速比 3 の渦電流損失が著しく大きかった。減速比 3 において渦電流損失が増加する原因は次のようなことが考えられる。減速比 3 (減速条件) では、駆動側磁石円盤を 1 回転させ、固定中間磁性媒体で隔てた対向する被駆動側磁石円盤を逆の回転方向に 1/3 回転させている。つまり、中間磁性媒体に与える相対的な磁極の移り変わりが非常に速く、磁束変化が著しい。一方、減速比 3/4 (増速条件) では、中間磁性媒体を 1 回転させ、被駆動側磁石円盤を同じ回転方向に 4/3 回転させる。つまり、中間磁性媒体に与える相対的な磁極の移り変わりが遅く、磁束変化が減速比 3 よりも遅い。したがって、減速比 3 は、減速比 3/4 よりも大きな入力動力を必要とし、伝達動力とともに渦電流損失が増加したと考えられる。伝達効率については、減速比 3 と減速比 3/4 は駆動の方法は異なるものの、同様のアセンブリモデル、材料条件で計算を行っている。従来の機械的接触を伴う歯車では、減・増速するとトルクが減速比に相当する割合だけ増・減しするが、回転数が減・増速するため、動力は摩擦損失がありわずかに減少するものの、入出力でほぼ同じ値を示し、伝達効率は 90% 以上を示す。しかし、磁力による動力伝達を行う場合は、従来の減・増速の機械的効率を見込むことは不可能であり、渦電流損失を考慮した伝達効率を求めておく必要がある。

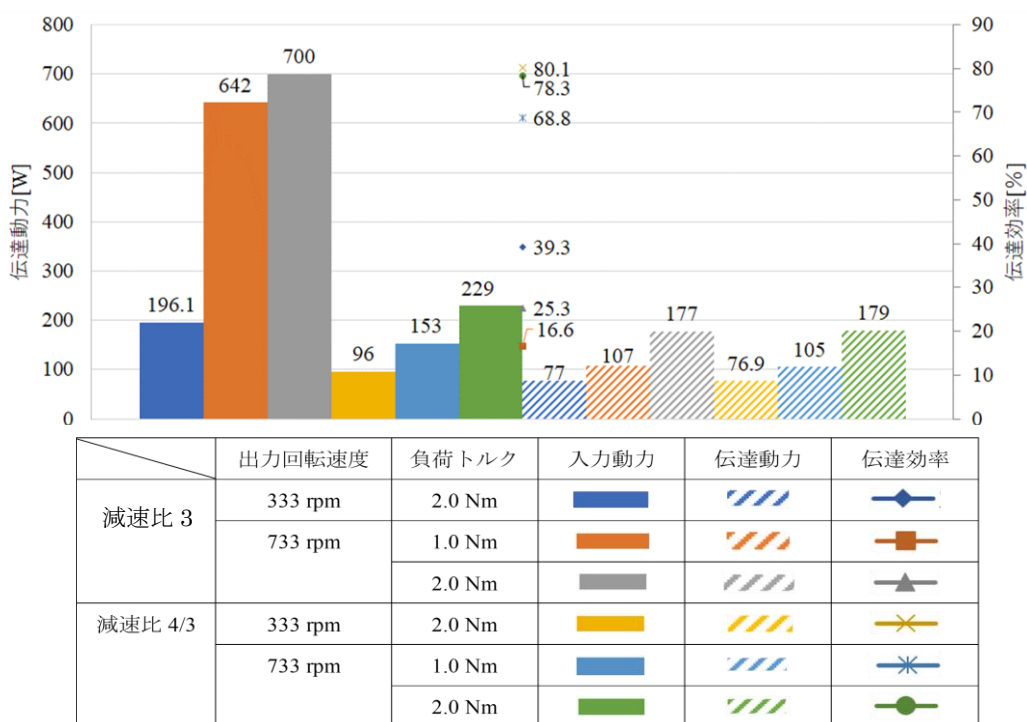


図 1 1 平均入力動力と平均伝達動力と伝達効率の関係

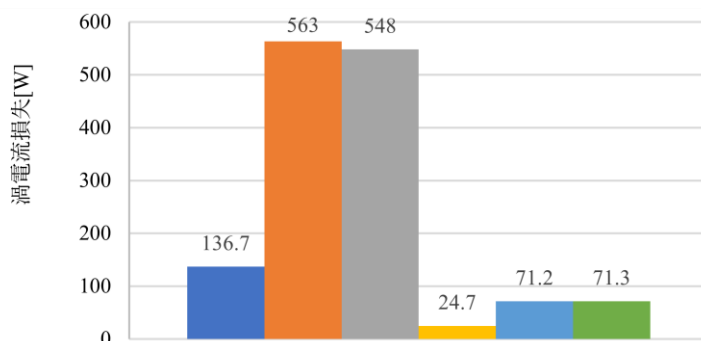


図 1 2 渦電流損失 (図 1 1 の解析条件に対する)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩月勇樹, 田中淑晴, 原野智哉, 小谷明, 綿崎将大, 山口康太
2. 発表標題 磁気歯車を用いた直動ジョイントの特性調査
3. 学会等名 計測自動制御学会中部支部若手研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩月勇樹, 田中淑晴, 小谷明, 原野智哉, 綿崎将大, 山口康太
2. 発表標題 磁気リニア駆動式直動ジョイントの特性調査
3. 学会等名 第3ブロック専攻科研究フォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩月勇樹, 田中淑晴, 原野智哉, 小谷明, 綿崎将大
2. 発表標題 磁石列の対向面配置におけるトルクの違い
3. 学会等名 第27回高専シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩月勇樹, 田中淑晴, 原野智哉, 小谷明, 綿崎将大
2. 発表標題 非接触直動ジョイントのトルク・回転角・直線変位の関係
3. 学会等名 日本設計工学会東海支部令和3年度研究発表講演会
4. 発表年 2022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
研究 分担 者	原野 智哉  (Harano Tomoki)  (20332067)	阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・教授    (56101)	

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
---------	---------