

超精密工作機械のための位置決め技術展望

水本 洋

鳥取大学大学院工学研究科・情報エレクトロニクス専攻知能情報工学コース

Research Outlook of Positioning Technology for Ultraprecision Machine Tools

Hiroshi MIZUMOTO

Department of Information and Knowledge Engineering, Faculty of Engineering

Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: mizu@ike.tottori-u.ac.jp

Abstract: Positioning technology supporting the development of the ultraprecision machine tool is summarized. For the basic understanding of positioning technology, dynamics of the positioning mechanism and tribology of the guideway are explained. Then, positioning system using hydrostatic lubrication widely used in the ultraprecision machine tools is described, where the positioning resolution of the system is 1nm (10^{-9} m). Finally, it is shown that the positioning with 10pm (10^{-11} m) resolution is realized by using the active control of the aerostatic guideway.

Key Words: Active control, Hydrostatic lubrication, Machine tool, Positioning, Tribology,

1. はじめに

古代エジプトの一枚の壁画がトライボロジ関係の書籍にしばしば引用される[1-3]. 図1に示すその壁画には多くの人々が巨大な石像を運んでいる様子が描かれているが、特に注目されるのは運ばれる石像の先端で通路に液体を注いでいる男の存在である。彼は石像の通過する直前に通路を潤滑して摩擦軽減を図っていると考えられ、「最初のトライボロジスト」と呼ばれることもある。この石像はやがて、神殿の祭壇に安置されて彼らの作業は一段落ついたことであろう。このように重量物を所定の経路に沿って移動させて所望の位置に

正しく停止させる“位置決め”は、古くて新しい技術的課題である。

工作機械においても、工具または工作物を搭載したテーブルをモータなどの駆動力を使って移動、位置決めすることがその基本機能である。工作機械には複数の位置決め制御軸が装備されており、これらを組み合わせることで工作物に所望の形状を創成することができ、このときの各制御軸に沿ったテーブル運動が創成される品物の形状に遺伝的に転写されることを「母性原理」と呼ぶ。近代工作機械の出発点であるウイルキンソンの中ぐり盤やモーズレイの旋盤[4]以来、このような母性原理によりものづくりを行う工作機械の運動精度と

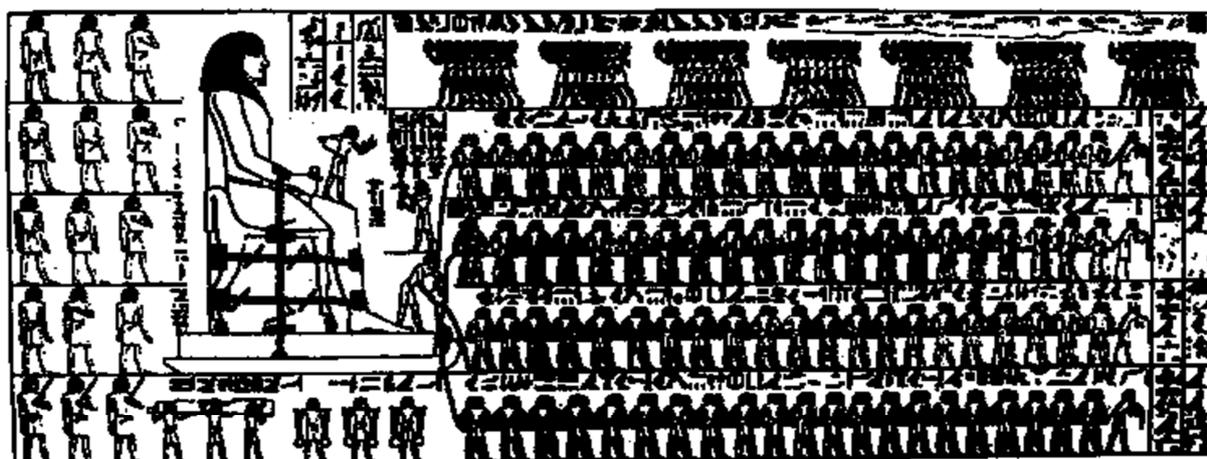


図1 巨像の運搬を示す古代エジプトの壁画（BC2000年頃）[1]

位置決め精度の改善には、位置決め機構の力学とトライボロジを理解することが必須である。

大学の卒業研究でのテーマとして、恩師の井川直哉先生（大阪大学名誉教授）から「工作機械の位置決め」を頂いてから40年を過ぎたが、この間ほぼ一貫してこのテーマに取り組めたことを感謝している。卒業研究、そして学位論文のための研究で行ったことは、案内機構のトライボロジを考慮しながら位置決め機構を力学モデルで表してその挙動を解析することであった[5, 6]。その結果、位置決め精度の向上には案内機構等での摩擦低減が必須であることが明らかとなり静圧案内機構を活用した超精密位置決めへの研究へと進んだ[7]。

今日ではナノメートルオーダーの位置決め分解能を持つ数値制御超精密工作機械が実用化され、10nmオーダーの形状精度と数nmの表面あらさでの超精密加工が産業レベルで行われている[8]。このような超精密工作機械を用いることで複雑な形状の品物を高精度で自動的に製作できるようになった。たとえば、非球面加工が容易となったことでレンズなどの光学素子の性能が飛躍的に向上し、デジタルカメラやDVDなどが広まった。半導体製造や大型平面ディスプレイ（FPD）製造などの分野でも、精度向上とコスト低下に超精密工作機械が大きな役割を果たしており[9]、我が国がこれらの分野で優位性を保つ原動力となっている。

今後、加工精度への要求はサブナノメートル領域に入ると考えられ、次世代超精密工作機械のためのピコメートル位置決め技術の開発が急務となっている。ピコメートル位置決め達成のためには新しい発想の位置決め技術の開発が必要であると考える、最後にはここ10年ほど取り組んでいるいくつかの技術提案を紹介する[10, 11]。

2. 位置決め機構の力学と案内面のトライボロジ

古代における重量物運搬での作業方法の選択目的はおもに摩擦を軽減することであったが、後述するように摩擦の軽減は位置決め精度の向上にも有効である。したがって精度が重視される工作機械の位置決め技術を理解するには案内面を始めとする各接触部での摩擦、摩耗、潤滑特性、いわゆるトライボロジの理解が必須となる。そこで工作機械の位置決め機構を力学モデルで表し、トライボロジ的視点から位置決め精度を向上させるために考慮すべき事柄を考えてみる。

一般的な工作機械のテーブル（質量 m ）は送りねじなどの運動変換機構を介してモータにより駆

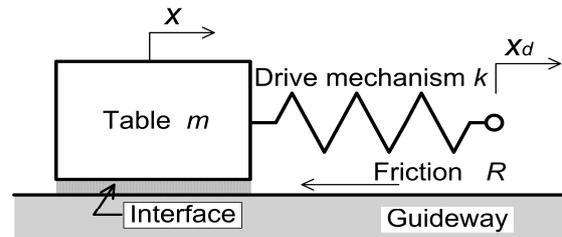


図2 位置決め機構の力学モデル

動、位置決めされる。運動変換機構を線形ばね（ばね定数 k ）で表すと位置決め機構は図2の1自由度ばね質量系でモデル化できる[5]。この力学モデルを使って位置決め指令 x_d に対するテーブルの挙動 x を解析する。テーブルは案内面により案内され、そのときの動摩擦係数を μ_d とすると位置決め挙動は次の運動方程式で与えられる。

$$\ddot{x} + \omega^2(x - x_d) = -\mu_d g \quad (1)$$

ただ $\omega = \sqrt{k/m}$ し、は送り駆動系の固有振動数、 g は重力加速度である。 μ_d が一定であれば、テーブルの位置決め挙動は式(1)により容易に解析できる。しかしながら実際の案内面の μ_d は一定ではなく、位置決め時にテーブルはスティックスリップ現象などの複雑な挙動を示す。

母性原理を重視する工作機械では支持剛性が高く、案内精度に優れた滑り案内面が伝統的に採用されてきたが、摩擦軽減を目的として使用される潤滑油のため、その摩擦特性は複雑である。図3はテーブルの滑り速度と摩擦係数の関係を示したもので、ストライベック曲線と呼ばれる[12]。正確には、横軸はゾンマーフェルト数（「潤滑油粘度×滑り速度÷テーブル負荷」の次元を持つパラメータ）とすべきであるが、ここでは簡単に速度の効果のみを考えてみる。この図の特徴的な点は、滑り速度が零または極めて遅いときの摩擦係数、いわゆる静止摩擦係数は0.2程度とかなり高いが、テーブルが滑り出すと急速に摩擦係数が低下し、いわゆる動摩擦係数は0.01程度に低下するという点である。このような摩擦特性を“垂下特性”と呼ぶ。もう少し詳しく見ると、静止時には案内面とテーブルとは真実接触部で固体接触して凝着していると考えられる[13]。したがって、滑り出し時にはこれらの接触部での凝着を破壊する必要があり、大きなせん断力、つまり静止摩擦力を必要とする。一旦テーブルが動き出すと、滑り速度とともに案内面の潤滑油に動圧が発生・増加してテーブルが持ち上がり、境界潤滑状態さらには混合潤滑状態となるにつれて固体接触面積が減少し摩擦力は急速に低下して極

小値を示す。さらに滑り速度が上昇すると完全な流体潤滑状態となり、潤滑油の粘性抵抗により滑り速度とともに摩擦力は増加する。

このように案内面の摩擦力が垂下特性を持つ場合、位置決め動作へ深刻な影響を与えるスティックスリップと呼ばれる現象が生じる。この現象はテーブルの間欠動作であり、次式で与えられるスリップ距離 δx よりも小さな間隔での位置決めが不可能となるため、位置決め精度の低下を招く。

$$\delta x = \frac{2(\mu_s - \mu_d)g}{\omega^2} \quad (2)$$

これは、制御機構における不感帯に相当する。以上は静止摩擦係数が一定値であるとした簡単な解析結果であるが、実際の静止摩擦係数は静止時間とともに増加することが知られている。つまり、静止時間とともに案内面に挟まれた潤滑油が次第に押し出される結果、静止摩擦係数が増加する。このことを考慮するとやや複雑な解析になるが、滑り速度の増加によるスリップ距離の減少など、実際に観測されるスティックスリップをより正確に説明できる[14, 15]。

図3では摩擦係数が滑り速度とともに変化することを示したが、詳細に観察すると滑り速度などの摩擦条件が一定であっても摩擦係数は時間的、空間的に変動することが知られている。すでに曾田は実験により静止摩擦係数の変動係数（標準偏差/平均値）が16%であると述べている[16]。筆者も焼入れ鋼どうしの動摩擦係数を実測したところ、その変動係数は1~5%であった[5, 6]。したがって、案内面での摩擦力は平均値の数%は変動していると考えられる。そこで上述のスティックスリップの解析において述べた不感帯と同様に考えると、摩擦力変動の標準偏差を σ_μ としてテーブル停止位置のばらつき、つまり位置決め標準偏差 σ_x は次式で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{\sigma_\mu g}{\omega^2} \quad (3)$$

この不感帯の範囲での位置決め制御は不可能であり、結局のところ式(3)はその位置決め機構の分解能を示していることになる。摩擦力変動の大きさは平均摩擦力の数%であるので、位置決め分解能を向上させるには平均摩擦力を下げればよい。したがって、前述のスティックスリップの回避だけでなく、位置決め分解能向上のためにも摩擦係数の低減が案内面開発の技術的課題となる。

以上をまとめると理想的な案内面の条件とは次のふたつとなる、

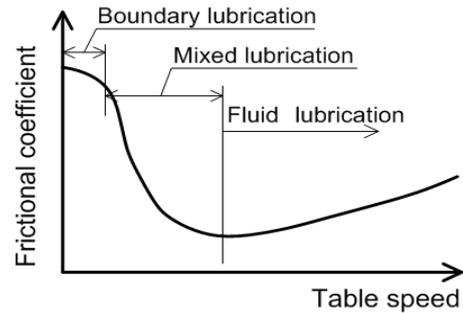


図3 ストライベック曲線

- 1) 母性原理を保証し案内精度を向上させるために支持剛性が無限大であること
- 2) 作業効率と位置決め精度向上のためにしゅう動摩擦が零であること

この相反する技術的要求に対して永年、技術者たちはテーブルと案内面との接触部（インターフェース）のトライボロジを熟考することで妥協的に解決する努力を行ってきた。その結果、加工精度が特に重視される超精密工作機械のために加圧潤滑流体を注ぎ込む「静圧案内面」、あるいは転動体を挟み込む「転がり案内面」が開発された。

3. 工作機械の自動化・高精度化と静圧潤滑

工作機械における位置決め技術の重要性は、作業者がテーブル移動量を目盛りで読み取りながら位置決めをしていたマニュアル機の時代から変わりはない。当時の技術水準では母性原理の観点から支持剛性の高い（数kN/ μ m）滑り案内面が採用されており、作業者の経験と勘により案内面の摩擦特性などを考慮して作業条件を調節することで、前述のスティックスリップなどを起こさぬようにして、その工作機械の位置決め性能を引き出して作業していた。20世紀半ばに数値制御工作機械が出現すると、作業者の技能を頼りとする位置決めは行えなくなり、自動制御システムによる位置決めを行う必要が生じた。この頃より「工作機械の位置決め」は独立した研究テーマとして意識されるようになったと思われる。

自動制御システムにとって厄介なのは、滑り案内面や運動変換機構などの接触部分で生じる摩擦力により、制御の障害となる不感帯が存在することである。したがって、制御精度を向上させるためには各部の摩擦力を極力抑えて不感帯を極小化する必要があった。そこで、多くの数値制御工作機械には送りねじとしてボールねじが、そして案内面として転がり案内面が採用されることとなっ

た[17]. これらの転がり機素では摩擦低減のために挿入される転動体の効果により静止摩擦が低くて垂下特性を持たないためスティックスリップを生じなくなる. しかしながら, 転動体の変形するために転がり案内面での支持剛性は滑り案内面よりも低く ($1 \text{ kN}/\mu\text{m}$ 以下) なることと, 転動体自体の寸法・形状誤差が影響することなどのために案内精度の低下が懸念される. つまり転がり機素は, 母性原理を保証するための運動の転写性のある程度犠牲にして数値制御の制御精度の向上を図って採用されたことになる.

一方この頃, 静圧軸受, 静圧案内面などの静圧潤滑技術が開発され, 工作機械に採用されるようになってきた[18, 19]. 滑り案内面が運動に伴って発生する動圧により潤滑膜を形成して負荷を支えているのに対して静圧案内面では, 図4に示すように外部に設置されたポンプあるいはコンプレッサなどであらかじめ圧力を加えられた潤滑流体(潤滑油あるいは空気など)が案内面のポケットに供給されるので, 滑り速度にかかわらず流体潤滑状態で負荷を支えることができる. その結果, 静圧案内面を採用した位置決め機構にはつぎのような長所がある.

- (i) 低滑り速度での摩擦係数が極めて低い(摩擦係数は0.001以下).
- (ii) 摩擦係数は垂下特性を示さず, スティックスリップを生じない.
- (iii) 摩擦力変動も小さく, 高い位置決め精度, 分解能が期待できる.
- (iv) 有限要素法などを用いた高精度の設計計算が可能で, 滑り案内面と同程度の高い支持剛性が得られる.
- (v) 潤滑膜の平均化作用により, 部品精度より一桁高い案内精度が実現できる.
- (vi) 案内面が潤滑流体で常に保護され, 摩耗を生じず経年変化が生じない.
- (vii) 能動制御により無限大の支持剛性や運動精度の補正, 微小位置決めなどの高機能化が図れる.

このような長所により静圧案内面は低摩擦と高剛性を兼ね備え, 長期間に渡って高い案内精度, 位置決め精度が維持できる理想的な案内面であり, 超精密工作機械にとって必須のものとなった. ただし, 静圧案内面ではポンプやコンプレッサなどの周辺機器や潤滑流体の供給および回収配管などが必要であり, しかも負荷容量, 剛性を得るには図4に示すように流体圧力を「絞り」で減圧しなければならない(定圧力差動方式[20]の場

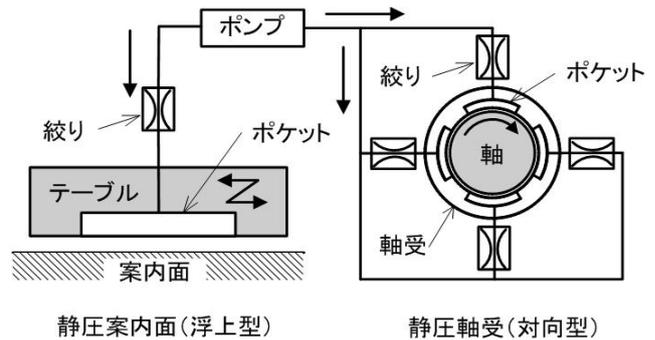


図4 静圧潤滑システム概念図[19]

合). したがって静圧案内面の設計においては多くの機器配置や設計パラメータ間のバランスの考慮が必要で, 結果としてコスト高となるなど静圧案内面の採用には実用上の制約も少なくない.

4. 超精密工作機械の位置決め技術

“精密”あるいは“超精密”という用語が意味するところは時代とともに, あるいは技術発展とともに変わってゆく. これに谷口の提唱による”ナノテクノロジー”という概念[21, 22]が加わり, 20世紀後半の技術指標となった. その頃は「ミクロン」すなわち $1 \mu\text{m}$ が精密の世界で, これを下まわる領域が超精密と呼ばれた. 21世紀に入ると $1 \mu\text{m}$ はもはや精密と呼べなくなってきており, $0.1 \mu\text{m}$ つまり 100nm が精密と超精密を隔てる標識とみなされるようになった. そのような流れの中での技術的発展経過を見ると, 「全静圧システム」を採用した”夢の工作機械”の提案[23]と LODTM (Large Optics Diamond Turning Machine, 大型光学素子加工用数値制御ダイヤモンド旋盤)の公表[24]が契機となって, 超精密工作機械はナノテクノロジーを支える重要な生産財へと成長したことがわかる.

「夢の工作機械」とは, 図5に示すように相対運動個所, つまり案内面, スピンドル等の回転軸受, そして送りねじなどのすべてを静圧潤滑しようとする工作機械で, 固体接触部を排除して摩擦特性という不安定材料を極力排除することで高い位置決め精度, そして加工精度をめざそうとするものであった. ただし, この理想を実現するには運動変換機構である送りねじの静圧化が技術的課題であった. 図6には静圧ねじを示すが, めねじのフランク面にポケットを設け, そのポケットに流体絞りを付属させることは容易ではない[25].

そこで筆者らは図7に示す構造の静圧ねじを

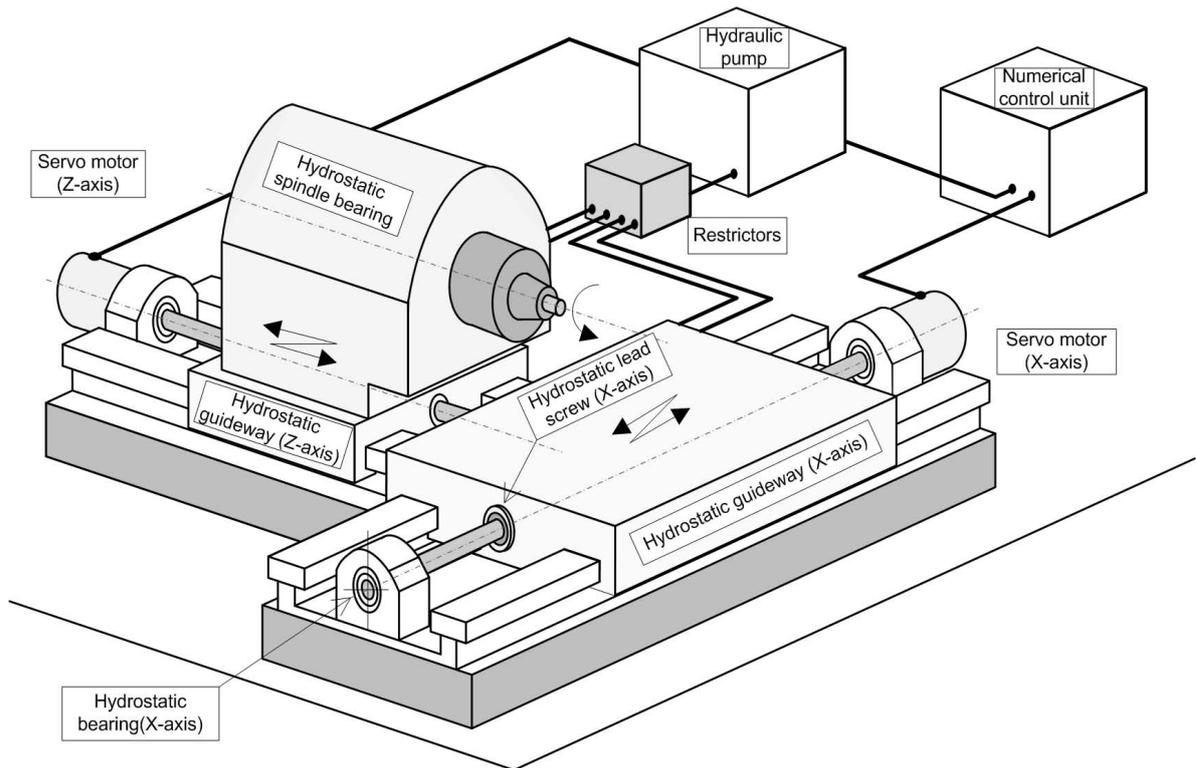


図5 全静圧潤滑システムを採用した理想の工作機械の概念図[7]

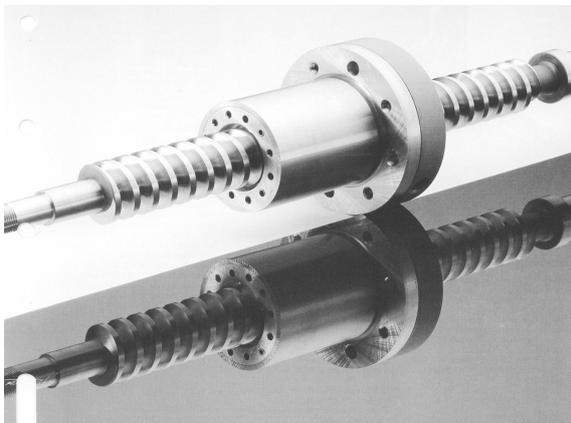


図6 静圧ねじ

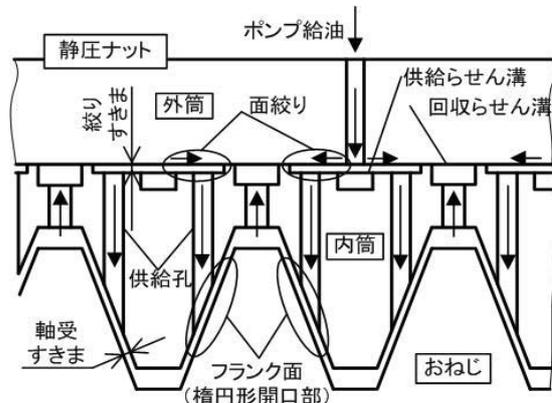


図7 静圧ねじの構造[26]

考案した[26]. この考案では、ねじフランク面に外周から穿たれた給油孔の開口部をポケットとして利用するとともに外周部に設けられた浅い溝部を流体絞りとして利用することで上述の技術的課題を解決している。

このような摩擦のない静圧ねじを用いることで駆動モータの回転運動を正確に縮小して直線運動に変換でき、位置決め分解能 1nm を問題なく達成できる。図8には静圧ねじを含めて全静圧潤滑

システムを採用した超精密工作機械を示す[7]. 加工できる最大寸法は直径約 300mm で位置決め分解能は標準的には 1 nm である、高分解能変位センサを用いると図9示すように 0.1nm ステップでの位置決めが可能である[27].

このように完全流体潤滑状態が維持できる静圧機素が位置決め性能向上に必須の要素と見なされるようになったが、一方では転がり摩擦に関して、微小な運動領域において非線形ばね特性が観



図8 全静圧潤滑システムを採用した超精密工作機械[7]

察された[28]。ばね特性があるということは、転がり摩擦を組み込んだ機構での運動の再現性が高いということである。1983年、この転がり摩擦を活用した摩擦駆動機構を送りねじの代わりに運動変換機構に採用した超精密工作機械、LODTMが米国カリフォルニア州のローレンスリバモア国立研究所で公開された。この超精密工作機械は大口径高精度光学素子の加工を目的として開発されたもので、加工物の最大寸法は直径約1600mm、高さ約500mmで、Point-to-Point制御による位置決め分解能は2nmと発表されている。LODTMは60年代から開発され、当初は軍事目的での使用を考慮して機密扱いであったが、その後、民生用への転用可能性から公開されたもので、公開当初から完成度は高かった。LODTMに続いて類似の位置決めシステムを持つ超精密工作機械が大学、企業の研究室で盛んに開発された。しかしながらこの摩擦駆動機構は送りねじのような運動縮小が行われないため、位置決め分解能の向上と負荷変化に対する計測・制御機構の特性調整が困難であることなどの理由から、あまり普及してはいない。

最近では送りねじなどの運動変換機構を用いずにリニアモータにより直接テーブルを駆動する超精密工作機械が開発されている。リニアモータを採用することで完全非接触が実現でき、静圧ねじと同等の位置決め分解能が得られている[29]。一方、リニアモータの高速性を活用して、回折格子あるいは液晶のバックライト用導光板の精密金型

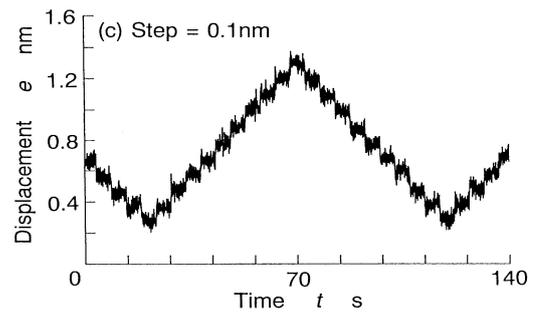


図9 静圧ねじを用いた位置決め機構による超精密位置決め[27]

を10m/minを越える切削速度でプレーナ加工する機種も開発されている[9]。

現在の標準的な超精密工作機械の位置決め機構では数百mmのストロークを持つ2~3軸の運動制御軸を持ち、位置決め分解能、あるいは数値制御の最小設定単位は1~10nmである。加工精度は位置決め分解能よりも2桁程度は落ちることより、およそ0.1μm、条件が良ければ50nm程度である。光学素子の加工では使用波長の10分の一($\lambda/10$)の形状精度が必要であることから、標準的な超精密工作機械では最新のブルーレイDVD(使用波長405nm)用のピックアップレンズを加工できる性能を持っていることになる[8]。

5. ピコメートル位置決めにむけて

今後は光学素子の性能向上をめざしてより短波長の紫外線、さらにはX線などが使用されることになると考えられ、そのようなX線光学素子に要求される形状精度はナノメートルオーダーと厳しくなることが予想される。したがって、そのような用途の光学素子を製造するための超精密工作機械には加工精度よりも一桁、二桁高い位置決め性能が求められることになり、必要な位置決め分解能はピコメートルオーダーに迫ると考えられる。そこで最後にはこのような課題に対応する次世代の位置決め技術について述べる。

この技術的課題を解決できる位置決め機構の一つは先の述べた静圧ねじを用いた完全静圧潤滑方式である。この方式ではテーブルは静圧案内面で案内されるため摩擦力は零であり、送りねじのフランクにも潤滑膜が形成されているため、テーブルの滑り速度が低い場合にはほぼ効率100%での運動変換が行われ、図9に示したように高い位置決め分解能が得られる。このように送りねじを用いる機構で高い位置決め分解能の得られる理由

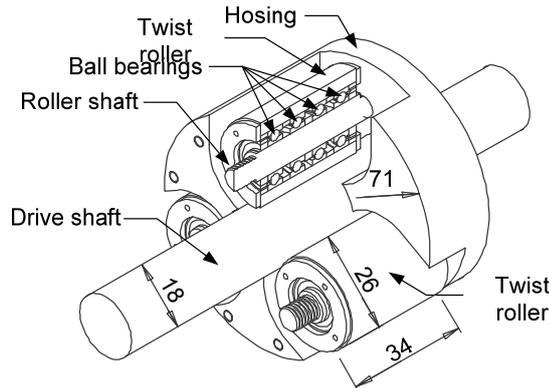


図10 ツイストローラ摩擦駆動機構[30]

は運動変換における縮小率が大きいことである。この点で摩擦駆動機構が位置決めに不利なことを上述したが、筆者らは摩擦駆動を用いる機構でありながら、運動縮小率を上げることで位置決め分解能の向上をめざしたツイストローラ摩擦駆動機構を考案した。この機構は図10に示すように送りねじと同様の形態であり、静圧案内面と組み合わせることでサブナノメートルの位置決め分解能が得られる[10, 30]。

これまでに述べてきた各位置決め装置を粗動機構とし、この粗動機構により案内・位置決めされるテーブルに短ストローク・高分解能の微動機構を搭載する「2モード位置決め機構」も考案されている。微動機構の駆動には圧電素子などの直動型アクチュエータが用いられ、弾性ヒンジ機構により微動テーブルを案内する。特に刃物台に組み込まれた微動機構はFTS(ファースト・ツール・サーボ)と呼ばれ、マイクロレンズアレイのような微細加工などに活用されている[31]。ただしこれらの微動機構では運動の縮小は行われず、アクチュエータの動作が直接、位置決め性能に現れるため位置決め分解能はサブナノメートル程度である。

そこで、筆者らはアクチュエータの動作を縮小できる微動機構として能動静圧案内面を開発した[11, 32]。能動静圧案内面では、流体絞りの開度を圧電素子により制御することで潤滑膜厚さ変化させてテーブルを変位させるが、このときのテーブル変位は圧電素子変形量の数十分の一となる。図11は長ストロークのツイストローラ摩擦駆動装置で駆動されるテーブルの案内にストロークは短いが高分解能の能動型静圧案内面を用いた粗微動2モード位置決め機構の微動モード制御システムである。変位センサで検出されたテーブル変位はパソコンにフィードバックされPI制御アルゴリ

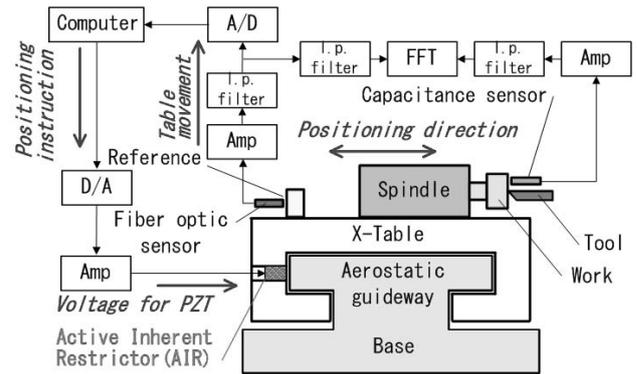


図11 能動型静圧案内面を用いたピコメートル位置決めシステム[32]

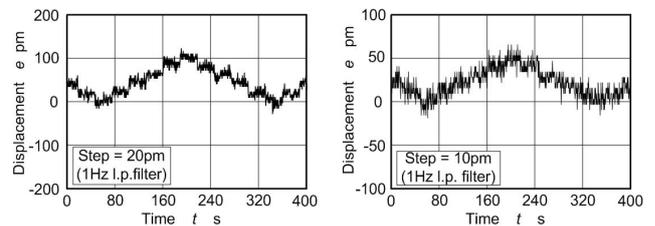


図12 ピコメートル位置決め[32]

ズムにより流体絞りへの印加電圧が計算される。パソコンから出力される印加電圧により圧電素子は流体絞りの開度を調節してテーブルを位置決める。この能動型静圧案内面を用いた微動モードでのストロークは高々 $1\mu\text{m}$ であるが、図12に示すように位置決め分解能は最高で 10pm に達することが報告されている。

5. おわりに

案内面などでのトライボロジーの理解を背景として超精密工作機械に採用されている位置決め技術を展望した。位置決め性能を向上させるには結局、摩擦の影響を極力排除することであり、静圧潤滑法を活用した完全非接触位置決めシステムの研究開発がめざされた。その結果、今日の超精密工作機械では標準的にナノメートルオーダの位置決め分解能を有するようになってきている。今後はさらに高い位置決め技術が求められ、すでに 10pm オーダでの位置決め制御は実現可能な技術である。今後は位置決め挙動の物理像、トライボロジーをよく理解することで技術的限界と可能性を見極め、次世代技術である「ピコメートル位置決め」の実用化への研究開発が行われることが期待される。

参考文献

- [1] Dowson, D., : History of Tribology, p.35, Longman, 1979.
(「トライボロジーの歴史」編集委員会訳：トライボロジーの歴史, p. 24, 工業調査会, 1998.)
- [2] J. ホーリング編 (松永正久訳) : トライボロジー, p. 5, 近代科学社, 1984.
- [3] 村木正芳 : トライボロジー, p. 1, 日刊工業新聞社, 2011.
- [4] Rolt, L.T.C. : A Short History of Machine Tool, Batsford 1965.
(磯田 浩訳: 工作機械の歴史, 平凡社, 1993.)
- [5] 井川直哉, 水本 洋 : 工作機械の位置決め精度の基礎研究 (第1報), 精密機械, 41 巻, 8 号, pp. 771-777, 1975.
- [6] 水本 洋, 松原十三生, 井川直哉 : 工作機械の位置決め精度の基礎研究 (第2報), 精密機械, 44 巻, 6 号, pp. 653-659, 1978.
- [7] 水本 洋 : 超精密工作機械の位置決め技術展望, 日本機械学会論文集, 76 巻, 769 号, pp.2167-2175, 2011.
- [8] 森 健治 : ナノアスファ A S P O 1 A, 不二越技報, 12 巻 B3, pp.1-6, 2007.
- [9] 阿閉克彦 : ナノグルーバ A M G 6 2 P, 不二越技報, 13 巻 B1, pp.1-7, 2007.
- [10] Mizumoto, H., Yabuya, M., Shimizu, T. and Kami, Y. : An angstrom-positioning system using a twist-roller friction drive, Precision Engineering, Vol.17, No.1, pp.57-62, 1995.
- [11] 水本 洋, 藪谷 誠, 上 芳啓, 有井士郎 : 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, 精密工学会誌, 67 巻 9 号, pp. 1524-1529, 2001.
- [12] 文献[3], p. 79.
- [13] 文献[3], p. 39.
- [14] 岡村健二郎, 松原十三生 : 工作機械しゅう動面のしゅう動特性の研究, 精密機械, 35 巻, 9 号, pp. 561-566, 1969.
- [15] 水本 洋, 井川直哉 : 工作機械におけるスティックスリップの発生限界に対する一考察, 精密機械, 42 巻, 8 号, pp. 797-799, 1976.
- [16] 曾田範宗 : 岩波新書「摩擦のお話」, p. 200, 岩波書店 1971.
- [17] 佐久間敬三, 斎藤勝政, 吉田嘉太郎, 鈴木裕 : 工作機械, p. 71, コロナ社 1992.
- [18] 稲崎一郎, 青山藤詞郎 : 静圧軸受, 工業調査会, 1990.
- [19] 水本 洋 : 静圧軸受のおもしろさ, 精密工学会誌, 73 巻, 5 号, pp. 537-540, 2011.
- [20] 文献[19], p. 17.
- [21] Taniguchi, N. : On the Basic Concept of 'Nano-Technology', Proceedings of the International Conference on Production Engineering, Part 2, pp. 18-23, 1974.
- [22] Taniguchi, N. : Nanotechnology, Oxford University Press, 1996.
- [23] Rumberger, J.H. and Wertwijn, G. : First Design Information on Hydrostatic Lead Screws, Machine Design, Vol. 40, p.218, 1968.
- [24] Donaldson, R.R. and Patterson, S.R., Design and Construction of a Large Vertical Axis Diamond Turning Machine, Proceedings of SPIE, Vol. 433, pp. 62-67, 1983.
- [25] 文献[17], p. 117.
- [26] 水本 洋, 松原十三生, 久保昌臣 : 静圧ねじの試作 (第1報), 精密機械, 48 巻, 10 号, pp. 1291-1296, 1982.
- [27] 水本 洋, 藪谷 誠, 清水龍人, 上 芳啓 : 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 巻 3 号, pp. 458-462, 1996.
- [28] 大塚次郎 : 次世代精密位置決め技術, pp. 32-38, フジ・テクノシステム, 2000.
- [29] 浅野浩伸 : 超精密工作機械におけるリニアモータ駆動方式と静圧ねじ方式の特性比較評価, 不二越技報, 21 巻 A2, pp.1-6, 2010.
- [30] Mizumoto, H., Ikawa, N., et al., A Twist-roller Friction Drive for Nonometer Positioning-Simplified Design Using Ball Bearings, Annuals of the CIRP, Vol.45/1, pp.501-504, 1996.
- [31] Okazaki, Y., Asano, and Goto, : Dual-servo mechanical stage for continuous positioning, International Journal of Japan Society for Precision Engineering, Vol.27 No.2, pp. 172-1723 1993.
- [32] Mizumoto, H., et al., : Picometer Positioning System using Aerostatic Guideway as Motion Reduction Mechanism, Proceedings of 16th American Society for Precision Engineering (ASPE), Vol.1, pp.119-122 2001.

(受理 平成 23 年 10 月 28 日)