静圧案内面を運動縮小機構として利用した 超精密位置決めシステムの開発*

水本 洋** 藪谷 誠*** 上 芳啓† 有井士郎††

Ultraprecision Positioning System using Aerostatic Guideway as Motion-Reduction Mechanism

Hiroshi MIZUMOTO, Makoto YABUYA, Yoshihiro KAMI and Shiroh ARII

A new type of ultraprecision positioning system using an aerostatic guideway with active control system is proposed. The control system employs an Active Inherent Restrictor (abbreviated AIR) invented by the authors. The AIR 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 bearing surface. By changing the length of the piezoelectric actuator, the AIR controls the air film thickness and the position of the table supported aerostatically by the guideway. Owing to aerostatic mechanism, the table displacement normal to the guideway can be much less than the deformation of the actuator. This means that the aerostatic guideway with the AIR acts as a motion-reduction mechanism. Full stroke of the actuator is 3.5 μm , while that of the table is 110nm, then the reduction ratio of this mechanism is about thirty. Dynamic step positioning of the table shows that the settling time is about 30ms and the slewing rate is about 4.5nm/ms. Static step positioning with various step width shows that the positioning resolution is 50pm. Therefore, the stroke is short, however, the system can be used for picometer positioning. Under step positioning of the table, an aluminum alloy mounted on the table is turned by a single point diamond tool. On the turned surface, micro steps, depth of which is 16nm, can be resolved. This shows that the positioning system can be used to control the depth of cut.

Key words: active control, aerostatic bearing, aerostatic guideway, piezoelectric actuator, positioning, nanometer, picometer, turning

1. 緒 言

工作機械や計測機器などの精密機械にとって「位置決め」は基本的機能の一つである。これらの精密機械においては一般に百ミリメートル以上のテーブル移動を必要とすることより、ボールねじやリニアモータなどを用いた位置決め装置が良く使用されている。このような長ストロークの位置決め装置においては 1nm 程度の高い位置決め分解能を公称する超精密機種も珍しくなく¹⁾、さらにサブナノメートルオーダの位置決め分解能も静圧ねじ²⁾やツイストローラ摩擦駆動機構^{3,4)}により得られることが報告されている。

しかしながら、今後の発展が期待される X 線光学分野で使用される光学素子の加工や計測などではさらに高い位置決め分解能が必要となるため、上述のような位置決め装置での対応は困難である。そこで総合的な位置決め分解能の向上を目的として長ストロークの装置上に短ストローク、高分解能の位置決め装置が微小切り込み装置などとして搭載されている⁵⁾。短ストローク、高分解能の位置決め装置は STM や AFM などの超精密測定器においても必要とされている⁶⁾。このような短ストローク高分解能の位置決め装置では圧電素子やボイスコイルなどがアクチュエータとして用いられており、適切な制御によりサブナノメートルオーダの位置決め分解能が得られている。しかしながらこれらのアクチュエータには案内機構が必要である上に、アクチュエータの変位量が直接、位置決め量となるために、さらに高い分解能を実現することは困難と思われる。

そこで本研究では、能動制御機構を組み込んだ静圧案内面を

運動縮小機構として利用する超精密位置決めシステムを提案し、ピコメートルオーダの位置決め分解能の実現をめざす。これまでも静圧軸受を位置決め機構に使う試みはいくつか発表されている。野村らは油静圧案内面への圧力油供給回路にサーボバルブを組み込み、ナノメートルオーダの分解能での位置決め制御に成功している⁷⁾。また、渡辺らは空気静圧軸受の軸受面を圧電素子により駆動、制御することで軸をナノメートルオーダで位置決めしている⁸⁾。しかしこれらの制御機構にはアクチュエータの変位を縮小するという思想は見られず、位置決め分解能の限界は我々のめざすレベルに比べて低い。

それに対して本研究では制御機構によりアクチュエータの変位を縮小することが意識されている。その制御機構とは筆者らにより開発された能動自成絞リ(Active Inherent Restrictor, 以下の図中では「AIR」と略記)を使用するもので、これまでの研究においてはこの能動自成絞リを用いて静圧軸受や静圧案内面の運動精度を向上させてきた^{9,10)}。運動精度を向上させるには基準面からのテーブル変位を検出し、能動自成絞リの開度を制御してテーブルを基準面に復帰させる。一方、本研究の目的である位置決め動作では所望の変位量を指令値として絞リ開度を制御することでテーブルを強制的に変位させる。このとき能動自成絞りに組込まれた圧電素子の変位に比べてテーブル変位は数十分の一になるので変位の縮小機構が成立する。この縮小機構を活用することでピコメートルオーダに迫る高い位置決め分解能が得られたのでここに報告する。

2. 静圧案内面の微小位置決め機構としての利用

2.1 能動自成絞リの動作について

自成絞リを持った空気静圧軸受における空気の流れを考えてみる。図 1 は絞リ部を拡大して示したものであるが、直径 d の円形流入絞リを通過して軸受面に流入する質量流

* 原稿受付 平成 13 年 4 月 11 日

** 正 会 員 鳥取大学工学部 (鳥取市湖山町南 4-101)

*** 正 会 員 (株) 不二越 (富山県滑川市大掛 171)

† (株) 不二越

†† 鳥取大学工学部

量 W_{in} は次式となる¹⁾。

$$W_{in} = C_{in}(\pi d \cdot h d) \cdot P_s \quad (1)$$

ここで $h d$ は絞り隙間で、 $\pi d \cdot h d$ がオリフィス断面積、つまり絞り開度となる。また、 C_{in} は空気やオリフィスの特性などで決まる定数、 P_s は供給圧力である。一方、軸受が外径 R の円形スラスト型で、流入絞りが中央に1個所にある場合、隙間 h の軸受面を通過して軸受外に流出する空気の質量流量 W_{out} は次式となる。

$$W_{out} = \frac{C_{out} \cdot \pi R^3 (P_0^2 - P_a^2)}{P_a \cdot \ln(2R/d)} \quad (2)$$

ここで P_0 、 P_a はそれぞれ軸受面の絞り出口圧力および大気圧で、 C_{out} は空気の密度、粘度などにより決まる定数である。軸受形状が様々に変わっても、式(2)に示されるように流出流量 W_{out} が軸受隙間 h の3乗に比例することは基本的に変りない。質量が保存されることより式(1)の W_{in} と式(2)の W_{out} を等しいと置くと次式を得る。

$$h = \sqrt[3]{\frac{C \cdot P_s \cdot P_a}{(P_0^2 - P_a^2)} h d} \quad (3)$$

ここで C は軸受や絞りの形状などにより決まる定数である。通常の空気静圧軸受においては絞り隙間 $h d$ と軸受隙間 h とは常に一致しており、たとえば負荷増加に応じて軸受面圧力 P_0 が上昇するためには絞り隙間 $h d$ と軸受隙間 h がともに減少しなければならない。それに対し能動自成絞り付き軸受では組み込まれた圧電素子によって $h d$ のみを単独で変えることができ、式(3)から理解できるように $h d$ を増加させることで軸受隙間 h を一定に保ったままで P_0 を増加できる。その結果、軸受剛性や回転精度が向上することはすでに発表している^{9,10)}。

この静圧軸受を位置決め装置として使用する場合には負荷は一定、すなわち P_0 は変わらないので、式(3)より軸受隙間 h は図2に示すように絞り隙間 $h d$ の3乗根に比例することになる。そこで図1および図2を使って位置決め動作を説明する。案内面とテーブルの距離が h の時に圧電素子を $\Delta h d$ 縮めると絞りが開かれたことになり、軸受隙間に流れ込む空気量が増加してテーブルを Δh だけ押し上げる。つまり圧電素子の $\Delta h d$ の変位によりテーブルは Δh だけ変位するが、図2の曲線の傾きが1以下となるように軸受を設計すれば両変位の比 $R = \Delta h / \Delta h d < 1$ となり、能動自成絞り付き静圧案内面による変位の縮小が可能となる。縮小率 R は静圧軸受の負荷特性の設計により決まるが、通常的设计で容易に数十分の一にすることができるので、単独での分解能が1nmのアクチュエータを使えば、10pm オーダの分解能が得られることになる。

2.2 3軸制御超精密工作機械の概要

図3には本研究の位置決め実験に使用する3軸制御超精密工作機械を示す。水平軸であるX軸とZ軸の位置決め装置にはツイストローラ摩擦駆動機構が、そして垂直軸であるY軸にはボールねじが使用されている。X軸の位置決め装置はこれまでの研究により0.5nmの位置決め分解能を持つことを報告している⁴⁾。各軸テーブルは能動自成絞り付き空気静圧案内面により

Fig. 1 Motion reduction mechanism of Active Inherent Restrictor

Fig. 2 Relationship between restriction gap and air film thickness

Fig. 3 Three-axis ultraprecision machine tool with AIR

案内され、ストロークはX軸 150mm、Y軸 60mm、Z軸 110mm である。能動自成絞りはX軸6カ所、Z軸5カ所、Y軸2カ所に組み込まれており、各軸テーブルの運動真直度を10nm オーダにまで高めることが可能である。X軸テーブルは300mm×350mm×100mmの大きさで、ワークスピンドルが搭載されている。一方、工具はZ軸テーブルに垂直に搭載されたY軸テーブルの刃物台に固定される。これまでに研究により、アルミ合金をダイヤモンド単刃工具により旋削し、能動自成絞りの効果などにより、仕上げ面の形状精度 0.1μm、表面あらさ $R_a=4\text{nm}$ の鏡面を得ている¹²⁾。本研究ではX軸テーブルのZ方向について能動自成絞りによる超精密位置決めを試みる。

2. 3 能動自成絞り付き静圧案内面を用いた位置決め制御

図4には能動制御システムの構成概要を示す。X軸は紙面に垂直であり、X軸テーブルは静圧案内面によりY方向およびZ方向の動きを拘束されているが、Z方向には能動自成絞りにより微少に変位させることが可能である。ツイストローラ摩擦駆動機構を用いたX方向への移動に際してのテーブル運動の真直度を高める場合には、テーブル左に取り付けられた参照面を基準として光ファイバセンサでとらえたテーブルのZ方向変位が零になるようにPI制御アルゴリズムを用いたパソコン処理により能動自成絞りの開度を調節する¹⁰⁾。一方、本研究の目的である位置決めを行う場合には、パソコンより位置決め指令を出してアクチュエータを調節することでテーブルを変位させ、光ファイバセンサでその変位をフィードバックして所望の変位量が得られるように制御する。

図5にはX軸のZ方向制御用能動自成絞りに電圧を印加したときのX軸テーブルのZ方向変位、つまり軸受隙間の変化 Δh を示す。横軸は圧電素子の変形量、つまり絞り隙間の変化 Δh_d であり、したがって図5は図2の曲線の一部と見なすことができる。テーブル変位はほぼ圧電素子の変形量に比例して増大し、最大で約110nmとなっている。それに対する圧電素子の変形量は約 $3.5\mu\text{m}$ （このときの印加電圧は70V）であり、圧電素子の変形は能動自成絞り機構により約1/30に縮小されている（つまり、縮小率 $R=30$ となる）ことがわかる。このように能動自成絞り付き空気静圧案内面は変位縮小機構となり、この機構を図4の制御システムと組み合わせることでアクチュエータである圧電素子の分解能を越えた超精密位置決めが可能となる。

テーブル変位の検出に用いられる光ファイバセンサ（MTI（米国））の感度は $2\text{mV}/\text{nm}$ 、公称分解能は 0.2nm （ 130kHz ）である¹³⁾。使用に当たっては図4に示すようにセンサ出力にカットオフ 100Hz のローパスフィルタをかけた。テーブル変位を観察するためにはFFTアナライザ（小野測器）を用いた。FFTアナライザでは表示時間の設定によりさらに適当なローパスフィルタがかけられる。制御用のA/D変換器（コンテック）の入力範囲は $\pm 5\text{V}$ 、変換速度 $1\mu\text{s}$ 、分解能は16bitであることより1LSBは変位にして約 75pm に当たる。それに対してD/A変換器（コンテック）の出力範囲は $0\sim 10\text{V}$ 、変換速度 $6\mu\text{s}$ 、分解能は16bitであることより1LSBは 0.15mV に相当する。この電圧に対する圧電素子の変形量は約 7.5pm で、図5よりこのときのテーブル変位は計算上 0.25pm となる。したがってこの位置決めシステムはセンサ側の分解能で性能が制限され、圧電素子側には余裕がある。制御処理に使用したパソコンは日本電気製、PC9821、V233（CPU：ペンティアム、 233MHz ）で、A/DおよびD/A変換時間を含むPI制御プログラムの制御周期は約 $30\mu\text{s}$ である。

3. ピコメータ位置決め

位置決め実験に先立ち、システムの安定性を確認するために、目標変位を零にして静止状態を保たせるよう制御したときの変位センサの出力を測定した。図6はその結果で、図の中央付近から右側で制御を行っている。制御を行う前には全振幅 4mV （変位に換算して 2nm ）程度のノイズとかなりのドリフトが見られる。ノイズの原因として考えられるものは機械的振動、電気的ノイズなどであり、ドリフトの主な原因は温度変化、供給圧変化と考えられる。制御開始とともにノイズ幅は 1mV

Fig.4 Ultraprecision positioning system using aerostatic guideway as motion reduction mechanism

Fig.5 Characteristics of Active Inherent Restrictor

Fig.6 Stability of control system

Fig.7 Spectrum of noise under controlling

(変位で 0.5nm) 以下になり、ドリフトも見られない。このことから制御を行わないときに見られたノイズのかなりの部分がセンサに起因するものではないことが理解できる。図 7 には制御状態でのノイズの周波数特性を示す。この図より 50Hz までの周波数範囲には 0.1mV、変位換算で 50pm を越す成分がなく、高い安定性と位置決め分解能の期待できることが分かる。

ノイズレベルを確認した後にはまず位置決め動特性を調べるため、図 4 の制御システムによりテーブルを 5nm 移動させた後、約 150ms 静止させるようにステップ位置決め制御した。つまり、約 6Hz の制御周期での位置決めである。静止時間は制御回数で与えており、制御周期が 30 μ s であるのでここでは 5000 回としている。図 8 にはその結果を示す。立ち上がり時には若干のオーバーシュートが見られるものの各段差は明瞭に識別できる。静止状態でのノイズ幅は 1nm 程度であることよりさらに細かなステップ幅での制御も可能と考えられる。このときのスルーレートは約 4.5nm/ms であった。整定時間は明確には決められないが 30ms 以下と考えて良いであろう。したがって、図 8 よりもやや早い、10Hz 程度の動的な位置決め制御が可能であると思われる。

次にこの制御システムの位置決め分解能を解析するために 5nm から 0.1nm に至る種々のステップ幅で位置決めを行った。図 9 にはその結果を示す。ステップ幅を小さくするにつれて各ステップでの静止時間を長くして FFT での表示時間を長くすることで、ローパスフィルタのカットオフ周波数を各図に示すように下げている。その結果、ノイズの高周波数成分が除去され、波形が見やすくなっている。ただし、制御に使われるセンサからのフィードバック信号は最初に述べたとおり 100Hz の

Fig. 8 Step response of machine table of X-axis

ローパスフィルタのみを通過させている。位置決め指令は一方方向にそれぞれのステップ幅での位置決めとその位置での静止を 10 回繰り返させた後、逆方向に同じく 10 回の位置決め動作をさせるものである。図 8 でも見られたとおり 1nm 程度のノイズがあるが、適当なローパスフィルタを通して観測することで各ステップは明瞭に分離される。その結果、測定されたステップ幅はそれぞれの設定値に一致していることが分かる。ただし、図 9 の結果は X 軸テーブル上の参照面での変位を現しているに過ぎず、しかも制御ループ外に設置されたフィルタを通して観察していることより、制御されているテーブルそのものの挙動を現しているとは必ずしも言い難い¹⁴⁾が、位置決めシステムが位置決め指令に対して正しく応答していることは明らかである。

Fig. 9 Step positioning of X-table using aerostatic guideway with AIR

テーブルの実際の挙動についての考察は次節に譲ることとし、ここではこの位置決めシステムの分解能の限界を探るために、さらに小さなステップ幅での位置決めを試みる。図10にはステップ幅50pm および20pm での位置決めを行った結果を示す。ノイズ除去のためにさらにカットオフ周波数の低いローパスフィルタを用いるとともに、FFTにより得られた測定波形を計算機処理により拡大、表示している。図10より50pm のステップはかろうじて判別可能である。一方、20pm のステップは明瞭でなく、10 回分で200pm の移動を行っていることは分かるものの、位置決めできているとは言い難い。したがって、この位置決めシステムは50pm の分解能での制御が可能であると言える。しかしながら、先に述べたようにセンサ側の1LSB は約75pm であるので、1LSB を下回る分解能での制御処理を検討してみる。50pm 位置決めを行おうとすると各制御周期ごとのA/D変換器からパソコンへのデジタル入力値は"0" (0pm) または"1" (75pm) となる。図10での静止中の制御周期回数は120,000 回と多数であるので、入力値"0"と"1"の割合は約1:3 になっていると考えられ、この入力値に適当なゲインをかけることで制御周期ごとの制御電圧が算出される。その結果、パルス幅変調(PWM)と同等の効果が得られ、1LSB が0.25pm である制御側からは平均的に50pm の位置決めに対応する電圧が出力されることになる。ただし、位置決め分解能をさらに上げようとしたら、静止時間を短縮してより早い位置決めを行おうとすれば、パルス幅変調に伴うパルスの動作が影響して位置決め制御が困難になると思われる。したがって、テーブル変位50pm に対する圧電素子の変位は約1.5nm であり、圧電素子の分解能から考えて余裕のあるレベルであることより、センサ側の分解能をさらに上げることで、この制御システムを使って、より高い分解能での位置決めが可能であると期待できる。

4. 位置決め機能を使った微小段差の切削

前節においてはステップ位置決めにより位置決め分解能の限界を探ったが、その際に得られた位置決め波形はフィードバック用のセンサで測定されたものであり、必ずしもX軸テーブルそのものの挙動を現しているとは言い難い。そこで、図4に示すように、X軸テーブル右側のスピンドルにアルミ素材を取り付け、これをY軸に取り付けたダイヤモンド工具により正面旋削した。その際にX軸テーブルをX方向に送ると同時にZ方向つまり切り込み方向について能動自絞りによる位置決め動作を行わせ、切削面に転写されたテーブルの動きを観察することとした。切削に先立ち、位置決め動作時のテーブル挙動を確認するために、図4に示すようにあらかじめ平面に仕上げられた被削材面を測定面として、容量型変位計(ADE)により切削点での変位測定を行った。位置決め指令は、10nm のステップ幅でX軸テーブルを切り込み方向に5回位置決めしたにち反転させるものである。図11は測定結果であるが、(a)に示すように制御点に置かれたフィードバックセンサが当然の事ながら、10nm の段差を正しくとらえているのに対し、(b)に示す切削点センサがとらえた段差の幅は約14nm となっていることが分かる。両センサの校正値の誤差は高々10%程度であったので、このような差異が生じたのはX軸テーブルが位置決め動作に際してZ方向の並進運動だけでなく回転運動も行っているためと考えられる。また、(b)における切削点での変位は全体に右下が

Fig. 10 Picometer positioning using aerostatic guideway with AIR

りとなっており、約40sの間に10nm 近く動いている。これは温度ドリフトと思われ、制御点が切削点から離れていることの影響がここにも見られる。このように制御点でモニタされているテーブル挙動とテーブルの他点での挙動には若干の差異があることに注意しなければならない。

このことを考慮しつつX軸テーブルの挙動を転写させるため

Fig. 11 Cutting of micro step using positioning system

Fig. 12 Profile of turned surface of aluminum alloy under step positioning of X-table(Step depth is 10nm)

に、X軸テーブルを図11に示すようなステップ位置決めをZ方向に繰り返しながらX軸に送り動作をさせ、静止させたZ軸上のダイヤモンドバイトによりスピンドルにとりつけられたアルミ素材を正面削りした。旋削された面の断面曲線を図12に示す。全体に高さ約80nmの三角形の山が連続している（ここでは二山が示されている）。よく見ると、あらさに隠れているが各山には5段のステップが刻まれていることが判読できる。したがってステップ幅は約16nmとなり、あらかじめ切削面で測定されたステップ幅（図11(b)）とほぼ一致している。切削は左から右に向かって行われているが、図11をよく見ると、刃物がステップ分だけ切り込みなら加工が進む、各山の右斜面側ではステップの左端がわずかに切り込みすぎになっている。これは図8で見られたオーバシュートの影響と思われる。このような早い動きはローパスフィルタを通してみた図11では判読できないので、位置決めシステムの性能を議論するときには注意しなければならない。つまり、テーブルの実際の挙動は図11に示された変位測定結果よりも振動的である可能性があるが、おおまかには転写切削実験により、能動制御システムが実際にX軸テーブルを設定通りに位置決めしていることが仕上げ面の形状によっても確認された。

5. 結 言

能動自成絞りを組み込んだ空気静圧案内面を位置決め装置とし、パソコン制御の位置決めシステムを構成して行った実験において次のことが明らかとなった。

- (1) 能動自成絞りに組み込まれた圧電素子の変位が約30分の一に縮小されてテーブル変位として現れることが観測された。したがって、能動自成絞り付き空気静圧案内面は圧電素子の変位縮小機構となる。
- (2) 段差幅5nmのステップ位置決めの結果、位置決めシステムは少なくとも10Hz程度の動的応答が可能であると考えられる。
- (3) ほぼ静的な状態において種々の段差幅で行ったステップ位置決めの結果、本位置決めシステムの分解能の限界は50pmであることが確認された。
- (4) 段差幅10nmのステップ位置決めを行いながらの切削試験において、仕上げ面には階段状の切削痕が形成された。このように位置決め動作がほぼ正しく転写されていることから本位置決めシステムの動作が確認された。

謝 辞

本研究の実施にあたり、実験装置の製作にご協力いただいた(株)不二越に対し厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Nanoform 600, Catalogue of Rank Pneumo Inc., 1989.
- 2) Y. Kami, M. Yabuya and T. Shimizu: Research and development of an ultraprecision positioning system, *Nanotechnology*, **6** (1995) 127.
- 3) H. Mizumoto, M. Yabuya, T. Shimizu and Y. Kami: An angstrom-positioning system using a twist-roller friction drive, *Precision Engineering*, **17**, 1 (1995) 57.
- 4) H. Mizumoto, S. Arai, T. Shimizu and N. Ikawa: A twist-roller friction drive for nanometer positioning, *Annals of the CIRP*, **45**, 1 (1996) 501.
- 5) S. R. Patterson, E. B. Magrab: Design and Testing of a Fast Tool Servo for Diamond Turning, *Precision Engineering*, **7**, 3 (1985) 123.
- 6) 江田 弘：超精密工作機械の製作，工業調査会，初版（1993）61.
- 7) 野村武彦，金井 彰，宮下政和：静圧支持回転軸系の回転振れ自動補正機構，精密工学会誌，**53**, 7 (1987) 1104.
- 8) 渡辺一郎，青山尚之，下河辺 明：能動空気軸受，精密工学会誌，**54**, 2 (1988) 329.
- 9) H. Mizumoto, S. Arai, Y. Kami, K. Goto, T. Yamamoto and M. Kawamoto: Active inherent restrictor for air bearing spindles, *Precision Engineering*, **19**, 2/3 (1996) 141.
- 10) 水本 洋ほか：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，精密工学会誌，**63**, 11 (1997) 1543.
- 11) 十合晋一：気体軸受，共立出版，初版（1984）54.
- 12) H. Mizumoto, S. Inoue, S. Arai, Y. Kami and M. Yabuya: An Ultraprecision Machine Tool with Active Control Aerostatic Guideways for Improving Quality of Machined Surface, *Proc. of 9th ICPE* (1999) 165.
- 13) 光ファイバ式変位計“MTI-2000 ホトニクセンサ”，カタログ，ミクロン機器.
- 14) 下河辺 明，佐藤海二：変位センサと超精密位置決め，精密工学会誌，**61**, 12 (1995) 1661.