

補助事業番号 2022M-213

補助事業名 2022年度 磁気ギアードスクリー構造に基づいた二自由度モータ開発  
補助事業

補助事業者名 岐阜大学 高等研究院 航空宇宙生産技術開発センター 八田禎之

## 1 研究の概要

本事業は既に開発した磁気ねじ構造に基づいた二自由度モータのトルク向上として、磁気ギアードスクリー構造に基づいた二自由度モータの開発を進める。磁気ねじ構造に基づいた二自由度モータは補直動動作と回転動作を実現可能であり、一台でリニアモータと回転モータの機能を有する。また、磁気ねじとは回転方向のトルクを直動方向の大きな推力に変換するボールねじが永久磁石によって構成されたものである。ボールねじにおけるナット及びスクリーに相当する部品の結合が磁力により非接触で実現され、駆動時の摩擦が小さい。磁気ねじ構造に基づいた二自由度モータは、直動方向において大きな推力を出力可能であると共にエネルギー損失が小さい。しかしながら、回転方向におけるトルク出力の向上が課題として残る。

本事業では直動方向の推力向上だけでなく回転方向のトルク向上を目的として、磁気ねじに対して磁気ギアを一体化した磁気ギアードスクリー構造に基づいた二自由度モータの開発を行う。磁気ギアとは減速機における入力部と出力部の結合を磁力によって実現したものであり、一般的な減速機と比較して摩擦によるエネルギー損失が小さい。これにより、高推力・高トルクかつ低損失な二自由度モータを実現する。また、提案モータは従来の磁気ねじ構造を適用した二自由度モータにおける回転子が磁気ギアの入力部と一体化し、可動子が磁気ギアの出力部と一体化したものである。本一体化構造は可動部品の増加を防ぎ、制御性能の低下を防ぐことができる。

## 2 研究の目的と背景

近年の産業分野では様々な課題について議論されており、そのうちのひとつとして少子高齢化問題による労働者の減少が挙げられる。ロボットは人に代わる労働力としてその需要が非常に高まっているが、再現する動作が複雑なほど多くのモータが搭載され、サイズ及び重量が増加するおそれがある。また、産業分野における別の課題として排出量削減が世界各国で求められている。今後も産業分野において増加し続けるロボットの省エネルギー化は必要不可欠である。

ロボットは複雑な動作を実現可能にするために複数のモータで構成されている。本事業はロボットに搭載されるモータの開発を通して、ロボットの小型化・軽量化・低炭素化に貢献することを目的とする。提案する磁気ギアードスクリー構造に基づいた二自由度モータは、一台でモータ二台分の動作を実現可能であると共に、磁気ギアードスクリー構造により高推力・高トルクを低損失で出力可能である。本モータを開発することによりロボットの小型化・軽量化・低炭素化に貢献する。

### 3 研究内容

#### (1) 磁気ギアードスクリー構造に基づいた二自由度モータの設計及び実機製作

磁気ギアードスクリー構造に基づいた二自由度モータの基礎となる磁気ギアードスクリーを考案し、その基本構造を構築した。磁気ギアードスクリーの基本構造を図1に示す。磁気ギアードスクリーは、磁気ねじのナット(回転子)とスクリー(可動子)に相当する部品の間には強磁性体で形成されたピースを有する。本ピースによって回転子を入力側、可動子を出力側とした磁気ギアの構造を再現する。従って、磁気ギアードスクリーは、回転子に入力されたトルクを磁気ねじ構造によってトルクと推力の組み合わせであるらせん方向に力に変換する。そして、そのトルク及び推力を磁気ギア構造によって増幅し、可動子から出力する。

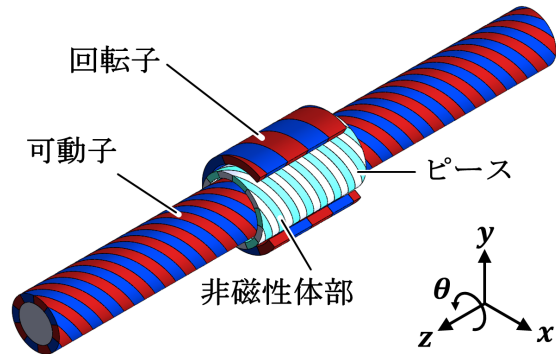


図1 磁気ギアードスクリー

磁気ギアードスクリーに基づいて二自由度モータの基本構造を構築した。二自由度モータの基本構造を図2に示す。また、回転子に対してハルバツハ配列を適用した二自由度モータも考案した。ハルバツハ配列を適用した第2モデルの基本構造を図3に示す。それらの二自由度モータにおける出力のFEM解析結果を図4及び5に示す。本解析結果は二自由度モータのR型回転子によって発生するトルク及び推力のみを解析したものである。解析結果より、R型回転子の回転に応じてR型回転子にトルクが発生し、そのトルクが磁気ギアードスクリー構造に基づいて大きなトルク及び推力に変換されることを確認した。そのトルク及び推力から構成されるらせん方向の力が可動子から出力される。なお、L型回転子は回転に応じて、R型回転子によって発生するらせん方向と交差するらせん方向の力を出力可能である。したがって、R型及びL型回転子によって発生するトルク及び推力を組み合わせることにより、大きなトルク及び推力を独立かつ同時に発生可能であることを示すことができた。

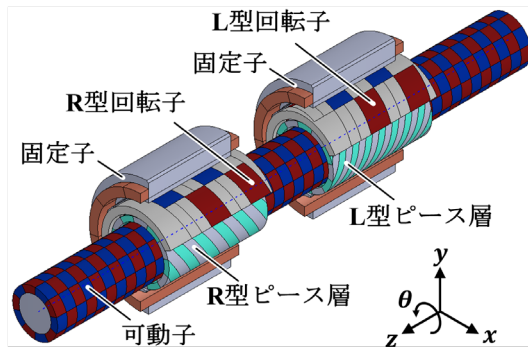


図2 第1モデル

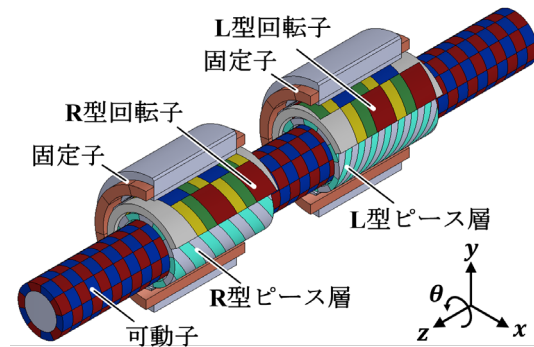
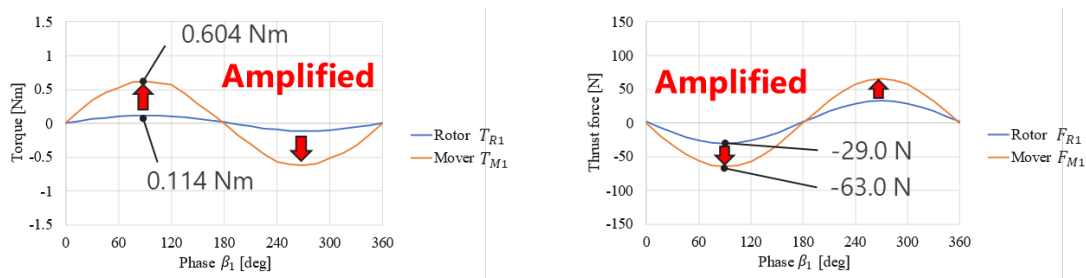


図3 第2モデル

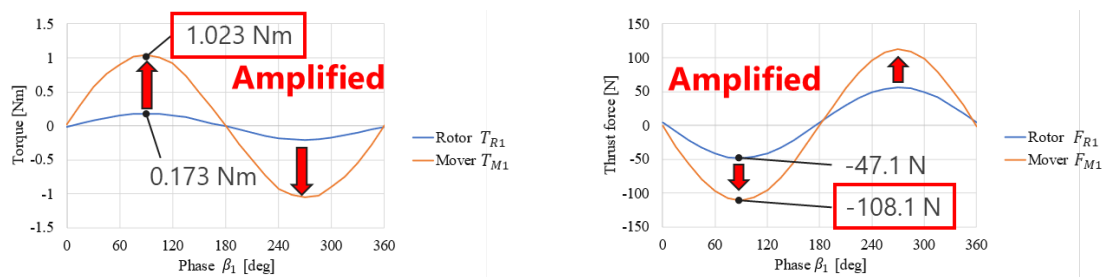
また、ハルバツハ配列を適用した第2モデルでは、ハルバツハ配列が磁気ギードスクリーウの機能を損なうことなく、第1モデルより大きなトルク及び推力を出力可能であることを図5の解析結果から確認した。解析結果からR形回転子の回転に応じて最大 1 Nm以上のトルク及び 100 N以上の推力を発生可能であることがわかる。このことから、本二自由度モータは、R型回転子及びL型回転子を合わせて 2 Nm以上のトルク及び 200 N以上の推力を発生可能であり、本事業における目標要件を満たすことがわかる。



(a) トルク応答値

(b) 推力応答値

図4 R型回転子の回転によって発生するトルク及び推力のFEM解析結果（第1モデル）



(a) トルク応答値

(b) 推力応答値

図5 R型回転子の回転によって発生するトルク及び推力のFEM解析結果（第2モデル）

また、本二自由度モータの基本構造に基づいて図6に示すように実機的设计を行った。そして、その設計に基づいて各種部品製作及び組み立てを行った。ピース層はらせん形状のピースを六軸加工機により成形し、形成した複数のピースをモールド加工により固定して製作した。図7は製作したL型及びR型ピース層と、L型ピース層の組付け様子を示す。最も大きな課題と予測されていたピース層の製作手法を確立し、実機製造の目途を示した。

## (2) 数式モデルの導出

既存の磁気ねじ及び磁気ギアの特長から、磁気ギードスクリーウにおける入出力関係を数式化した。特に、回転子に入力されるトルクと可動子から出力されるトルク及び推力の関係を、回転子及び可動子における永久磁石の二次元的形状及び磁極数と、ピースの二次元的形状及び個

数に基づいた数式モデルによって導出した。その数式モデルの有効性を図4及び5に示されるFEM解析結果に基づいて確認した。上記磁気ギアードスクリー構造に基づいた二自由度モータの基本構造と共に本数式モデルの研究結果を2023年3月に開催された国際学会ICMIにおいて発表した。

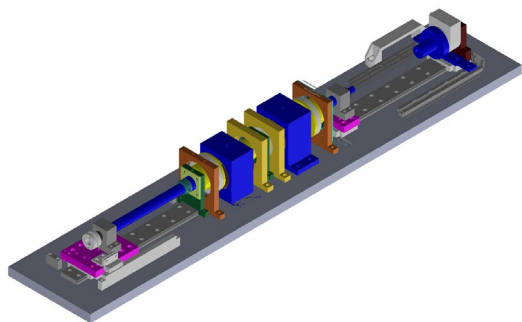


図6 実機の3D設計図

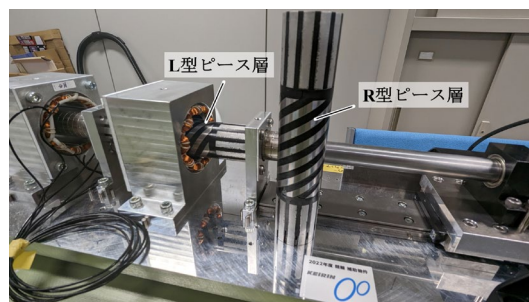


図7 製作したピース層の組付け様子

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

「研究の目的と背景」において述べたように、本研究はロボットを含む多自由度システムにおいて小型化・軽量化・低炭素化に貢献可能である。例えば、直動と回転動作を有するスカルロボットの先端軸、ミリングマシン等に本研究の二自由度モータが適用可能である。

また、本二自由度モータは力制御の高精度化に貢献可能である。力制御では、押し付け対象への押し付け力を計測し、その計測値に基づいて押し付け力を制御する。押し付け力の計測方法として反力推定オブザーバ(RFOB)が広く用いられている。RFOBは外乱オブザーバ(DOB)を応用したものであり、DOBによって推定された外乱から予め同定した摩擦を取り除くことによって押し付け力である反力のみを推定する。RFOBは力覚センサと比較して推定値(計測値)に含まれるノイズが小さく、ノイズ除去のためのローパスフィルタにおけるカットオフ周波数を高く設定可能である。このため、高い応答性を有し、力制御の高精度化が可能となる。しかしながら、RFOBは予め摩擦を同定する必要があり、摩擦が複雑又は大きいほどその同定が難しい。本二自由度モータは、磁気ギアードスクリー構造により摩擦が小さいため、RFOBの設計を容易にする。これにより、力制御の高精度化に貢献する。

ロボットは人に代わる労働力としてその需要が非常に高まっている。しかしながら、人の動作は複数の関節である自由度の組み合わせによって構成されている。また、繊細な動作ではより細かい力加減が求められる。このため、本研究内容はロボットによる人動作の実現に対して大いに活用が期待できると考えている。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

事業者はこれまでロボット及びモータを対象にしたモーションコントロールの研究を行ってきたが、制御性能の向上においてソフトウェアだけでなくモータ自体の改良も必要不可欠と考えてきた。特に、複数のモータから構成されるロボットでは、サイズ及び重量だけでなく振動抑制の観点から一台で複数台のモータの動作を実現する多自由度モータが必要である。そこで、多自由度モータの一種である二自由度モータの研究開発を行ってきた。しかしながら、二自由度モータは出力が小さく、実用化において出力向上が必要不可欠である。一方、二自由度モータは構造が複雑であり、減速機等を装着することが難しい。また、減速機によって摩擦の増加やバックラッシュが引き起こされるため、高精度な力制御の実現が難しい。本研究はこのような研究の遍歴に基づいて実施されたものであり、二自由度モータの実用化の課題である低摩擦かつ高出力を解決する二自由度モータとして重要な位置づけになると考えている。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

・Y. Hatta and K. Ito, “Development of Magnetic Geared Screw Two-Degree-of-Freedom Motor with Halbach Array”, IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2023, Loughborough, UK, 2023 (JKA謝辞あり, 査読あり).

## 7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 岐阜大学 高等研究院 航空宇宙生産技術開発センター  
(ギフダイガク コウトウケンキュウイン  
コウクウウチュウギジュツカイハツセンター)

住 所: 〒501-1193  
岐阜県岐阜市柳戸1-1

担 当 者: 特任助教 八田 禎之 (トクニンジョキョウ ハッタヨシユキ)

担 当 部 署: 航空宇宙生産技術開発センター(コウクウウチュウギジュツカイハツセンター)

E - m a i l: [hatta.yoshiyuki.b3@f.gifu-u.ac.jp](mailto:hatta.yoshiyuki.b3@f.gifu-u.ac.jp)

U R L: <https://www1.gifu-u.ac.jp/~kzitolab/index.html>