

リニアエンコーダ

角度エンコーダ

ロータリエンコーダ

3Dタッチプローブ

表示カウンタ

## 送り軸の精度

年々新しい工作機械は効率とパワーの改良を示しており、増大する送り速度と加速度は着実に加工時間を短縮している。同時に、加工精度の向上により、加工しるのより少ない加工方法が切望されている。

一方、これらの発展は増加する限界精度を要求される部品の加工を可能とし、他方では複雑な製品組立を容易にしている。また、しばしば用いられる手作業での組立や仕上げを排除することができる。

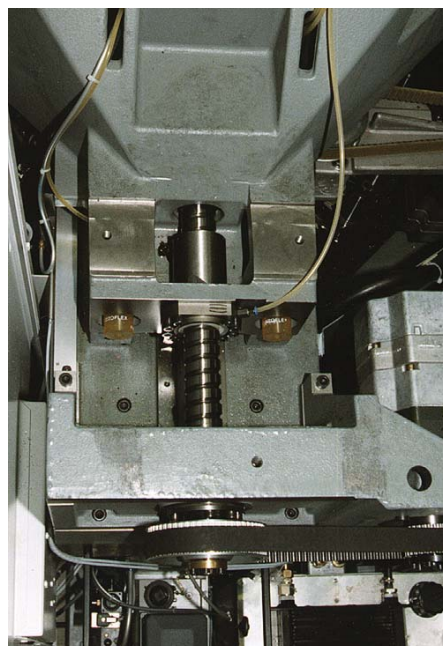
それに加え、より高精度な部品は結果として部品組み立て機能の改善をもたらしている。モータ動力伝動装置の寸法精度の向上は耐用年数を延ばし、また騒音の発生を減少させている。工作機械の全誤差量のうち、位置決め誤差は重要な要因であるため、以下にこれらの誤差について議論し、他のタイプの誤差と比較する。

近代の工作機械の精度は、増加しつつある新規および改良された検査と受け入れ試験により測定されている。何年前かまでは、純粋な幾何学的受け入れ試験が支配的であったが、今日の試験方法は、ISO/DIS 230-3に記述されている円弧補間および自由形状試験、温度試験のような動的試験が含まれている。また生産機械に対しては、受け入れおよび定期的検査時の能力試験が含まれている。

上記試験により、切削プロセス、幾何学的および熱に対する精度、静的および動的剛性、および、部品について実現可能な精度に対する送り軸位置決め応答性などの種々の影響をより詳細に解析することができる。このように、機械誤差はユーザーにとってますます明白になってきている。

作業変更頻度の増加とそれに伴うバッチサイズの減少を考慮すると、個々の製造段階での熱的あるいはシステムの誤差を、時間のかかる最適化により、減少させることはありえない。すなわち、最初の部品の加工精度がその重要性を増してきている。特に工作機械の熱的な誤差に、より重要な関心が寄せられている。以下に、特に送り軸については熱的誤差がとりわけ影響が大きいことを示す。

構造的な変形と異なり、送り軸の誤差は容易に利用可能な計測技術により、劇的に減少させることができる。



マシニングセンタの送り機構



## 送り駆動系の設計

ロータリエンコーダとボールねじによる位置計測の正確な解析を一般的な送り軸機構の考察からはじめる。

工作機械設計は機械ごとに大きく異なるが、送り駆動の構成は概ね標準化される(図1)。ほとんど全てのケースで、「循環式ボールねじがサーボモータの回転運動をリニアスライド運動に変換する方法」が定着している。そしてその軸受が軸方向の力の全て

を受けている。通常、サーボモータとボールねじは直結される。タイミングベルト駆動もコンパクトなデザインおよび最適な速度を実現するために広く用いられている。NC工作機械の位置計測にはリニアエンコーダあるいはロータリエンコーダを結合させた循環式ボールねじの使用が可能である。ロータリエンコーダとボールねじを経由する位置制御ループはサーボモータのみをそのループに含んでいる(図1、破線)。言い換えれば、サーボモータのロータのみが制御されているので、実際のスライドの位置を制御していない。スライドの位置の推定を可能とするには、サーボモータとスライドの間の機械系が既知で、とりわけ、機械伝達特性の再現性が必要である。他方、リニアエンコーダによる位置制御ループは機械送り駆動系全体をそのループに含んでいる。スライドに装着されたリニアエンコーダは機械伝達機構の誤差を検出し、この誤差は機械制御装置により補正される。

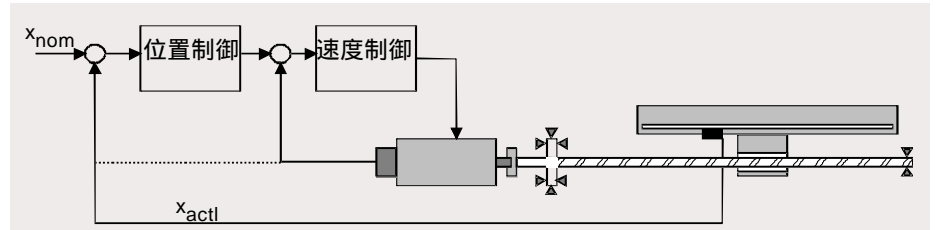


図1 スライドにリニアエンコーダを装備し、モータにロータリエンコーダを装備したNC工作機械の典型的な駆動システム。ロータリエンコーダとボールねじを用いた位置制御と異なり、リニアエンコーダを用いた場合には送り駆動機構が制御ループに含まれる。

## 異なる技術用語

上記の二つの位置制御を区別するために異なった技術用語が使用されている。ドイツ語およびいくつかの英語圏では“直接および間接計測”のように、一般にやや不正確な表現をしている。しかし、これらの用語の選択基準はやや不十分である。すなわち厳密に言えばどちらの方式も直接である。一方の方式はリニアスケールの格子刻線を計測基準としている。他方はボールねじピッチを計測基準としており、ロータリエンコーダは単にボールねじピッチ内の補間の手助けとしての働きをしている。ここで、日本の“セミクロズドループとクロズドループ”の概念は、実際の機械構成をより適切に表しているの、ふさわしい表現と思われる。

## デジタル駆動軸の傾向

駆動技術におけるデジタル駆動軸化の流れの結果、多くの新しいサーボモータはロータリエンコーダを装着している。これらのエンコーダは、原則的には位置制御用の送りねじとセットでその役割を果たすことができる。このような駆動構成では、リニアエンコーダを追加すべきか、あるいは単に、既にあるモータエンコーダとの組み合わせによるボールねじ駆動を使用すべきかの決定をしなければならない。

ロータリエンコーダとボールねじ構成を用いた位置計測に関しては、以下に議論されている諸問題を考慮すべきであること忘れてはならない。機械のあるアプリケーションで、その機械のオーナーが、精度が十分でないことがわかった場合、問題点を解決するには、“経済的な”機械であったはずのその機械のコストを急速に高めてしまうことになる。

## 運動誤差

送りねじとロータリエンコーダを用いた位置計測に直接起因する運動誤差はボールねじピッチ、駆動要素の遊び、およびいわゆるピッチロスに帰着する。ボールねじピッチはボールねじとロータリエンコーダのシステムにおける長さ計測の基準として用いられるので、ボールねじのピッチ誤差は直接計測結果に影響を及ぼす。送り伝達機構要素の遊びはバックラッシュの原因となり、ピッチロス<sup>1)</sup>は2点与圧によるボールねじ駆動の位置決め時のボールのシフトに起因し、1~10 $\mu$ mオーダの反転誤差を発生する可能性がある。

## 誤差補正

ほとんどの制御では上記のピッチ誤差や反転誤差を補正することができる。しかし、その補正値を決定するには、レーザ干渉計やグリッドエンコーダのような比較測定装置による入念な計測が必要である。加えて、反転誤差は長期間に渡っては不安定であるので、定期的に再調整されねばならない(図2)。

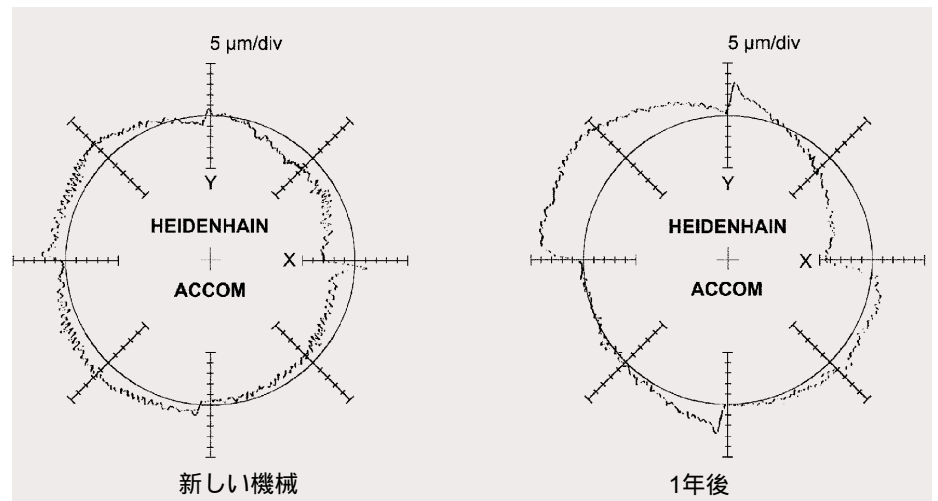


図2 リニアエンコーダを装備しないマシニングセンタの円運動試験の初期データと1年後のデータ。X軸の反転誤差が大きく増加している。

## 駆動機構の歪

送り駆動機構を变形させる力はボールねじとロータリエンコーダにより計測された位置に対し実際のスライド位置にシフト量を発生させる。これらの力はスライドの加速による慣性力、切削力、そしてガイド機構の摩擦である。図1に示された送り駆動機構の平均的な剛性は100~200N/μm（ボールナットと固定軸受間が0.5m、ボールねじ径40mmの場合）である。

## 加速力

代表的なスライド質量500kgで中程度の加速度4m/s<sup>2</sup>の場合、変形量は10~20μmとなり、これはロータリエンコーダとボールねじのシステムでは認識することができない。今日の工業界は非常に高加速度な領域に向かっており、変形量が大きく増加する結果となっている。

## 切削力

切削力は実際kN領域にあるので、これが送り駆動系に影響を与えるばかりでなく、ワークピースと工具間にある全ての機械構造に影響を与える。通常、送り駆動系の変形量は全機械変形量のうちのわずかな部分である。リニアエンコーダはこの全体変形量のうちほんのわずかな部分を認識し修正することができる。厳しい寸法の部品は、通常、送り駆動系の小さな変形に対応した低い送り速度で仕上げ加工される。

## 摩擦力

ガイド機構の摩擦力はローラガイドの場合、重量の1%~2%、すべりガイドの場合、重量の3%~12%である<sup>2)</sup>。したがって、5000Nの重量に対して、送り駆動系の変形量はわずか0.25~6μmである。

## 工作機械検査を目的とした円運動試験

立型マシニングセンタの円弧補間試験における加速度と速度に依存する典型的な誤差を図3に示す。位置制御がロータリエンコーダとボールねじで構成されている場合、円軌跡は速い速度で大きく理想軌跡からずれている。これに対し、同じマシニングセンタにリニアエンコーダを装着した場合は輪郭精度が格段に向上しているのがわかる。

## ボールねじの膨張による位置決め誤差

ボールねじの熱膨張による位置決め誤差はロータリエンコーダとボールねじによる位置計測に大きな問題を提起する。これは、ボールねじ駆動は2つの機能を満たさねばならないことに要因がある。すなわち、一方ではサーボモータの回転を直線運動に変換するために、可能な限り剛性を高める必要があり、また他方では高精度な計測基準を満たさねばならない。したがって、剛性と熱膨張はボールナットと固定軸受の与圧に依存するので、この2つの機能は、互いに妥協を強いられることになる。軸方向剛性と摩擦力はおおよそ与圧に比例する。

## ボールナットの摩擦

ボールねじ送り駆動系のもっとも大きな摩擦はボールナット部で発生する。これは循環ボールナットの複雑な運動に起因している。一見するとボールは単に回転しているように見えるが、実際は摩擦の多くの部分を占めている。圧縮接触領域における相対運動によるマイクロスリップの他に、もっとも大きな影響は運動の窮屈な状態によるマクロスリップがある。ボールは完全にはレースに支えられず、溝の中を転がるテニスボールのようにぐらつく。結果として、時々ボールのスリップを伴う、圧縮と押し出しの連続となる。ボール同士を分けるリテーナが無い場合大きな表面圧により摩擦が悪化する。アンギュラーコンタクトボール軸受では、接触部分がボール回転軸に対して直角でなくある接触角をもつので、回転摩擦が発生する。このように、各ボールは接触直径に沿って回転する。最近の研究は、各ボールはねじピッチによりもたらされる付加的なスリップ成分のみにより溝内で運動することが示されている<sup>3)</sup>。

再循環システムはボールねじにとって特に問題の部分である。再循環チャンネルの全ての入り口で、全ての出口と同様に、ボールの運動が完全に变化する。すなわち早送り時の代表的な回転数は8000min<sup>-1</sup>となり、ボール回転エネルギーを持つが、そのボールの回転を、入口、出口でそれぞれスタート、ストップせねばならない。与圧部分と対照的に再循環部分ではボールはストレスを受けない。エネルギーの作用によりボールは再循環チャンネルに集められる。

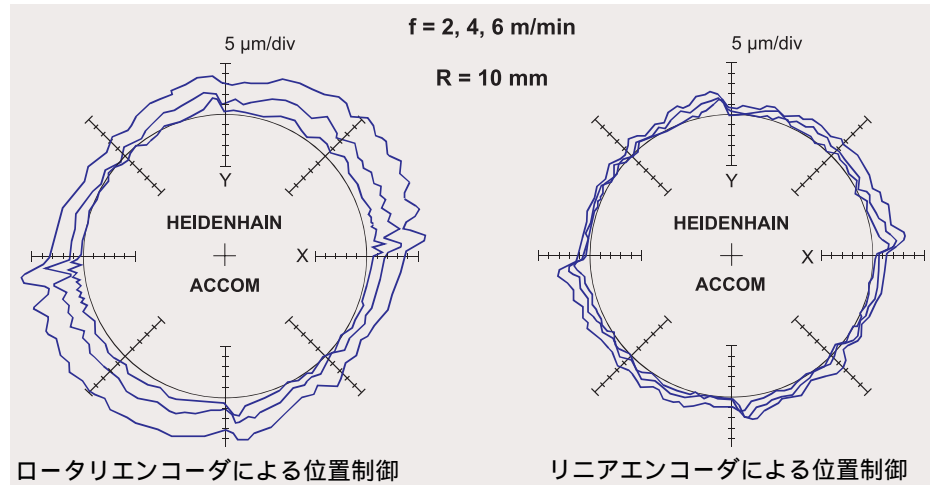
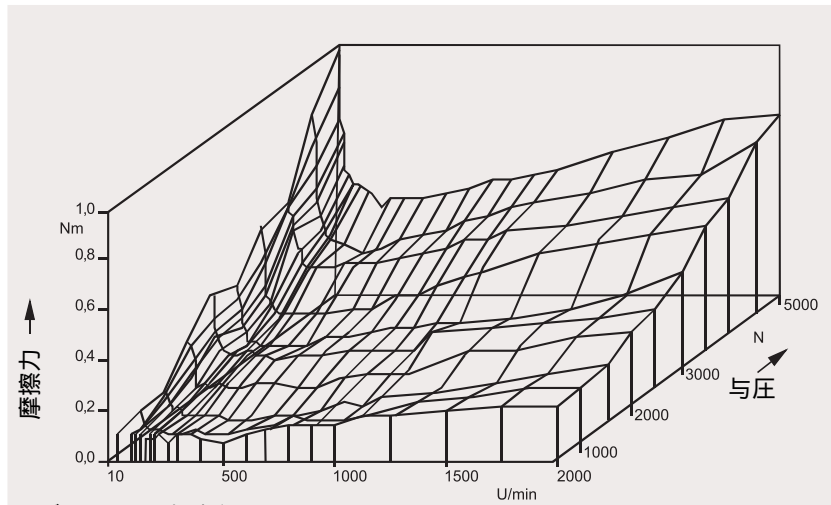
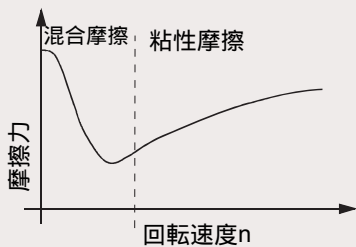


図3 リニアエンコーダによりレトロフィットされたマシニングセンタの円運動試験。ロータリエンコーダとボールねじの位置制御では、高速送りで、計測された円が理想軌跡から大きくずれている。リニアエンコーダ付きでは、輪郭精度は非常に良好である。



ボールねじ回転速度 →

ねじ軸外径	40.00mm
リード	10.00mm
アキシャル荷重	0.00kN
接触角	45.00°
ボール径	6.35mm
内部ボール循環、ワイパー無し	



ストライベック曲線

### ボールナットに発生する摩擦熱

典型的な3kNの与圧をかけ、ワイパーを外した場合、無負荷トルクあるいは摩擦力は0.5Nm～1Nmである。これは、2000min<sup>-1</sup>のボールねじ回転で早送りする場合、ボールナット部におよそ100W～200Wの摩擦熱が発生することを意味する。

### 予想される他の発熱

早送り速度を上げるためには、循環式ボールねじのピッチあるいは回転速度のいずれかを大きくしなければならない。最近の5年間に循環式ボールねじの最大許容速度は2倍になった。絶えず増加する高加速度化のために、与圧とその結果としてのボールナットの摩擦は減少させることはできない。それゆえ、循環式ボールねじ駆動は以前よりかなり多くの熱を発生しており、これからもより多くの熱を発生することになるだろう。

### ISO230-3による位置決め精度の測定

送り軸の位置決め応答におけるこの摩擦熱の影響は、新しい国際標準であるISO/DIS 230-3に準拠して行われたときに明確になる。この標準は、外部および内部熱源の結果として旋盤およびマシニングセンターの熱変位について、同一基準による測定を制定するという提案を含んでいる(図5)。

図4 2点与圧ボールねじの摩擦力(4)。ストライベック(Stribeck)特性が明確に見られる。

ボールをねじ溝に再投入するのに、精巧な措置をとらないと、再循環チャンネルの端でボールが混み合って、ボールねじ駆動でよく知られている詰りを起こす。直径40mm、ピッチ10mmの研磨された精密再循環ボールねじの摩擦力が種々の与圧と回転速度に対して、ゴルツ<sup>4)</sup>により測定されている(図4)。摩擦力のストライベック(Stribeck)特性が明確に認識できる。ボールねじ駆動の遅い速度で、固体摩擦と混合摩擦が高い割合であることが確認できる。粘性摩擦は高速で支配的である。この典型的なボールねじを用いた加工速度は摩擦力が最小になる速度よりはるかに低いことは注目される。それに対して、早送り速度は摩擦力が最小になる速度よりはるかに高い。したがって、このボールねじが最高効率となる送り速度はほとんど無いことになる。摩擦力はボールナットの軸方向加重にわずかに依存する<sup>4)</sup>。

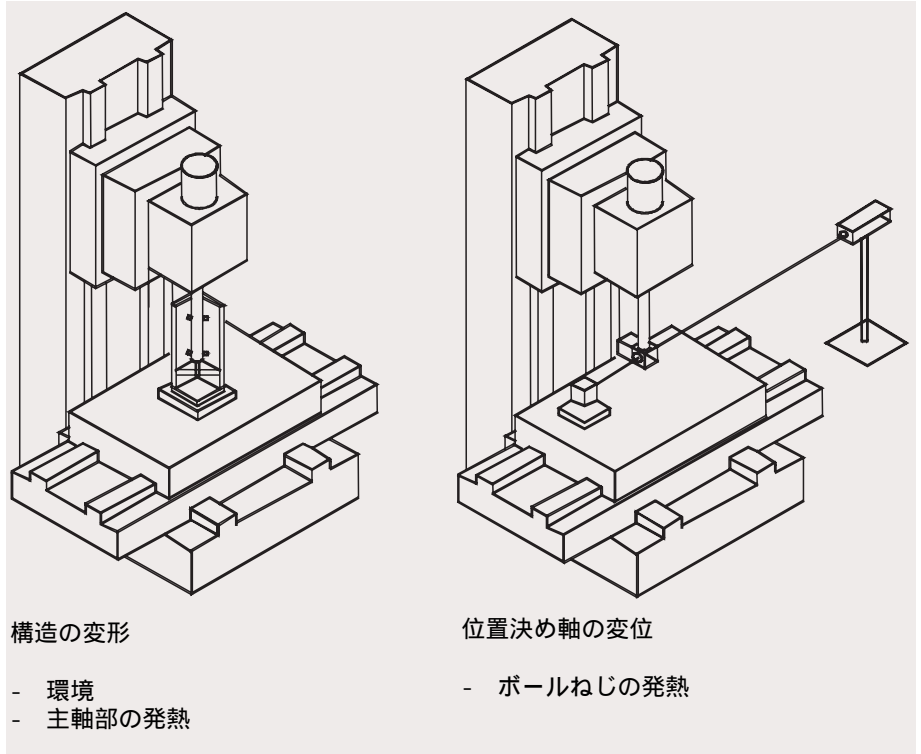


図5 ISO/DIS 230-3に準拠したマシニングセンターの熱変位計測

環境条件あるいは主軸駆動の発生熱の変化による機械構造の熱変形は工具ホルダーに装着された円筒を計測する5つのプローブにより記録される。この方法は5自由度の計測が可能である。送り軸の試験をするには、可能な限り送りストローク一杯の2点間を繰り返し位置決めすることが提案されている。このときの送り速度は合意によって早送りの何パーセントかを定める。位置の変化は初期値を基準として記録される。ここで、試験は明らかに飽和現象が観測されるまで実行される。レーザ干渉計より簡単な測定装置は、あたかもダイヤルゲージのように軸の試験に使用することができる。そのため、これらの試験をどのようなワークショップでも妥当な費用で行うことを可能としている。

### 位置決め精度におけるボールねじ軸受の影響

ボールねじが自由に伸びるかどうかにより、異なったタイプの振る舞いが予想される。循環式ボールねじのためのいろいろなタイプの軸受が図6に描かれている。

#### 固定端/自由端軸受

固定端/自由端軸受の場合、ボールねじはその温度の状況に応じて固定軸受を基準にして自由に伸びることができる。このような送り軸の熱変位の零点は固定軸受にあるので、もし、ボールナットが固定軸上であれば理論的には熱変位はないことになるが、他の全ての位置はボールねじの熱膨張により影響を受けることになる。

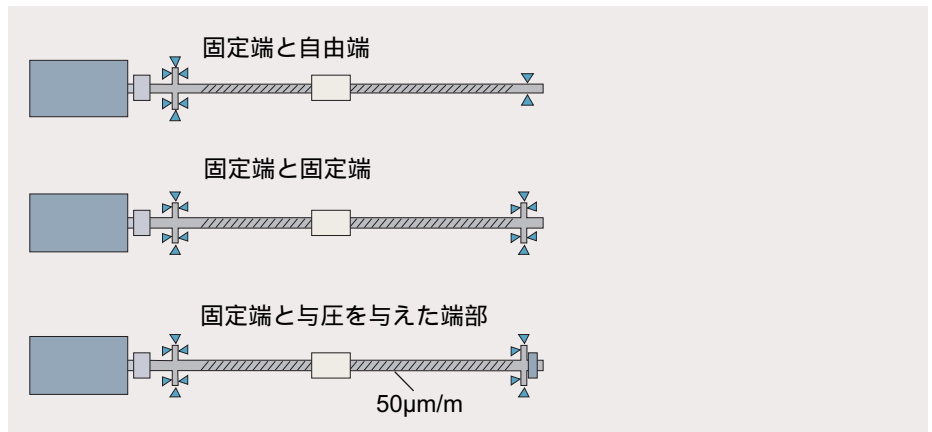


図6 送り軸の循環式ボールねじに使用される各種軸受

図7はリニアエンコーダを装備した立型マシニングセンタ（1998年製）のリニアエンコーダによる制御およびロータリエンコーダとボールねじによる制御のISO/DIS 230-3に基づく位置決め試験結果を示している。機械は長さ1mのX軸の3点について、10m/minの送り速度で合計100回の位置決めされている。計測値の取り込み時間を考慮すると、試験中の平均送り速度はおよそ4m/minである。標準条件として推奨されているストローク両端の位置に加えて、ストロークの中央点が第3の位置として測定されている。

図7は位置の値をそれぞれの初期値に対して示している。最初にボールねじ/ロータリエンコーダシステムが位置制御に使用され、次に同一条件の下にリニアエンコーダが使用された。比較システムにはハイデンハインのVM101を用いた。

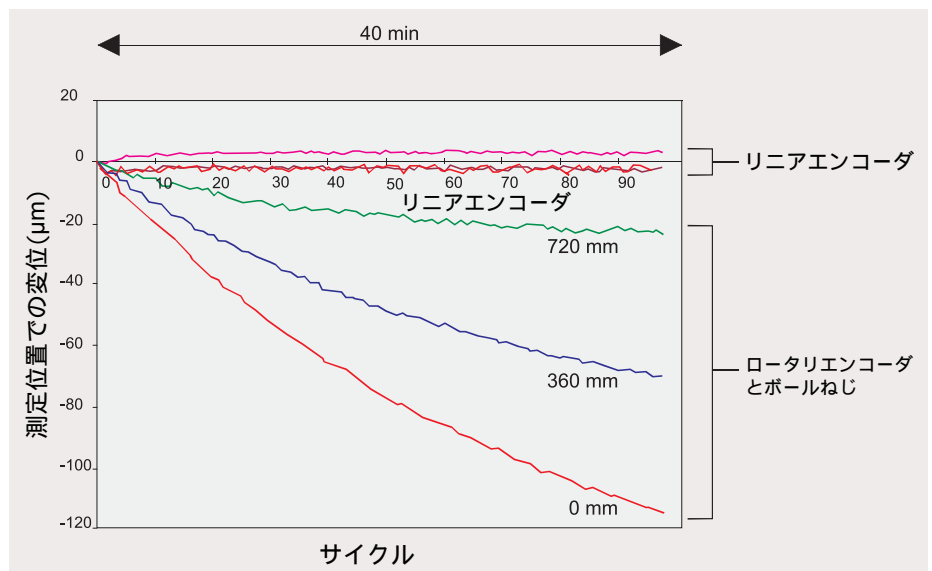


図7 固定端/自由端軸受のボールねじを装備したマシニングセンタを多数回往復させ、ISO/DIS 230-3に準拠して計測した3点のドリフト値。ロータリエンコーダとボールねじによる位置計測では、ボールねじの熱膨張により大きな位置のドリフトが見られる。

## リニアエンコーダによるドリフトの無い位置計測値

位置決め計測精度は、とりわけ、最初のわずかな繰り返しの回数に直接依存するが、リニアエンコーダを用いてレトロフィットされた計測ではドリフトは見られない。

## バッチ生産

この試験の実用性を示すために実際の生産条件で、小さなバッチのアルミワークピースを同じ機械で加工した。8個の70mm×70mmワークピースを立型マシンングセンタにセットし、4個のポケットと2個の四分円を4本の工具を用いて、Z方向切り込み1mmで加工した(図8)。

6分間の加工後、4個の部品は交換せず、Z軸の切込みを1mm増やし加工を続けた。ボールねじの熱膨張の結果として、全てのワークピースはその左側に段差パターンを見せている。このパターンは固定軸受から最も遠い位置のワークピースに顕著である。ワークピースの右側は平坦である。これはプラスX方向シフトにより、前の加工段差の部分も今回の加工により除去されるからである。同じ原理により、Y軸にもX軸と同様な現象が観測される。しかし、Y軸の移動量は少ないので、段差パターンは非常に小さい。X方向の段差パターンの比較計測結果は1時間弱の熱膨張時定数でおよそ90 $\mu$ mのドリフトがあることを示している。(図9)

もし、既に加工されたワークに厳しい精度で追加加工する場合、機械データは常に検査され、修正されねばならない。機械は1時間後に熱的平衡が得られるが、加工に中断があると逆方向にドリフトすることになる。また、加工プログラムとそれに伴って平均送り速度が変わると、ボールねじの熱的平衡を取り戻すには再びおよそ1時間を必要とする。

## 両端固定軸受

両端固定タイプの軸受の場合状況はより複雑になる。理想的に剛体の軸受はボールねじの膨張をその両端で防ぐが、これは相当な力を必要とする。40mm直径のボールねじの膨張を防ぐには、温度1 上昇当り2.6kNを加える必要がある。アンギュラーコンタクトボール軸受は急速な温度上昇では無理を強いられる。軸受座付の固定軸受の剛性は、現実の条件では800N/ $\mu$ mの領域にある。このことはボールねじの温度が上昇するに従い、軸受が大きくひずむことを意味し、ボールねじの両端は元の位置を保てない。

図7と同様な試験を両端固定の軸受を装備した立型マシンングセンタ(1998年製)について行った。

試験した長さ1mの送り軸は力学的に非常に高剛性に設計されており、ボールねじ両端の軸受は同じ軸受で機械の鋳造フレームに直接加工された座に組み込まれている。

図10の実験結果は理論的に予想されるカーブを示している。ボールねじ両端は元の位置を維持できず、共に熱によって生じた力の方向に20~30 $\mu$ mだけ動いている。ボールねじの全体の伸びは図7に示された伸びの約50%以下である。このことは両端の軸受を固定軸受に設計することによりボールねじの伸びを半分にしたこと意味している。送り軸の熱変位の零点はストロークの中央に存在する。これもまた、両軸受はほぼ同じ剛性を持ち、そしてボールねじは全長にわたり様に熱せられるので、推測されることである。

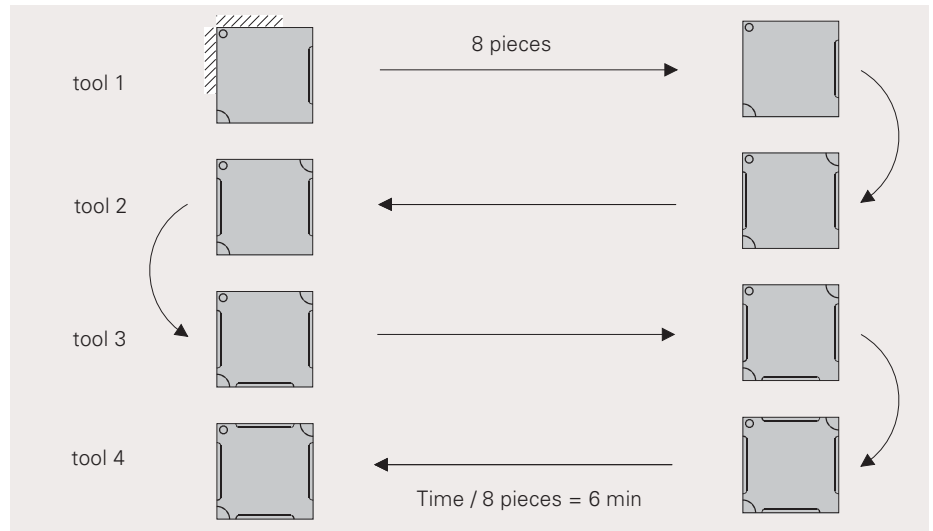


図8 複数ワークピースのバッチ生産実験のための実験構成。4個のポケットと2個の四分円を4本の工具を用いて、Z方向切り込み1mmで加工した。ボールねじの熱膨張によるドリフトを明示するために、各ワークピースは加工後交換せず、加工プログラムの切り込み深さを順次増やし、繰り返し運転した。

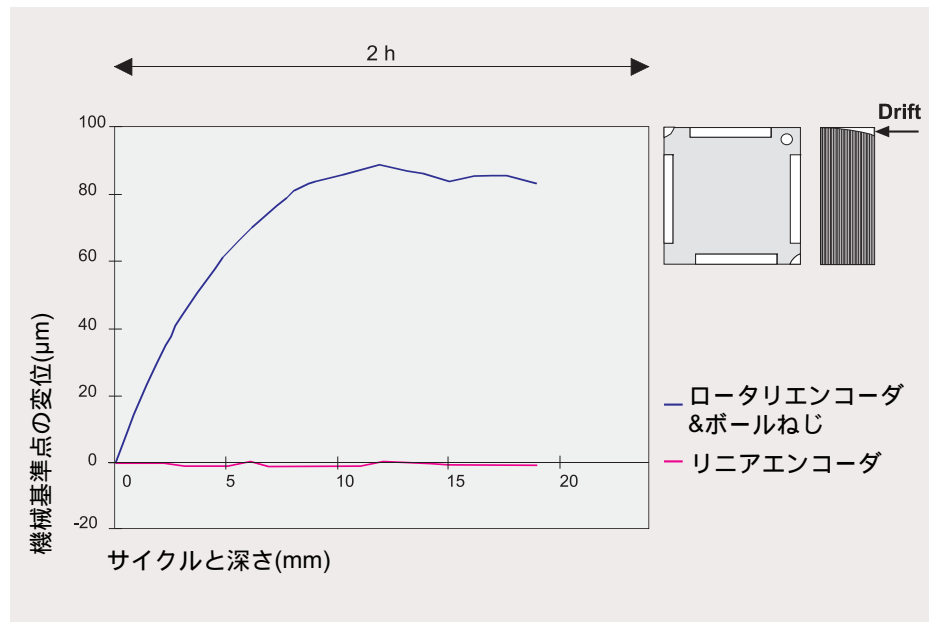


図9 図8の実験結果。左のワークピースの左側ポケットは明らかにボールねじの膨張が原因の段差パターンを示している。

### 固定 / 与圧軸受

両端固定の軸受は高い平均速度の運転プログラムでは問題を引き起こす。すなわち軸受負荷は稼働寿命に有害であり、軸受が耐える力は機械構造に変形をもたらす。固定 / 与圧軸受設計 (図6) がそのために、ある種、圧力弁のように用いられる。50 $\mu$ m/mの典型的な与圧では、およそ5Kの温度上昇までは両端固定の軸受として、さらにそれ以上の温度上昇に対しては固定端 / 自由端軸受として振る舞う軸受が期待できる。

図11は固定 / 与圧軸受のボールねじ付のマシニングセンタを前述の実験パターンで実施した位置決め試験結果を示す。驚くべきことに、固定 / 与圧構成軸受にもかかわらず、位置のドリフトは図7と似ているのが明らかである。このことは、送り軸が概ね固定端 / 自由端軸受として機能していること意味している。熱変位の零点は固定軸受近くに存在している。前の2つの実験と異なり、この軸のストロークは1mではなくわずか500mmであるので、この機械のドリフト振幅は比較の対象にはならない。

この実験は、この単純な固定 / 与圧軸受のモデルは現実には即さないことを示している。通常、可動軸受端は固定軸受端より剛性が非常に小さい。原因は2つの軸受の設計の違いにある。第1の本来の正真正銘の固定軸受は第2の軸受が動き出してもまだ剛性を保っているのに引き換え、温度上昇により、第2の軸受は与圧を失い、結局その剛性を失うことになる。

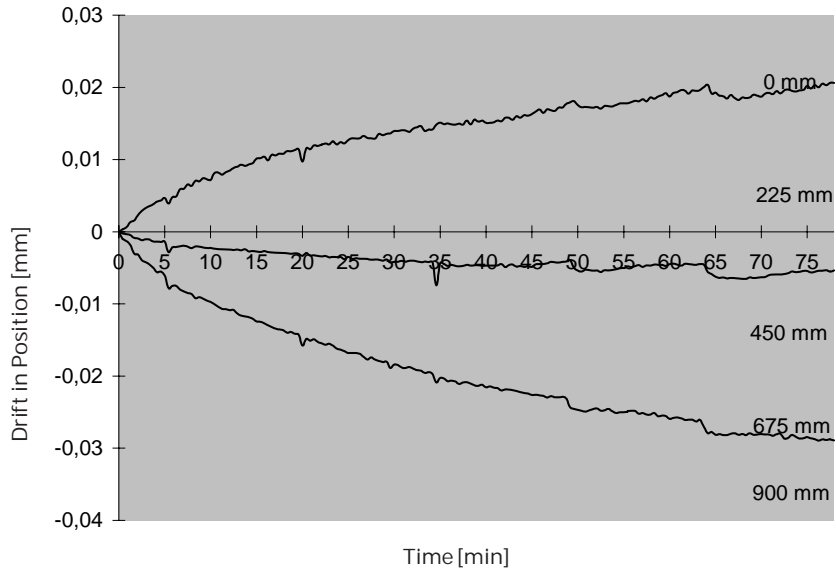


図10 両端固定軸受のボールねじ送り軸のISO/DIS 230-3に準拠した計測における3点のドリフト。ロータリエンコーダとボールねじによる位置計測はボールねじの熱膨張により大きな位置ドリフトを引き起こす。

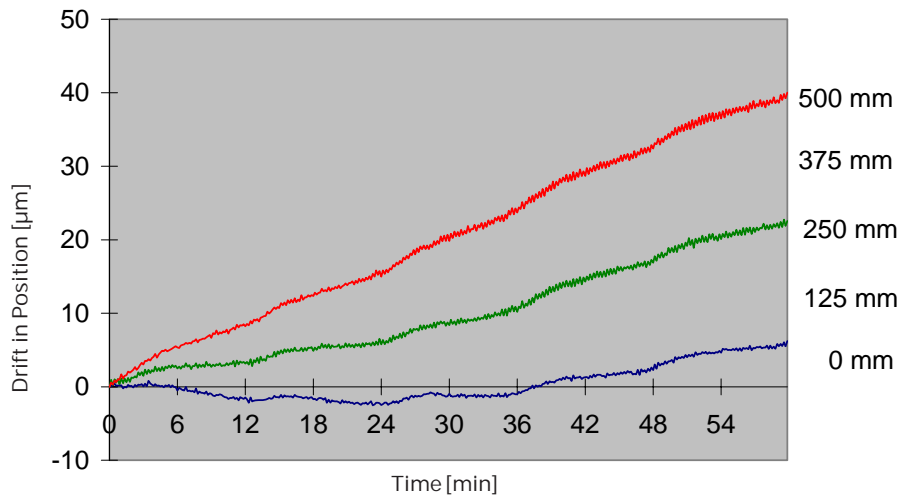


図11 固定 / 与圧軸受のボールねじ送り軸のISO/DIS 230-3に準拠した計測における3点のドリフト。ロータリエンコーダとボールねじによる位置計測は大きな位置ドリフトを引き起こす。

ボールねじの温度分布の影響

両端の軸受の剛性比は別として、熱変位の零点は特にボールねじ上の温度分布に依存する。図12は150mm区間を数時間往復繰り返し運動させた後のボールねじ駆動のサーモグラフ・スナップショットを示している。サーモグラフが示すように、数時間の運転後にもかかわらず、温度上昇はほとんどボールナットの移動区間に存在している。ボールねじの温度、従って熱膨張は非常に局部的である。

ボールねじの軸受はせいぜい単に一樣に分布した機械的な張力を与え、ボールねじの一定の伸びを保證しているの、これらは局部的な温度変化による膨張は補正できない。

簡単な計算はこれを明確に示している(図13)。長さ1mの一端が固定軸受のボールねじでは、図13(上)の赤い曲線で示す局部的に10Kの温度上昇は図13(下)の緑の曲線で示す位置決め誤差をもたらしている。また、700N/μmの剛性の両端固定の軸受構成は青い曲線で示す誤差をもたらしている。軸受によって与えられる力の結果、ボールねじはその両端を圧縮されるが、その場所の温度は上昇していない。固定端/自由端軸受とほとんど同様にボールねじの中央付近が温度上昇により膨張している。両端固定の位置決め誤差の最大値22μmは固定端/自由端軸受の誤差の概ね2/3となっている。

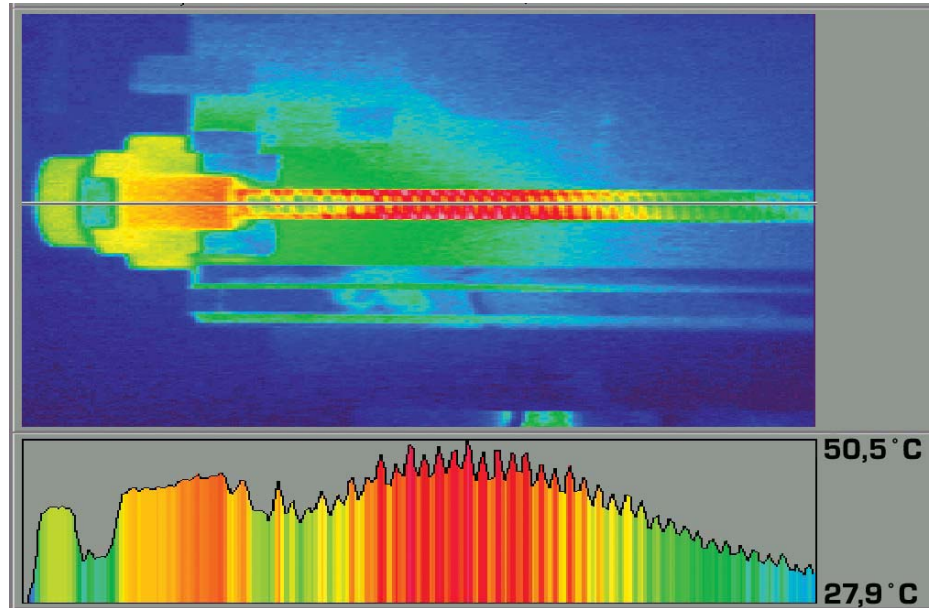


図12 150mm間を24m/minの速度で6時間往復運動させた後の循環式ボールねじのボールナット運動領域の局部的加熱<sup>6)</sup>。このサーモグラフィック・スナップショットを撮るために、繰り返し運転プログラムの終わりに、機械テーブルをわきに動かしている。ベルトドライブ、固定軸受およびボールねじに相対的に高い温度が認められる。

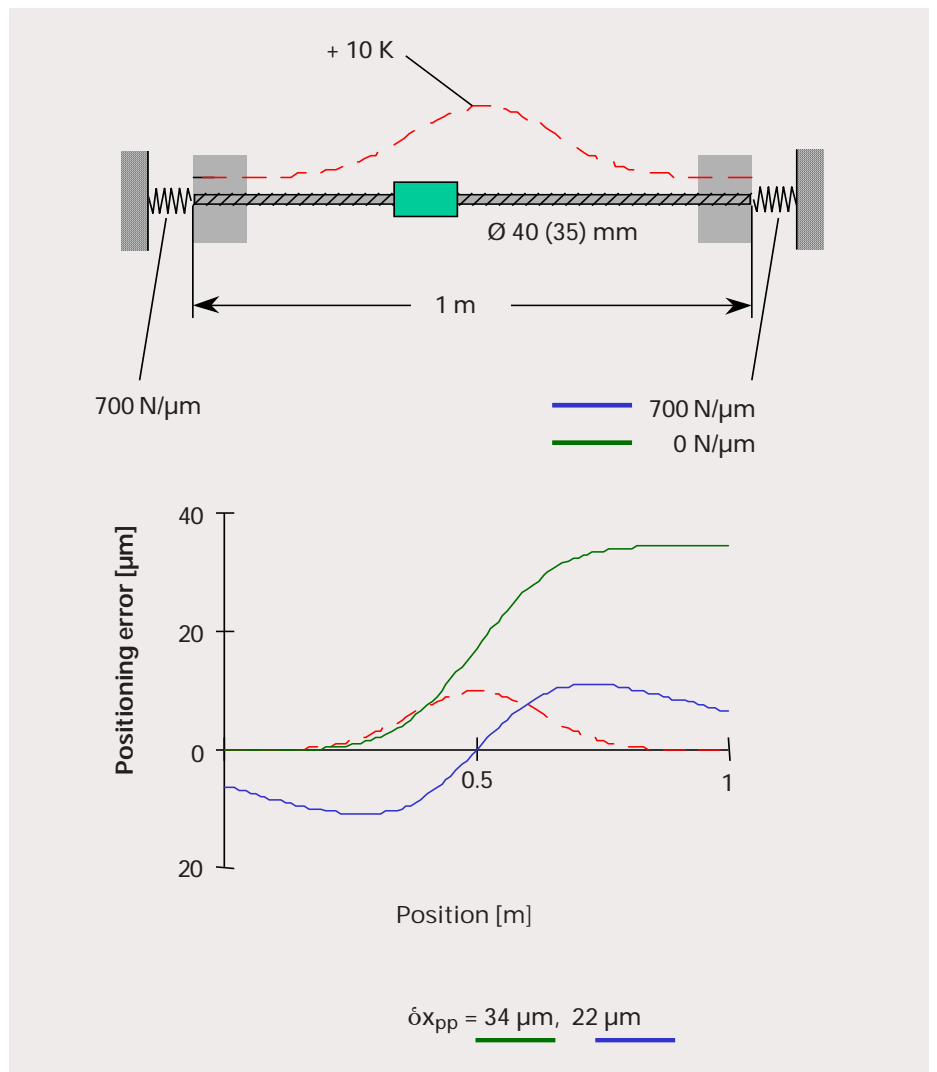


図13 循環式ボールねじの局部的温度上昇に起因するセミクローズドループの位置決め誤差

$\delta x_{pp} = 34 \mu\text{m}, 22 \mu\text{m}$



## 対策

この時点までに議論した試験結果は、送り軸がセミクローズドループ制御される場合、軸受摩擦と特にボールナットの摩擦に起因するボールねじの熱膨張は大きな位置決め誤差を引き起こすことを示している。リニアエンコーダの使用以外に、この誤差を避けるための対策には中空ボールねじの軸芯冷却とコントロールソフトウェアによる純粋な電子的補正がある。

## 冷却したボールねじ

冷却液の循環には中空ボールねじとボールねじの回転に対する回転ブッシュがボールねじ軸受近くに必要である。冷却液のシーリングの問題は別にして、ボールねじの穴はそうでなくても弱いボールねじの軸方向機械剛性を弱める。しかしながら、最も大きな問題は冷却液温度の精密な制御である。1の温度変化により、長さ1mのボールねじは11 $\mu$ mだけ変化する。除去すべきかなりの量の熱を考慮すると、1K以下の温度安定性を維持するのはたやすいことではない。これは特に主軸あるいは軸受と同じシステムで冷却する場合に困難である。このような場合、冷却容量は容易にキロワット領域になってしまう。既存の主軸冷却器の温度定常性は1Kより悪くなってしまう。従って、これらの冷却器をボールねじの温度制御に使用するのは多くの場合不可能である。コスト低減のためにしばしばスイッチング制御器が使用される。開閉動作はある設定温度範囲を外れることにより行われるので、個々の開閉動作の間に冷却されたボールねじが膨張収縮し、従って軸の位置決め誤差となることが考えられる。図14は固定端/自由端軸受の液冷ボールねじを用いた立型マシニングセンタの位置決め試験結果を示す。試験の間、送り軸を500mmの2点間を2.5m/分の遅い速度で動かした。この軸の最大ストロークは800mmである。図には、固定軸受から最も遠い位置の位置ドリフトが記録されている。冷却器の開閉動作は明らかに見ることができ、このヒステリシスは1Kである。非冷却のセミクローズドループ構成と比較すると、位置ドリフトの絶対値はかなり減少している。しがしながら、開閉動作は比較的早い位置変化を起こしており、これは短い加工時間のワークピース加工中には、むしろ位置ドリフトが緩やかな非冷却セミクローズドループ構成より重大な影響を持つことになる。

## ソフトウェアによる補正

解析モデル、ニューラルネットワークおよび経験式による熱変形の解析研究が進行中である。しかしながら、これらの研究の重点は機械内外の熱源の結果としての工作機械構造の変形に置かれており、軸ドリフト補正の研究への関心は少ない。

全体として、今日のソフトウェア能力に対する全般的な熱い雰囲気により、このようなソフトウェア補正はしばしば過大に評価されている。実験室で成功している補正はしばしば入念に特別に調整された試験用の機械で成し遂げられている。これらの補正方法を調整時間余裕の無い個々の量産機械に適用するのは一般に不可能である。以下の送り軸の例は初期パラメータの考慮すべき変動について示している。

ボールねじの膨張を補正するには、ボールねじの局部温度は移動プログラムに依存するので、その位置に対応して、ボールねじの温度を知らねばならない。しかしながら、回転中の機械ボールねじを直接温度測定することはできないので、工作機械製造者はしばしば温度分布の計算を試みる。この計算は、ボールねじの各部分について温度分布が得られるなら理論的には可能である。そのような各部分の熱は、ボールナットの摩擦により生成され、またボールねじのサーマルコンダクタンスを通し、そしてさらに周囲との熱交換を通して生成される。ボールナットの摩擦は、ほぼボールナット与圧に比例し、また、冷却液のタイプ、量そして温度にも複雑に依存する。ボールナットの与圧は、個々のボールねじに幾分依存するが、通常ストローク全体で $\pm(10 \sim 20)\mu$ m変化する。最初の6ヶ月の期間に平均的な与圧は、一般的にはその個々の値の50%に減少する。ボールねじの設置の際の複雑な静的干渉力によって、ある程度の詰まり現象やそれに伴う摩擦の増加は避けられない。これまで紹介してきた一連の多くの例でさえも現実の厄介な問題点を示すことはできない。熱放散の計算も未知の環境条件に大きく依存するので同様に難しい。ボールねじを囲んで

いる空気の温度でさえ、その温度が熱放散のどのような計算でも決定的役割を果たすにもかかわらず、通常未知である。概して、比較的簡単な固定/自由端軸受の場合でも、付加的な温度センサなしで、ソフトウェア補正の成功するチャンスはほとんど無いと思われる。固定/固定および固定/与圧軸受の場合、軸受剛性と与圧に依存する摩擦を考慮せねばならない。これらの要因は補正をさらに困難にしている。

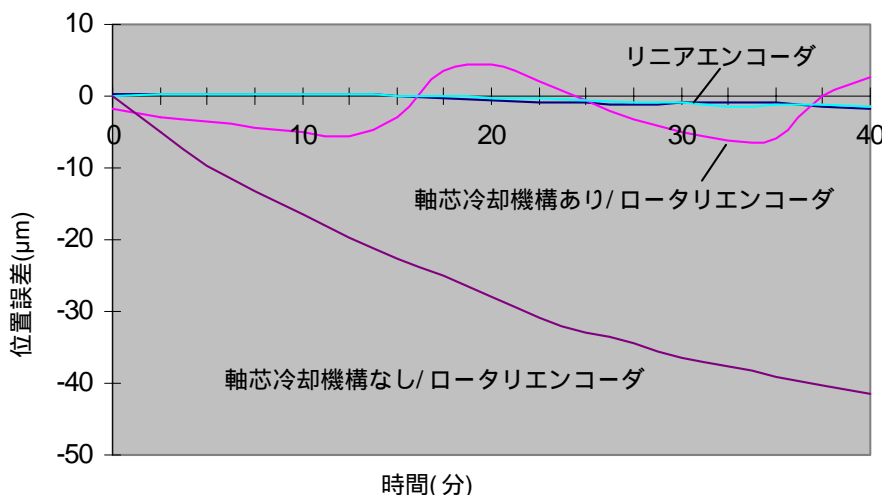


図14 固定端/自由端軸受の液冷ボールねじを用いた立型マシニングセンタのX軸。図は固定軸受から最も離れた500mm以上（機械ストロークは800mm）の位置のドリフトを示す。繰り返し送り速度は2.5m/minである。この軸には試験のためにリニアエンコーダも装備されている。

## 他のタイプの誤差と位置決め誤差の比較

送り軸の温度依存性位置決め誤差の議論の後には、被試験マシニングセンタの合計誤差のなかのこれらの誤差を他の静的および準静的誤差とともに分類することが残されている。主軸により生成される熱に起因するフレームの変形についてISO/DIS230-3に準拠し、3台の機械全部を考察した。最高速度 $6000\text{min}^{-1}$ で数時間運転後、第1のマシニングセンタは直線方向変形 {x:  $5\mu\text{m}$ , y:  $60\mu\text{m}$ , z:  $15\mu\text{m}$ } を示した。回転変形はよくても {a:  $40\mu\text{m}/\text{m}$ , b:  $70\mu\text{m}/\text{m}$ } であった。第2のマシニングセンタの歪は図15に示されている。同じ条件、主軸も同じく $6000\text{min}^{-1}$ の下で、最大直線方向変形 {x:  $5\mu\text{m}$ , y:  $45\mu\text{m}$ , z:  $55\mu\text{m}$ } を示し、回転変形の最大値は {a:  $25\mu\text{m}/\text{m}$ , b:  $10\mu\text{m}/\text{m}$ } であった。第3の機械はジャケット冷却の高速主軸を装備している。 $12000\text{min}^{-1}$ でこの機械は直線方向変形 {x:  $5\mu\text{m}$ , y:  $5\mu\text{m}$ , z:  $40\mu\text{m}$ }、そして回転変形の最大値は {a:  $20\mu\text{m}/\text{m}$ , b:  $30\mu\text{m}/\text{m}$ } であった。前述の計測された軸のドリフト値は少なくともこれらの構造変形量と同じであった。特に、固定端/自由端軸受のボールねじ、あるいは効果的に冷却された主軸の機械がセミクロースドループで駆動される場合の位置決め誤差は計測された構造変形よりかなり大きい。

通例の幾何学的誤差の比較でも同様な結果が得られる。すなわち、もしピッチ(pitch)、ロール(roll)およびヨウ(yaw)誤差を16台の異なるNC機械を調査すれば、このタイプの誤差は通常 $10\sim 50\mu\text{m}/\text{m}$ の範囲にあることが分かるであろう(図16)。位置決め誤差はこれらの値にそれぞれ対応するアップ(Abbe)距離を掛けることで得られる。この誤差は送り軸ストロークが $1\text{m}$ を超えるまでは、送り軸のドリフト値までには至らない。

### 結論

ロータリエンコーダとボールねじを用いた位置計測の主たる問題はボールねじの熱膨張である。加工プログラムの内容に依存するが、熱膨張は一般に1~2時間の時定数を持ち、 $0.1\text{mm}$ の大きさの位置誤差を引き起こす。したがって、この位置決め誤差は熱によるマシニングセンタの構造変形や幾何学的誤差よりも影響が大きい。どのような加工プログラムでも、ボールねじが熱的に安定するのにおよそ1時間を必要とする。これは、加工を中断した場合も同様である。熱膨張に対する経験則は次のようである。すなわち、冷えている長さ $1\text{m}$ のボールねじ全長にわたって1往復するごとに、ボールねじはおよそ $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 伸び、そしてこの膨張は熱時定数で蓄積されていくということである。

工作機械精度と速度に対する要求が増加するにしたがって、位置計測に対するリニアエンコーダの役割がますます重要になってきている。このことは適正なフィードバックシステムを設計する際に考慮されるべきことである。

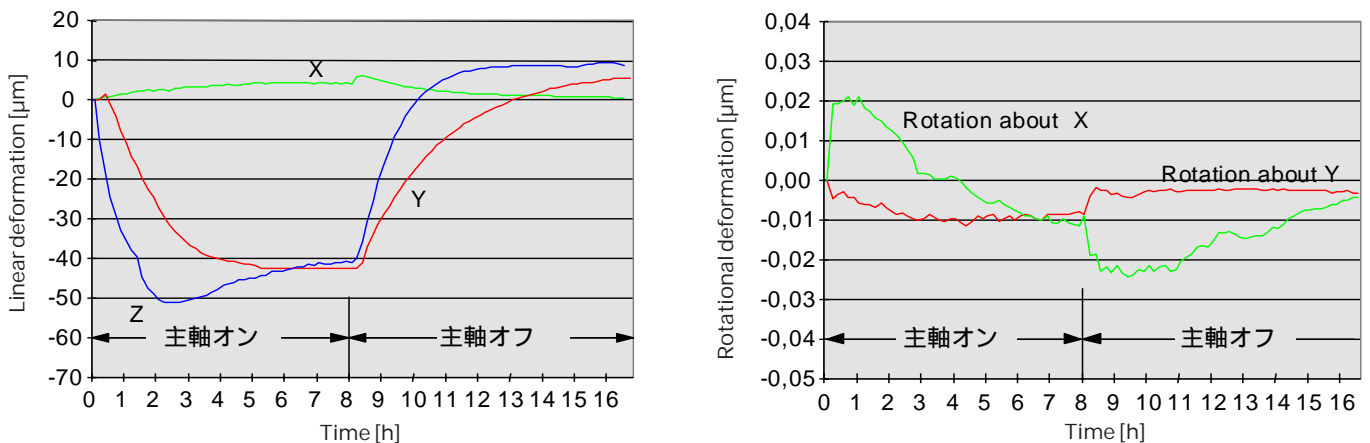


図15 主軸の無負荷 $6000\text{min}^{-1}$ 運転時に生成される熱による立型マシニングセンタの構造変形

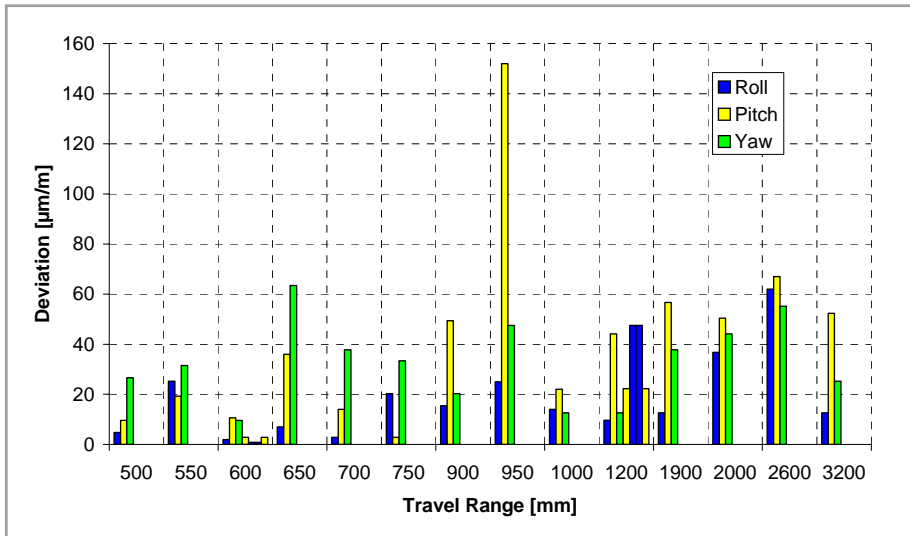


図16 異なる16台のマシニングセンタの送り軸のピッチ，ロールおよびヨー角度

## 結論

ロータリエンコーダとボールねじを用いた位置計測の主たる問題はボールねじの熱膨張である。加工プログラムの内容に依存するが、熱膨張は一般に1~2時間の時定数を持ち、0.1mmの大きさの位置誤差を引き起こす。したがって、この位置決め誤差は熱によるマシニングセンタの構造変形や幾何学的誤差よりも影響が大きい。どのような加工プログラムでも、ボールねじが熱的に安定するのにおよそ1時間を必要とする。これは、加工を中断した場合も同様である。熱膨張に対する経験則は次のようである。すなわち、冷えている長さ1mのボールねじ全長にわたって1往復するごとに、ボールねじはおよそ0.5~1µm伸び、そしてこの膨張は熱時定数で蓄積されていくということである。

工作機械精度と速度に対する要求が増加するにしたがって、位置計測に対するリニアエンコーダの役割がますます重要になってきている。このことは適正なフィードバックシステムを設計する際に考慮されるべきことである。

## 参考文献

- 1) Schröder, Wilhelm, Feinpositionierung mit Kugel-gewindetrieben, FortschrittsberichtVDI Reihe 1 Nr. 277, Düsseldorf;VDI Verlag 1997
- 2) VDW-Bericht 0153, "Untersuchung von Wälzführungen zur Verbesserung des statischen und dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen"
- 3) Weule, Hartmut, Rosum, Jens, Optimization of the friction behaviour of ball screw drives through WC/Ccoated roller bodies, Production Engineering Vol. 1/1 (1993)
- 4) Golz, Hans Ulrich, Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben, Dissertation Uni Karlsruhe, 1990
- 5) Schmitt, Thomas, Modell der Wärmeübertragungsvorgänge in der mechanischen Struktur von CNC-gesteuerten Vorschubsystemen, Verlag Shaker, 1996
- 6) A. Frank, F. Ruech, Position measurement in CNC Machines ...Lamdamap conference, Newcastle 1999

## シールドタイプリニアエンコーダ

ハイデンハインのシールドタイプリニアエンコーダはダスト、切粉、切削液飛沫から保護されていますので、工作機械に使用するのに最適です。

シールドタイプリニアエンコーダの特徴

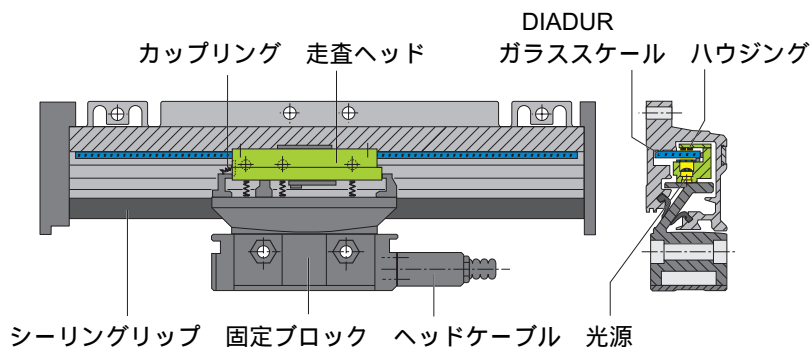
- ・ インクリメンタルおよび  
アブソリュートモデル
- ・ 測定ステップ 最小0.1μm
- ・ 測定長 最大30m
- ・ 早くて簡単な取り付け
- ・ 大きな取り付け公差
- ・ 高加速度負荷への対応
- ・ 汚れの防護
- ・ 明確な熱特性



## 機械的設計

シールドタイプリニアエンコーダのスケール、走査ユニットおよびガイドは切粉、埃、切削液飛沫をアルミニウム製ハウジングと下方向に向けた弾力性のあるシーリングリップにより保護されています (IP 53 : IEC 60529による保護等級)。さらに、圧縮空気をエンコーダ内部に注入することにより、保護等級をIP64まで高めることができます。

走査キャリアはスケールユニット内の低摩擦のガイド上を移動します。このキャリアは、外部の取り付けブロックにカップリングを介して結合されます。このカップリングにより、スケールと機械ガイドの避けられないアライメント誤差を補償することができます。またこのカップリングは、測定方向に高い剛性を維持するように設計されていますので、高い固有振動周波数が保証されます。



# HEIDENHAIN

本社  
〒102-0073

東京都千代田区九段北4-1-7  
九段センタービル10F  
TEL (03)3234-7781  
FAX (03)3262-2539

名古屋営業所  
〒470-1132

愛知県豊明市間米町  
敷田1225-12  
TEL (0562)95-1160  
FAX (0562)95-1166

大阪営業所  
〒532-0011

大阪市淀川区  
西中島6丁目1-1  
TEL (06)6885-3501  
FAX (06)6885-3502

九州営業所  
〒802-0001

北九州市小倉北区  
浅野2-13-23  
TEL (093)511-6696  
FAX (093)551-1617