

令和元年6月26日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18063

研究課題名(和文) 省資源低コストなリニアモータの実現を目指した基礎特性解明とドライブシステムの開発

研究課題名(英文) Fundamental Characteristic Elucidation and Development of Driving System for Realization of Linear Motor with Resource Saving and Low Cost

研究代表者

平山 斉 (HIRAYAMA, TADASHI)

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号：60560109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：省資源型で低コスト化が実現できるリニアスイッチトリラクタンスモータを用いた搬送用リニアモータの開発を目指し、実験システムの設計・作製、特性評価、シミュレーションモデルの構築、新たな駆動システムの開発を行った。

まず、定格速度1 m/s、定格推力50 Nの実験機と駆動システムを設計・作製し、設計通りに動作することを確認した。次に、実験および解析により本リニアモータの諸特性を明らかにした。また、回路解析と磁場解析を連携した高精度なシミュレーションモデルを構築した。さらに、高効率、高出力な運転に加え推力脈動が低減できる駆動システムを提案し、実験により実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

省資源・低コストなリニアモータとして期待されるリニアスイッチトリラクタンスモータにおいて、これまで基礎特性を評価したデータは少なかったが、本研究によりその特性を明らかにすることができた。これにより本リニアモータの優位性や改善すべき問題点が明らかになり、モータの開発にとって有用なデータとなる。また、高効率、高出力運転かつ推力脈動の低減ができる駆動システムの研究開発を行ったことで、駆動システムの開発技術の分野にも貢献できた。本リニアモータによって長短ストロークの両方を同一のリニアモータで駆動できる装置が開発できれば、搬送用リニアモータ市場への大きな貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：Aiming at development of a linear motor for a transportation system using a linear switched reluctance motor (LSRM) that can realize resource saving and low cost, we carried out a design and manufacture of an experimental system, characteristics evaluation, a construction of simulation model, and a development of new driving system.

First, the experimental machine of the LSRM and driving system with the rated speed of 1 m/s and rated thrust of 50 N were designed and built, and it was confirmed that the experimental machine operated as designed. Next, the characteristics of the experimental machine were clarified by experiments and analysis. In addition, a high precision simulation model was constructed by linking a circuit analysis and magnetic field analysis. Furthermore, the driving system that can reduce the thrust ripple in addition to high efficiency and high power operation was proposed and verified by experiments.

研究分野：電気機器

キーワード：リニアモータ スイッチトリラクタンスモータ シミュレーション 電流形インバータ 推力脈動低減

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来、工場内搬送用リニアモータには、リニア誘導モータ(LIM)またはリニア同期モータ(LSM)が適用されてきた。LIMは堅牢で長ストローク、大推力が可能であり、時間当たりの搬送量が要求される仕分けシステムに適用されている。また、希土類永久磁石を用いたLSM(PMLSM)は、高位置決め精度、サーボ制御が可能、大推力、高効率であり、短ストローク、精密位置決めを要求する用途に適用されている。

リニアモータ市場で最も必要な課題の一つはモータの低コスト化である。LIMは一次側が巻線と鉄心、二次側が導電体と磁性体から構成される簡単な構造であるが、導電体として銅もしくはアルミが使用される。近年、銅の価格が高騰しており、銅が大量に使用されるLIMの高コスト化が懸念される。またPMLSMでは、一次側はLIMと同様に巻線と鉄心で構成されるが、二次側に高性能な希土類永久磁石を用いるため高価であることや、磁石の材料となるレアアースの安定調達に問題がある。このような背景から搬送用リニアモータでは、省資源化による低コスト化が強く求められている。また、工場内搬送に適用されるリニアモータには、長ストローク・工程間搬送ではLIMが、短ストローク・工程内搬送ではPMLSMが適用されてきた。このように、従来の搬送用リニアモータでは、用途に応じて使い分けられており、長短ストローク両方の駆動を同一の装置で行うリニアモータがない。

2. 研究の目的

省資源型で低コストなモータとして、レアアースを使用せず銅の使用量も低減することができるリニアモータ、すなわちリニアスイッチトリラクタン্সモータ(LSRM)を用いた、短ストロークから長ストロークの搬送まで同一の装置で担うことができる搬送用リニアモータの開発を目指す。そのために本研究では、LSRMの基礎特性の解明および効率、出力を向上する駆動システムの開発を目的とする。シミュレーションと実験によりLSRMの静特性、動特性を明らかにし、また従来のリニアモータと特性を比較することで、LSRMの利点や課題を解明する。研究期間では、以下の研究を行う。

- (1) LSRMの基礎特性解明
- (2) 特性評価用高精度シミュレーションモデルの構築
- (3) LSRMの高効率、高出力化のための駆動システムの開発

3. 研究の方法

- (1) LSRM実験機および駆動システムの設計と作製

有限要素法(FEM)解析を用いてLSRM実験機の設計を行う。実験で高速運転時の特性測定を可能とするためにモータの極ピッチを短くし、巻線を持たない二次側を固定子側に長く配置するよう工夫して解析を実施する。固定子長1m、定格速度1m/s、定格推力50Nをもつ実験機を設計する。また、LSRM実験機の駆動用に、可動子位置に応じた電流を一次巻線に供給するインバータを設計、作製し、さらにDSPを用いた制御システムを作成する。

- (2) 基礎特性の測定と評価およびFEM解析による特性評価

実験機の測定システムを作製し、LSRM実験機の基礎特性を測定する。また、FEM解析により、LSRMを用いた物流搬送システムの諸特性を算出し、従来の物流搬送用リニアモータと比較する。

- (3) シミュレーションモデルの構築

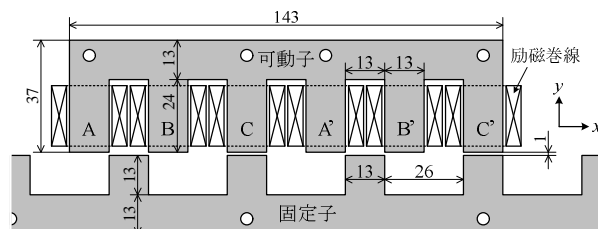
高効率、高出力な運転ができる駆動システムを解析的に検討するために、磁場解析と回路解析を連携した高精度なシミュレーションモデルを構築する。

- (4) 高効率、高出力な運転ができる駆動システムの検討

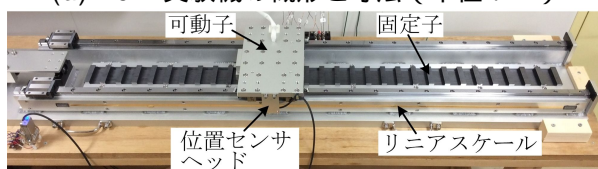
LSRMの特性向上を目指して、電流形インバータを用いた新しい駆動システムを検討し、シミュレーションおよび実験により特性を評価する。

4. 研究成果

(1) 図1に設計、作製したLSRM実験機の概形と寸法および写真を示す。実験機は三相6/4形片側式のLSRMであり、可動子を一次側とした短一次形リニアモータである。可動子は突極構造の鉄心に集中巻された6つの励磁巻線をもち、二次側である固定子は突極構造をもつ鉄心のみからなる。固定子鉄心の全長は約1.2mである。本実験機は、エアギャップ長1mmで速度1m/s、推力50Nの出力が得られるよう設計されている。可動子の位置検出には分解能2 μ mの光学式リニアセンサを使用した。可動子の支持、案内にはリニアガイドを用いた。また、実験機ではエアギャップ長を0.5mmから1.5mmの範囲で変えることができる。



(a) LSRM実験機の概形と寸法(単位: mm)



(b) LSRM実験機の写真

図1 LSRM実験機

図2に設計、作製した駆動システムの構成略図を示す。本駆動システムは、非対称HブリッジインバータシステムとDSP制御システムより構成される。DSP制御システムでは、可動子位置情報をアップダウンカウンタ(UDC)によりDSPに取り込み、可動子位置に応じたLSRM各相の励磁指令を作成し、デジタル出力(DO)から出力する。また、可動子位置情報から実測速度を演算し、可動子実測速度と指令速度とのPI制御を行うことで励磁電流の振幅指令を作成し、LSRM各相の指令電流をD/Aコンバータから出力する。以上の処理が10kHzで行われる。非対称HブリッジインバータのIGBT制御用のPWM信号は、非対称Hブリッジインバータの各出力端子に取り付けられた電流センサから得られる実電流とD/Aコンバータから出力される各相指令電流を比較することで作成される。

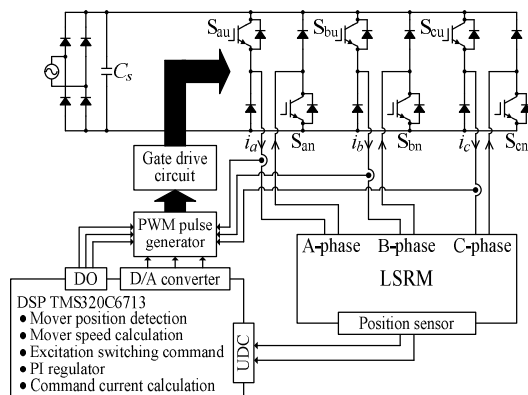


図2 駆動システムの構成略図

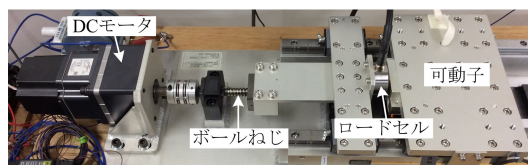


図3 静推力測定システム

(2) 図3に、作製した静推力測定システムを示す。LSRM実験機の静推力は、圧縮型ロードセルに可動子を直接押し付けて測定する。可動子の位置を変えて静推力を測定するために、DCモータとボールねじを用いてロードセルを十分に低速かつ一定速度で移動できるものを作製した。

また、LSRM実験機は有限長であるため通常の電力計を用いた電力測定は困難である。そこで、LSRM実験機用の電力計測システムを新たに構築した。図4に電力計測システムの概略図を示す。電力計測システムは、電流、電圧センサ、パソコンおよびLabVIEWで構成される。電流センサと電圧センサからの信号は、マルチファンクションI/OデバイスUSB-6255を使用してLabVIEWが実装されているパソコンに入力される。それら電流、電圧の信号を用いて、電力、力率等をLabVIEWで算出する。

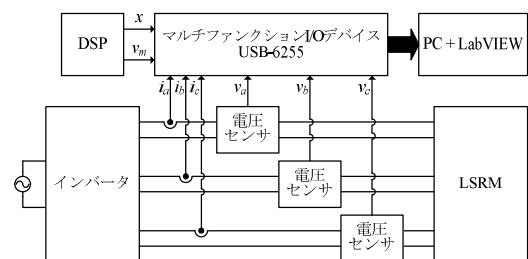


図4 電力測定システムの概略図

実験システムおよび測定システムを用いて、LSRM実験機の諸特性を測定した。図5に定格電流における静推力の測定結果およびFEM解析を用いた磁場解析による計算結果を示す。図より、測定結果の平均推力は51Nであり、ほぼ設計通りの推力が得られていることがわかる。図6にエアギャップ長 $g = 1 \text{ mm}$ および 0.5 mm において指令速度を -1 m/s から 1 m/s にステップ状に変化させたときの速度応答の測定結果を示す。実測速度は指令速度によく追従しており、設計通りに動作することを確認した。図7にエアギャップ長 g を変えたときの無負荷時の電流、電圧、入力電力、銅損、鉄損と機械損の和および力率の測定結果を示す。図より、電圧および鉄損と機械損の和はギャップ長に対してほとんど変わらないこと、力率はギャップ長が短くなるにつれて低くなることがわかった。また、これらの特性の他に LSRM 実験機の磁化曲線、平均推力の電流値依存性、低速駆動時の速度脈動、励磁切り換えのタイミングが推力、速度応答、電流、電圧、電力、損失特性に及ぼす影響を実験により明らかにした。さらに、LSRMの動推力の評価方法として、磁気随伴エネルギーを利用した推力算出法を検討し、LSRM実験機の動推力測定を行い、これまで評価が難しかった動推力を明らかにすることができた。本手法を用いて測定した動推力特性および効率特性に関しては、2019年度の学会で発表予定である。

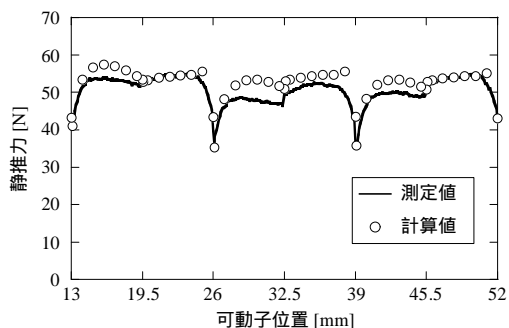


図5 LSRM実験機の静推力 - 位置特性

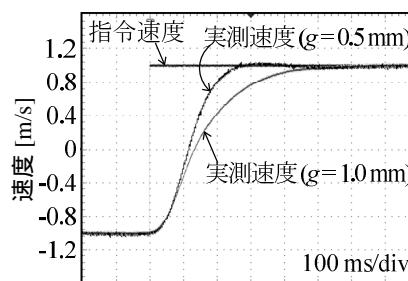


図6 速度応答波形の測定結果

さらに、6/4形 LSRM、6/8形 LSRM、LIM、PMLSMのそれぞれを用いた場合の搬送システムの運転特性および効率特性をFEM解析により算出し、比較検討を行った。その結果、6/8形 LSRMの推力は同じサイズの LIM とほぼ同じであることが確認された。ただし、LSRMの効率は LIM およ

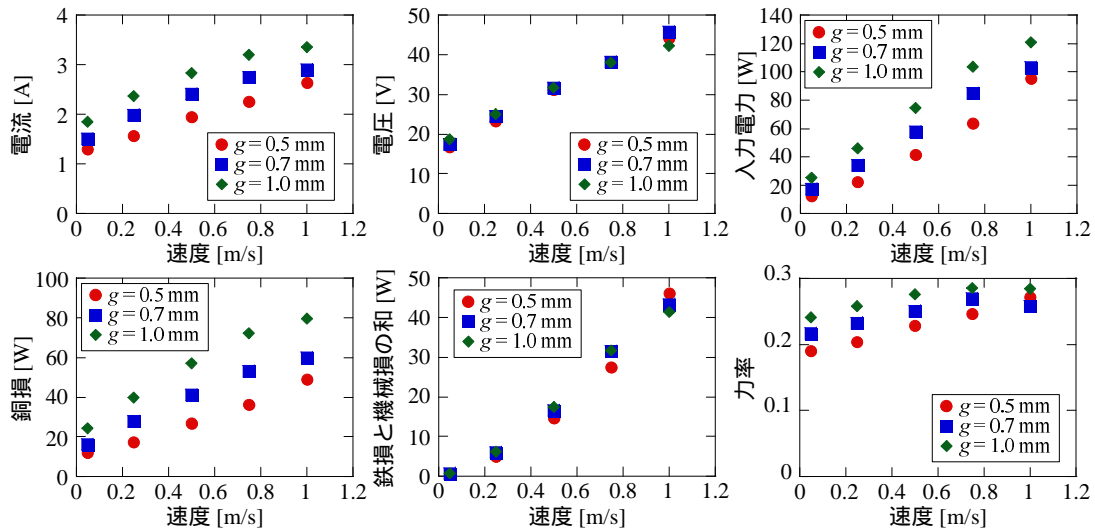


図7 LSRM 実験機の電气的特性の測定結果

び PMLSM より低くなった。LSRM の効率を改善するためには、LIM および PMLSM と比較して LSRM のギャップ長を短く設計する必要があることが分かった。

(3) 回路解析と磁場解析を組み合わせた回路 - 磁場連携解析を行うためのシミュレーションモデルを構築した。シミュレーションモデルでは、LSRM 実験機本体および駆動システムをモデル化した。LSRM 実験機本体は、LSRM 等価回路の特性方程式や運動方程式等を VHDL-AMS で記述することでモデルを構築した。LSRM の非線形性を考慮するために、各可動子位置における励磁巻線の鎖交磁束および推力 - 電流特性を磁場解析により算出し、算出したデータをテーブル化して LSRM モデルに入力した。シミュレーション結果と実験機を用いた測定結果とを比較し、誤差の要因やその程度を検討することで瞬時値解析の精度を改善し、従来に比べ高精度なシミュレーションが行えるモデルを構築できた。

(4) LSRM の特性向上を目指して、電流形インバータ (CSI) を用いた新しい駆動システムを検討した。シミュレーションおよび実験により特性評価を行い、電流の制御性能の向上および効率が向上することを確認した。また、CSI によって駆動される LSRM のための推力脈動低減法を提案した。推力脈動低減のために力分布関数 (FDF) を用いた制御方法を検討し、FDF を CSI によって駆動される LSRM に適用するための新しい回路構成を提案した。提案した駆動回路を図 8 に示す。提案した駆動システムによる LSRM の推力脈動をシミュレーションおよび実験により調べた。図 9 に FDF を適用したときの静推力波形の測定結果を示す。図に示すように、従来の駆動回路である図 2 の電圧形インバータ (VSI) とほぼ同じ静推力波形が得られており、提案する手法で FDF を用いた推力脈動低減法が CSI 駆動の LSRM にも適用可能であることを実証した。ただし、LSRM 実験機では十分に推力脈動が低減できていないので、今後の課題となった。

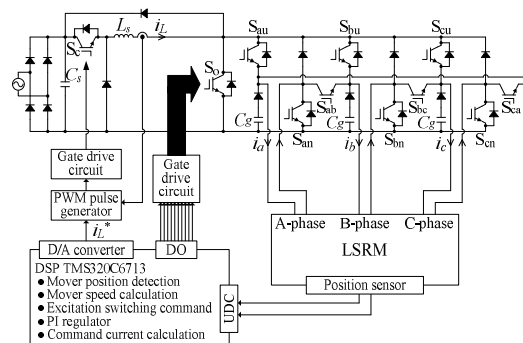


図8 CSI 駆動 LSRM へ FDF を適用するための駆動回路

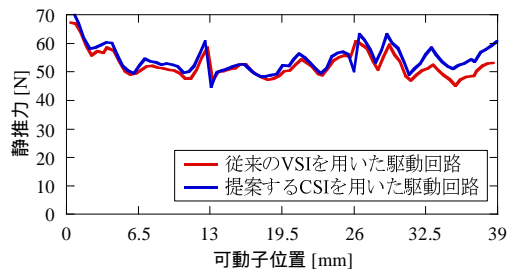


図9 FDF を適用したときの静推力 - 位置特性の測定結果

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計3件)

Tadashi Hirayama, Yuya Nakamori, Takafumi Yamada, Shuma Kawabata, Experimental Characterization of Linear Switched Reluctance Motor for Physical Distribution Conveyance System, Proc. 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 査読有, No.14-2378, 2018, pp.1832-1835
DOI:10.23919/ICEMS.2018.8549090

Tadashi Hirayama, Shuma Kawabata, Method of Applying Force Distribution Function

for Linear Switched Reluctance Motor Driven by Current Source Inverter, Proc. 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), 査読有, No.23E4-1, 2018, pp.3406-3411

DOI:10.23919/IPEC.2018.8507686

T. Hirayama, T. Hiraishi, S. Kawabata, Study on Transfer System with Both Long-Distance Driving and High Positioning Accuracy Using Linear Switched Reluctance Motor, Proc. 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 査読有, No.DS5G-4-19, 2016, pp.1-4

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7837079&isnumber=7837067>

〔学会発表〕(計5件)

平山 斉, 川畑秋馬, 電流形インバータ駆動リニアスイッチトリラクタン্সモータの推力脈動低減法の検討, 平成 30 年電気学会全国大会, 2018

山田鳳文, 平山 斉, 川畑秋馬, 片側式リニアスイッチトリラクタン্সモータの基礎特性の測定, 平成 30 年電気学会産業応用部門大会, 2018

中森侑也, 平山 斉, 川畑秋馬, 短一次形リニアスイッチトリラクタン্সモータの実機実験による特性解析の評価, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 2017

平山 斉, 平石貴将, 川畑秋馬, リニアスイッチトリラクタン্সモータの駆動回路が鉄損に及ぼす影響, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 2016

平石貴将, 平山 斉, 川畑秋馬, 搬送システム用リニアスイッチトリラクタン্সモータの運転特性および効率特性解析, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 2016

〔その他〕

ホームページ等

鹿児島大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻電気エネルギー工学分野 川畑研究室
研究成果

<http://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~kawabata/html/paper-list.html>

鹿児島大学研究者総覧 平山斉 研究活動

http://ris.kuas.kagoshima-u.ac.jp/html/100005328_ja.html

6. 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。