

NACHI-BUSINESS

Machining news

Vol. 4A1
August/2004

マシニング事業

プレジジョン

■ 寄稿・論文・報文・解説

近未来技術展望

「超精密工作機械の位置決め技術について」

Technology in Positioning Mechanism
for Ultra-precision Machine Tools

〈キーワード〉 超精密位置決め・静圧送りねじ・リニアモーター
運動縮小・摩擦駆動・サブナノメートル
ピコ位置決め・ツイストローラ

鳥取大学 工学部 教授
水本 洋



要 旨

超精密数値制御工作機械はデジタルカメラやDVDなどに用いられる非球面レンズやその金型、さらには液晶用導光板金型などを製造する装置として注目を集めている。超精密工作機械には多くの先端技術が投入されており、その中心となるのが超精密位置決め技術である。

本稿では、超精密工作機械に採用されている直動型位置決め技術^{※1}について“摩擦”と“運動縮小”^{※2}をキーワードとして比較、検討している。その結果、高精度化に有利な「静圧送りねじ」方式と、高速化に有利な「リニアモーター」方式^{※3}の2方式が今後の超精密工作機械の発展を支えると結論づけている。

Abstract

Ultraprecision CNC machine tools are considered to be indispensable as an industrial equipment for manufacturing aspheric lenses used in digital cameras and DVDs, and light guide plates used in liquid crystal displays. Several innovative technologies are employed in the ultraprecision machine tools; especially fundamental and important technology is ultraprecision positioning.

In the present paper, the ultraprecision positioning technologies for the linear motion of ultraprecision machine tool tables are discussed from the viewpoint of friction and motion-reduction in the feed drive mechanism. It is concluded that the following two positioning technologies will support the development of the ultraprecision machine tools: the hydrostatic lead screw that is versatile and advantageous for high-positioning accuracy, and the linear motor that is advantageous for high feed rate.

1. 超精密位置決め技術の現状

(デジタルカメラ・DVDの非球面レンズ金型、液晶ディスプレイの導光板金型の製作に)

最近、超精密加工技術に支えられた高機能な日本製品が世界の市場で健闘しており、景気回復の牽引役となっている。たとえば、デジタルカメラやDVDには必須となった非球面レンズや、その金型、さらには液晶ディスプレイの性能向上に欠かせない導光板の金型などは、「非球面加工機」や「ナノグローバ」などと呼ばれる超精密数値制御工作機械により生産されている。

金型などの超精密加工には、形状精度 $0.1\mu\text{m}$ 程度、仕上げ面あらさ数 nm (Ra)程度の仕上げが要求され、このような加工を実現するための超精密工作機械には多くの先端技術が投入されている。その中心となるのが超精密位置決め技術である。

(超精密工作機械の位置決め)

市販されている超精密工作機械の直線運動軸(X、Y、Z軸)の最小設定単位はすでに 1nm に達しており、制御分解能はサブナノメートルの領域に入っている。伝統的な直動型位置決め技術は「送りねじ」方式であり、サーボモーターとボールねじ、あるいは静圧ねじの組み合わせにより、位置決めの高精度化が計られている。

(リニアモーター方式の精度が向上)

それに対して最近、高速化に有利でコンパクトな「リニアモーター」方式の精度向上が著しく、同期型コアレスモーターなどが超精密工作機械に採用されるようになった。送りねじ方式がモーターの運動をねじ機構により縮小してテーブル運動を与えているのに対して、リニアモーター方式ではモーター運動が縮小されずにそのままテーブル運動となっている。位置決め分解能を上げるには、運動縮小率の大きい方が有利であるが、運動縮小機構は一般に位置決め有害な摩擦の発生を伴う。つまり、運動縮小率の向上と摩擦の低減とは二律背反的な性格を持っている。そこで、位置決め技術の現状と発展について“運動縮小”と“摩擦”とをキーワードに考察する。

表1には超精密工作機械に採用されているおもな位置決めシステム(送り機構と案内機構の組み合わせ)の特徴・性能などを示す。ここではまず、表1の最初の3方式について概観する。

(「ボールねじ+転がり案内」は0.1 μ mが限界)

一番上に示した「ボールねじ+転がり案内」方式は現在、マシニングセンタをはじめとするNC工作機械で最も広く用いられているもので、ねじ機構による運動縮小効果が期待できる。NSKやTHKなどの専門メーカーが優れたボールねじやローラガイドなどを提供しているので、工作機械メーカーとしては低コストで高性能の位置決めシステムを構成でき、日本製工作機械の高い市場競争力を支えている方式である。

しかしながら通常的设计による位置決めシステムの分解能は0.1 μ m程度が限界である。その理由はボールねじに加えて、ころがり案内機構で発生する摩擦の大きさやその変動にある。案内機構の性能が最終的な工作機械の加工精度を左右していることから、超精密工作機械の案内面には表1の他の方式に見られるように「静圧案内」機構の採用が常識とされている。

表1.超精密工作機械に用いられる主な位置決めシステムの比較

方式	特徴・性能	摩擦	運動縮小率	市販の機種
ボールねじ + 転がり案内	マシニングセンタなどの汎用NC工作機械にも採用される方式で、コストパフォーマンスに優れる。超精密工作機械へ採用する場合には転がり要素の精度向上が課題。位置決め分解能は0.1 μ m程度(一部10nm)	中	1:10~ 1:20	ULGシリーズ(東芝機械) SNCシリーズ(西部電機) NANOWAVE(ナノ)
摩擦駆動 + 静圧案内	LODTM(ローレンスリバモア研究所(米)で開発された大型光学素子加工機)に採用された機構。構成部品の形状が単純なので高い部品精度が期待される。高速位置決めには有利だが、運動縮小が行なわれず、位置決め分解能は数nmが限界か。	軽	1:1	Nano-Centre(CPE)
ボールねじ + 静圧案内	超精密工作機械で最もよく採用されている形式で、コストパフォーマンスに優れ、多くの機種が市販されている。位置決め分解能は10nm~1nm程度。	軽	1:10~ 1:20	AHN60(豊田工機) Nanoform600(Precitech) Nanotech500FG(Moore) Microturn100(Hembrug) など
静圧ねじ + 静圧案内	全静圧、非接触の“夢の工作機械”として提案された組み合わせ。摩擦がなく、性能的には理想的ではあるが、高精度の静圧ねじの製作が課題となる。位置決め分解能1nm程度は問題なく、実験室レベルでは0.1nmを実現。	なし	1:10~ 1:20	ASP30(NACHI) ROBOnano(ファナック)
リニアモーター + 静圧案内	運動縮小は行なわれないが、摩擦部分がなく、高性能が期待される。コイルの冷却が課題だが、位置決め分解能1nm実現可能となったことで、最近、注目を浴びる組み合わせ。高速位置決めには有利で、設計自由度の面でも有利となる。	なし	1:1	Nanoform200(Precitech) Nanotech220(Moore) AHN05(豊田工機) AMG92P(NACHI)

（高精度な「静圧案内」方式）

静圧案内とは、テーブルと案内面の間に外部から高压潤滑油や圧縮空気などの加圧流体を送り込んで高压の潤滑膜を生成させてテーブルを支える機構で、摩擦が極めて低く、流体膜による平均化効果と相まって、高い案内精度が実現できる。それに対し東芝機械では、転がり案内に用いられる転がり要素の形状精度を高めることなどで転がり案内でも静圧案内に匹敵する性能の得られることを実証し、静圧案内に必須の油圧ポンプなどの補機を必要としないコストパフォーマンスに優れた超精密工作機械群を市場に投入している。

（「摩擦駆動+静圧案内」では10nm）

二番目の「^{※8}摩擦駆動+静圧案内」方式はおおよそ半世紀前に軍需・宇宙開発で使用される大型非球面光学素子の加工用にアメリカで開発され、現在の超精密工作機械の先駆けとなったNC旋盤（LODTM, Large Optics Diamond Turning Machine）に採用された。「摩擦駆動」とは、ちょうど鉄道車両の走行のように、レール上をモーター駆動されたローラを転がすことで、モーターの回転運動を直線運動に変換して推力を得る機構である。レールやローラは単純な形状なので高精度に仕上げることができ、しかも運動変換はスムーズでバックラッシュも生じないなどの理由から高い位置決め性能が期待された。この摩擦駆動に、低摩擦、高性能の静圧案内を組み合わせたLODTMの位置決めシステムは、当時としては画期的なものであり、類似の位置決めシステムが大学、企業の研究室で盛んに開発された。

しかしながら、この方式では運動縮小が行なわれないため、位置決め分解能の向上が困難で、実用的には10nmが限度であり、実験室レベルでも1nmの位置決め分解能実現は困難と思われる。しかも、運動縮小が行なわれないために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などの弱点も明らかになり、汎用性を求められる市販工作機械への採用は限定的なものとなった。

LODTMなどにより非球面光学素子を直接、創成加工できることが示されたことから、多くの超精密NC工作機械（いわゆる非球面加工機）が開発され、市場投入されることとなった。それらの工作機械には、表1の3番目に示す「ボールねじ+静圧案内」方式がよく採用されている。

（「ボールねじ+静圧案内」では1nm）

静圧案内面を用いることで低摩擦と高い案内性能が期待でき、専門メーカーから供給されるボールねじと組み合わせることでコストパフォーマンスに優れた超精密工作機械を実現できる。位置決め分解能も10nm程度は問題なく実現でき、1nmの最小分解能を公称する機種も少なくない。ただし、ボールねじ内部ではボールとねじ溝、そしてボール同士の個体接触が生じるため、運転に伴って摩擦とサブミクロンオーダーの横ぶれを生じるので、案内精度、したがって加工精度の要求を満たすことはできない。

以上で述べた3方式は従来技術と位置づけられるもので、技術的な完成度は高いが、性能的な限界も見えてきている。そこで次節以降では、今後の発展が期待できる表1に残された「高精度化に有利な静圧ねじ」と「高速化に有利なりニアモーター」の2方式について詳しく述べる。

2. 静圧ねじー高精度化への必須アイテムー

ねじ送り方式は運動縮小率が大きくとれるため、位置決め分解能向上に有利であるが、ねじフランク面で発生する摩擦の問題があった。ボールねじでは、ねじフランクに転がり要素を挿入することで摩擦の低減が計られているが、超精密分野では無視できない摩擦とそれに伴う振動の発生が避けられない。そこで非接触化により摩擦を完全になくす技術として「静圧ねじ」が開発された。

(NACHIは「静圧ねじ」を実用化)

静圧ねじは静圧案内機構をねじに応用したもので、おねじとめねじのフランク面間に設けた $10\mu\text{m}$ オーダのすきまに外部から高压流体を供給して潤滑膜を生成させ、おねじとめねじを非接触で対向させるものである。

したがって、ねじ機構によりモーターの回転運動を摩擦なしで極めて正確に直線運動に $1/10\sim 1/20$ 程度に縮小して変換することができるので、モーターのローターステータ間の分解能よりも1ケタ高い位置決め分解能が期待できる。

しかしながら単純な平面である案内面と違って、らせん形状のフランク面を持つ送りねじを静圧化することはあまりにも技術的課題が多く、市販レベルで採算をとるのは極めて難しかった。そのような課題を筆者とNACHIは協力して克服し、図1に示すような静圧ねじを製品化することができた。

(“完全非接触、摩擦なし”の“夢の工作機械”)

このような静圧ねじを活用して、運動変換機構と案内面での“完全非接触、摩擦なし”をめざしたのが表1の4番目に示した「静圧ねじ+静圧案内」方式である。この方式は30年ばかり前に“夢の工作機械”として提案されたもので、テーブルは流体膜によりベッドやおねじなどと完全に絶縁されるので位置決めの際に摩擦・摩擦をまったく生じない。したがって位置決めシステムとしては理想的な組合せである。図2にはこの方式を採用した3軸制御自由曲面加工機(ASP30;NACHI)を示す。

(位置決め分解能 0.1nm を達成)

位置決め分解能 1nm は問題なく達成でき、非接触で横ぶれを生じないので案内精度も高く、 $0.1\mu\text{m}$ 程度の加工精度が期待できる。さらにこの方式の実験機では図3に示すように位置決め分解能 0.1nm ステップでの位置決め動作も正確に行なえることが示されている。したがって、この「静圧ねじ+静圧案内」方式は、前節で述べた3方式では困難な加工精度の要求にも応えることができ、より一層の高精度化をめざす次世代の超精密工作機械を支える位置決め技術であると言える。



図1. 静圧ねじ (NACHIカタログより)



図2. 静圧ねじを用いた自由曲面加工機 ASP30 (NACHI)

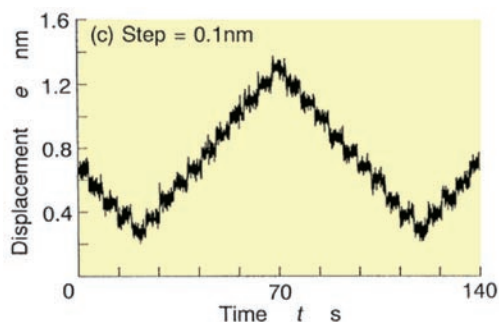


図3. 静圧ねじを用いた位置決め実験機によるサブナノメートル位置決め

3. リニアモーター — 高速化の切り札 —

超精密位置決め技術のもう一つの課題は「高速化」で、送り速度や切削速度の高速化により生産性の改善が期待できる。さらに最近では、液晶の導光板金型加工などに見られるような^{※9}シェーパ加工の必要性が増加しており、この点からも切削速度の高速化が望まれている。

ただし、汎用工作機械では分速100mを越える送り速度も珍しくはないが、超精密工作機械の分野ではようやく分速10mを越え始めたところである。この程度の送り速度であれば送りねじでも実現可能と思われるが、汎用機に比べて格段に高い精度を求められる超精密工作機械では、分速10mの送りをねじで行なった場合の発熱、振動は許容されるレベルを超えてしまうであろう。しかも今後、より一層の高速加工が要求されることを考えると、リニアモーターが超精密工作機械の分野でもにわかに注目され始めたのも納得できる。アメリカのPrecitech社が表1の最後に示す「リニアモーター+静圧案内」方式の超精密工作機械を製品化したのに続いて、国内でもNACHIや豊田工機などが製品を市場投入している。

（「リニアモーター+静圧案内面」で高速・高精度）

リニアモーターはすでに高速マシニングセンタなどで多用されているが、超精密工作機械の分野では高速性もさることながら、完全非接触で摩擦のないことと、設計の自由度が大きいことが採用の理由と思われる。つまり、サーボモーターなどの動力源とねじなどの運動変換機構を必要とする他の方式とは異なり、この方式ではリニアモーターから直接、電磁的に推力が得られるために変換機構が不要であるので、位置決めシステム全体をコンパクトにまとめることが可能である。

リニアモーターにも多くの形式があるが、推力むらなどの変動を極力さけたい超精密工作機械では、推力は劣るがコアレスモーターの採用が適当であろう。

ただし、コイルからの発熱と磁気漏れの対策を施す必要があり、これらの弱点を適当な制御回路と冷却を施すことで克服し、1nmオーダの位置決めが実現可能になった。最近では回折格子や液晶のバックライト用導光板の金型を^{※9}プレーナ加工することが増えてきており、このような点からも、今後は高速・高加減速運転に有利なリニアモーターの需要が増すと見込まれる。

（液晶導光板加工機にリニア採用）

以上、現状の位置決め方式の特徴を概観した。ところで、工作機械は複数の位置決め軸を持つことから、それぞれの軸の機能に応じて位置決め方式を使い分けることで、総合性能を高めた機種が登場している。たとえば図4の液晶導光板加工機として最近発表された機種（AMG71P;NACHI）は、プレーナ加工を行なうX軸にはリニアモーター方式（最大分速12m）を、工具の精密な位置決めを行なうY、Z軸には静圧ねじ方式（位置決め分解能1nm）を採用している（案内は3軸すべて静圧案内を採用）。今後はこの例に見られるように、使用目的を明確にして、それに最も適した位置決め方式を採用することで、高い精度と生産性を持ち、しかもコストパフォーマンスに優れた機種が増えるであろう。



図4. リニアモーターと静圧ねじを用いたナノグルーブ AMG92P (NACHI)

4. 今後の超精密位置決め技術 –ピコ位置決めに向かって–

今後の超精密位置決め技術について考えてみると、ナノメートルレベルの位置決め技術が実用化された現在、次の課題は「ピコメートル位置決め」である。今日のナノテクノロジーの発展によりマイクロメートルレベルの技術が安定し、一般化していったように、現在の先端技術であるナノテクノロジーのより安定した実用化をめざすには、現状の技術をより高いピコメートルレベルから考察する必要がある。

(サブナノメートルの位置決めシステム)

計測・制御技術に関してみると、テーブル位置計測に使用されるレーザー干渉計やレーザスケールの分解能が数十ピコメートルに達するなど、その分解能は上がり続けている。加工上の要求も考慮すると超精密工作機械の最小設定単位、位置決め分解能が本格的にサブナノメートルに入るのは時間の問題であろう。そのようなサブナノ位置決めシステムには非接触であるリニアモーター、あるいは静圧ねじのいずれかの方式が採用されると思われる。

(ピコ位置決め「ツイストローラ摩擦駆動機構」)

さらにその先のピコ位置決めに対応するために筆者はこれまでに、新しい摩擦駆動方式である「ツイストローラ摩擦駆動機構」、そして圧電素子を使った超精密位置決め機構である「能動静圧案内面」などを提案してきた。ツイストローラ摩擦駆動機構とは、図5に示すように駆動軸と従動軸をわずかな交差角で接触させ、駆動軸の回転運動を従動軸のらせん運動に変換するもので、従動軸のらせん運動の軸方向移動を位置決め使用する。機構学的にはねじ送りと同価であり、ある程度のころがり摩擦は生じるものの、ねじのつるまき角に相当する交差角を極端に小さくすることでリードを小さくでき、大きな運動縮小率が得られる(1/100~1/1000)。この機構を採用した位置決め実験装置で得られた位置決め分解能は、図6に示すように、50pm(0.05nm)に達している。ストロークは駆動軸の長さによるので、数百ミリメートルが可能である。

(能動静圧案内面で10pmのステップ送りが可能に)

能動静圧案内面とは、静圧案内面への流体供給回路に圧電素子で駆動される可変絞りを挿入したもので、圧電素子変位の数十分の一の変位を静圧支持されたテーブルに生じさせる機構である。圧電素子それ自身が0.1nm程度の変位分解能を持つと考えられ、この機構によって実現される摩擦のない運動縮小によって圧電素子の変位分解能の数十分の一、つまりピコメートルオーダーの分解能での位置決めが可能となる。次ページの図8には20pmおよび10pmのステップ位置決め結果を示す。今後はこれらの技術を改良することで、ピコメートルオーダーの位置決めを実現させる予定である。そのときに得られる知見は次世代の超精密工作機械で必須となるサブナノメートルの位置決め技術に貢献するものと期待している。

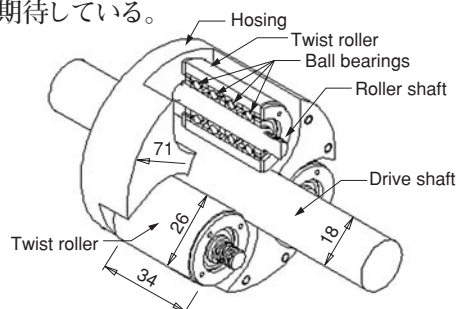


図5. ツイストローラ摩擦駆動装置

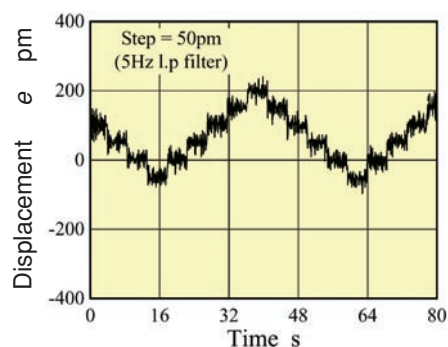


図6. ツイストローラ摩擦駆動装置を用いた実験機による位置決め

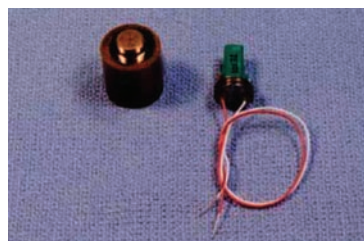


図7. 空気静圧案内面に組み込まれる能動自成絞りの写真

5. まとめ

今日に至る超精密工作機械の発展は、ここで示した多くの位置決め方式に支えられてきたといえる。工業製品である以上、コストパフォーマンスも十分に考慮する必要があるが、超精密工作機械に課せられる要求を満たす位置決め方式を性能面から考えるときには、「静圧ねじ+静圧案内」方式と「リニアモーター+静圧案内」方式を第一に挙げるべきであろう。しかもこの両方式は、今後予想される一層の高精度化、高速化などへの要求にも十分対応できるものと判断される。

最近では、制御軸ごとにその使用目的に応じて最も適した位置決め方式を備えることで、性能的にもコストパフォーマンスにも優れた超精密工作機械が現れており、超精密工作機械の発展の方向を示すものとして注目される。研究室レベルでは、新しい超精密位置決め技術の提案も多く行なわれており、それらの新技術が超精密工作機械に採用される日も遠くないと期待している。

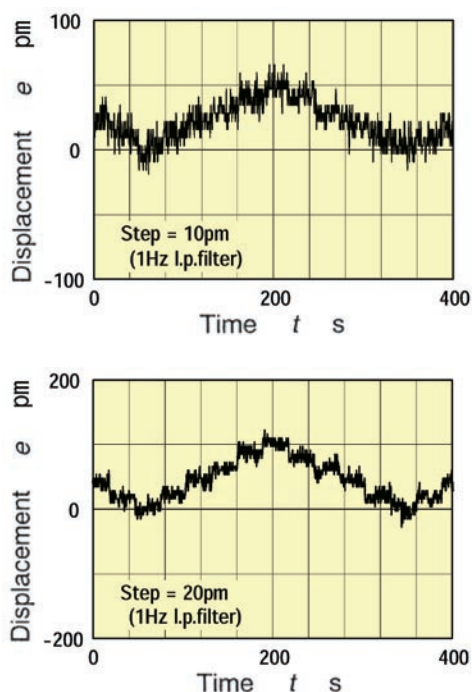


図8. 能動型静圧案内面を用いた実験機による位置決め

用語解説

※1 運動縮小

機構上、入力変位よりも出力変位が小さくなる状態で、例えば、てこ、歯車、ねじなどで実現される。

※2 静圧送りねじ

おねじとめねじの間に高圧潤滑油または圧縮空気を強制的に送り込み潤滑膜を形成する低摩擦、高性能の送りねじ。

※3 リニアモーター

電気入力に応じて直線運動を与えるアクチュエータ。簡素な構成と高速性能に特徴がある。

※4 非球面レンズ

球面以外の曲面を持った、収差の少ない高性能レンズ。

※5 導光板

バックライトの光を適当に反射させることで液晶ディスプレイ全面を均一に照明するための光学素子。

※6 サブナノメートル

1ナノメートルを下回る大きさを言い、普通は0.1nmのオーダーを指す。

※7 コアレスモーター

通常のモーターで用いられるコア（鉄心）を持たないモーターで、出力は落ちるが推力ムラが少ないなど滑らかな駆動が期待できる。

※8 摩擦駆動

駆動力を摩擦により従動側に伝える機構。機構は比較的簡単だが、滑りを生じる。

※9 シェーバ加工/プレーナ加工

被削材表面を非回転工具により削り取る加工で、平面加工や溝加工に適した加工法である。被削材が固定され、工具が直線運動する場合はシェーバ加工と呼ばれ、逆に静止した工具の下を被削材が直線運動する場合はプレーナ加工と呼ばれる。

※10 ピコメートル位置決め

ピコメートルとは 10^{-12} mのこと、つまり0.001nm。このような分解能での位置決めを指す。

※11 圧電素子

電圧をかけると変形する「圧電効果」を示す結晶でつくられた素子。アクチュエータとしてはチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）の結晶が良く用いられる。