超精密位置制御に関する研究*

—粗・微動の連動制御—

佐久田 茂** 小 川 潔** 上 田 勝 宣**

Experimental Studies on Ultra-precision Positioning
— Inchworm Movement Method using Fine and Coarse Positionings —

Shigeru SAKUTA, Kiyoshi OGAWA and Katsunobu UEDA

This work was carried out to develop a precision dual positioning apparatus, consisting of friction drive and piezoelectric actuator. In this apparatus, the piezoelectric actuator, designed for fine positioning, is mounted on top of the friction drive slide, designed for coarse positioning. Individual loops are closed by laser interferometer systems, with 2.5 nm resolution. The friction drive and piezoelectric actuator move together, using a kind of inchworm movement method, which the authors have proposed. The method makes it possible for this positioning system to have an over 100 mm stroke with 2.5 nm resolution and no backlash. In addition, this dual positioning system, using the inchworm movement method, is also valid for assuring a tool's continuous path (CP) control, with nanometer order accuracies, in forming three-dimensional surfaces, using a precision machine (precision lathe).

Key words: dual positioning, piezoelectric actuator, friction drive, fine positioning, coarse positioning, inchworm movement, precision machine, continuous path control

1. は じ め に

位置制御は、古くて新しい技術である。精密工学の進歩・発展と軌を一にして、位置制御技術への要求は、その厳しさを増してきている。一般的に、位置制御の主な性能としては、まず精度（分解能）と速度の二つが挙げられよう。しかし、これらのほかに、使用目的によって、種々の要求条件が付加されることになる。

本報では、使用目的として特に、超精密加工¹⁾への応用を念頭におき、今回提案した尺取虫方式粗微動連動によるデュアル制御超精密位置決め²⁾について、その動作原理および基礎実験結果を中心に報告する。

2. 超精密加工装置の位置制御系

超精密加工装置においては、その位置制御系に対して位置決め速度は数百 $\mu\text{m/s}$ 以下とそれほど求められない反面、高分解能、大ストローク、高剛性、軌跡制御 (Continuous Path Control: CP 制御) などが要求条件となる。すなわち、ラッピング、ポリシングなど

の仕上工程を極力少なくするためには、ナノメートルの形状精度、表面粗さが必要となり、制御として高精度・高分解能化（位置決め分解能にして 10 nm 以下）が求められる。近年の加工物の大形化に従い、位置制御の大ストローク化も必要となってきた。また、加工装置では、切削力などの外乱をうけるため、この外乱に打ち勝つだけの剛性が求められる。さらに、自由曲面創成の際には、工具は無数の座標指令値に対して連続的かつ滑らかに追従しなければならず、工具を指定された軌跡に沿って移動させる高精度軌跡制御が必要とされる。半導体ステッパなどでは、点から点への移動動作のみが問題となり、その間の軌跡には言及しない (Point to Point Control: PTP 制御)。この点、両者の位置制御の性格は、大きく異なる。

我々は、位置制御の超精密加工装置での適用を念頭において、次世代の分解能サブナノメートルオーダーの大ストローク軌跡制御の一方法として、尺取虫方式粗微動連動によるデュアル制御を提案した。

3. 実 験 装 置

図 1 は装置外観である。図 2 に実験装置の概要を示す。本装置は、粗動位置決め機構およびその上に搭載された微動位置決め機構からなる。表 1 に粗動、微動

* 原稿受付 平成 3 年 2 月 1 日。1990 年度精密工学会春季大会学術講演会（平成 2 年 3 月 30 日）にて発表。

** 正 会 員 (株) 東芝生産技術研究所 (横浜市磯子区新杉田町 8)

Fig. 1 Precision dual positioning system

Fig. 2 Precision dual positioning system diagram

Table 1 Main specifications for the coarse and fine positioning

	Coarse positioning	Fine positioning
Positioning method	Friction drive	Piezoelectric actuator
Positioning resolution	20 nm	2.5 nm
Stroke	130 mm	200 nm
Notes	Slide : External pressurized air bearing slide Motor : DC servo motor Max power : 16.8 W Torque coefficient : 1.82 N·m/A Slide mass : 12 kg Max velocity : 100 μm/s	Material : PZT piezoelectric ceramic Shape : $\phi 40 \times 12$ mm Piezo coefficient : $d_{33} = 417 \times 10^{-12}$ m/V

各位置決め機構の主な仕様を示す。

3.1 粗動位置決め機構

粗動位置決め機構は、摩擦駆動³⁾である。図2に示すように駆動ロッドは、モータ軸と静圧軸受の間に位置し、空気圧でモータ軸に押し付けられる。また、支持ローラは、モータ軸と共に、駆動ロッドを水平に保持している。モータの回転運動は、押付力（予圧）によってモータ軸と駆動ロッド間に発生する摩擦力により、駆動ロッドに伝達される。駆動ロッドとモータ軸間の予圧は、空気圧を調整することにより変化できるようにした。

本摩擦駆動機構は、減速機構を用いないダイレクトドライブ方式である。nm オーダの位置決めを行うためには、モータは低速・高トルクモータである必要がある。このため本実験装置では、駆動部に高トルクで、制御線形性が優れた高性能DCモータ（最大出力：16.8 W、トルク定数：1.82 N·m/A）を採用した。

案内機構としては、水平直線に沿って動く高精度・高剛性セラミック製静圧空気軸受（スライダ）を用いた。スライダ質量は約 12 kg、スライダの移動範囲は 130 mm である。スライダにおいて、給気による nm オーダの微振動が予想されるため、スライダへの給気圧をレギュレータによって、調整できるようにした。制御時は、スライダ給気圧、摩擦駆動部予圧をそれぞれ適正值（給気圧 3×10^5 Pa、予圧 2×10^5 Pa）に調整した。

粗動用レーザ干渉計が実験装置ベース上に設置されており、位置センサとして分解能 2.5 nm のレーザ干渉測長器を用いた一軸のレーザフィードバック位置決め機構である。

3.2 微動位置決め機構

微動アクチュエータは圧電素子で、PZT 系セラミックス（NPM-N 21, TOKIN）を使用した。形状は直径 40 mm、厚さ 12 mm の円柱形である。圧電セラミックス上に絶縁物を介して反射ミラーを直接取り付け、摩擦駆動装置上に搭載した。粗動と同様、微動用レーザ干渉計が実験装置ベース上に設置されており、レーザフィードバックによって圧電素子を位置制御した。

3.3 制御系の構成

図3に制御系の構成を示す。位

Fig. 3 Control block diagram for precision dual positioning

置センサとして2系統のレーザ干渉式測長器を備えている。すなわち粗動としての摩擦駆動，微動としての圧電素子の両者をそれぞれ独立にレーザフィードバック制御したデュアル制御システムである。制御方式は，粗動・微動ともに位置PID制御である。

デュアル制御方式を考えた場合，粗・微動切換え式制御⁽⁴⁾⁽⁵⁾では，粗動から微動への切換え時の粗動の停止特性が問題となる。加工装置における軌跡制御では，粗・微動切換え式制御を用いた場合，連続的に粗・微動間の切換えが繰り返されることになり，高精度な位置制御は困難である。また，外乱（加工力）を受ける加工装置上では，剛性確保のために粗・微動切換えごとに制御オフとなる制御系をクランプする必要性が生じ，装置が複雑になる恐れがある。そこで，デュアル制御方法として，独立した制御系を成す粗・微動を切り換えることなく，両者を断続的に連動させる粗・微連動方式を採用した。

4. 粗・微動の連動原理

圧電素子の特色として，変位分解能は高い（サブナノメートル）が，変位量は小さく（数十～数百 μm ），動作範囲に制限があることが挙げられる。今回，圧電素子を伸縮させながら大ストロークにわたって位置決めを行う尺取虫方式デュアル制御を提案した。図4に尺取虫方式デュアル制御における粗・微動の連動原理を示す。以下の順序で摩擦駆動・圧電素子を連動させ，圧電素子を用いての大ストローク位置決めが行えるようにした。

- ① 摩擦駆動を固定して，圧電素子を細かく変位させていく（ $L_0 \rightarrow L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3 \rightarrow \dots \rightarrow L_{(x-1)} \rightarrow L_x$ ）。
- ② 摩擦駆動によって圧電素子を①での変位長さ（ $L_x - L_0$ ）だけ進める。
- ③ と同時に，圧電素子を元の長さ（ L_0 ）に戻す。

図5に，粗・微動の連動の一例を示す。微動が3ステップ動くごとに粗動が1ステップ動く場合（図4の $r=3$ に相当）の粗・微動の動きをグラフ状に表したも

Fig. 4 Principle of inchworm movement method

Fig. 5 Dual positioning movement method

のである。尺取虫が歩みを進めるように，圧電素子が伸縮を繰り返しながら，大ストロークにわたって位置決めされることがわかる。なお，実際は粗・微動の応答速度が異なるため，粗動，微動の両者を図4②，③のように厳密に同時に連動させることは困難である。そのため，制御プログラム上で連動時の粗・微動の動きのタイミングをとった。

図4①～③の動作を繰り返すことによって，圧電素子における変位量が小さいという短所をデュアル制

Fig. 6 Step response measured by laser interferometer and capacitance gage

Fig. 7 20 nm step responses for coarse positioning

御によって補うことができ、原理的には圧電素子の位置決めストロークは無限大となる（実際は粗動スライダのストロークに制限される）。さらに、本方式は、連続的な位置決め、すなわち軌跡制御に対しても適用できるという特長を合わせもつ。

5. 位置制御特性

5.1 実験方法

図6は、スライダを微小変位させたときに、スライダの位置を位置フィードバックセンサであるレーザ干渉測長器とフィードバック外センサである静電容量型変位計で同時測定したものである⁶⁾。両者の測定値は、一致しており、位置フィードバックセンサ（レーザ干渉測長器）の応答がそのまま制御対象物の運動を捕えていると考えられる。そこで以降、レーザ干渉測長データを位置測定値とする。

粗動、微動の制御は、PID定数設定および動作指令をコンピュータの制御プログラム上で行う、ソフトウェアサーボである。

5.2 粗動位置決め特性

図7に粗動としての摩擦駆動微小変位応答特性を示す。20 nmのステップ送りにおいてバックラッシュ、ロストモーションのない応答が得られた。位置制御時のスライダ振動もほぼ位置検出センサ分解能 ± 1 ビット以内であった。粗動最小位置決め分解能20 nm以下を確認した。

5.3 微動位置決め特性

図8に今回微動として使用した圧電素子の電圧-ひずみの特性を示す。測定はひずみゲージを用いて行った。変位特性は約0.2 nm/V、非直線

性誤差は約3%であった。図9に圧電素子単独でのレーザフィードバック微小変位応答特性を示す。圧電素子の振動も、位置検出センサ分解能 ± 1 ビット（ ± 2.5 nm）以内であった。2.5 nmのステップ送りにおいてバックラッシュ、ロストモーションのない応答が得られた。微動最小位置決め分解能が2.5 nm以下であることを確認した。

5.4 デュアル制御位置決め特性

図10に上記摩擦駆動、圧電素子両者を尺取虫方式で連動制御したデュアル制御位置決め結果を示す。摩擦駆動（粗動）は30 nmステップ、圧電素子（微動）は10 nmステップで送っている。すなわち圧電素子を10 nmステップで3回送った後、摩擦駆動で30 nm進めると同時に圧電素子を元の長さに戻すという一連の動作を繰り返したものである。粗動、微動の位置検出には粗動・微動の各位置フィードバックセンサ（レーザ干渉測長器）を、圧電素子の伸縮測定にはひずみゲージをそれぞれ用いた。

圧電素子が摩擦駆動スライダ上に搭載されているため、図10に示すように

$$(\text{微動伸縮}) + (\text{粗動位置}) = (\text{微動位置})$$

の関係が成立する。このとき相互間の干渉を軽減するため、連動時に微動動作指令に時間差を設けて2回に指令を分けて与えた。尺取虫方式デュアル制御の基本動作を確認した。

図11に大ストロークにわたるデュアル制御位置決め結果の一部を示す。以降、デュアル制御結果におけ

Fig. 8 Voltage applied to piezoelectric ceramics vs. strain

Fig. 9 2.5 nm step responses for fine positioning

Fig. 10 Dual positioning by using inchworm movement method

Fig. 11 Long-stroke positioning for dual positioning

Fig. 12 2.5 nm step responses for dual positioning

る測定位置は、圧電素子の位置を示す。変位量に制約がある圧電素子単独では、大ストローク位置決めは困難である。デュアル制御によって、圧電素子を用いた nm オーダの大ストローク連続位置決めが可能となった。

図 12 は、デュアル制御微小変位応答特性を示す。尺取虫方式粗・微動連動は、往路（図 12 の山上り部

Fig. 13 Flow chart of the inchworm movement method for continuous path control

分）、復路（図 12 の山下り部分）両者に有効であり、バックラッシュもなかった。最小位置決め分解能が 2.5 nm であることを確認した。

図 13 に、尺取虫方式による軌跡制御フローチャートを示す。まず、圧電素子に対して自由曲線に沿った座標指令値を連続的に与えながら、プログラム上で圧電素子の伸び量を逐一監視する。そして、軌跡制御中に圧電素子がある一定の限界伸び量（ ΔL 、図 4 において $\Delta L = L_x - L_0$ ）に達したときに、図 4 の②、③に示すような粗・微動の伸縮を同時に行わせる。以降、再び圧電素子に対して、自由曲線に沿った座標指令値を連続的に与えていく。これら一連のプロセスを繰り返すことによって、圧電素子は伸縮を繰り返しながら大ストロークにわたって、座標指令値に沿った軌跡を描く。

自由曲線として正弦曲線を選択し、図 13 のフローチャートに従って、尺取虫方式デュアル制御による自由曲線軌跡制御を行った。圧電素子の伸び量限界値 ΔL は 10 nm とした。粗・微動間の干渉軽減を図るため、図 11～13 と同様に粗・微動の連動時において、微動指令を二つに分割した。

図 14 は結果の一例である。粗・微動の連動時に 10

Fig. 14 Continuous path control for dual positioning

nm 以下の干渉 (図 14 A 部分) が依然みうけられるものの、尺取虫方式を用いて圧電素子を正弦曲線に沿って位置決めできた。図 13 のフローチャートに従った、尺取虫方式デュアル制御による軌跡制御アルゴリズムの基本動作を確認できた。

6. ま と め

粗動としての摩擦駆動機構、微動としての圧電素子から成るデュアル制御システムを開発した。

- (1) 尺取虫方式粗・微動連動によるデュアル制御を提案した。
- (2) 尺取虫方式によって、圧電素子を用いた nm オーダの大ストローク軌跡制御が可能であることを示した。

実際の加工装置の制御にあたっては、スライダ運動誤差、加工中の振動誤差といった問題が指摘され⁷⁾、これらに対する多角的なアプローチが必要となる。この点、本方式は微動アクチュエータに誤差補正機能⁸⁾

も兼ね備えさせることができ、ある意味では非常に柔軟な位置決めシステムである。

今後は、今回の基礎実験結果を基に、微動位置決め分解能を上げていき、剛性および速度に対する検討も加えていく。さらに、軌跡制御における干渉軽減のための制御アルゴリズムを開発する。そして、サブナメートルの分解能をもつ大ストローク軌跡制御を行う。

参 考 文 献

- 1) R. R. Donaldson and S. R. Patterson: Design and Construction of a Large Vertical Axis Diamond Turning Machine, SPIE, 433, (1983) 62.
- 2) 佐久田 茂ほか: 超精密位置制御に関する研究——粗・微動の連動制御, 1990 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 795.
- 3) 佐久田 茂ほか: 摩擦駆動による超精密位置決め, 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 641.
- 4) 二見 茂ほか: AC リニアモータと転がり案内による超精密位置制御, 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 659.
- 5) 半沢宏敏ほか: 超精密位置決め技術の開発——粗微動複合一軸テーブルの試作と評価, 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 679.
- 6) S. Sakuta et al.: Precision Dual Positioning System, SPIE, 1334, (1990) 10.
- 7) J. K. Myler: The Influence of Machine Tool Vibration on the Surface Texture of Diamond Turned Components, SPIE, 732, (1987) 196.
- 8) H. K. McCue: The Motion Control System for the Large Optics Diamond Turning Machine, SPIE, 433, (1983) 68.