

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14209

研究課題名(和文)磁気ギア内蔵円筒形リニアモータの原理実証

研究課題名(英文)Validation of Tubular Linear Motor with Internal Magnetic Gear

研究代表者

下野 誠通 (Shimono, Tomoyuki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90513292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、二年間の研究期間において、磁気ギア内蔵円筒形リニアモータの基本設計を完了し、推力発生メカニズムの理論式を導出した。設計モデルに対して電磁界解析を行うことで、種々のモータ特性を明らかにすることができた。さらに、考案モータの駆動原理を実証するための基礎検証機を試作し、高出力モータとしての実現可能性を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：In this research project, the design of tubular linear motor with internal magnetic gear was completed. The mathematical theory for generation of thrust force in the proposed motor was established. From the electromagnetic analysis by simulator, the characteristics of the proposed motor was investigated. The first prototype was also developed. The feasibility was confirmed from the basic experiment on the prototype.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：電気機器工学 リニアモータ 磁気ギア モーションコントロール 制御工学

1. 研究開始当初の背景

リニアモータは工作機械や搬送機械などの産業システムに広く使われており、高速高精度な運動の実現に大きく寄与している。近年では、制御性能やバックドライバビリティ（可逆駆動性）に優れるという特性を活かして、人間支援ロボットや医療福祉機器などへの応用研究が進められている。

このような人間支援ロボット等への応用においては、人や周囲環境との高度なインタラクションを実現する必要があり、特に精密に相互作用力を制御することが求められる。このような目的においては、ダイレクトドライブモータであるリニアモータが適しているが、高い推力を得るためには大きなモータを用いる必要があり、装置の肥大化や重量の増大が問題となる。

このような背景の下、人間支援ロボットへの応用に向け、リニアモータの高推力密度化が一つの技術課題となっている。また、学術的にも従来の産業用途指向型のモータ設計論のみならず、人間支援用途指向型のモータ設計論を新たに確立することが、ロボット技術の発展にとって重要となってきている。

2. 研究の目的

本研究では、小型高出力で力制御性能にも富む新しいリニアモータの開発を目指し、磁気ギア構造を内部に有する円筒形リニアモータの試作に挑戦する。

本研究で高出力リニアモータとしての原理実証を目指す磁気ギア内蔵円筒形リニアモータは、駆動コイルを有する外側固定子部、リング形状永久磁石を配した高速可動子部、リング形状の磁性体を配した内側固定子部、最内部のリング形状永久磁石を配した低速可動子部、の四層から成る独創的な構造をしている。本研究においては、この考案モータの基本設計を完了し、電磁界解析ソフトウェアを用いた数値シミュレーションにて特性解析を行うと共に、実際に試作開発を行うことで有用性を確認することまでを目標とする。

3. 研究の方法

(1) 平成 28 年度の研究方法

まず考案モータの解析モデルを、研究開始前までに得られていた基礎検討結果を基に再構築し、固定子部材や可動子ポピンなど細かなパーツを加えた詳細モデルを設計する。その後、電磁界解析ソフトウェアを用いた有限要素解析によって特性評価を行い、磁気ギア特性、モータ出力特性などを調査する。この解析結果を受けて、考案モータおよび試験装置の実機設計を行う。

また、構築した解析モデルを基に、運動制御シミュレーションを行い、磁気バネ効果による共振特性などを細かに分析する。この結果から、高速かつ高精度に考案モータの運動を制御するための理論研究に着手する。研究

開始時点では、考案モータは内外の可動子間に磁気バネ効果が生じることが予想されており、高速可動子部と低速可動子部とが二慣性共振系のように振る舞うものと想定している。したがって、振動抑制機能を付加した運動制御理論について検討を進める。

(2) 平成 29 年度の研究方法

平成 29 年度においては、考案モータの基本モデルを改良することで、低リプル化、低コギング化、高出力化の可能性について検討する。特に、内側の磁性体部あるいは永久磁石部を低速可動子としてそれぞれ使用した場合のモータ性能比較や、モーションシステムとしての制御性の相違について考察を深める。

また、前年度に設計したモータ試験装置を試作する。駆動実験を行うためのモータドライブ回路を製作し、考案モータの性能評価試験を実施する。これにより、磁気ギア一体型リニアモータとしての動作原理を確認する。

4. 研究成果

(1) 平成 28 年度の成果

研究期間初年度である平成 28 年度においては、まず磁気ギアを内蔵するリニアモータの基本構造を 3D-CAD を用いて設計した(図 1)。そして、この基本構造に基づき、磁気ギア部における磁束の変調原理および磁気ギアの減速比に関する理論式を導出した。

さらに、ラジアル方向に磁化した磁気ギアを内蔵する円筒形リニアモータモデルと、アキシャル方向に磁化した磁気ギアを内蔵する円筒形リニアモータモデルとの二種類を設計し、比較を行った。具体的には、それぞれのモデルにおいて、磁気ギア部単体、および磁気ギアとリニアモータとをシステム統合した磁気ギア内蔵円筒形リニアモータについての電磁界解析を行い、磁束密度分布やそのスペクトルについて精査することで、磁気ギア部の減速比の精度や最大伝達推力、モータ全体としての発生推力と推力リプルなどの観点から考察を行った。解析結果から、両モデルのモータ発生推力に大きな差が見られなかったものの、アキシャル方向磁化に基づく磁気ギアを内蔵する円筒形リニアモータのほうが低リプルであり、医療福祉支援ロボットなど精密な力制御性能が要求されるアプリケーションの観点から有用性が高いとの知見を得た。

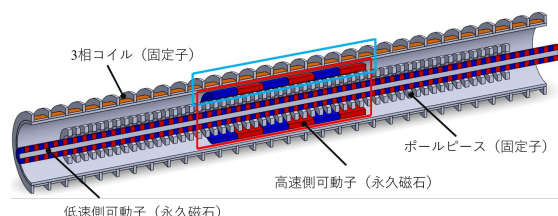
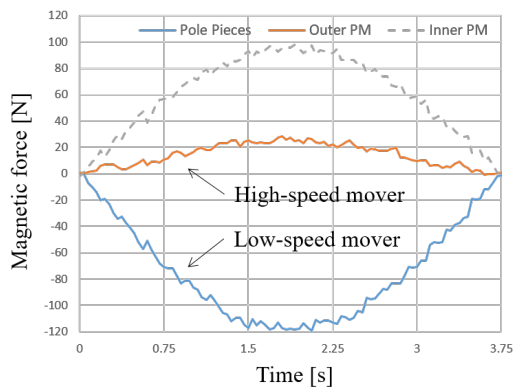


図 1 基本モデルの 3D-CAD 図

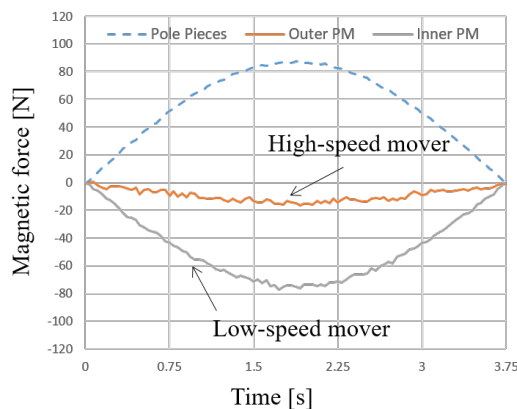
次に、電磁界解析結果を基に、固定子部材や可動子ボビンなど細かなパーツを加えた詳細な検証機を設計すると共に、モータの試作に着手した。また、開発する磁気ギア内蔵円筒形リニアモータでは、外側の高速可動子と内側の低速可動子との間に磁気バネ効果が生じ、二慣性共振系として振る舞うことが解析結果から示された。この磁気バネ特性は高い非線形性を有していることも確認された。そこで、二慣性共振系の振動抑制のための運動制御に関する研究にも着手し、開発モータに実装するための制御アルゴリズムの基礎検討も行った。

(2) 平成 29 年度の成果

平成 29 年度においては、まず昨年度のモデル解析に関する研究を継続し、磁気ギア内蔵円筒形リニアモータの内側可動子として中間磁性体であるポールピース部を用いた場合（モデル A）と、内側永久磁石部を用いた場合（モデル B）との比較を行った。図 2 に示す電磁界解析結果より、モデル A のポールピース部を可動子として用いた場合の方が最大伝達推力を向上させることができることを確認した。それに対して、モデル B の内側永久磁石部を可動子として用いた場合には、図 3 に結果を示すように、コギング力の低減が可能となることを確認した。これらの結果から、提案モータは、要求される特性に応じてモータ構造を決定することができ



(a) モデル A



(b) モデル B

図 2 最大伝達推力の比較

るという設計自由度を有していることを示した。

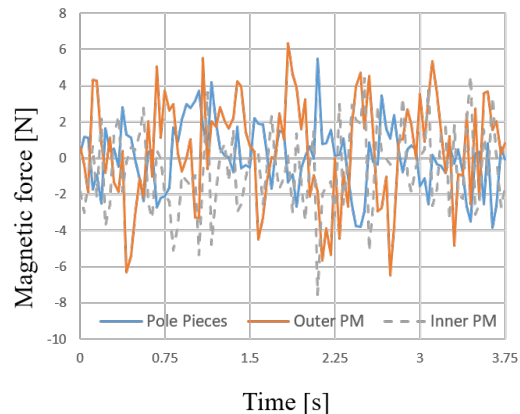
次に理論的研究においては、提案モータにおける磁束密度と発生推力の関係を数学的に明らかにした。これにより、提案モータの基本原理解を示す数理モデルを確立することができた。

実験的研究においては、図 4 に示す基礎検証用試作機の製作を完了し、動作実験を行った。その結果、モータとしての実現可能性が十分であることを確認することができた。しかしながら、内部支持部材が永久磁石の荷重によって湾曲したため、滑らかに動作することができず、検証機の機械構造設計を改良する必要があったとの認識に至った。

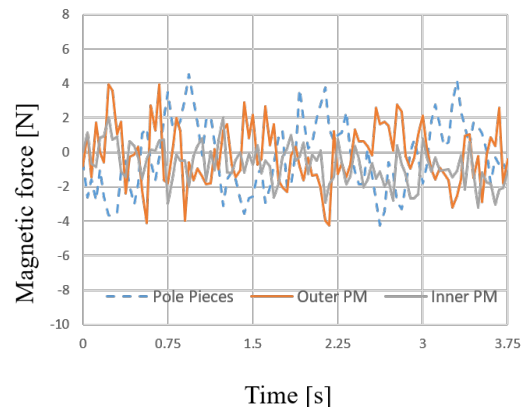
最後に提案モータの運動制御研究においては、外側高速可動子と内側高速可動子との間に生じる磁気ばね特性による振動を抑圧する、加速度フィードバック制御手法についての検討を行い、シミュレーションモデルにおいてその有効性を確認した。

(3) 研究成果のまとめ

本研究では、平成 28 年度および平成 29 年度の二年間の研究期間において、考案した磁気ギア内蔵リニアモータの駆動理論式を確立し、また電磁界解析により種々の特性を明らかにすることができた。さらに、基本原理解を実証するための基礎検証機を試作し、高出力モータとしての実現可能性を確認するこ



(a) モデル A



(b) モデル B

図 3 コギング力の比較

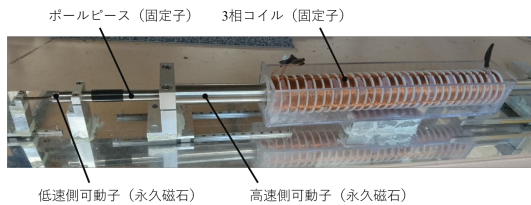


図4 磁気ギア内蔵リニアモータ検証機

とができた。

研究成果発表については、平成 28 年度に得られた研究結果を纏め、国際会議で英語論文発表を 1 件行った。また、平成 29 年度に得られた内側可動子の比較検討結果については、国内研究会において日本語論文の発表を 1 件行った。以上のように、当初の研究計画を概ね遂行することができた。

今後の研究課題としては、検証機の改良を行うことで、実験検証を充実化させることが挙げられる。特に永久磁石の荷重に十分に耐えられる強度を有する支持機構を再設計する必要がある。改良機の製作を経て、特性評価実験や運動制御実験などを継続的に実施する予定である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

Mizuki Ubukata and Tomoyuki Shimono, "Discussion on Comparison of Magnetic Geared Linear Motors with Different Magnetization Direction," The 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2017), 2017 年 8 月 11 日~8 月 14 日

シドニー (オーストラリア)

生方瑞城, 下野誠通, "磁気ギアードリニアモータにおける低速側可動子に関する一考察", 電気学会産業応用部門メカトロニクス制御研究会, 2017 年 9 月 22 日
東京 (日本)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tsl.ynu.ac.jp/index.html>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

下野 誠通 (SHIMONO, Tomoyuki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：90513292

(2) 研究分担者

河村 篤男 (KAWAMURA, Atsuo)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：80186139

藤本 康孝 (FUJIMOTO, Yasutaka)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：60313475

溝口 貴弘 (MIZOGUCHI, Takahiro)

神奈川県立産業技術総合研究所・

「力を感じる医療・福祉介護次世代ロボット」プロジェクト・研究員

研究者番号：80759308