弾性案内—電磁力駆動系の微動特性 (基礎実験と考察)

Fine Motion of Positioning System with Elastic Flexure Guide And Electromagnetic Actuator

正 深田 茂生 (信州大) 〇学 澁谷 太郎 (信州大院)

Shigeo FUKADA, Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano
Taro SHIBUYA, Graduate school, Shinshu University

Key word: Elastic flexure guide, Electromagnetic actuator, Positioning, Fine motion

1. 緒言

現在の精密位置決め機構は、工作機械や半導体製造装置のように数十 mm～数mの比較的大ストロークの位置決め機構と、SPM 等のようにストローク数 μm 以下の微動位置決め機構に分化している。微動位置決め機構の場合は、アクチュエータとして圧電素子を用いるのが一般的であり、ナノメートルレベルを超える位置決め分解能を容易に得ることができるが、ストロークは一般に数 μm 程度に制限される。本研究は、それら両者の位置決め機構の中間的な領域をカバーするものとして、最大 1mm 程度のストロークでナノメートルレベルの分解能を持つ位置決め機構を電磁力—弾性案内により実現することを目的としている。具体的なアプリケーションの対象としては、例えば代表寸法が 0.1～1mm 程度の微細要素を放電加工等の非力学的原理で加工するための装置を想定している。電磁力アクチュエータとばね案内を用いた機構は、光ピックアップの駆動機構として多用されている。電磁力は非接触による力の印加が可能であり、ばね—質量系に対する力強制系を容易に実現できるため、制御系の構成とモデル化が容易であるという特徴を持つ。そこでばね系を単純な弾性体とし、これを電磁力で非接触駆動することにより、線形性と制御性に優れた極めて高性能な微動機構の実現が期待できる。しかし、電磁力と弾性体を組み合わせた微動機構は、高い位置決め分解能を期待できる反面、非接触駆動であるため振動減衰性に劣り、応答周波数に限界があると考えられる。そこで本研究では、弾性案内と電磁力アクチュエータによる位置決めシステムを構成し、その微動特性を把握することを目的として基礎的な実験と考察を行う。

2. 実験装置の構成

実験装置の概要を図 1 に、機構部の詳細を図 2 に示す。一辺 60 mm の立方体からなる位置決めステージを 4 本の弾性ヒンジで弾性支持している²⁾。ステージの両側に、非接触電磁力アクチュエータとなる 2 本のソレノイドと静電容量型非接触変位計を配置して微動位置決めシステムを構成した。振

動減衰性を高めるために、ステージはシリコンオイル中（粘度 100, 300, 1000cst）に浸している。また、サーボアンプは電流駆動型リニアサーボアンプを用いており、変位データの取得と指令信号の出力は、A/D 変換器、D/A 変換器を介して行い、すべての制御をリアルタイムでパソコンにより行う。なお、弾性案内によるステージの支持剛性は 1.5 N/mm であり、A/D 変換による変位測定分解能は 12.5nm である。

3. 制御対象の特性とシミュレーションモデル

電磁力アクチュエータの静特性を図 3 に示す。1A の電流印加により約 0.1N の力を発生するが、電流と発生力の関係は 2 次関数で表され、さらに鉄損等によるヒステリシスが現れている。また、ソレノイドステージ間がシリコンオイルで隔てられていることにより、空気中の発生力の約 50% に低下した。

次に、制御対象の動的なシミュレーションモデルを構築するために、過渡応答実験と周波数応答実験を行った。入力電流に対する出力変位の時間応答の実験結果を図 4 に示す。粘度 100cst の場合に振動的であったものが、粘度 300cst の場合にはほぼ臨界制振状態となった。そこで、後の位置決め実験では粘度 300cst のシリコンオイルを用いることにする。また、印加電流に対して変位の立ち上がりには約 2ms の遅れがあり、明らかにむだ時間要素が存在する。

制御対象の開ループ周波数特性（入力：電流、出力：変位）を図 5 に示す。約 150Hz 付近に共振点を持ち、これは位置決め対象の質量と弾性ヒンジの支点周りの等価慣性質量およびヒンジ剛性から求めた固有振動数と単純に一致した。また粘度 300cst の場合には共振点は現れなくなった。以上の結果、本実験システムの制御対象はむだ時間を含む 2 次遅れ系でモデル化できることが確認できた。図 6 に Simulink のシミュレーションモデルを示す。ソレノイドの発生力は動作点で線形化し、質量は位置決め対象とヒンジ部の等価慣性質量から求めている。モデルは、制御対象（アンプ、線形化されたソレノイド、むだ時間、質量、粘性、ばね定数）と、変位をフ

Fig.1 Experimental apparatus

Fig. 2 Mechanism of system

Fig. 3 Static performance of actuator

(a) In case with oil 100 cst

(b) In case with oil 300 cst

Fig. 4 Open loop step response of control object

(a) In case with oil 100 cst (b) In case with oil 300 cst
Fig. 5 Open loop frequency response of control object

Fig. 6 Block diagram of simulation model

フィードバックするフルクローズドループからなっており、制御動作は比例-積分動作としている。また、シミュレーションでは制御対象を連続時間系として扱い、コンピュータ内をサンプリング周期 T_s の離散時間系として扱う。

4. 位置決め実験と考察

本実験システムの位置決め限界を知るために変位フィードバックによるフルクローズド位置決め制御系を構成し、ステップ状の入力を与えたときの応答と、微小ステップの位置決め実験の結果を図7に示す。目標ステップ幅 300 nm とし、比例ゲイン K_p と積分ゲイン K_i を 5, 10, 20 V/μm とした。またシリコンオイルは粘度 300 cst を使用した。ゲインの増大に伴い立ち上がりが速まるのに対して安定度は低下するが、ここではゲイン 10 V/μm を最適な調整値として採用することにする。また、各実験結果は図6に示したモデルによるシミュレーション結果と良く一致している。

目標ステップ幅を 25 nm とし階段状に目標変位を与えた微小ステップ位置決め実験の結果を図8に示す。 $K_p=K_i=10$ V/μm とした。完全静止状態における変位の時間応答を図9に示す。静止状態においても変位測定分解能 12.5 nm/bit の影響による変動が見られ、この変動が本実験システムの変位分解能を支配していると言え、計測系の分解能を改善することにより、さらに高分解能な位置決めが可能になると考えられる。なお、フルクローズド系にすることで図3で示したアクチュエータのヒステリシスの影響はなくなっているが、現時点における本システムのストロークは最大 0.2 μm 程度に制限されている。今後は、アクチュエータの発生力と弾性案内のコンプライアンスの増大によるストロークの拡大を検討する。

4. 結 言

(1) 弾性案内と非接触電磁力アクチュエータ、静電容量型非

(a) $K_p=K_i=5$ (b) $K_p=K_i=10$ (c) $K_p=K_i=20$
Fig. 7 Step response of closed loop system

Fig. 8 Resolution of positioning system

Fig. 9 Sensor output at rest

接触変位計を用いて微小位置決めシステムを構成した。

- (2) 過渡応答実験と周波数応答実験を行い、本実験システムの動的なシミュレーションモデルを構築した。
- (3) 制御動作を比例-積分動作とした微小ステップ位置決め実験を行ったところ、センサ分解能と同程度の 25 nm の位置決め分解能を実現できた。

参考文献

- 1) 次世代精密位置決め技術, フジテクノシステム(2000) 658.
- 2) S. T. Smith and D. G. Chetwynd: Foundation of Ultraprecision Mechanism Design, Gordon & Breach (1992).