

令和 7 年 6 月 20 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2024

課題番号：21K14101

研究課題名（和文）モータ・波動歯車一体型新構造アクチュエータによる脚支援機器の革新的軽量化

研究課題名（英文）The development of strain wave geared actuator for lightweight lower limb leg exoskeletons

研究代表者

北山 文矢 (Kitayama, Fumiya)

茨城大学・応用理工学野・講師

研究者番号：50774197

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：アクチュエータ要素として、機械式波動歯車の楕円カムを磁石に置き替えた磁気式波動歯車を提案した。従来の機械式波動歯車とは異なり、接触力ではなく磁力を用いて部品変形を引き起こして減速回転させる。磁場・機構構造解析により磁力生成・変形・接触・回転の複合現象を解析した。トルクセンサと変位センサを用いて変形形状・トルクを測定した。磁石寸法や配置を調整した磁気式波動歯車では、主要部概算質量が250～400g、最大伝達トルクが解析値で12.5Nm、実測値で10.7Nmとなった。片麻痺者用脚支援機器 (Manipuleg(茨城大学))に磁気波動歯車付モータを実装すると、約40%軽量化することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した磁気式波動歯車は変形と磁場の両方を利用する特異な構造・動作原理を有しており、機械式波動歯車と比べると軽量であり、磁気歯車と比べて高い減速比を実現できる。磁気式波動歯車を搭載した脚支援機器は軽量となるため、介護者や下肢麻痺者の負担軽減に寄与できる。さらに、人協調ロボットや上肢装着型支援装置などの軽量化を要する幅広い分野での応用も期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a lightweight magnetic strain wave gear for lower-limb exoskeletons, utilizing permanent magnets in place of the mechanical cam. In this gear, the distribution of magnetic forces deforms the flexible outer gear, allowing the gear teeth to engage with the rigid inner gear. The flexible outer gear rotates with deceleration, operating on the principle of differential gears. We analyzed the operation through magnetic and multi-flexible body dynamic analyses, and we measured the transmission torque and deformed shape using a torque sensor and laser displacement sensors. The weight of the primary components ranges from 250 to 400 g. The analyzed and measured maximum transmission torques were 12.5 Nm and 10.0 Nm, respectively. Based on these findings, we anticipate a weight reduction of about 40% in the lower limb exoskeleton (Manipuleg, Ibaraki University).

研究分野：アクチュエータ工学

キーワード：磁気式波動歯車 伝達トルク 軽量化 脚支援機器

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

脊椎損傷や脳梗塞により脚の感覚がない下肢障害者に向けて、アクチュエータによって姿勢維持や歩行補助を行う脚支援機器が活発に研究開発されている。脚支援機器を装着した下肢麻痺者は、自身の脚をアクチュエータによって動かすことで歩行欲求を満たすことができ、段差や障害物などのバリアフリー化されていない環境でも生活できる。しかし、脚用支援機器の利用は一部の病院等のみに留まっており、広く普及していない。この工学的な原因のひとつとして機器重量による着脱・装着状態維持の負担が考えられる。国内外の比較的軽量の市販の下肢障害者用脚支援機器をみると、Cyberdyne 社の HAL(3 関節駆動)は 7kg であり、Technaid 社の Exo-H2(6 関節駆動)は 12kg である。研究段階の脚支援機器 (例えば、茨城大学の Manipuleg(3 関節駆動))は 6kg と既製品よりも軽いが、装着機器として十分な重量とはいえない。脚支援機器の重量の大部分を占める構成要素はアクチュエータであり、アクチュエータの軽量化が脚支援機器全体軽量化に寄与する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、脚支援機器用アクチュエータである波動歯車付モータの部品点数を減らし、軽量・コンパクト化し、脚支援機器のユーザビリティを向上させることである。そこで、「磁界で部品変形を起こし、低速高トルクの回転を直接生み出す」モータ・歯車を考案する。

3. 研究の方法

(1) 波動歯車機構内蔵モータの開発

機械式波動歯車でベアリング内蔵楕円カム(ウェーブジェネレータ,W/G)を撤廃し、磁石付電磁石を配置した波動歯車機構内蔵モータを設計する。

磁場解析と機構構造解析を併用して最大発生トルクを概算する。

(2) 磁気式波動歯車の開発

更なる軽量化・出力トルク向上を目指し、磁気式波動歯車の開発に移行した。

機械式波動歯車の W/G を撤廃し、磁石を用いた磁気式 W/G を内蔵した磁気式波動歯車を設計する。

磁場解析と機構構造解析を連成した変形形状・最大伝達トルク解析手法を構築する。

トルクメータとレーザ変位計を組み合わせた変形形状・最大伝達トルク測定設備を構築する。

で構築した手法・設備を用いて駆動メカニズムを解明し、最大伝達トルクを取得する。

最大伝達トルク向上のための磁気式波動歯車を改良する。

(3) 脚支援機器適用時の効果検討

開発機を脚支援機器に実装した時の軽量化効果を計算する。

4. 研究成果

(1) 波動歯車機構内蔵モータの開発

図 1 に示すように波動歯車機構内蔵モータは全体重量 486g であり、金属弾性体の外歯車であるフレクススプライン(F/S,出力軸)、剛体の内歯車であるサーキュラスプライン(C/S,固定部)、非磁性体のケース、電磁軟鉄製のヨーク、ネオジム磁石、コイル 24 個から成る。電流非印加状態で、磁石の磁力により F/S が楕円上に変形し、F/S と C/S 間で歯の噛み合いを起こす。それから、電流印加により電磁力で F/S 変形形状の楕円傾きを変化させてトルクを生成する。

構造解析結果から磁石の磁力によって F/S と C/S の歯が噛み合うことを確認した。磁場解析結果を用いた簡易計算結果から電流非印加時に $\pm 2\text{Nm}$ のコギングトルク、電流印加時に 3.6Nm の出力トルクを確認した。

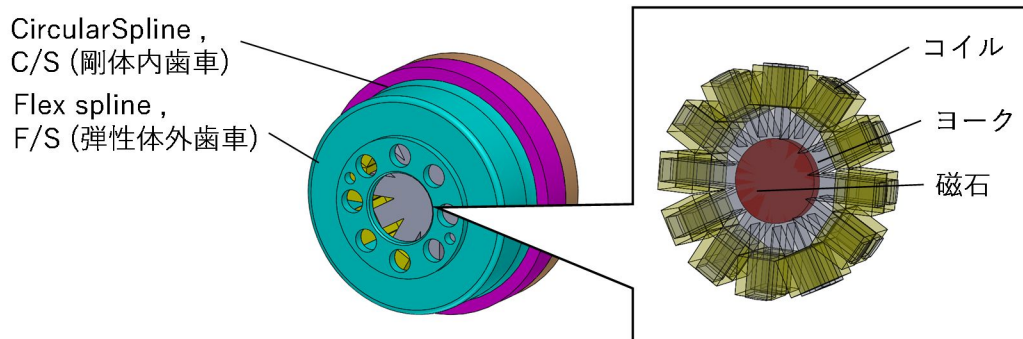


図 1 磁気式波動歯車

(2) 磁気式波動歯車の開発

磁気式波動歯車は、図2に示す通りカップ型波動歯車装置のF/SとC/S、磁気式W/Gから構成される。磁気式W/Gを入力軸、F/Sを出力軸、C/Sを固定軸として扱う。磁気式W/Gは永久磁石、ヨーク、シャフトから成る。図3(a)に示すように初期状態では、磁石とF/S間に発生する磁力によってF/Sが楕円変形し、F/Sの歯がC/Sの歯と噛み合う。図3(b)に示すように磁気式W/Gを回転させることで、磁気式W/Gの回転角に応じてF/S上で磁力の生じる領域が移動する。磁力発生領域の移動に伴いF/S楕円変形形状における長軸(楕円変形長軸)が回転し、F/SとC/Sの噛み合い位置が移動する。それから、F/SはC/Sとの歯数差に依存して減速回転する。

磁気式波動歯車の動作解析フローチャートを図4に示す。まず、三次元有限要素法(FEM)を用いた磁界解析により各F/S形状における磁束密度分布を求め、節点力法を用いてF/S上の磁力分布を計算する。各変形形状における磁力分布を磁力データベースとして保管する。次に、Multi Flexible Body Dynamics (MFBD) 解析によりF/Sの回転・接触・変形形状を計算する。MFBD解

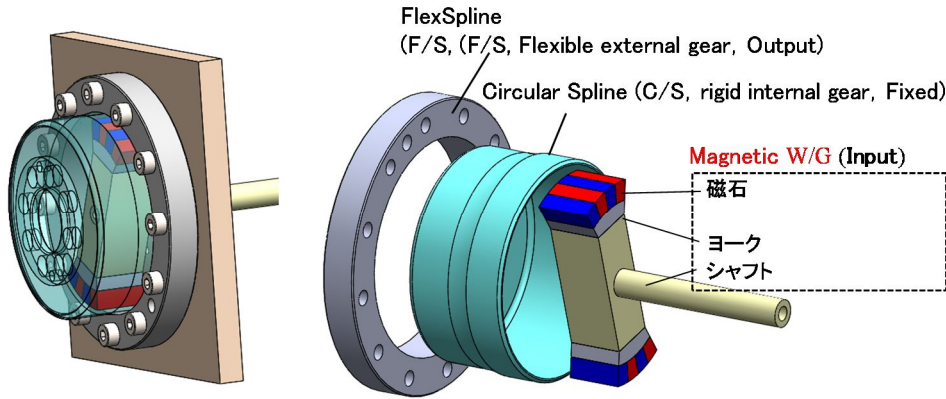


図2 磁気式波動歯車の基本構造

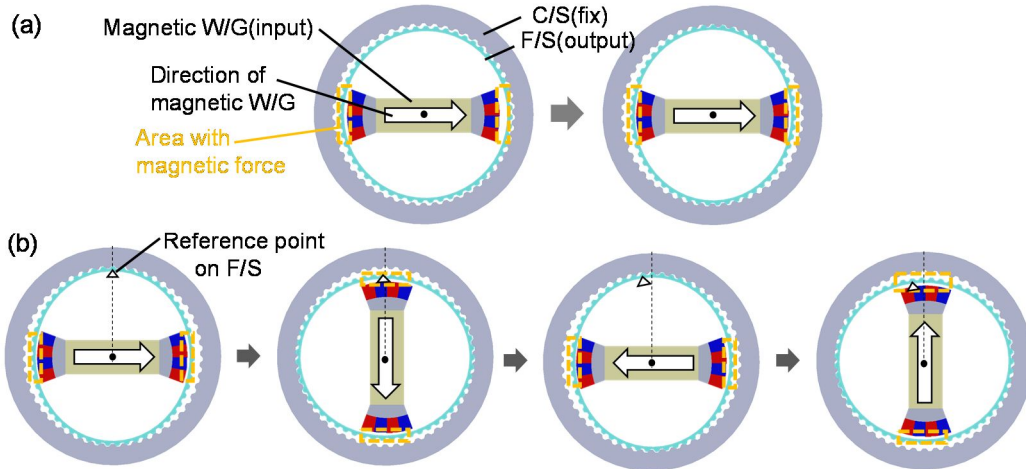


図3 磁気式波動歯車の動作原理

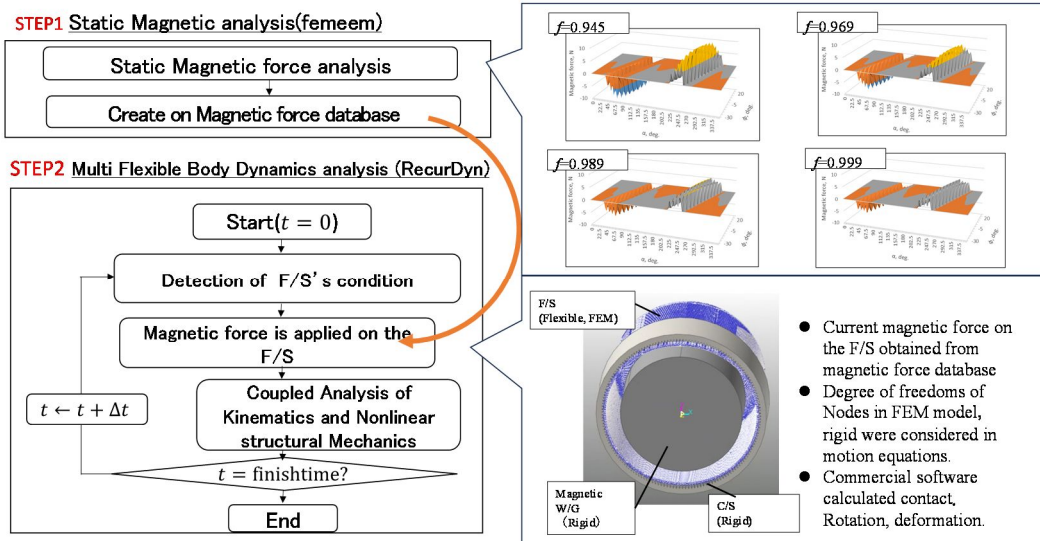


図4 伝達トルク解析手法フローチャート

析において、磁力データベースに基づいて F/S に力を付与する。このようにして、磁場・変形・回転・接触を達成した磁気式波動歯車で生じる物理現象を再現する。

構築した測定設備を図 5 に示す。(a)は静止時 F/S 変形状測定用装置であり、本装置により F/S の楕円変形を確認した。エンコーダ付回転軸に治具を介してレーザ変位センサ 1 個を配置する。変位センサを F/S 外面を沿うように 1 周させる。エンコーダと変位センサ情報に基づき、F/S の変形状を計算する。(b)は動作時の F/S 変形状・伝達トルク測定装置である。エンコーダ付きブラシレス DC モータで磁気式 W/G を回転させる。それから、F/S をパウダブレーキ、トルク検出器、偏心抑え治具と接続し、F/S にブレーキトルクを与える。F/S 周辺に設置した 5 台のレーザ変位計により動的な変形状を測定する。

解析結果では 3.2Nm の最大伝達トルクを、実験結果では 3.4Nm の最大伝達トルクを確認し、解析手法の有効性が示された。また、解析・実験共に、最大伝達トルク発生時に磁気式 W/G の回転角と F/S 変形状の楕円傾きに位相差が生じていることが確認された。磁気式波動歯車の主要部質量は 274 ~ 374g と概算され、基にした機械式波動歯車重量 490g に比べて軽量である。

最大伝達トルクを向上させるために、磁石の極数と開き角を調整した二次モデル、磁石奥行き長さを調整した三次モデル、F/S 内側と外側の両方に磁石を配置した四次モデルを開発した(図 6)。四次モデルでは、主要部概算質量が 250 ~ 400g、最大伝達トルクが解析 12.5Nm、実測 10.7Nm となった(図 6)。

(3) 脚支援機器適用時の効果検討

片麻痺者用脚支援機器(Manipuleg-2(茨城大学), 全体重量 5.8 kg, 3 関節, 機械式波動歯車付モータ使用)に、磁気式波動歯車付きモータ(アクチュエータ質量 360g, 磁気式波動歯車 250g, モータ 80g, 接続部 30g)を実装することを想定する。実装した場合に脚支援機器の概算全体質量は 3.4 kg 程度となり、約 40% 程度の軽量化となる。

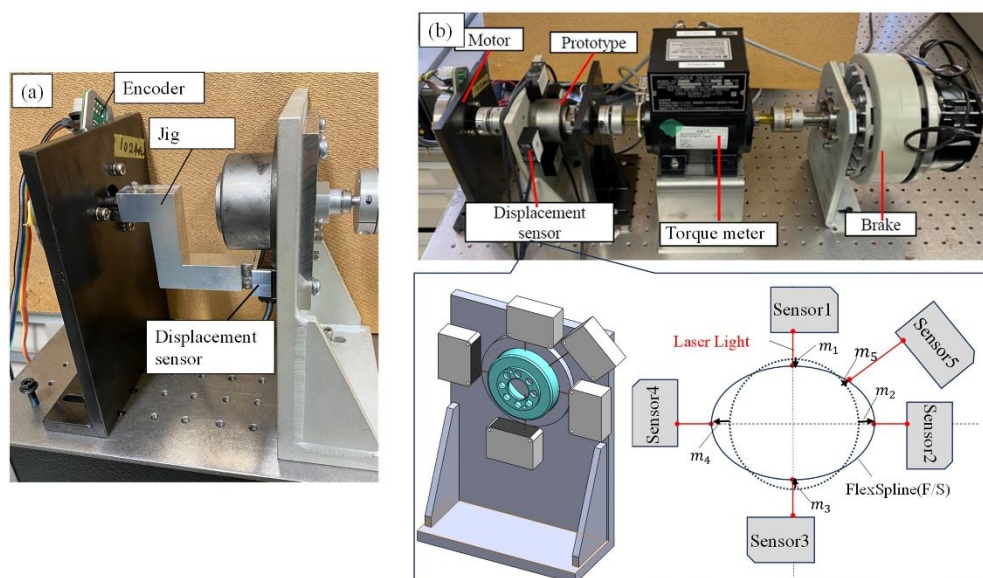


図 5 変形状・伝達トルク測定装置

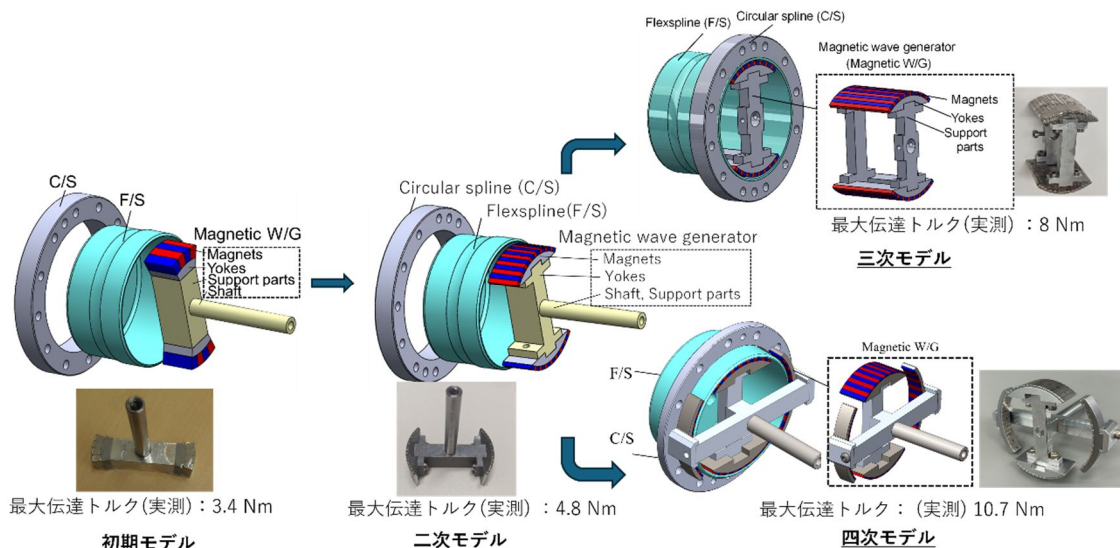


図 6 磁気式波動歯車の開発推移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 遠藤 理久, 北山 文矢, 近藤 良	4. 巻 31(2)
2. 論文標題 磁気式波動歯車装置の動作特性解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本AEM学会学会誌	6. 最初と最後の頁 251-256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14243/jsaem.31.251	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fumiya Kitayama, Ryou Kondo, Riku Endo	4. 巻 71
2. 論文標題 Proposal of strain wave gear actuated by magnetic force	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 S551-S560
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-220213	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 北山文矢, 近藤良, 遠藤理久	4. 巻 90(936)
2. 論文標題 Multi Flexible Body Dynamicsと変形変位測定による磁気式波動歯車の脱調現象の解明	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 24-00017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.24-00017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 北山 文矢, 遠藤 理久, 近藤 良
2. 発表標題 Multi Flexible Body Dynamics と変形変位測定による磁気式波動歯車の脱調現象の解明
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2023 (D&D2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fumiya Kitayama, Ryou Kondo, Riku Endo
2. 発表標題 Improvement of Transmission Torque Characteristics of Strain Wave Gear with Magnets
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference INTERMAG 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 遠藤理久, 北山文矢, 近藤良
2. 発表標題 磁気式波動装置の動作特性解析
3. 学会等名 第31回MAGDAコンファレンス in 鹿児島 (MAGDA2022) ~ 電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス ~
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤理久, 近藤良, 北山文矢
2. 発表標題 フレクスブラインの形状特性を考慮した永久磁石内蔵型波動歯車装置の動作特性解析
3. 学会等名 日本機械学会2022年茨城講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北山文矢, 近藤良
2. 発表標題 波動歯車装置を内蔵した小型モータに関する基礎検討
3. 学会等名 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD33 in 伊香保温泉)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北山文矢, 近藤良
2. 発表標題 磁力で変形する波動歯車装置の提案
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumiya Kitayama, Ryou Kondo
2. 発表標題 PROPOSAL OF STRAIN WAVE GEAR ACTUATED BY MAGNETIC FORCE
3. 学会等名 20th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumiya Kitayama, Ryou Kondo
2. 発表標題 Transmission Torque Characteristics of Strain Wave Gear with 16-poles Magnet
3. 学会等名 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 北山 文矢
2. 発表標題 永久磁石を用いた変速機構の研究動向
3. 学会等名 令和7年電気学会全国大会
4. 発表年 2025年

1. 発表者名 松本 勇翔, 北山 文矢
2. 発表標題 磁気式波動歯車装置における磁石配置の検討
3. 学会等名 令和7年電気学会全国大会
4. 発表年 2025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