搬送システムのための永久磁石形リニア同期モータの基礎研究

正員 早 船 一 弥 (東京大)

正員 正 田 英 介 (東京大)

1. はじめに

現在、工場などにおける搬送システムは、まだ大半がベルトコンベアなどによる従来方式によって占められている。しかし、自動化システムでの搬送では新方式、つまりリニア電磁アクチュエータの採用が活発になってきている⁽¹⁾⁽²⁾。搬送システム用のリニア電磁アクチュエータとして、現在最も使われているリニア誘導モータ（以下、LIM と略記）では、位置決め性能の劣ることが一番の問題である。これに対して、LIM のベクトル制御などの研究が行われている⁽³⁾⁽⁴⁾。リニアパルスモータ（以下、LPM と略記）においては、空け長の問題や長ストロークの搬送をどうするかなどの問題が残されている。

これらの欠点を克服し、高度な制御の要求にこたえるようなリニア電磁アクチュエータ搬送システムとして、永久磁石形リニア同期モータ（以下、PM 形 LSM と略記）を応用したシステムの研究を著者らは行っている。PM 形 LSM は、界磁損失がなく可動子の構造が簡単にでき、定点保持力も得ることができるなどの特徴を有する。更に、高速搬送には本来向いているように、LPM ほど空け長を縮める必要もない。反面、位置決めの方法が確立しておらず、いかにしてこれを解決すべきか、LSM の構造、制御の方法も含めて考えていかなければならない。

本論文では、まず試作した PM 形 LSM 搬送システムモデルの発生力の測定結果および加減速・位置決め実験の結果を示す。更に、PM 形 LSM の発生力解析のための解析モデルと数値解析方法について説明

し、実験結果と比較して示す。最後に、高い位置決め精度をもたせるための LSM の構造および駆動方法について述べる。

2. PM 形 LSM 搬送システムモデル

〈2・1〉 搬送システムモデルの構造 PM 形 LSM 搬送システムの基礎的データを集め、高度な要求を満たす将来の搬送システムの概念を得るため、システムモデルを試作した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。対象とする搬送システムは自動化工場内工程間を結ぶものであり、その要求仕様は搬送重量 10 kg、搬送速度 5 m/s、自己保持能力 100 N、位置決め精度 ± 0.1 mm を考えている。この搬送システムの 1/10 モデル程度のものを試作した。

図 1 に試作モデルの構造を、表 1 に仕様を示す。試作モデルは平行に置かれた二つの同一の固定子を持ち、各々の固定子には三相巻線が施されている。巻線は 1 スロットあたり $\phi 0.5$ mm のホルマル線で 30 ターン波巻に巻かれ、Y 形結線されている。二つの固定子の巻線は、巻線励磁用パワーアンプに並列に接続さ

図 1 PM 形 LSM 搬送システムモデルの構造

Fig. 1. Structure of the PM-type LSM transportation system model.

PM-Type Linear Synchronous Motor for Transportation Vehicles in Automated Production Lines. By Kazuya Hayafune, Member & Eisuke Masada, Member (Faculty of Engineering, University of Tokyo).

早船一弥：正員，東京大学工学部電気工学科

正田英介：正員，東京大学工学部電気工学科

表 1 PM 形 LSM 搬送システムモデルの仕様

Table 1. Specifications of the PM-type LSM transportation system model.

固 定 子	寸法 ($L \times W \times H$)	700×150×64 mm
	重 量	5,000 g
	有効ストローク	633 mm
	極ピッチ	18 mm
ス ロ ッ ト	寸法 ($L \times W \times H$)	30×3×5 mm
	スロットピッチ	6 mm
可 動 子	寸法 ($L \times W \times H$)	30×152×63 mm
	重 量	500 g
	空げき長	2~9 mm
永 久 磁 石	種 類	SmCo ₅
	個 数	4
	寸法 ($L \times W \times H$)	12×30×(1, 3, 5) mm
固定子巻線	巻線方法	全節集中巻
	結線方法	Y結線
	巻 数	30
	定格電流	2 A

れる。可動子および固定子は成層されていない純鉄でできている。

可動子は4個のサマリウム・コバルト磁石（日立金属 HICOREX-18 B）をもち、固定子の下面から吸引することによって自重を保持している。このモデルは完全磁気浮上システムを考える前段階のものであるので、空げきの保持は補助巻線の電流制御などによらずベアリングによっている。

〈2・2〉搬送システムモデルの制御システム 試作モデルは VME/10 マイクロコンピュータ（CPU：68010）で制御される。コンピュータは位置センサからの情報をもとに固定子巻線励磁用パワーアンプを制御する。

位置センサはレーザダイオード反射形ホトセンサであり、これを2個組合せて0.6 mm 間隔の白黒ストライプを検出している。これにより、1.2 mm の位置検出精度を得ている。可動子には、位置センサのほか進行方向加速度を測定するための加速度計も取付けている。

固定子巻線駆動のためにインバータを使うべきであるが、本システムが第一試作段階であり、高調波の影響を極力避けたいことや、様々な基礎データを収集するのに電源の制御性の良さが必要とされるため、三相の正弦波電圧を発生するパワーアンプを使っている。このパワーアンプの定格は、出力電圧 0~25 V、出力電流 0~6 A、出力周波数 DC~30 Hz である。

3. 搬送システムモデルの特性

〈3・1〉発生力の測定結果⁽⁷⁾ リニアアクチュエータの特性値に関しては、一般的に文献(8)に示され

図 2 ディテント力の測定結果

Fig. 2. Experimental results of detent force.

ているようなものが測定される。しかし、搬送用 LSM については過去にほとんど例がないため、ここでは LPM に準じた特性値を測定した。

(1) ディテント力特性 可動子に滑車を介して重りをぶら下げ、進行方向に引っ張る。固定子巻線無励磁の状態で徐々に重りを増していき、可動子が1スロットピッチ変位するときの最大負荷を測定する。測定結果を図2に、磁石厚（以下、PM 厚と呼ぶ）をパラメータとして示す。

(2) 吸引力特性 可動子が安定点にあるとき、ばね秤で可動子を真下に引っ張り固定子から離れるときの力を測定する。測定値には可動子重量の500 gを加えて、純粋な磁石の吸引力を求める。図3に固定子巻線無励磁の場合のPM厚をパラメータとした吸引力と空げき長の関係を示す。固定子巻線を励磁すると吸引力は増加する。PM厚3 mmの場合で固定子巻線定格電流（2 A）励磁により、吸引力は空げき長により12~32%増加する。

(3) 静推力特性 固定子巻線を直流電流で励磁し、可動子を静止状態で安定させる。その後、ディテント力と同様な測定方法で静推力を測定する。図4に固定子巻線定格励磁（励磁電流2 A）のときの、PM厚をパラメータとした静推力と空げき長の関係を示す。

静推力と吸引力の比較を行うと、固定子巻線定格励磁時、PM厚3 mmでは空げき長2~5 mmで、静推力の9.2~6.3倍の吸引力を発生している。

(4) 自起動周波数特性 可動子上に負荷を載せ

図 3 吸引力の測定結果(固定子無励磁時)
Fig. 3. Experimental results of attractive force (without stator excitation).

図 5 自起動周波数-負荷特性の測定結果
(PM 厚 3 mm)
Fig. 5. Experimental results of starting frequency (PM thickness: 3 mm).

図 4 静推力の測定結果〔固定子巻線
定格 (2A) 励磁時〕

Fig. 4. Experimental results of static thrust force (with rated stator excitation).

固定子巻線を定格電流励磁し、同期起動できる最大の周波数を測定する。PM 厚 3 mm のときの空けき長をパラメータとした自起動周波数と負荷重量の関係を図 5 に示す。

(5) 動推力特性 固定子巻線を定格電流で励磁し、励磁周波数を一定に保って可動子を起動する。ディテント力の測定と同じように、可動子には負荷重量を負わせて重りを徐々に増していき、同期運転できる

図 6 動推力-周波数特性の測定結果
(PM 厚 3 mm)

Fig. 6. Experimental results of kinetic thrust force (PM thickness: 3 mm).

最大負荷重量を測定する。動推力は周波数が零で静推力と等しくなる。PM 厚 3 mm の場合の空けき長をパラメータとした動推力と周波数の関係を図 6 に示す。

以上のように、PM 形 LSM 搬送システムモデルの発生力の実験結果を得た。吸引力は強力な希土類磁石のために、永久磁石厚 3 mm で空けき長 2 mm のとき 50 N、つまり 5 kg 程度の荷重に耐える力を発生する。

静推力は同様の条件で 6.4 N が測定された。動推力は 5 Hz (180 mm/s) で 3 N である。空けき長 2 mm は実際の搬送システムで可能であるから、この条件で測定値を判断する。試作モデルが実際の 1/10 モデルであれば、基本的に発生力は測定値の 10 倍と考えることができ、搬送重量 50 kg、静推力 64 N の搬送システムとなる。試作モデルの有効ストロークが短いので速度がでないのはしかたないが、吸引力を除けば推力が不足している。これは、可動子支持用ベアリングの摩擦が大きいかことや、固定子巻線の定格励磁電流を熱的な配慮から低く抑えていることが原因となっている。しかし、この不足分は固定子巻線励磁電流の増加、あるいは搬送路の工作精度を上げて空けき長の短縮により満足されると考えられる。

〈3・2〉 加減速・位置決め実験結果 LSM システムがどの程度の加減速特性、位置決め精度をもっているのか実験してみた。実験では、停止状態の LSM システムに対し

- (i) 固定子巻線を励磁する周波数を一定割合で増加させていき可動子を加速する。
- (ii) 設定された速度に達したら周波数指令は一定に維持する。
- (iii) 停止位置に近付いたことを位置センサで読み取った後、一定割合で励磁周波数を減少させて可動子を減速する。
- (iv) 可動子が瞬間的に停止できる速度にまで減速したところで、その速度を保持して目標停止位置が接近するのを待つ。
- (v) 停止位置直前を可動子が通過した時点で、固定子巻線を直流励磁して可動子を停止させる。

このような制御アルゴリズムで加減速・位置決め実験を行った。ここでは、可動子を停止状態で保持するために、固定子巻線を直流励磁するという方法をとっている。

PM 厚 3 mm、空けき長 4 mm、固定子励磁電流 2 A で実験を行った結果を図 7 に示すが、(a) 図は可動子の変位を、(b) 図は速度を表し、(c) 図は可動子に取付けられた加速度計の出力信号波形とその周波数スペクトルを示す。可動子速度は位置センサの出力値を 50 ms ごとにサンプルして図に表示した。指示した移動距離は 480 mm、一定速度移動時の可動子速度は 490 mm/s、加速度および減速度はどちらも 736 mm/s² である。このほか様々な負荷、速度、加減速度条件において実験を行ったが、可動子は指示停止位置 ± 0.6 mm で停止し、この制御方法で ± 0.6 mm の停止精度を得ることができた。位置センサの精度がもっと上

図 7 加減速・位置決め実験結果

Fig. 7. Results of positioning experiment.

れば更に良い位置決め制御ができるものと思われる。移動速度のグラフがかなり波うっているが、これは進行方向加速度のダンピング不足による振動が現れているものである。可動子上にダンパ巻線を施すなどの対策が必要であろう。試作 LSM モデルでは、要求仕様の ± 0.1 mm の位置決め精度は得られなかったが、これを改善する方法については第 6 章で述べる。

4. PM 形 LSM の発生力解析モデル

本章では、簡単な解析モデルを使って PM 形 LSM の発生力の解析を行う。PM 形 LPM の推力解析に関しては長坂らの文献⁽⁹⁾があるが、それは永久磁石が連続的に配置され、かつ空けきが短い場合の LPM に対するものであり、今回の解析モデルとは条件が異なる。また、山本らの文献⁽¹⁰⁾では、空けきのパーミアンスを計算し、磁気随伴エネルギーから推力を求めている

点で、ここでの解析モデルと手法が異なる。更に、吸引力に関しては酒井の文献⁽¹¹⁾があるが、これも LPM のように空けき長の小さなモータにおいて、可動子の変位に伴う吸引力の変化を差分法解析で求めている、ここで示す解析モデルによる手法とは異なる。

〈4.1〉解析モデル 試作した PM 形 LSM を図 8 のモデルで解析する。以下の解析における座標系は同図中に示す。希土類磁石の減磁曲線は直線状であり、その透磁率は真空の透磁率とみなしてもよい。更に、希土類磁石は一樣に磁化していると考えられるので、側面を流れる幾つかの電流ループでモデル化できる。この様子を図 8 (a) に示す。まず、永久磁石の表面磁化電流密度 $\mathbf{A}$ は、磁化の強さ $\mathbf{M}$ を用いて

$$\mathbf{A} = \mathbf{M} \times \mathbf{n} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\mathbf{n}$: 単位法線ベクトル
と表される。このため、磁石側面を流れる等価電流ループの電流振幅 I_m は次のようになる。

$$I_m = |\mathbf{A}| \cdot d \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 d : 永久磁石の厚さ

実際の計算では、永久磁石の表面磁化電流密度は希土類コバルト磁石のものをを使い、 $|\mathbf{A}| = 670 \text{ kA/m}$ としている (日立金属 HICOREX-18 B のカタログ値の平均値)。このため永久磁石厚 3 mm では $I_m = 2,010 \text{ A}$ となる。磁石の厚さの影響をモデルに考慮す

るために、等間隔に置いた幾つかの電流ループを考える。この電流ループの数は、実際の磁束密度分布の計算において収束計算の相対誤差が平均で 1% 以下になるという基準で 10 個と定めた。

次に、固定子と可動子の鉄材の影響は、磁石の電気影像を幾つか置くことにより考慮できる。つまり、鉄の透磁率は非常に大きいので、磁束はその表面にほぼ垂直に侵入すると考えられる。そこで、静電場のアナロジーとして磁石の影像を置けば、鉄の部分を取除いて空けき磁束分布を計算することができる。この様子を図 8 (b) に示す。同図で線 a と線 b の間为空けきであり、実際の永久磁石が存在する領域である。線 a より上は固定子の鉄心を表し、線 b より下は可動子の鉄心をモデル化している。固定子スロットの影響はカーター係数で補正する。影像の総数は上述の等価電流ループの総数を決定する基準と同じ基準で 20 個とした。

空けき中の磁束密度分布はビオ・サバルの法則で求める。つまり、すべての影像の電流ループについて発生磁束密度を計算し総和をとる。

固定子巻線励磁電流は x 成分のみをもつ固定子表面のカレントシートで置き換える。固定子励磁電流による起磁力の基本波成分 F_1 は、試作 LSM 搬送システムモデルで採用している三相全節集中巻の場合には

$$F_1 = \frac{3NI_p}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} - y - \omega t\right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 N : 一相あたりの巻数、 I_p : 励磁電流の振幅、 τ : 極ピッチ、 ω : 一次電流の角周波数

可動子が同期速度 v_s で y 方向に移動しているとき、次の関係が静止座標 y と移動座標 y' との間に成り立つ⁽¹²⁾。

$$y = v_s t + y' + y_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 y_0 : F_1 からの可動子の遅れ

(4) 式を (3) 式に代入して

$$F_1 = \frac{3NI_p}{\pi} \cos \frac{\pi}{\tau} (y' - y_0) \dots\dots\dots (5)$$

従って、カレントシートの電流密度 $j_x(y')$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} j_x(y') &= \frac{\partial F_1}{\partial y'} \\ &= -\frac{3NI_p}{\tau} \sin \frac{\pi}{\tau} (y' - y_0) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

空けき中の磁束密度分布とカレントシートの電流密度分布がわかると、静推力は Bil 則によって、吸引力はマクスウェルの応力法によって求めることができる。

図 8 PM 形 LSM の解析モデル

Fig. 8. Loop current model.

(a) 静推力の解析モデルによる計算値と測定値との比較(固定子巻線定格(2A)励磁時)
(a) Comparison of static thrust force between analytical model and experiment (with rated stator excitation).

(b) 吸引力の解析モデルによる計算値と測定値との比較(固定子無励磁時)
(b) Comparison of attractive force between analytical model and experiment (without stator excitation).

図 9
Fig. 9.

実際の静推力の計算では $N=30$ ターン, $\tau=18\text{mm}$, $I_p=2\text{A}$ で計算し, $y_0=\tau/2$ で静推力は最大値をとる。

〈4・2〉 測定値と解析モデルとの比較 等価電流ループと電気映像を使った解析モデルによる静推力と吸引力の計算結果と、試作モデルによる測定値とを比較してそれぞれ図 9 (a), (b) に示す。

静推力では両者はおよそ一致を見ていて、この解析モデルの妥当性が証明されている。しかし、実際には静推力の測定値には可動子支持用ベアリングの摩擦トルクも含ませなければならないわけであるから、測定値と解析モデルによる計算値とはもう少し誤差が広がる。吸引力については、静推力に比べ測定値と計算結果との誤差が大きい。特に、磁石厚さが薄いときの誤差が大きい、これは磁石の厚さに比べて空け長さの大きいために、磁束の漏れがかなり大きくなっていることが影響しているものと思われる。この解析モデルでは、固定子スロット付近の磁束密度分布が正しく表されないことも誤差の増加原因である。

5. 差分法による磁界解析

電気映像法と電流ループによる解析モデルでの解析では、スロット付近の磁束の評価が正しく行われず、ディテント力の評価も不可能である。搬送システムの構造や制御パラメータの最適化を行うためにも、更に次章で述べるような新しい形状のシステムの磁界解析

図 10 空け磁束密度の差分法による計算値と測定値との比較

Fig. 10. Comparison of air gap flux density between FDM and experiment.

のためにも数値解析が必要となる。ここでの解析対象がリニアアクチュエータであり、各々の要素の形状が長方形であるので、メッシュの形状や境界条件が容易となるため、差分法 (FDM) で磁界解析を行った。

〈5・1〉 基本方程式 次のような仮定のもとに PM 形 LSM の磁界解析を行う。

- (i) 二次元解析を行う
- (ii) 渦電流は無視する
- (iii) 鉄の飽和は考慮する
- (iv) すべての材質は等方的とする
- (v) 界磁巻線は一様に電流の流れる領域とする
- (vi) 永久磁石は等価磁化電流密度で表す

真電流と等価磁化電流密度の和を $\mathbf{J}$, ν を磁気抵抗率, $\mathbf{A}$ をベクトルポテンシャルとすると、解くべき基本方程式は

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J} \dots\dots\dots (7)$$

となる。解析対象は二次元場であるので、磁束密度は x, y 成分をもち、電流 $\mathbf{J}$ およびベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$ は z 成分のみをもつ。よって、(7)式は z 成分のみを考えればよいので、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $A=A_z$, $J=J_z$ としている。鉄の飽和の影響はヒステリシス曲線を三つの領域に分けて、それぞれ

(a) 静推力の差分法による計算値と実験値との比較
〔固定子巻線定格 (2A) 励磁時〕
(a) Comparison of static thrust force between FDM and experiment (with rated stator excitation).

(c) ディテント力の差分法による計算値と実験値との比較
(c) Comparison of detent force between FDM and experiment.

(b) 吸引力の差分法による計算値と実験値との比較
〔固定子無励磁時〕
(b) Comparison of attractive force between FDM and experiment (without stator excitation).

図 11

Fig. 11.

を関数近似して磁気抵抗率を求めることで考慮する。

〈5・2〉発生力の計算方法 LSM の静推力は次のようにして計算される。可動子の永久磁石を取外し、可動子は鉄心のみの状態で固定子巻線からの発生磁束分布を求める。こうして求めた磁束密度の y 成分 (空けきに平行な成分) と永久磁石の等価磁化電流とで働く力を Bil 則で求める。

ディテント力の計算方法は固定子巻線が無励磁の状

態で永久磁石を等価磁化電流で表し、生じる磁束密度分布を求める。この磁束分布にマクスウェルの応力法を適用してディテント力を求める。このとき、同時に吸引力も求まる。

〈5・3〉計算結果 計算した空けき磁束密度と試作システムの実測値とを比較して図 10 に示す。計算値は空けきの平均値である。FDM による二次元解析は良く実測と一致している。ただ、磁石厚が厚くなると誤差が大きくなってくるのは、厚い磁石は一樣に磁化しているとみなせなくなるためと思われる。

固定子巻線定格励磁時の静推力の計算結果を図 11 (a) に、固定子巻線無励磁時の吸引力の計算結果を (b) 図に、ディテント力の計算結果を (c) 図にそれぞれ測定値と共に示す。まず、静推力は計算結果のほうが、永久磁石厚さ 1 mm と 3 mm で測定値よりも 1.5 N 程度大きな値を示していて、永久磁石厚さ 5 mm ではほぼ一致しているように見える。しかし、実験システムの可動子支持用ベアリングなどの摩擦が 1.5 N あるとすれば、磁石厚 5 mm を除くと FDM による解析結果は測定値と一致していると考えることができる。厚さ 5 mm の磁石では、静推力、吸引力、ディテント力の三つとも測定値がかなり大きい値を出している。空けき磁束密度は測定値と計算値はそれほど変わらない値であることを考えると、厚さ 5 mm の磁石の場合の発生力測定に問題があったものと考えられる。

次に、吸引力では静推力と同様に永久磁石厚さ 5 mm の場合を除けば計算結果は良く測定値と一致していて、第 4 章の解析モデルでは食い違っていた吸引力は、FDM による数値解析ではうまく評価されている

ことがわかる。

ディテント力に関しては測定値の大きさが非常に小さいため、静推力以上に摩擦の影響を受けていて測定値と計算値の比較は難しいが、静推力や吸引力と同様の傾向を見せている。

静推力、吸引力、ディテント力の計算値と測定値とを比較したわけであるが、どれも磁石厚さ5mmを除く薄い磁石の場合には良い一致をみて、差分法による磁界解析と上述の発生力計算の手法が、永久磁石利用のリニア電磁アクチュエータの特性評価に良い基準を与えることがわかった。

6. 位置決め精度向上のための LSM の構造

第3章で述べたように、搬送システムとしての発生力はほぼ要求仕様のものが得られる見通しがついたが、位置決め精度については、固定子巻線を直流励磁する場合でもまだ要求仕様の $\pm 0.1\text{mm}$ は実現できない。これを阻む原因の一つはディテント力である。固定子巻線を直流励磁して可動子を保持する場合には、ディテント力に対抗する静推力を発生させる必要があり、ディテント力を小さく抑えたり、なくしてしまうような可動子や固定子の構造が実現できれば、更に位置決め精度は上がると思われる。

ここで、可動子の永久磁石の配置を変えたシステムの位置決め性能を考えてみる。例えば、図12に示したような可動子の永久磁石の分散配置によって、スロットピッチの1/4の位置決め精度が可能になると思われる。この磁石配置では、永久磁石と固定子スロットとの相互位置関係はLPMのものと同様になっている。このとき、固定子巻線構造に工夫をすることにより、このLSMは二つのモードで動作を行える。つまり、高速搬送が必要な場所では、通常のLSMとして三相交流による固定子巻線の励磁を行い、位置決めが必要な位置では固定子巻線をパルス的に励磁することによってLPM的な動作をさせるのである⁽¹³⁾。可動子の停止時に固定子巻線を直流励磁すれば、更に位置

図12 可動子の励磁磁石分散配置

Fig. 12. Arrangement of PMs on the mover for positioning.

決め精度は向上する。

FDMにより、この可動子構造のLSMとしての静推力、吸引力を解析した結果は、通常磁石配置に比べて推力、吸引力とも約20%の減少という結果になった。しかし、高い位置決め精度が得られるメリットが生かせる応用分野では十分な利用価値があると思われる。

7. 終りに

高精度位置決め系をもつ吸引浮上方式の搬送システムを目標として、その基礎データを得るためにPM形LSM搬送システムモデルを試作した。LSMでも停止制御が可能であり、位置決めも固定子巻線の直流励磁により可能であることがわかった。更に、その発生力の測定結果から搬送用リニアアクチュエータとしての適用可能性が確かめられた。

等価電流ループと電気映像を使った簡易解析モデルとFDMによる数値解析によって、PM形LSMの発生力の特性解析を行った。この解析モデルで静推力と吸引力の大きな評価は可能であった。しかし、吸引力についてはこの解析モデルではうまく評価できない場合があり、それはFDMによれば正しく評価できることがわかった。

位置決め精度の不足を補う可動子構造の提案をした。励磁磁石を分散配置し、スロットピッチ内のディテント力の安定点を増加させたり、ディテント力を発生させない構造にして、固定子巻線直流励磁により高精度の位置決めを行うものである。現在、そのような構造のモデルを使い実験的に研究を行っている。

以上のことにより、高度な要求にこたえる搬送システム用のアクチュエータとして、PM形LSMの可能性が明らかにされた。

(昭和62年11月2日受付、同63年1月30日再受付)

文 献

- (1) 菊田：無人化技術，p. 51 (昭59)
- (2) 福渡：産業機械，p. 50 (昭59)
- (3) 柳，他：電学論D，107，419 (昭62-3)
- (4) 小貫，他：昭62電学会産業応用部門全大，No. 22，p. 93
- (5) 萩原・早船・正田：昭61電気学会全大，No. 842
- (6) 早船・正田・萩原：電気学会マグネティックス研資，MAG-86-133，p. 145 (昭61)
- (7) 早船・正田：昭62電気学会全大，No. 840
- (8) 山田 編著：リニアモーター応用ハンドブック，p. 241 (昭61) 工業調査会
- (9) 長坂・梶島：電学論D，107，723 (昭62-6)
- (10) 山本・山田：同上B，104，265 (昭59-5)
- (11) 酒井：信学論C，J64-C，682 (昭56-10)
- (12) 吉田，他：電気学会マグネティックス研資，MAG-84-105，77 (昭59)
- (13) K. Hayafune & E. Masada: Proc. of IECON '87, Vol. 1, p. 16 (1987)