学術論文

横方向磁束型フラックスリバーサルリニアモータにおける構造の検討

Study of Structure for Transverse Flux Type Flux Reversal Linear Motor

吉田 健吾^{*1}(学生員), 松澤 慎^{*1}, 鈴木 憲吏^{*1}(正員)

Kengo YOSHIDA (Stu. Mem.), Shin MATSUZAWA, Kenji SUZUKI (Mem.)

This research is a proposal of a novel transfer device using a Transverse Flux-Flux Reversal Linear Motor (TF-FRLM). Transfer device in this paper is mounted on a carrier apparatus which was operated in parallel synchronous operation. This digest mainly discusses the overview of a transfer device and the optimization result of C-core TF-FRLM. The section of transfer device describes the basic structure and basic operation. In the optimization section, the results for single-sided and double-sided structures are displayed in a graph and the comparison is explained. Three-dimensional finite element analysis is used for dimension optimization.

Keywords: synchronous operation, TF-FRLM, finite element method, PM-LSM, Transfer device, linear motor.

(2020 年 5 月 20 日受付, 2020 年 11 月 25 日再受付)

1 緒言

リニアモータは、搬送分野において半導体工場内の工程間搬送や病院内の書類搬送、空港や運送会社での仕分けシステムなどに使用されている。

従来の搬送システムでは、長距離向けにリニア誘導モータ(Linear Induction Motor; 以下 LIM)が使われ、比較的短距離または高位置決め精度が求められるときにリニア同期モータ(Linear Synchronous Motor; 以下 LSM)が利用されてきた。しかし、近年のドライブ技術の向上に伴い、長距離搬送に永久磁石リニア同期モータ(Permanent Magnet-Linear Synchronous Motor; 以下 PM-LSM)を適用する事例が増えてきており、当研究室でも固定子側を間欠配置にした PM-LSM を利用した搬送システムを提案している[1-6]。

搬送システムにおける問題点は荷物の移載時に発生し、通常、荷物の移載は搬送装置台車を停車させて行うため、台車は停止・再始動を繰り返すことになる。その結果、時間的な搬送効率低下に繋がる。

このような状況に対し、当研究室では台車を止めることなく荷物を移載する手法として2台のPM-LSMを用いた並行同期運転を提案している。並行同期運転を適用する搬送システムの概念を Fig. 1 に示す。また Fig. 2 に並行同期運転の動作説明図を示す。並行同期運転

とは、メインラインを走行している台車にサブラインを走る台車が追従し、Fig. 1 の点線で囲まれた並走区間を同じ位置・速度で走行することで停車せずに荷物を移載する手法である。この手法は、台車を停止させることなく移載し時間短縮や生産効率向上に寄与する。

並行同期運転に関する先行研究[3,4]において、移載装置は、Fig. 3 に示すロボットアームを用いたものを想定していた。先行研究における移載装置はロボットアームを用い、荷物をスライドさせて移載するという方式を採用している。しかしながら、ロボットアームは重量が重く、メンテナンスに専門の知識を持った技術者が必要だという欠点をもつ。

Fig. 1 Concept of conveyance system for long distance.

Fig. 2 Basic operation of parallel synchronous operation.

連絡先：鈴木 憲吏, 〒158-8557 世田谷区玉堤 1-28-1, 東京都市大学電気機器研究室,
e-mail: suzukik@tcu.ac.jp

^{*1} 東京都市大学 電気機器研究室

Fig. 3 Transfer device using robot arm.

このことより、搬送装置台車に搭載する移載装置としてロボットアームを用いたものは最適とは言えない。そこで本研究では、ロボットアームを用いない新しい移載装置を考案し、実現することを目的とする。

本論文では2つのことについて述べる。1つ目は、先行して提案している新しい移載装置の基本構造と動作説明、2つ目は提案するリニアモータの構造を三次元有限要素法で解析し、固定子形状変更に伴うコギング力・推力・推力脈動について比較検討する。

2 提案する移載装置

2.1 条件と要求性能

条件として、搬送装置と移載装置の諸定数を Table 1 に示す。搬送装置台車の縦・横の寸法記号 Y_0, X_0 は Fig.3 に示してある。移載装置が搭載される搬送装置は、可動磁石型 PM-LSM であり、固定子巻線はコスト低減のため間欠配置されている。搬送装置台車の縦横の寸法は実機からの測定結果であり、荷物の重量と台車速度は先行研究[4]からの引用である。

移載装置に求められる性能を以下に示す。

- 1) **移載を短時間でできること** 理由：高速に移動する台車を減速させることなく、移載区間（並行同期運転区間）で移載させるため。
- 2) **軽量化** 理由：台車に搭載するため軽量化が必要で、重い場合は、加減速するとき電流を多く流さなければならず、銅損の増加につながる。
- 3) **メンテナンス性の向上** 理由：メンテナンスの回数と時間を減らし、メンテナンスコスト低減につながる。

以上の要求を満たす移載装置の考案と、適切なアクチュエータの選定を行わなければならない。

リニアモータの一般的な特性として、高速性を持ち、ギアなどの変換機構を必要としないことから上記要求を満たすことが可能である。

2.2 アクチュエータの提案および動作原理

新たに提案する移載装置の動力源には、各要求条件を満たし、軽量化かつ構造がシンプルなりニアモータの横磁束型磁束反転リニアモータ (Transverse Flux Type-Flux Reversal Linear Motor ; 以下 TF-FRLM) を適応する[7, 8]。従来の PM-LSM の固定子では、各相はバックヨークでつながれた構造の積層鉄心に対して、TF-FRLM は、各相を独立に C 型で成形した積層鋼板で固定子を構成することから電磁鋼板の使用量が削減でき軽量化が期待できる。

Fig. 4 に提案する移載装置の外観を示す[9]。Fig. 5 に提案する移載装置の断面図の一部分を示す。Fig. 4 で搬送装置台車上と荷物を載せるためのカバーの間にある四角い箱は、バッテリーや制御装置を表している。Fig. 4 では、ケーブル、搬送装置の巻線、永久磁石はモデリングしていない。

Table 1 Precondition of carrier vehicle and transfer device.

Item	Symbol	Value (Unit)
Long side of carrier vehicle	Y_0	550 (mm)
Short side of carrier vehicle	X_0	279 (mm)
Weight of luggage	m	5 (kg)
Velocity of carrier vehicle	v	1 (m/s)
Expected transfer time	t	1 (s)

Fig. 4 Three-dimensional structure of novel transfer device.

Fig. 5 Cross section of the novel transfer device.

Fig. 4, Fig. 5 より提案する移載装置は, TF-FRLM, バッテリ, モータドライバなどの制御装置, 非接触給電装置, TF-FRLM の可動子と一体化している荷物を置くためのカバー, キャスタで構成されている。Fig. 4 に示すように, TF-FRLM をカバーの両端に設置することで, 推力 2 倍かつ垂直力相殺の構造としている。

提案する移載装置の基本動作は, 荷物を載せたカバーへ TF-FRLM により推力が加わり, その推力によりキャスタが回転する。荷物を載せたカバーは, 隣の走行路を走る搬送装置の台車へと移動し, 移載が完了される。カバーと荷物は常にセットで移動する。

2.3 TF-FRLM の基本構造, 動作原理と諸特性

Fig. 6 に C コア TF-FRLM の 3 次元の基本構造を示す[7,8]。以下, Fig. 6 の上にある 3 つのコアを可動子, その下にある複数の鉄心を固定子と呼称する。解析上は, Fig. 5 に示される固定子と可動子の構成と逆としている。TF-FRLM は, C 型コアの中央に電機子巻線が巻かれている。永久磁石は, コアのギャップに面している部分に貼られており, N 極・S 極が横から見ても進行方向から見ても交互に配置されている。固定子は磁性体の鉄心である。可動子の 3 つの電機子巻線にはそれぞれ 120 度の位相差を持った正弦波交流電流が流されており, 1 つの電機子巻線が U, V, W 相の内の 1 つを担当している。巻線に電流を流すとギャップ中に磁束が増加するところと減少するところが発生する。磁束が多い所と鉄心は強く引きあい駆動する。また, 先行研究にて三次元有限要素法により Fig. 6 に示す形状の TR-FRLM を得た[9]。また, 推力脈動やコギング力が最小となる寸法を Fig. 7 および Table 2 に示す[9]。

3 提案リニアモータの解析結果

3.1 片側式 TR-FRLM の特性

先行研究にて決定した寸法を基に片側構造の TR-FRLM の詳細な解析を行う。解析結果を Fig. 8, Fig. 9 に示す。ここで有限要素法の磁界解析は, 電磁界解析ソフト JMAG-Designer19.0(株式会社 JSOL)を用いた。TF-FRLM の一相の巻線数は $N=75$ Turns であり, 巻線抵抗は $R_a = 0.184 \Omega$ である。永久磁石には NMX-42BH(日立金属製)を使用し, 可動子鉄心と固定子鉄心には無方向性電磁鋼板 50JN1300(JFE スチール製)を用いる。ギャップ長は 1 mm である。また, 各解析条件は, コギング力の解析時は無負荷解析,

Fig. 6 Three-dimensional structure of single side type TF-FRLM.

Fig. 7 Dimensions of single side TF-FRLM.

Table 2 Specification of the optimal shape.

Item	Symbol	Value (Unit)
Total length of the C-cores	L_{c2}	197.4 (mm)
Winding thickness	L_{a2}	7.7 (mm)
Spacing between C-cores	L_{b2}	28 (mm)
Pole pitch	τ_2	10.5 (mm)
Thickness of the stator core	L_{s2}	6 (mm)
Displacement of stator core	L_{st2}	2.25 (mm)
Armature winding width	W_{a2}	20 (mm)
Height of armature winding	H_{a2}	7.7 (mm)
C-core height	H_{c2}	18 (mm)
C-core thickness	W_{c2}	22 (mm)
Magnet height	H_{m2}	1.5 (mm)
Stator core height	H_{s2}	10 (mm)

Fig. 8 Characteristics of thrust force, average thrust and cogging force.

推力の負荷解析は定格電流 5 A（最大値）、誘起電圧は可動子速度 5.25 mm/s として解析している。Fig. 8 は TF-FRLM の推力・コギング力を、Fig. 9 は誘起電圧を示す。推力は、最大 27.7 N、最小 23.2 N、平均 25.4 N となり、推力脈動は 17.7%であった。また、コギング力は最大 2.36 N、最小 -2.07 N となった。誘起電圧に関しては、高調波成分のひずみが含まれることで発生推力にひずみを生じさせている。

次に、電流値として 2.5 A、5 A、7.5 A、10 A の各負荷解析結果の平均推力を Fig. 10 に示す。この変化から TR-FRLM の推力定数 K_f は、7.07 N/A と求まり線形性の推力特性が得られることを確認した。また、誘起電圧は、台車速度を 1.31 mm/s、2.63 mm/s、5.25 mm/s、10.5 mm/s、21.0 mm/s、42.0 mm/s と変化させた際の誘起電圧の実効値を Fig. 11 に示す。この結果から誘起電圧定数 K_e は、2.33 V/m/s と求まった。

しかしながら、Fig. 6 より片側構造を取ることで垂直力が発生してしまう。解析上では、平均して 327 N が固定子側に加わることが確認できた。

3.2 両側式 TR-FRLM の基本特性

次に TR-FRLM に生じる垂直力の低減のため、片側構造から両側構造の TR-FRLM について有限要素解析による検討を行う。Fig. 12 に両側式 TR-FRLM の三次元モデルを示す。Fig. 12 は Fig. 6 の固定子を挟み込むよう可動子を配置し、固定子は磁気飽和を考慮し 2 倍の厚さ、各相は同一相に設置した片側構造の 2 倍の重量となる構成とし、ギャップ長は 1 mm としている。

Fig. 13 に両構造のコギング力を、Fig. 14 に両構造の推力特性を示す。両側構造のコギング力は最大 4.91 N、最小 -5.55 N と解析結果が求まった。推力は、最大 55.1 N、最小 45.7 N、平均 50.4 N となり、推力脈動は 18.6%であった。固定子を挟み込む両側構造としたことで推力は 2 倍に増加し、コギング力も 2 倍に増加したことが確認できる。また、垂直力は、ゼロ付近であることから相殺が確認できる。

以上から両側構造により垂直力の低減かつ推力の倍増が可能なることは明らかである。例えば、移載装置用アクチュエータの要求推力が片側構造でも十分な場合、垂直力を相殺可能な両側構造の方が 1/2 倍の形状での設計が可能となり小型化ならびに薄型構造を実現したアクチュエータが可能となる。また、Fig. 5 に示す TR-FRLM の配置方法とは異なった配

Fig. 9 Characteristics of induced voltage waveform.

Fig. 10 Characteristics of thrust force of each current.

Fig. 11 Characteristics of induced voltage of each speed.

Fig. 12 Three-dimensional structure of double side type TF-FRLM.

Fig. 13 Characteristic of the cogging force of each type.

Fig. 14 Characteristics of thrust force of each type.

置も可能となり、移載装置の自由度向上につながる。

3.3 両側式 TR-FRLM の構造改善について

3.3.1 固定子形状の提案

Fig. 12 の TF-FRLM を製作する上で固定子に用いる鉄心の固定方法が重要となる。固定子の各鉄片をモールドして固定した場合、鉄片以上のフレームが必要となり大型化につながる。そこで、固定子の各鉄片を Fig. 15 に示すように固定子センター部分にプラスチックによる固定用ブラケットを利用した TR-FRLM を提案する。Fig. 15 は、磁界の影響を受けない材質に鉄片を嵌めあい固定する方式となる。Fig. 16 に横から見た TR-FRLM の形状を示す。Fig. 12 と異なり固定子の鉄片は、短い形状となる。

3.3.2 各固定子形状における解析結果

有限要素法の解析条件は、負荷解析とし定格電流 5 A (最大値) として解析を行った。また、解析は、負荷解析のみとし、誘起電圧や無負荷解析時のコギング力は求めている。

Fig. 17 に新たに提案した固定子形状 (Fig. 15) と

Fig. 15 Proposed new structure of TR-FRLM.

Fig. 16 Dimensions of new stator.

Fig. 17 Characteristic of thrust force of new stator shape and initial shape stator.

Fig. 12 の形状で求めた推力特性を示す。新たに提案した形状における推力は、最大 59.9 N, 最小 45.0 N, 平均 52.5 N となり、推力脈動は 28.5%であった。この形状においても推力の発生が確認でき、Fig. 12 と同等な駆動が可能と言える。しかしながら、推力脈動が 9.9%増加している事が確認できる。

推力脈動の低減には、固定子形状を変更することで実現できる。そこで、推力脈動を考慮し、各固定子の形状について複数の形状で検討を行う。Fig. 18 は、各固定子形状となる。Fig. 18 の各固定子形状は以下の条件で決定している。

Fig. 18 List of stator shapes.

Fig. 19 Characteristic of thrust force of each pattern.

Table 3 Characteristics comparison of each stator shape.

Thrust force	Basic	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3	Fig. 12
Maximum [N]	59.9	44.8	51.1	34.8	55.1
Minimum [N]	45.0	35.2	41.6	21.2	45.7
Average [N]	52.5	40.0	46.4	28.0	50.4
Thrust ripple rate [%]	28.5	24.1	20.5	48.3	18.6

- 1) Basic ; 新たに提案した形状 (Fig. 15)
- 2) Pattern 1 ; 角を 2 mm で削った形状
- 3) Pattern 2 ; 円弧状に削った形状
- 4) Pattern 3 ; 厚さと同じ直径の棒状

Fig. 19 に各固定子形状における推力特性を示す。

Table 3 に各固定子形状の特性をまとめている。Fig. 19 と Table 3 より Basic 形状から Pattern 1 では、24% の推力低下を招き、推力脈動は 4.4% 低減できている。Pattern 2 では、推力は 12% 減で推力脈動は 8% 程度低減している。Pattern 3 では、推力は 47% 減で推力脈動は 20% 増加している。

以上からギャップ中の磁束が鉄心に流れ込む際の断面積およびギャップ距離に応じて特性が変化することが確認できた。また、固定子形状において、Pattern 2 の様な可動子側ギャップ面を角の無い円弧とする形状は、磁束の集中する箇所を減らせ推力脈動の低減、推力低下の軽減につながり有用と言える。

4 結言

本論文は、移載装置に利用するアクチュエータとし

て TR-FRLM を提案した。片側構造と両側構造を比較し、推力向上並びに垂直力低減を確認、小型化につながる結果となった。製作の簡素化を目的に新たな固定子を提案し、結果から提案前の形状と同等な推力特性を得られ、推力脈動低減の固定子形状を明らかにした。

以上、提案のアクチュエータは、要求を満たす推力や形状であることが確認でき有用であると言え、移載装置以外の動力源にも生かせる。今後は、移載装置に組み込む際の搭載方法の再検討、さらなる脈動の低減および実機にて評価を行う。

参考文献

- [1] Kenji Suzuki, Yong-Jae Kim, Hideo Dohmeki, "Modeling about the discontinuous armature arrangement interval of the permanent magnet type linear synchronous motor", *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2007.
- [2] Kenji Suzuki, Yong-Jae Kim, Hideo Dohmeki, "Proposal of the section change method of the stator block of the discontinuous stator permanent magnet type linear synchronous motor aimed at long-distance transportation", *18th International Conference on Electrical Machines*, 2008.
- [3] Kenji Suzuki, Yong-Jae Kim, Hideo Dohmeki, "Proposal of the Long-distance Transportation System in the Factory Using PM-LSM", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2009.
- [4] Takuya Sugimoto, Kenji Suzuki, Hideo Dohmeki, "A Position Detecting Method Using Hall Element for Discontinuous Stator Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", *International Conference on Electrical Machines*, 2010.
- [5] Kenji Suzuki, Yong-Jae Kim, Hideo Dohmeki, "Driving Method of Permanent-Magnet Linear Synchronous Motor With the Stationary Discontinuous Armature for Long-Distance Transportation System", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 5, pp. 2227-2235, 2012.
- [6] Takahiro Inagaki, Kenji Suzuki, Hideo Dohmeki, "The study of parallel synchronous drive in Permanent magnet linear synchronous motor", *11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, 2017.
- [7] Baoquan Kou, Jun Luo, Xiaobao Yang, Lu Zhang, "Modeling and Analysis of a Novel Transverse-Flux Flux-Reversal Linear Motor for Long-Stroke Application", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, No. 10, pp. 6238-6248, 2016.
- [8] Jun Luo, Baoquan Kou, Yiheng Zhou, Lu Zhang, "Analysis and design of an E-core transverse-flux flux-reversal linear motor", *19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2016.
- [9] Kengo Yoshida, Kenji Suzuki, Hideo Dohmeki, "Proposal of a Novel Transfer Device Using a Linear Motor in Parallel Synchronous Operation", *12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, 2019.