弾性案内—電磁力駆動機構による超精密円弧運動制御のための基礎研究

Ultra-precise Circular Motion Control on Positioning Mechanism
Using Flexure Guide And Electromagnetic Actuator

正 深田茂生 (信州大) ○ 西村建太郎 (信州大)

Shigeo FUKADA, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano
Kentaro NISHIMURA, Shinshu University

Key Words: ultra-precise positioning, continuous path positioning, circular motion, flexure mechanism, linear motor

1. 緒 言

本研究は、最大 1×1 mm 程度のストローク(ミリストローク)に対して nm レベルの分解能を持つ平面位置決め機構を、弾性案内-電磁力駆動により実現することを目的とする¹⁾。これまでに、複合平行板ばね機構と電磁力アクチュエータを用いて X 方向および Y 方向の直動 2 軸とヨーイング θ を制御可能な 3 自由度平面位置決め機構を構成し、 1×1 mm のストロークにわたって 2 nm (X-Y) および 0.01asec (θ) 程度の位置決め分解能を PTP (Point to point) 動作において達成している²⁾。しかし、本機構を一般的な加工・計測システムに応用するためには、連続動作を含む超精密 CP (Continuous path) 位置決め系に拡張してゆく必要があり、そのためには定速度の直線運動と円弧運動が最も基本的な目標動作となる。平面内の円弧運動を X-Y 駆動系で実現するためには、90 度の位相差をもつ正弦波動作と余弦波動作を各直動系に実現すれば達成することができる。そこで本報では、平面内での円弧運動実現の基礎となるランプ入力と余弦波状入力に対する一軸直動位置決め系の追従特性について、シミュレーションと実験により検討する。

2. 位置決め機構の構成と機構モデル

図 1 に機構部の構造を示す。質量 1.79 kg, $60 \times 60 \times 68$ mm の直方体からなる位置決めステージを複合型平行板ばね機構で弾性案内する。ベースに固定された支持柱から左右対称に配置した 2 個の案内板を各 4 枚 (上下 2 枚) の板ばねで支持し、案内板を介してさらに 8 枚の板ばねでステージを支持する。X 軸と Y 軸の固有振動数が一致するように各要素の重量配分と板ばね剛性が設計されている。電磁力アクチュエータにはボイスコイルモータ(VCM)を用いている。ステージ上に棒状平面鏡を直角に配置し、分解能 0.6 nm のレーザ測長システムによってステージの変位を検出する。機構の振動減衰性をパッシブに与えるため、図 1 の機構部を粘度 1000 cSt のシリコンオイル中に浸し、さらに実験装置を空気圧除振台上に設置して実験を行った。なお、本機構は平面内において X-Y- θ の 3 自由度の動作が可能であるが、本報では X 軸動作 (図 1 の左右方向) の 1 自由度のみを扱う。

図 2 は駆動方法の概略である。同図に示すように本機構は 3 慣性のばね-質量系であり、1 mm のストロークにわたって 1 nm の分解能を静的に実現するため、 $10^6 = 2^{20}$ の力制御分解能 (電流制御分解能) が必要である。そこで VCM には、粗動用電流源と微動用電圧源が並列に接続されており、各電源を独立に操作することにより粗微動駆動が可能となっている。各電源はそれぞれ 12 bit の DA 変換器で操作されるため、抵抗 R により定まる微動範囲を適切に配分することにより、

Fig.1 X-Y- θ stage mechanism

Fig.2 Dynamical model and driving method

Fig.3 Block diagram of mechanism

理論上は 2^{24} の駆動分解能が静的に得られることになる。

図2の3慣性-ばね-質量系に関する運動方程式から導出した機構モデルを図3に示す。図3の入出力関係を求めると、本制御対象は4個の極と2個の零点を持つ振動モデルとして表すことができる。

3. 制御システムの構成

図4に制御システムの構成を示す。制御対象 G は、目標値に対して0型の自己定位系であり、定常偏差を補償するためには積分動作を含むフィードバックコントローラが必要となる。さらに、種々の速度-加速度パターンを持つ目標値軌跡に対して生じる定常偏差を低減するために、レーザ測長システムにより得られる検出量をフィードバックする閉ループ系に、比例要素と微分要素から成る目標値フィードフォワード要素 F を付加した2自由度制御系とした³⁾。ただし上述したように、本機構の駆動系は、駆動分解能を確保するために粗動系と微動系に分割されており、それらに対応してフィードバックコントローラは粗動用のPID動作 C_c と微動用のPID動作 C_f から成る。一般の粗微動位置決め機構の制御方法には種々の方法が検討されているが、本実験では動的な分解能の向上を図るため偏差 ΔX の絶対値にしきい値を設け、偏差に応じて微動電圧源と粗動電圧源が同時に連動する方法をとっている。なお、図4中の C_c 、 C_f および F は、コンピュータ内にソフトウェアとして実装されている演算部と駆動電源のゲインから成る。

新たな制御則を導入するにあたり、あらかじめ本位置決め機構の特性を推測するためにMATLAB Simulink上でシミュレーションを行った。制御対象を連続時間系、コントローラを離散時間系として扱い、DA変換器の分解能等も再現したシミュレーションモデルを構成している。これにより2自由度制御の動特性を確認し最適パラメータ導出の参考とした。

4. 制御性能の評価

4.1 実機とシミュレーションモデルの動特性比較

図5にシミュレーション結果と実機の X 軸粗動位置決め実験結果との比較を示す。ここでは粗動のみを使用しているため、図4中の $C_f=0$ としている。(a)がPID制御のみを用いた場合($F=0$)の実験結果であり、(b)がフィードフォワード併用PID制御の場合の実験結果を示す。(a)、(b)の各上段が、ステップ入力、ランプ入力、余弦波入力に対する応答変位 X であり、下段がその偏差 ΔX となっている。入力波形の大きさ、PIDパラメータは同条件としているため、同図は純粋に2自由度制御の効果を示したものとなっている。図4において、フィードフォワード要素 F は、機構部伝達関数 G の逆数 $1/G$ とすることが望ましい。しかし、一般的には比例要素と微分要素によって伝達関数の低次の項を補償すれば十分な結果が期待できるとされている。図5(b)では ΔX の単位が μm となっており、目標値フィードフォワード型の2自由度制御系を導入することにより、動的定常偏差はランプ応答で約3%、余弦波応答で8%程度まで低減されている。

4.2 粗微動連動による動特性評価

以上の粗動による駆動では、駆動分解能が数 μm 程度に制限されるため、1 μm レベルを越える超精密位置決めは困難である。そこで前節の粗動による2自由度制御系に、さらに微動を用いて動的定常偏差を低減するための実験を行った。実験結果を図6に示す。図5では、偏差 ΔX の単位が nm となっている。ステップ入力に対する定常偏差は約10 nm 、ランプ入力および余弦波入力に対する動的定常偏差(追従偏差)は約100 nm を実現しており、粗微動連動制御によって粗動での動的定常偏差が補償された結果が得られた。本制御

Fig.4 Block diagram of control system

(a) With PID control only

(b) With PID and feedforward control

Fig.5 Comparison between simulation and experimental results

Fig.6 Experimental results with coarse-fine control

系を Y 軸方向にも適用して正弦波状の目標軌跡を入力することで平面内の超精密円弧運動が実現できると考えられる。

5. 結 言

- (1) 目標値フィードフォワード要素とPID動作のフィードバックコントローラから成る2自由度制御系を導入し、動的入力に対する偏差 ΔX を低減することができた。
- (2) 粗微動連動制御によって余弦波状目標軌跡に対する動的定常偏差100 nm 以内が得られ、本機構によって超精密円弧運動を実現する見通しが得られた。

参考文献

- 1) 深田, 渋谷: 機構論, No.017-1 (2001) p.311.
- 2) 深田, 平野, 高橋: 精構論, 2005 春季, p.1125.
- 3) 須田信英: PID制御, 朝倉書店 (1995), p.69.