角柱形リニア直流モータの位置制御特性

Positioning Control Characteristics of a Rectangular-Type Linear dc Motor

鹿野快男・山口昌樹・真鍋克之

東京農工大学, 東京都小金井市中町 2-24-16 (〒184)

Y. Kano, M. Yamaguchi, and K. Manabe

Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Naka-machi, Koganei, Tokyo 184

This paper proposes a rectangular-type linear dc motor (LDM) that consists of only six components, including the parts of the position detector. Cubic permanent magnets were found to be suitable for the LDM, and their magnetization characteristics were larger than those of cylindrical permanent magnets. Acetal resin slide bearings were used for the support mechanism. The driving characteristics of the manufactured LDM were as follows:

1. The maximum static thrust of the LDM was 1.59 newtons.
2. The linearity of the capacitance-type position detector was $\pm 1.5\%$.
3. When the LDM was controlled by using the PD control circuit, the positioning error and settling time were $\pm 4\%$ and 30 ms, respectively.
4. The maximum response frequency of the LDM was 9 Hz.

Key words: linear motor, dc motor, position control, rectangular type, servo

1. まえがき

リニア DC モータ (Linear Direct current Motor, 以下 LDM と略記) は, 他のリニアモータに比べて構造が簡単であり, 高速運転が可能, サーボ性が良いなどの長所を生かして, 磁気ヘッドの精密位置決め装置などの駆動源として応用されている^{1), 2)}. しかし, 同期モータのように電源遮断時の自己保持力がないので位置検出器と組み合わせて制御する必要があるが, 複雑な位置検出器を用いてはせっかくの長所が失われてしまう場合がある. LDM を考えるときには, 推力特性を考察するとともに, 制御システムにも工夫をこらす必要がある.

そこで筆者らは, LDM のよりいっそうの小型化・高速化のために, トリアセタル樹脂製の点接触滑り軸受けを用いて耐久性を向上するとともに, 位置検出センサまでを含めても 6 種類の部品だけで構成された角柱形 LDM を考察・試作した³⁾. 本論文では, この角柱形 LDM を試作した結果につき, 以下の事項について述べるものである.

- 1) 角柱形 LDM の構造と推力特性の測定結果
- 2) 容量式の位置検出器の原理と検出特性
- 3) 本 LDM のサーボ制御システムとその制御パラメータ決定法
- 4) 本 LDM の応答特性の測定結果

2. 角柱形 LDM の構造と特性

2.1 角柱形 LDM

Fig. 1 には, 角柱形 LDM の構造を示した. 一般にソレノイドなど小形のリニアアクチュエータでは円筒形状などのものが多いが, 本 LDM のように角柱形とすると以下の利点がある.

- 1) 永久磁石を立方形にできるので, 円筒形に比べてその着磁特性を向上できる.
- 2) 一般に, リニアベアリングは円筒形に比べて平板形のものの方が薄型化・小形化しやすい.

Table 1 には角柱形 LDM の仕様を示した. 可動子は, エボ

Fig. 1 Components of the rectangular-type linear dc motor (units in mm).

Table 1 Mechanical and electrical specifications of the LDM

Item and Symbol	Value	[unit]
Total mass M	274	[g]
Mass of mover M_m	28	[g]
Stator size	$16^{(h)} \times 40^{(w)} \times 82^{(l)}$	[mm]
Mover size	$2 \times 28 \times 104$	[mm]
Maximum stroke $x_{\max}$	± 6	[mm]
Magnetic gap g_m	0.5	[mm]
Mechanical gap g	4	[mm]
Number of turns N	100	[turns]
Thrust constant k_f	3.1	[N/A]
Maximum current $I_{\max}$	0.52	[A]
Maximum thrust $F_{\max}$	1.59	[N]
Magnet	Nd-Fe-B alloy	
Yoke	SS400	
Slide bearing	Poly-asetarl (Delrin)	

キシ樹脂製の板と、厚さ方向に着磁した2個の磁石から構成されている。本LDMは、可動子を構成するエポキシ樹脂と磁石の他に、ポリアセタール製の滑り軸受け、駆動コイル、電極、ヨークの6種類の部品だけから構成されており、それが特長の一つとなっている。滑り軸受けに用いたポリアセタール樹脂(デルリン、デュポン社)は、摩擦係数0.1~0.3と一般軸受け材料と変わらないが、低価格で耐摩耗特性に優れている⁴⁾。

本LDMでは、隣り合う磁石の極性が反対になるように磁石が配置され、磁石とヨークの間のコイルに流れる電流に発生する電磁力により $\pm x$ 方向に推力を得ている。

Fig. 2には静推力 F -変位 x 特性の測定結果を示した。無励磁時に可動子に働く磁気力 F_m は、最大で -0.18 [N]であった。この F_m は、必ず $-F$ 方向に働くので磁石がヨークを吸引する力であると考えられ、摩擦係数と区別するため磁気力と表した。磁気力 F_m には、 50 [mN]以下とわずかながら摩擦力も含められている。静推力 F から磁気力 F_m を引くと、角柱形LDMが発生する静推力となり推力定数は 3.1 [N/A]となった。

2.2 容量式位置検出器

Fig. 3には、角柱形LDMに用いた容量式位置検出器の構成を示した⁵⁾。角柱形LDMのコイルの内側に設置された上下一対の電極間を、比誘電率の異なるエポキシ樹脂と磁石が可動子の動作に応じて動き、電極と対向する面積の割合が変化することで変位に比例した容量変化を得ることができる。この電極は金属製ヨークの内側にあるので外部電界の影響を受けにくい構造になっている。位置の検出には、可動子の移動により生じる $9\sim 12$ [pF]の微小な容量変化を、モータの制御に必要な直流電圧の変化に変換する必要があるため、ここでは電極の容量変化を反転帰還回路の入力インピーダンスの変化としてとらえている。また2組の電極は差動に接続して外乱の影響をキャンセルした。Fig. 4には、LDMに搭載した容量式位置検出器の検出特性の測定結果を示した。基準となる変位 x は、最高分解能 ± 2.5 [μ m]のレーザ式変位計(アンリツ(株), KL137F)で測定した。試作した位置検出器は、 $9\sim 12$ [pF]の容量変化を0

Fig. 2 Relationship between static thrust, F , magnetic force, F_m , and displacement, x .

~ 5 Vの電圧変化に変換できたとともに、直線性誤差は $\pm 1.5\%$ であることが分かった。この誤差の主要因は、電極や軸受けの機械加工精度によるものと考えられる。

3. PD制御システム

3.1 PD制御モデル

Fig. 5には、角柱形LDMのサーボ制御に採用したPD制御モデルを示した。本制御モデルの伝達関数 $G(s)$ は次式で表される。

$$G(s) = \frac{k_f k_p (1 + k_d s)}{L M s^3 + M R s^2 + (k_e k_f + k_f k_p k_d) s + k_f k_p} \quad (1)$$

ここに、 L : コイルのインダクタンス [H], M : 可動子の質量 [kg], R : コイルの抵抗 [Ω], k_f : 推力定数 [N/A], k_e : 逆起電力定数 [V $\cdot$ s/m], k_p : 比例制御定数 [V/m], k_d : 微分制御定数 [無次元]

本伝達関数では、摩擦係数を考慮していない。LDMでは、 k_f と k_e は同じ値となる。ここで、電気的時定数 T_e 、機械的時定数 T_m は次式で表される。

Fig. 3 Circuit composition of the capacitance-type position detector.

Fig. 4 Relationship between position voltage, V_p , and displacement, x .

$$T_e = \frac{L}{R} \quad [\text{H}/\Omega] \quad (2)$$

$$T_m = \frac{MR}{N^2 B^2 l^2} \quad [\text{kg} \cdot \Omega / (\text{Wb}^2 \cdot \text{m}^2)] \quad (3)$$

ここに、 B : 永久磁石とヨーク間の磁束 [Wb], l : コイルの x 方向の辺の長さ [m], コイルの巻数 N [回]

3.2 パラメータ決定法

比例制御定数 k_p と微分制御定数 k_d は、ステップ応答法によって決定した。ステップ応答法とは、制御対象の開ループステップ応答によって制御対象の伝達関数を近似し、その伝達関数の係数から調整則に従いパラメータを決定する方法である⁶⁾。ステップ入力電圧 V_{in} は、ラプラス変換により次式となる。

$$V_{in} = \frac{A}{s} \quad [\text{V}] \quad (4)$$

ここに、 A : ステップ入力電圧の振幅 [V]

その開ループ応答 $x(s)$ を積分むだ時間要素で近似すると次式になる。

$$x(s) = \frac{e^{-\tau s}}{-t_d s^2} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

ここに、 τ : むだ時間 [s], t_d : 積分時間 [s]

さらに、入力ステップ電圧と開ループ応答の比をとることで、LDM の伝達関数 $G(s)$ が近似でき、次式のようになる。

$$G(s) = \frac{e^{-\tau s}}{A t_d s} \quad [\text{m}/\text{V}] \quad (6)$$

この伝達関数の係数 τ と $A t_d$ から、高橋の調整則⁷⁾に従い PD 制御パラメータを算出した。Fig. 6 には、角柱形 LDM の開ループ応答を示した。Fig. 6 により、ステップ入力電圧の振幅 $A=5$ [V] のとき $\tau=10.4$ [ms], $t_d=1.62$ [s] となり、その結果 $k_p=857$ [V/m], $k_d=4.58 \times 10^{-3}$ が算出された。しかし、実際にはステップ応答法は半経験則であるので最適なパラメータにはならない場合もあるので注意する必要がある。本 LDM でも、算出されたパラメータ付近で収束時間が最短となるように最適なパラメータを試行錯誤的に決定し、 $k_p=1033$ [V/m], $k_d=9.97 \times 10^{-3}$ とした。本 LDM ではストロークが ± 6 [mm] と短いので、十分収束した応答特性が実験的に得られないことも、調整則により試算された k_p , k_d が最適値にならなかった要因の一つと考えられる。

4. 制御特性

Fig. 7 には、最適パラメータ $k_p=1033$ [V/m], $k_d=9.97 \times 10^{-3}$ における PD 制御でのステップ応答特性の測定結果を示した。目標値 ± 4.5 [mm] に対し、位置決め誤差は $\pm 4\%$ 、整定時間は 30 [ms] となった。Fig. 8 には、同じく最適パラメータにおける PD 制御での周波数応答の測定結果を示した。ステップ応答時に等しい位置決め誤差 $\pm 4\%$ 内で応答しうる最大周波数は 9 [Hz] であり、このとき位相差は -18° となった。

5. あとがき

角柱形ニア DC モータを考察・試作した結果、以下の事項が明らかとなった。

1) 位置検出センサを含めても六つの部品だけで構成された LDM を試作したところ、最大静推力は 1.59 [N] であった。また、最大で静推力の 12% に相当する磁石のヨークへの吸引力が存在した。

2) 試作した LDM に搭載した容量式検出器の直線性誤差は、最大誤差 $\pm 1.5\%$ であり、その主要因は電極や軸受けの機械加工精度と考えられた。

3) ステップ応答法により PD 制御のパラメータを決定してサーボ制御を行ったところ、位置決め誤差 $\pm 4\%$ 、整定時間 30 [ms] であった。

4) 位置決め誤差 $\pm 4\%$ 内で制御可能な最大周波数は 9 [Hz]

Fig. 5 Block diagram of the PD control model of the LDM.

Fig. 6 Step response of the open-loop system of the LDM and its approximate line.

Fig. 7 Step response of the displacement in the case of PD control.

Fig. 8 Frequency characteristics of the PD controlled LDM.

であった。

今後の課題としては、ヨークが全質量に占める割合が大きいため、ヨークを薄形化してコイル体積を増加させることで推力特性を向上させることが挙げられる。

謝 辞 最後に、角柱形 LDM の試作にご協力頂いた KGS の松野守甫氏に感謝の意を表するしだいである。本研究の一部は、平成 8 年度高度化推進特別経費〔大学院重点特別経費〕により行われた。

文 献

- 1) 山田 一：リニアモータ応用ハンドブック，pp. 146-216（工業調査会，東京，1986）。
- 2) 電気学会編：リニアモータとその応用，pp. 6-13（オーム社，東京，1984）。
- 3) 真鍋克之，山口昌樹，鹿野快男，松野守甫，電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 III，191，61（1996）。
- 4) 平野陽三：先端材料応用事典，p. 276（産業調査会事典出版センター，東京，1990）。
- 5) 穴戸 淳，鹿野快男，佐藤四郎，松野守甫：電気学会研究会資料，LD-95-3，106（1995）。
- 6) 渡辺嘉二郎：制御工学，井上昌夫，小林一哉編集，pp. 147-152（サイエンスハウス，東京，1992）。
- 7) 須田信英：PID 制御，pp. 19-27（朝倉書店，東京，1995）。

1996 年 10 月 4 日受理，1996 年 12 月 3 日採録