リニア直流ソレノイドモータを用いた精密な運動制御

学生員 加藤 敦* 正員 久保 武春**
正員 大西 公平*

Precision Motion Control of Linear DC Solenoid Motor

Atsushi Kato*, Student Member, Takeharu Kubo**, Member, Kouhei Ohnishi*, Member

High speed and high precision control has been required in various cases. Hence, a new linear actuator based on Linear DC Solenoid Motor (LDSM), is developed for that purpose. In addition, we propose a precision motion control for LDSM. LDSM is composed of solenoid stator and moving permanent magnet. It has simple and light structure. Moreover, the solenoid form provides small leakage and generates more power than non-linear motor. Nevertheless, the nonlinear disturbance force such as friction force prevents LDSM from controlling precisely. In this paper, the high gain disturbance observer is applied to LDSM to suppress the force. The observer is able to estimate and compensate the nonlinear disturbance force. It is confirmed that the proposed precision motion control provides LDSM with precise observer control position and force through the experiments.

キーワード：リニアモータ，直流ソレノイド，モーションコントロール，外乱オブザーバ，摩擦補償

Keywords: linear motor, DC solenoid, motion control, disturbance observer, friction compensation

1. 序 論

現在，産業界において高速，高精度な性能を有する機械装置が広く求められている。そこで，この要望を実現するべくリニアモータが積極的に採用されつつある⁽¹⁾。これはリニアモータが減速器を必要としないダイレクトドライブ構成の為，高速，高精度な運動制御を実現することが可能であるからである。

さらに，近年，産業界だけでなく，医療の現場においても精密な運動制御を有する装置が必要とされている。特に，低侵襲治療，遠隔医療の実現においては触覚を再現する装置が希求されており，そのような装置には精密な運動制御が不可欠とされている。例えば，手術支援ロボットシステム，da Vinci は手先に鉗子を備え，細かい操作を安定して行うことができ，低侵襲治療の現場で有用性が実証されているが，その欠点として触覚の欠如が指摘されている⁽²⁾。そこで，我々は触覚の再現を可能にすることができる運動制御性能を持つアクチュエータを新たに開発した。一般に人間

が触覚を誘発するのに必要な最小深度はおよそ $10\mu\text{m}$ である。また，人間が認識し，区別をすることができる刺激頻度は数百 Hz である⁽³⁾。そこで，本論文では開発したアクチュエータを用いて，精度 $1\mu\text{m}$ 以内，周波数帯域 100 Hz 以上の制御性能を持つシステムを構築することを目標とする。

図 1 に開発したリニア直流ソレノイドモータ (Linear DC Solenoid Motor, 以下, LDSM と略す) の外観を示す。開発した LDSM は直流ソレノイドを固定子側に配し，可動子を永久磁石で構成したものである。直流ソレノイドを用いた構造はギャップが小さく，管状の閉じた構造となっている為，漏れ磁束が少ない。したがって，入力電流および体積に対して比較的大きな推力を得ることが可能である。また，ソレノイドの特徴である高速な応答性能を有している。さらに，ソレノイドを用いたアクチュエータは小型かつ軽量であり，その構造も簡単であるという利点をもっている為，新しいアクチュエータとして注目され，研究されている⁽⁴⁾。しかし，ソレノイド型のアクチュエータの主な使用用途は電磁弁⁽⁵⁾であった。そこで，本論文では開発した LDSM を用いて精密な運動制御を実現し，医療分野へも適用できるようにすることを目的とする。

高速，高精度な運動制御を実現する為には，位置，速度，力等の出力の値を所望の値に追従させる入力追従特性および負荷変動，パラメータ変動，環境変動等の外乱の出力に対する影響を抑制する外乱抑圧特性の 2 つの指標を十分に満たす必要がある。この 2 つの指標を満たす制御系を実現

* 慶應義塾大学理工学部

〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

Faculty of Science and Technology, Keio University

3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

** (株) 明電舎総合研究所

〒141-8565 東京都品川区大崎 2-1-17

Central Research Laboratory, Meidensha Corporation

2-1-17, Ohsaki, Shinagawa-ku, Tokyo 141-8565

図 1 試作機の外観

Fig. 1. Overview of the prototype.

する為には有効な手法として外乱オブザーバが広く知られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。外乱オブザーバは、外乱を推定し、補償することで、ロバスタな加速度制御系を構築することができる。しかし、オブザーバの応答帯域に制限がある為、非線形な特性を有する外乱は外乱オブザーバを用いても十分に推定、補償することができず、高速、高精度な運動制御の実現を阻む要因であると考えられてきた。

そのような背景の中で、非線形外乱の代表である摩擦の補償法については数多くの研究がなされ、例えば、オブザーバに摩擦モデルを併用する摩擦補償法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾などが提案されている。しかし、本論文では制御周期を短くし、外乱オブザーバのオブザーバ応答帯域を広げることによって、摩擦を十分に補償することが可能であることを示す。さらに、応答帯域を広げた外乱オブザーバを用いて、高速、高精度な位置制御系および力制御系を構築し、その有効性を実験によって確認する。

2. リニア直流ソレノイドモータ

2.1 LDSM の特性 本論文で用いた LDSM は精密な運動制御を実現する為に試作したリニアアクチュエータである。LDSM は磁界を発生する固定子部分(ソレノイド)と永久磁石で構成される可動子部分からなる。ソレノイドに電流を印加することで、磁界を発生させ、その磁界によって推力が発生する原理となっている。図 2 に可動子および固定子の基本的な構造を示す。図 2 で示される単位セルを直列に 14 個並べて LDSM は構成される。LDSM は管状の構造となっているので、漏れ磁束が比較的小さい。また、可動子を支持する機構には滑り軸受けを採用している。試作した LDSM システムの諸特性を表 1、図 3 に示す。

LDSM の運動制御は PC (Pentium4 2.6 GHz) を用いて 50 μ s の制御周期で行っており、駆動用のリニアアンプ型モータドライバ (VCM1AT, Servotechno 製) に電流指令値を出力する。また、制御および計測の為に位置検出には光学式リニアエンコーダ (RGH24 Renishaw 製) を用いており、分解能は 0.1 μ m である。エンコーダのスケールを試作した LDSM の可動子部分に取り付け、リードヘッドをベース部分に固定した (図 1)。

入力した電流に対して発生する推力の測定結果を図 4 に

図 2 LDSM の基本構造

Fig. 2. LDSM basic structure.

表 1 LDSM システムの諸特性

Table 1. System characteristics of LDSM.

Size		
Stator outer size	[mm ³]	20×20×127
Mover length	[mm]	174
Stroke	[mm]	4
Weight		
Moving part	[kg]	0.117
Stationary part	[kg]	0.223
Characteristic of LDSM		
Thrust constant	[N/A]	23.31
Rated current	[A]	0.9

図 3 リニア直流ソレノイドモータ

Fig. 3. Linear DC solenoid motor.

図 4 試作したリニア直流ソレノイドモータの発生推力

Fig. 4. Thrust of a prototype linear DC solenoid motor.

示す。推力を測定する為、LDSM の先端にロードセルを取り付け、ソレノイドに -0.5 A から 0.5 A まで 0.1 A 間隔で電流を印加した。さらに、可動子を 1 mm 毎に移動させ、計測を行った ($L = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$ [mm])。ここで、 $L = 0$

図 5 試作したシステムの摩擦特性

Fig. 5. Measured system friction force.

はストロークの中央, $L = -3, 3$ はストローク外にあたる。測定した結果よりストローク内では入力電流に対して発生する推力がほぼ比例し, 開発した LDSM の推力定数が一定であるといえる。推力定数 ($K_f = 23.31$ [N/A]) は最小二乗法を用いて求めた。

次に, 後述する反力推定オブザーバ⁽⁸⁾を用いて摩擦力を計測した。計測した結果を図 5 に示す。摩擦力は主に可動子の支持機構部分によって発生する。摩擦力は微小駆動時や速度零付近においてスティック・スリップモーションの原因となり, 位置決め精度の低下を招く。そこで, 精密な運動制御を実現する為には摩擦力の補償が問題となる。

2.2 LDSM のモデル 発生する推力は推力定数を用いて次式のように表される。

$$f_m = K_f i \quad \dots\dots\dots (1)$$

f_m は推力, K_f は推力定数, i は入力電流を表す。そして, LDSM の運動方程式は次式のように表される。

$$M\ddot{x} = K_f i - f_{dis} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, M は可動子の重量, x は可動子の位置, f_{dis} は外乱力を表している。外乱力は次式のように定義する。添え字 n はノミナル値を意味する。

$$f_{dis} = f_{fric} + D\dot{x} + (M - M_n)\ddot{x} + (K_{fn} - K_f)i + f_{ext} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式の右辺第 1 項はクーロン摩擦, 第 2 項は粘性力, 第 3 項, 第 4 項はそれぞれ質量および推力定数のモデル化誤差によって発生する外乱力, 第 5 項は外から加えられた力を表す。本論文では外乱力の中で摩擦力および外から加えられた力が比較的其他の外乱に比べて大きい為, 外乱力を (4) 式のように近似して用いる。

$$f_{dis} \approx f_{fric} + f_{ext} \quad \dots\dots\dots (4)$$

3. 制御システム

本論文では精密な運動制御を実現する為には外乱オブザー

図 6 外乱オブザーバ

Fig. 6. Disturbance observer.

バを用いてロバストな加速度制御系を構築する。そして, 構築した加速度制御系に基づいて, 位置制御系, 力制御系を構築し, その運動制御性能を確認する。

3.1 外乱オブザーバ⁽⁷⁾ 外乱オブザーバ (Disturbance Observer, DOB) は (5) 式で表され, リニアモータのモデルに基づいて外乱を推定するアルゴリズムである。外乱オブザーバは高域ノイズ低減の為に一次 LPF を用いて構成される (図 6)。

$$\begin{aligned} \hat{f}_{dis} &= \frac{g}{s+g}(K_{fn}i^{ref} - M_n s \dot{x}^{res}) \\ &= \frac{g}{s+g}(K_{fn}i^{ref} + gM_n \dot{x}^{res}) - gM_n \dot{x}^{res} \\ &= \frac{g}{s+g}f_{dis} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで, g はオブザーバゲイン, 添え字 cmd は指令値, res は応答値, ref は参照値, $\hat{\cdot}$ は推定値を表す。

外乱オブザーバは一次 LPF を用いる為, 一次遅れを有するシステムとなっている。したがって, 外乱力の推定速度はオブザーバゲイン g に支配される。オブザーバゲイン g を大きくすることによって, 遅れは無視することができ, 推定される外乱力は実際の外乱力と同一になる。推定した外乱力を補償することによって, 外乱に対してロバストな加速度制御系が構築される。この時構築した制御系の入力加速度参照値 ($\ddot{x}^{ref}$) である。

従来, 外乱オブザーバを用いた手法では非線形な特性を含む外乱環境下で良好な応答特性を得られないと考えられてきた。特に, 摩擦を含むシステムにおいてはオブザーバの応答帯域が制限されている為, 十分に摩擦を推定, 補償することができないと考えられてきた。そのような背景の中で, 非線形な特性を持つ摩擦を補償する手法は数多く提案されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかし, 本論文では外乱オブザーバの応答帯域を広げることで摩擦を補償できることを示す。

外乱オブザーバの応答帯域は制御周期や機械的な性質によって, その上限が決定される。近年計算機の発達により処理能力が向上し, 制御周期を短くすることが可能になった。したがって, オブザーバの応答帯域を十分に広くする

ことができる⁽¹¹⁾。また、LDSM は高剛性の為、オブザーバの応答帯域を広くしたとしても機構的に不安定になりにくい。そこで、本論文では外乱オブザーバのオブザーバゲインを大きくし、応答帯域を広げることで、非線形な特性を持つ摩擦を十分に補償できることを確認する。

3・2 位置制御 位置制御器は外乱オブザーバと PD 制御器を用いて構成する。外乱オブザーバの入力である加速度参照値は PD 制御器によって生成される。構成した位置制御器の制御目標は精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内、周波数帯域 100 Hz 以上である。

$$\ddot{x}^{ref} = K_p(\ddot{x}^{cmd} - \ddot{x}^{res}) + K_v(\dot{x}^{cmd} - \dot{x}^{res}) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 K_p は位置ゲイン、 K_v は速度ゲインを表す。制御器のゲインは特性方程式の減衰係数が 1.0 になるように設定した。実験で用いたゲインを表 2 に示す。制御器全体のブロック線図を図 7 に示す。

3・2・1 等加速度試験 非線形摩擦は微小な速度変化時や速度方向反転時に速度応答特性に対して大きな影響を及ぼす。そこで、等加速度試験（加速度指令値 1 mm/s^2 ）を行い、オブザーバゲインを大きくした時の摩擦補償の有効性を確認する。

オブザーバゲインを変化させ（ $g = 20, 200, 2 \text{ kHz}$ ）等加速度試験を行った。その実験結果を図 8 に示す。図 8 よりオブザーバゲインを大きくすることで、零速度時間が短くなり、摩擦の影響が小さくなっていることがわかる。図 9 にオブザーバゲインが 2 kHz の時の拡大した結果を示す。 2 kHz のオブザーバゲインを用いた時、零速度時間が 21.8 ms と短く、位置の偏差も $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 以内になっていることが読み取れる。以上の結果よりオブザーバゲインを大きくすることで摩擦の影響を抑圧し、理想的な速度制御を実現できたといえる。そして、目標となる制御性能（精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ ）を満たしている。

次に、制御周期（ $0.5, 0.1, 0.05 \text{ ms}$ ）とオブザーバゲインを変化させて等加速度試験を行った。この時、各試験におい

て零速度時間を計測し、図 10 に結果を示す。図 10 の横軸は用いたオブザーバゲインの値を示し、縦軸は零速度時間を示す。制御周期が 0.5 ms の時オブザーバゲインは 200 Hz 、 0.01 ms の時 2 kHz で LDSM システムは不安定になった。したがって、制御周期に依らず、零速度時間は一致するが、制御周期によってオブザーバゲインは制限されることが実験的に確かめられた。したがって、摩擦を補償するためには制御周期を短くする必要があるといえる。

外乱オブザーバのみでは零速度近傍での等加速運動を実

図 8 外乱オブザーバによる等加速度試験

Fig. 8. Reversal characteristic of velocity in DOB.

図 9 等加速度試験（ $g = 2 \text{ kHz}$ ）

Fig. 9. Reversal characteristic of velocity ($g = 2 \text{ kHz}$).

表 2 位置制御に関するパラメータ

Table 2. Parameters of position control.

K_p [rad/s]	1000000
K_v [rad/s]	2000

図 7 位置制御器

Fig. 7. PD controller with DOB.

図 10 外乱オブザーバによる速度制御特性

Fig. 10. Performance of velocity control in DOB.

(a) Step command

(b) Error of position response

図 11 位置制御特性

Fig. 11. Performance of position control on LDSM.

現できることが確認できた。以上の結果より、外乱オブザーバの応答帯域を広げること、非線形な特性を持つ摩擦をも十分に補償することが可能であるといえる。そして、構築した位置制御器は目標となる制御性能を満たすことを示した。

3・2・2 運動精度 構築したシステムを用いてステップ指令値 (8.0, 10.0, 12.0 μm) を与え、位置制御を行った。図 11(a) に指令値に対する位置応答の結果、図 11(b) にステップ指令値 (10.0 μm) を与えた時の位置応答の偏差を示す。整定時間 ($\pm 2\%$) は 42.0 ms 以下、定常偏差は 0.1 μm 以下であった。

図 12 は円に対する追従性能を表している。実験は 2 台の LDSM システムを直交に配し、それぞれ、正弦波、余弦波の指令値を与え、実験を行った。直径 20 μm 、送り速度 $20\pi \mu\text{m/s}$ で位置制御を行ったとき、真円度公差は 0.5 μm 以下であった。

次に、構築したシステムの周波数特性 (振幅 10.0 μm) を求めた。周波数特性は正弦波の指令値に対する応答を測定し、これを FFT によって周波数分解することで求めた。その結果をを図 13 に示す。図 13 より構築したシステムの周波数帯域は約 200 Hz であることがわかる。また、100 Hz の時の実験結果を図 14 に示す。図 14 より、100 Hz の正弦波の指令値に対して、摩擦などの外乱の影響があるものの

図 12 真円度公差

Fig. 12. Roundness tolerance of LDSM.

図 13 位置制御における周波数応答

Fig. 13. Frequency response of position control.

図 14 正弦波応答

Fig. 14. Sine response.

LDSM の位置応答が指令値に追従していることが確認できる。したがって、構築した位置制御器によって目標である周波数帯域 100 Hz 以上を満たしていることがわかる。

3・3 力制御

3・3・1 力の推定 力制御においては初めに外から加えられた反力をどのように計測するかが問題となる。反

図 15 反力推定オブザーバ

Fig. 15. Reaction force estimation observer (RFEOB).

図 16 力制御器

Fig. 16. Force controller with DOB and RFEOCB.

表 3 力制御に関するパラメータ

Table 3. Parameters of force control.

K_c	[rad/s]	1.0
g	[Hz]	2000
g_r	[Hz]	20
f_{cmd}	[N]	10.0

力を計測する方法は一般に力センサを利用するものが多い。しかし、力センサを用いると非共配置 (non-collocation) 問題や得られる情報の帯域が狭いという問題が生ずる。そこで、本論文では力センサを用いずに推定反力情報を利用する。反力を推定するアルゴリズム⁽⁸⁾は(5)式で表される外乱オブザーバに基づいて構成される。(4)式より外乱力は摩擦力と反力の和で表される。推定した外乱力から摩擦力を引くことによって、反力を推定することができる。そのアルゴリズムを図15に示す。

3・3・2 力制御器 式(7)で表される力比例制御器の出力を加速度参照値にすることで力制御器(図16)を構成する。

$$\ddot{x}^{ref} = \frac{K_c}{M_n}(f^{cmd} - f^{res}) \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 K_c は力比例ゲインを表す。実験で用いたパラメータを表 3 に示す。

(a) Force response

(b) Position response

図 17 力制御特性

Fig. 17. Performance of force control on LDSM.

構築した力制御器を用いて金属で作成された硬い環境に LDSM の可動子を衝突、接触させる力制御の実験を行った。

反力推定オブザーバを用いて得られた力応答と環境に固定された力センサの力応答を図 17(a) に示す。また, LDSM の位置を図 17(b) に示す。本論文で構成した力制御器は衝突によって発生する過渡状態から非常に短い時間で収束することができた。また, 定常状態では反力推定オブザーバを用いることで安定な接触を実現することができた。実験結果より LDSM の力制御システムは精密な力制御を実現できるといえる。

4. 結 論

本研究では医療分野に適用できる新しいリニアアクチュエータ LDSM を開発した。

精密かつ高速な運動制御を実現する為には非線形な性質をもつ摩擦力を十分に補償しなくてはならない。そこで、本研究では制御周期を短くし、外乱オブザーバの応答帯域を広げることで、十分に非線形摩擦力が補償することが可能であることを示した。さらに、応答帯域を広げた外乱オブザーバを用いることで、高速かつ高精度な速度制御、位置制御、力制御、つまり、運動制御を実現することができた。特に、目標仕様である精度 $1\mu\text{m}$ 以内、周波数帯域 100Hz 以上の制御性能をもつことを確認した。

触覚の再現を可能にする制御性能を満たしているので、

LDSM システムは医療の現場で広く用いることができるといえる。また, LDSM は小型, 軽量であるため空間に制約がある手術支援システムなど次世代の手術用医療機器に適用可能である。さらに, LDSM は医療分野のみならず, 産業分野においても様々な機器に適用することができると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号 14205041 基盤研究 A「リニアアクチュエータを用いた内視鏡外科など低侵襲性外科手術における触覚技術の開発」)によって行われたことを記し, 関係各位に謝意をあらわす。

(平成 16 年 7 月 5 日受付, 平成 16 年 12 月 3 日再受付)

文 献

- (1) M. Sogabe: "Linear motor for machine tool", J. of JSPE, Vol.69, No.11, pp.1542-1544 (2003-11) (in Japanese)
曾我部正豊:「工作機械用リニアモータ」精密工学誌, 69, 11, pp.1542-1544 (2003-11)
- (2) S. Ozawa, T. Furukawa, G. Wakabayashi, and M. Kitajima: "Recent Advanced in Robotic Surgery", *Biotherapy*, Vol.15, No.4, pp.433-438 (2001) (in Japanese)
小澤壯治・古川俊治・若林 剛・北島政樹:「最新の Robotic Surgery」, *Biotherapy*, 15, 4, pp.433-438 (2001)
- (3) R.F. Schmidt: 感覚生理学, 金芳堂, pp.40-45 (1980)
- (4) H. Yajima, N. Misron, H. Wakiwaka, K. Minegishi, N. Fujiwara, and K. Tamura: "Consideration of high-speed positioning on linear DC motor", *IEEE Trans.*, Vol.119-D, No.3, pp.315-320 (1994-3) (in Japanese)
矢島久志・Norjism Misron・脇若弘之・峰岸敬一・藤原伸広・田村和也:「高速位置決め用可動コイル形リニア直流モータの特性検討」, 電学論 D, 119, 3, pp.315-320 (1994-3)
- (5) T. Kajima and Y. Kawamura: "Development of a High-Speed Solenoid Valve: Investigation of Solenoids", *IEEE Trans. on IE*, Vol.42, No.1, pp.1-8 (1995)
- (6) K. Ohnishi, et al.: "Motion Control for Advanced Mechatronics", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.1, No.1 (1996)
- (7) 大西公平:「外乱オブザーバによるロバストモーションコントロール」, 日本ロボット学誌, Vol.11, No.4, pp.486-493 (1993)
- (8) T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi: "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator", *IEEE Trans. on IE*, Vol.40, No.2, pp.259-265 (1993)
- (9) M. Iwasaki, Y. Kitoh, and N. Matsui: "Disturbance Observer-Based Nonlinear Friction Compensation in Servo Drive System", *IEEE Trans.*, Vol.117-D, No.4, pp.456-462 (1997-4) (in Japanese)

岩崎 誠・鬼頭芳明・松井信行:「外乱オブザーバによる電動サーボ系の非線形摩擦補償」, 電学論 D, 117, 4, pp.456-462 (1997-4)

- (10) I. Awaya, Y. Kato, I. Miyake, and M. Itoh: "Torque Bias Compensation Method for Nonlinear Friction by the Use of a Disturbance Observer", *JSME*, Vol.57, No.534, pp.371-376 (1991) (in Japanese)
栗屋伊智郎・加藤義樹・三宅岩夫・伊藤正美:「外乱オブザーバを利用した非線形摩擦のトルクバイアス補償法」, 日本機械学論文集(C編) 57, pp.371-376 (1991)
- (11) I. Godler, H. Honda, K. Ohnishi: "Design Guidelines for Disturbance Observer's Filter in Discrete Time", in *Proc Advanced Motion Control*, pp.390-395 (July 2002)

加 藤 敦 (学生員) 1978 年 12 月 11 日生。2001 年 3 月慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。2003 年 3 月同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修了。同年 4 月同大学院博士課程入学。現在, 在学中。主として画像およびリニアモータに関するモーションコントロールの研究に従事。

久 保 武 春 (正員) 1951 年 2 月 22 日生。1971 年新居浜高専電気工学科卒業。1977 年岡山大学工学部電子工学科卒業。1979 年東京工業大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年(株)明電舎入社。現在, 主として回転機の磁界解析に関する研究に従事。1996 年~2003 年東京工業大学非常勤講師。

大 西 公 平 (正員) 1980 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月慶應義塾大学理工学部電気工学科助手。現在, 理工学部システムデザイン工学科教授。工学博士。