能動自成絞りによる超精密空気静圧案内面の 制御に関する研究*

水本 洋** 有井士郎*** 山本 剛† 高田芳治†† 上 芳啓†††

An Ultraprecision Aerostatic Guideway Controlled by Active Inherent Restrictors

Hiroshi MIZUMOTO, Shiro ARI, Tuyoshi YAMAMOTO, Yoshiharu TAKATA and Yoshihiro KAMI

An active control method for improving the performance of an aerostatic guideway used in an ultra precision positioning system is proposed. The proposed method employs an Active Inherent Restrictor (AIR) to control pneumatic pressure on the guideway. The AIR invented by the authors consists of a piezoelectric actuator having a through hole, one end of which is small enough to function as an orifice when the actuator is embedded in the guideway to be controlled. Six AIRs are incorporated into the table guided by the aerostatic guideway; four AIRs for compensating the vertical displacement, and two for the horizontal displacement. According to the table displacements detected by sensors, a micro computer changes the length of the piezoelectric actuators for controlling the orifice area of the AIRs, and for compensating the displacements. In both vertical and horizontal directions, it was proved that the stiffness of the guideway can be infinite, and the straightness of motion of the table can be about 20 nm, while the pneumatic hammer did not occur.

Key words: active restrictor, aerostatic bearing, aerostatic guideway, infinite stiffness, inherent restrictor, piezoelectric actuator, positioning system, straightness

1. は じ め に

超精密工作機械、超精密測定器などは母性原理によりそれぞれの機能を発揮しており、各運動軸の駆動機構と案内機構の作り出す直線運動、回転運動の正確さが加工精度、測定精度を決定することになる。本研究はこれらのうち、直線運動の精度向上を目的としたものである。超精密工作機械の直線案内機構としては空気または潤滑油を作用流体とした静圧案内面が多く採用されている。その主な理由は、摩擦係数が低くて安定していることと流体膜の平均化作用により案内面表面の形状誤差の影響が軽減できることなどにより、高い案内精度が期待できることである。その結果、静圧案内面に案内されたテーブル運動の真直度は200 mmにつき数十 nm 以内にできる¹⁾。しかしこの程度の真直度であっても、工作機械の軸数が2軸、あるいは3軸と組み合わせられて製作される品物の加工精度をサブミクロン以内に抑えるのはたやすくはない。したがって、より高い加工精度、測定精度を求めるには案内精度をさらに向上させる必要があるが、案内面の形状誤差を現在以上に減少させて案内精度を高めることは技術的、コスト的に困難であろう。しかも、案内面を高精度で仕上げられる熟練技術者の減少も深刻な問題である。そこでより高い案内精度を実現するために案内面の平面度を調整する機構が提案されている²⁾。

テーブル運動はさらに駆動機構の影響も受ける。案内面本来の案内精度を維持するためには、駆動機構には送り方向と直角なラジアル方向剛性が零であることが望まれる。このような観点からすると、モータの回転運動からテーブルの直線運動への運動変換のために連続溝型の静圧ねじを使用するねじ送り装置

が最も理想的である³⁾。それに対してボールねじや摩擦駆動装置など、無視できないラジアル剛性を持つ変換装置を使用する駆動機構ではモータの回転に伴うラジアル方向の振動発生は避けられない⁴⁾。そのような場合には送り方向の剛性を犠牲にした静圧ねじ⁵⁾、あるいは制御可能なサブテーブル⁶⁾などを利用して案内精度の劣化を避ける必要があった。

そこで本研究では、空気静圧案内面で案内されるテーブルの変位をフィードバックして案内機構を能動制御することでテーブル運動の真直度改善を試みた。このような制御を行うことで、ラジアル剛性の低くない変換装置をテーブルと直結しても、発生するラジアル振動の影響を軽減し、送り方向剛性を低下させることなく高い案内精度が実現できる。実験においては表面絞りを付したセラミックス製の空気静圧案内面に筆者らが開発した能動自成絞り (AIR)⁷⁾を組み込んだ。能動自成絞りとは、中央に小孔を設けた圧電素子を空気静圧軸受の軸受面に埋め込み、この小孔を通して軸受面に圧縮空気を供給するもので、圧電素子の長さを印加電圧により調節することで絞り特性を変化させることができる。この能動自成絞りはすでにこれまでに空気静圧スピンドルに組み込まれ、スラスト、ラジアルの両方向における剛性と回転精度の向上に効果のあることが示されている⁸⁾。空気静圧案内面に案内されるテーブルの駆動にはACサーボモータとツイストローラ摩擦駆動装置⁹⁾を用いた。ツイストローラ摩擦駆動装置はロングストロームオーダの位置決め分解能を持つことをすでに報告しているが、そこではツイストローラの支持に油潤滑の静圧軸受を用いていた¹⁰⁾。本研究では清浄な環境で空気静圧案内面の駆動を行う必要から、ローラの支持には転がり軸受を使用しているが¹¹⁾、そのためにローラの回転精度が低下し、ラジアル方向の振動が増大した。そこで、テーブル運動時に生じるラジアル振動をセンサにより検出して能動自成絞りを制御することで、センサの感度を限度としてテーブル運動の真直度を向上させられることを明らかにする。

* 原稿受付 平成9年3月17日

** 正 会 員 鳥取大学工学部 (鳥取市湖山町南4-101)

*** 鳥取大学工学部

† 学生会員 鳥取大学工学部

†† 正 会 員 ヤマザキマザック(株)加工技術センタ (愛知県大口町)

††† 正 会 員 (株)不二越 (滑川市大掛176)

Fig. 1 Principle of active inherent restrictor (AIR)

2. 能動自成絞りと実験用位置決め装置

能動自成絞りの動作原理などについてはすでに報告している⁷⁾、ここでは簡単に述べる。空気静圧軸受には各種の絞りが使われているが、基本的には軸受面に至る圧縮空気の流路の一部を狭くすることでオリフィス効果を生じさせて空気の圧力を調節する形式のものが多く、そのような形式のひとつである自成絞りと、図1に示すように絞りの軸受面開口部直径 d と開口部における軸受相手面とのすきま h_d とで決まる仮想円筒の側面積、 $\pi \cdot d \cdot h_d$ をオリフィス断面積とするものである。自成絞りは絞りを下流の空気体積を小さくできることより、空気静圧軸受でしばしば問題となるニューマチックハンマを生じにくい特徴を持つ。通常の自成絞りは軸受面に固定されているので軸受すきま h と絞部すきま h_d とは常に一致しており、負荷変動などによる軸受すきまの変動は避けられない。そこで我々は、図1に示すように絞すきま h_d のみを圧電素子により強制的に変化させることでオリフィス断面積を能動的に調節して、負荷変動が生じても軸受すきまを一定に保つことのできる能動自成絞り (Active Inherent Restrictor, AIR と略記) を開発した。

能動自成絞りの本体は中央に直径 1 mm の給気穴を設けた圧電素子 (NEC 製, 5 mm 角, 長さ 10 mm の積層型, 150 V の印加電圧に対して約 $8 \mu\text{m}$ 伸長する) である。この圧電素子の先端を約 1 mm の厚さでエポキシ樹脂により被覆し, この樹脂層中央に圧電素子内の給気穴とつながる 0.3 mm の小孔を設ける。この圧電素子をその樹脂面が軸受面と一致するように埋め込むと, 樹脂面中央の小孔が自成絞りとして機能するようになる。そして負荷変動などによる軸受すきま h の変化をセンサで検出し, たとえば h が増加した場合には圧電素子への印加電圧を増加させることで圧電素子を伸ばして絞りをすきま h_0 を減少させる。すると, オリフィス断面積 (絞りの開度) が減少し, 軸受面圧力が減少するので軸受すきまは元に戻り, 軸変位が補償されることになる。このような能動自成絞りの機能により, 空気静圧軸受の剛性を高め, 回転精度を向上させられることはすでに報告している⁸⁾。本研究ではこの能動自成絞りを超精密位置決めシステムに使われている空気静圧案内面の性能向上に利用する。

図2は能動自成形りの効果を検証するための実験に使用した位置決め装置である。テーブルの駆動にはACサーボモータと、モータの回転運動を直線運動に変換するツイストローラ摩擦駆動装置⁹⁾とが使用されている。ツイストローラ摩擦駆動装

Fig. 2 Positioning system with twist-roller friction drive and the AIR

Fig. 3 Block diagram of control system for the AIR

置とは、駆動軸の回りに3個の従動ローラを微小な交差角で配置したもので、機構学的にはねじ送り装置と等価である。その特徴はリードを通常のねじに比べて極めて小さくでき、高い位置決め分解能を実現できることである（ここで使用した装置でのリードは約60 μm であった）。以前に報告したツイストローラ摩擦駆動装置は0.2 nmの位置決め分解能を持つことを明らかにしたが、その装置では従動ローラの回転精度を高めるために油潤滑の静圧軸受をローラ支持に使用していた¹⁰⁾。それに対して図2の装置では取扱いの容易さと油による汚染をさけるために転がり軸受をローラの支持に使用している¹¹⁾。転がり軸受の使用により位置決め性能の劣化が懸念されるが、このことについては3章で述べる。

摩擦駆動装置により駆動されるテーブルはセラミックス製の空気静圧案内面により案内され、ストロークは150 mmである。空気静圧案内面はテーブル下面にコの字型に配置され、水平、垂直両方向に関して対向型となっている。軸受面には浅い溝が設けられ、表面絞りを形成している。軸受すきまは平均で10 μm である。このテーブルの上面の4隅と一方の側面の隅の2か所の合計6か所には能動自成絞りを組み込んだ制御用パッド(AIRパッド)が取り付けられている。つまり、空気静圧案内面の本来の表面絞り機構はそのままにして、後から制御用パッドを取り付けることで案内面の垂直および水平方向の案内性能の向上を図ろうとするものである。各制御用パッドには図3に示すように能動自成絞りが2個組み込まれており、この制御用パッド下面と相手側案内面とのすきまは約10 μm となるように調整されている。能動自成絞り制御のためのブロッ

Fig. 4 Nanometer step positioning of the system¹¹⁾

ク線図も図3に示されている。テーブル変位はテーブル上に設置された直定規（長さ35mm，真直度0.1 μ m）を基準として光ファイバ変位計（MTI社製，分解能0.2nm）により検出され，A/D変換後パソコンに取り込まれる。パソコン内ではPI制御アルゴリズムにより圧電素子への印加電圧が算出され，D/A変換器によりアナログ電圧に変換される。このアナログ電圧はアンプで15倍に増幅されて圧電素子に印加され，能動制御が実行される。なお，圧電素子上面は軸受面よりも低くはできないので，図1に示すようにあらかじめオフセット電圧を印加して圧電素子を伸ばし， $h_a < h$ としておくことで負荷増加にも対処している。各圧電素子にはそれぞれの近傍にある変位計よりの信号のみがフィードバックされ，各能動自成紋りの制御は独立して行われることになる。

3. 実験用位置決め装置の基本性能

実験用位置決め装置に組み込まれたツイストローラ摩擦駆動装置では取扱いの容易さと油による汚染を避けるため，ローラ支持に転がり軸受を使用している。しかしローラの回転精度低下による位置決め性能の劣化が危惧されたので，位置決め分解能を調べた。ステップ送り指令に対するテーブルの送り方向変位を自作の光ファイバ変位計（分解能0.1nm）¹²⁾で検出し，ACサーボモータの回転角をフィードバック制御した。このときの位置決め可能距離は変位計のストローク（10 μ m程度）で制限される。測定結果を図4¹¹⁾に示すが，0.5nmのステップ送りが可能であると判断できる。このように転がり軸受によりローラを支持しているために，静圧軸受支持の場合での位置決め分解能，0.2nm¹⁰⁾に比べて分解能は低下したが，油圧回路を必要とせず，また製作組立が容易であるなど，転がり軸受支持の利点は多い。したがって，図2の実験装置はオングストロームオーダーの分解能を持った超精密位置決め装置であると言える。

Fig. 5 Straightness of guideway without control

この位置決め装置の性能を引き出すにはテーブル運動の正確さが必要となる。つまり，位置決め分解能が高くても，テーブル運動の真直度が悪ければ，高い位置決め精度を得ることはできない。そこで，テーブル上に設置された直定規を基準とし，テーブルの運動に伴う垂直および水平方向の変動を光ファイバ変位計により測定した結果を図5に示す。駆動機構を組み込まないときのこの空気静圧案内面単独での真直度は50nm/100mm程度であった（オートコリメータによる実測値）。図5にはこのような案内面本来の形状誤差に起因する長周期の変動成分のほか，振幅0.1~0.2 μ m程度の短周期の規則的な変動が見られる。この短周期の変動はツイストローラ摩擦駆動装置の駆動軸の回転に起因するものであると考えられる。このようにツイストローラ摩擦駆動装置では送り方向と直角のラジアル方向剛性が比較的高いために，ローラの回転精度の低下や駆動軸と3つのローラの中心位置の幾何学的なずれなどが生じると，図5に示すようなラジアル振動が発生してテーブル運動の真直度に影響を与えることになる。実際に生じるラジアル振動の大きさは案内機構の剛性にも依存する。後述するように，ここで使用した空気静圧案内面の剛性は水平方向の方が高いので，図5に示すように水平方向の振動振幅の方がやや小さくなっている。

4. 能動自成紋りの特性と案内面の静剛性

能動自成紋りは軸変位などをフィードバック制御により補償する目的で使われるのであるが，まず制御を行わない状態における能動自成紋りのアクチュエータとしての動きを確認した。図6は一つの垂直方向，あるいは水平方向制御用パッドの能動自成紋りに電圧を印加したときのパッド位置でのテーブルの垂直，あるいは水平変位を測定した結果である。図中の数字は圧電素子への印加電圧（V）を示す。印加電圧の上昇とともに圧電素子が伸びて絞り開度が減少してテーブルは下降していることがわかる。この測定結果より，垂直方向でおよそ0.8 μ m以内，水平方向で0.1 μ m以内のテーブル変位であればその変位をフィードバックして能動自成紋りに適切な電圧を印加することで，変位が補償されてテーブル姿勢が制御可能であると考えられる。

そこで次に，テーブルの静的負荷特性に対する能動自成紋りの効果を評価した。まず垂直方向の特性を解析するためにテー

Fig. 6 Static characteristics of the AIR pad

Fig. 7 Load carrying capacity in vertical direction

Fig. 8 Load carrying capacity in horizontal direction

ブル4隅の垂直方向制御用パッドを駆動して静止状態のテーブルにおもりを載せ、そのときの垂直方向の変位をテーブルの4隅で測定した。測定された4か所の変位の平均を図7に示す。図中の▲印が制御を行わないときの特性で、負荷の増加とともに変位が増大しており、剛性は約350 N/μmとなっている。それに対して、●印で示された能動制御を行った場合には、負荷が増加してもテーブルは変位しておらず、無限大の静剛性の得られていることがわかる。図8には水平方向での負荷特性の測定結果を示す。非制御時の剛性は約480 N/μmであり垂直方向よりもやや高い。そして能動制御を行うと水平方向においても無限大の剛性が得られた。このように、能動自成紋りを

Fig. 9 Frequency response in vertical direction

Fig. 10 Frequency response in horizontal direction

動作させることで静剛性を向上させられることが確認できた。

5. 能動自成紋りによる真直度の改善

図9,10には能動自成紋りの垂直および水平方向の周波数特性を示す。これは、それぞれの制御用パッドの圧電素子に一定振幅の正弦波状電圧を周波数を変えながら印加し、そのときのテーブル変位を光ファイバ変位計により検出して、変位振幅の変化と印加電圧に対する位相遅れを示したものである。図9,10より、垂直方向で40 Hz以下、水平方向で15 Hz以下の周波数においてゲインと位相遅れがほぼ零であり、この周波数範囲でのテーブル変動に対して能動自成紋りは有効に動作することがわかる。したがって、テーブル変動の周波数は図5などから考えて高々数 Hzであることより、充分制御可能であると考えられる。

そこで次に能動自成紋りのテーブル運動に対する効果について解析する。図5に示したように、制御を行っていないときのテーブル運動は駆動機構などの影響を受けて変動しており、その真直度は0.2 μm程度であった。図11には能動自成紋りを駆動して制御を行った場合のテーブル運動などを示す。上段よ

Fig. 11 Straightness of guideway controlled by the AIR

Fig. 12 Straightness of guideway controlled by the AIR

り、垂直方向のテーブル変位、垂直方向制御用パッドへの印加電圧、水平方向のテーブル変位、そして水平方向制御用パッドへの印加電圧である。S 点は能動制御の開始位置を示している。S 点以前は図 5 と同様に大きく変動していたテーブルは制御開始とともに安定し、摩擦駆動装置のローラ回転に起因する変動が消滅していることがわかる。さらに、案内面本来の形状誤差に起因する変動もほとんど見られない。一方この間、圧電素子への印加電圧は変動しており、制御システムが各種の外乱に対して圧電素子を伸縮させることで対処していることがわかる。能動自成絞りが作動している制御状態での、より長い距離にわたるテーブル運動を図 12 に示す。図 11, 12 より、テーブル運動の真直度は垂直、水平方向ともにおよそ 20 nm であるといえる。この真直度は制御の基準とした直定規に対する値であるが、能動制御により案内面本来の真直度 (50 nm/100 mm) よりも高い真直度の得られる可能性が示されている。しかしながら、図 11, 12 の制御中のテーブル変位の測定結果をよく見ると、非制御時に比べてノイズ幅が広がっているととも

に、パルス状の変動が新たに発生していることがわかる。ノイズ幅の広がりには変位計ノイズに起因すると考えられ、また、パルス状のノイズ発生は制御に用いたパソコンに起因すると考えられる。このように、ここで提案する方法は基準とした直定規の精度と長さ、そして変位計、パソコンなどの制御系のノイズレベルで制限されることになる。したがって、高い真直度を全ストロークにわたって実現するにはノイズの低い長ストロークの計測制御システムを開発する必要がある。なお、以上の実験においてニューマチックハンマは発生しなかった。

6. ま と め

超精密工作機械などに使用される空気静圧案内面の性能向上をめざして能動自成絞りによる制御法を提案し、能動自成絞りの空気静圧案内面の案内精度などに対する効果を実験的に解析した。その解析結果を以下にまとめる。

- (1) 能動制御により案内面の静剛性を垂直、水平両方向において無限大にできることを確かめた。
- (2) 能動制御により駆動機構の影響を抑制し、テーブル運動の真直度を垂直、水平両方向において 20 nm 程度に改善することができた。

以上により本研究で提案した能動自成絞りが空気静圧案内面の性能向上に有効であることが確認できた。

終わりに、本研究の遂行に当たり貴重なご助言をいただいた大阪大学井川直哉教授に心より感謝いたします。また、位置決め装置の製作および実験の実施に際しては(株)不二越より多大なご協力を頂いたことを申し添えます。なお、本研究は文部省科学研究費(基盤研究(A), 07555375, および基盤研究(C), 07650178)を受けて行われました。

参 考 文 献

- 1) 上 芳啓：超精密送り位置決め装置の開発，不二越技報，50, 2 (1994) 42.
- 2) 鈴木 洋ほか：斜入射 X 線ミラー用超精密研削加工機の開発，精密工学会誌，60, 9 (1994) 1309.
- 3) 水本 洋ほか：超精密工作機械用位置決め装置の分解能に関する比較研究，精密工学会誌，62, 3 (1996) 458.
- 4) 飯塚 保ほか：超精密駆動機構用溝なしボールねじの開発，1996 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，第 2 巻，(1996) 505.
- 5) 例えば，日本機械学会編：超精密システムの設計技術，初版，コロナ社，(1996) 85.
- 6) 小林 昭監修：超精密生産技術大系(第 3 巻，計測制御技術)，初版，フジテクノシステム，(1995) 423.
- 7) 水本 洋ほか：能動自成絞りに付き高剛性空気静圧軸受の開発，精密工学会誌，60, 9 (1994) 1325.
- 8) H. Mizumoto et al.: Active Inherent Restrictor for Air Bearing Spindles, Prec. Eng., 19, 2/3, (1997) 141.
- 9) 水本 洋ほか：ツイストローラ方式摩擦駆動による精密位置決め機構の研究，精密工学会誌，57, 8 (1991) 1468.
- 10) H. Mizumoto et al.: An Angstrom-positioning System Using a Twist-roller Friction Drive, Prec. Eng., 17, 1, (1995) 57.
- 11) H. Mizumoto et al.: A Twist-roller Friction Drive for Nanometer Positioning, Ann. CIRP, 45, 1, (1996) 501.
- 12) 井川直哉ほか：サブナノメートルの分解能を持つ反射光電式変位計の試作，精密工学会誌，53, 6 (1987) 891.