

# 工作機械技術の現状と将来

## Advanced Technology of Machine Tools

東京農工大学

教授 堤 正臣

### 1. はじめに

景気の低迷とともに落ちていた設備投資意欲も最近になって緩やかではあるが回復する兆しを見せている。製造業の根幹を支える工作機械業界は、数量的にはかなり回復してきた。

こうした背景のもとで新たな技術開発が進められているが、従来のシステム化ではなく、加工ノウハウを含めた高速・高精度化に重点が置かれている。これは工作機械産業の原点とも言える方向であり、高速・高精度化というキーワードは古いものであるが、各社のもつ固有技術を高度化する一つの方向として再び見直されるようになった。

とくに新しい技術はアメリカでいち早く実用化されたパラレルメカニズム<sup>(1)</sup>やリニアモータ<sup>(2)</sup>が注目を集めるのも、これらの技術が高速化を一段と進めてくれそうだとという期待が高いからである。

その一方で、従来技術の援用や改良によって高速・高精度化を実現する動きも強まってきた。超精密旋盤の開発で培った技術をマシニングセンタに応用し、金型や部品の高速・高精度加工を実現しようとする動きが見られる<sup>(3)</sup>。今後の工作機械発展の方向を強く示唆するものとして評価できる。

本稿では、新たに芽生えはじめた工作機械技術の概要、とくに主要な技術である主軸及びツーリング技術、送り駆動系、性能評価技術の最近の動向に焦点を当てて紹介し、さらに今後の発展の方向について展望することにする。

### 2. 高速・高精度主軸—超精密技術の汎用機への応用

空気軸受を使った主軸、回転精度 $0.5\mu\text{m}$ の主軸、熱膨張を抑制した主軸、磁気軸受を使った主軸など、ミリング加工用に高精度・高速主軸が相次いで発表されている。これは、数ミリ以下の小径のエンドミルを高速で回転させて金型や部品を加工するためのもので、従来、放電加工に頼っていた硬い材料を能率よく加工し、磨き工程を可能な限り省略できる機械の開発を目指したものである<sup>(4)</sup>。

工作機械の主軸軸受には長い間転がり軸受が採用されてきた。信頼性が高く安価なことがその最大の理由であった。転がり軸受を使った主軸の高速化は、

- (1) 軸受材質を軸受鋼からセラミックスに変更
- (2) 軸受潤滑をオイルエアやオイルミストなどの希薄潤滑方式に変更
- (3) ベルトや歯車を使わず、ベルトインモータに変更することによって実現されてきた。現在もこの考え方は変わらず、ジェットエンジンの潤滑に使われてきたアンダレース潤滑方式を採用することによってさらに高速化を図ろうとしている。

図1は著者の提案した間欠形オイルミスト潤滑方法<sup>(5)</sup>をアンダレース潤滑として実機に採用した例である<sup>(6)</sup>。間欠形オイルミスト潤滑は、従来のオイルミストと比べて消費油量が極端に少なく、消費空気量が多いのが特徴である。ノズルから出た空気は断熱膨張によって氷点下近くまで温度が下がり、冷却も期待できる潤滑方法で、オイルエア潤滑よりも優れた冷却性能を持っていることはすでに実証されている。

超高速主軸用軸受として古くから期待されてきた磁気軸受を使った主軸は、残念ながら試作されるにとどまり、市場に広く出回るまでには至っていない。これは、磁気軸受そのもののコストが転がり軸受を使った主軸と比べて高いことが大きな原因である。また、磁気軸受の能力を必要とするほどの高速領域で使われることがほとんどなかったことも、量産効果に結びつかず、コスト高の要因になっ

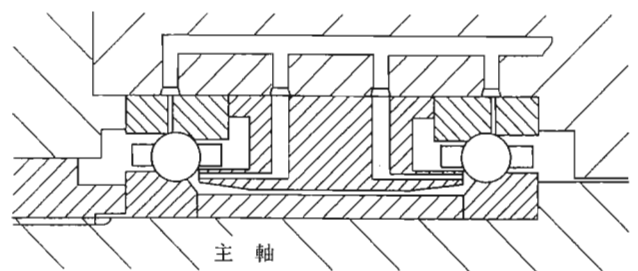


図1 間欠型オイルミストをアンダレースから供給することによってオイルエア潤滑よりも高速化を実現 (森精機による)

ている。さらに、磁気軸受を装備することで今まで必要でなかった電源、制御装置、冷却装置など多くの付属設備が必要になることも使いやすさや設置しやすさを阻害している。磁気軸受の工作機械への適用にさいして解決すべき最大の問題点は、回転精度や負荷容量にもあるが、コストである。

超精密旋盤に使われた空気軸受を通常のリリング加工で使うには静・動剛性やメンテナンスの面で不安があった。しかし、小径のエンドミルを使った加工では工具の振れ回りを極力小さくする必要があり、例えば、数十ミリのエンドミルを使っているときに、数ミクロンの振れがあってもほとんど問題にならないが、1mm以下のエンドミルを使うときに、それと同程度の振れがあったのでは工具の破損、摩耗に重大な影響を及ぼす可能性が高い。そのため振れをサブミクロンのオーダーに押さえる必要が生じてきた。

振れを小さく抑えるには精度の高い回転が容易に得られる空気軸受が適していた。図2はリリング加工用に開発された空気静圧軸受を採用した主軸構造<sup>(3)</sup>である。この主軸では、軸受隙間を20 $\mu$ m程度と広く取ることによって空気流量を多くして軸受自体の発熱を押さえている。さらに、主軸ハウジングを冷却したり、低熱膨張材で主軸を製作することによって熱による伸びを極力押さえる構造としている。

空気軸受の弱点であった剛性の面では高圧ガスに対する規制が緩和されたことで高圧空気を利用できるようになり、剛性を大幅に高められるようになったこともリリング加工を可能にした。しかし、図示したように工具の自動交換ができる構造になっていないことから、自動交換が可能な構造にすることが今後の課題といえよう。とくに、従来方式である自動交換のためのドロワーや皿ばね等を組み込んだ状態で高速回転させたときに果たして振れが十分に小さく押さえられるかどうかは鍵となる。主軸単体だ

けでなく、工具シャンクや工具保持具を組み込んだ状態での振れも考慮しなければならないことは言うまでもない。転がり軸受を使って高速・高精度化を実現した主軸の例<sup>(4)</sup>を図3に示す。この主軸ではコレットを使った自動交換装置が組み込まれており、マシニングセンタの主軸と呼べる構造となっている。ただし、工具の装着精度を出すために工具側に特殊な形状を必要とし、汎用のチャックを取り付けることはできないことが課題である。

以上述べた項目と技術的課題とをまとめると表1のようになる。いくつか重要な技術課題があるが、基本は高精度な主軸を開発することであり、それを高速で回転させたときの問題を一つひとつ潰していくことで一層の高速化が図れるものと考えられる。

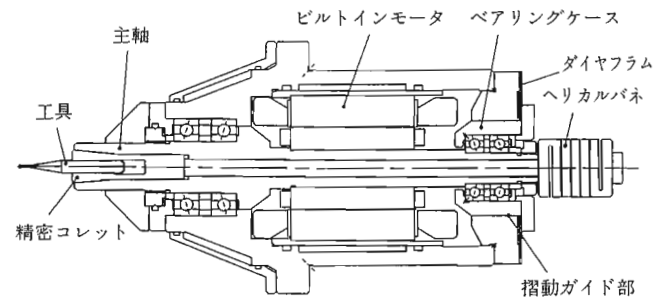


図3 転がり軸受を採用した高速・高精度主軸頭、工具の自動交換が可能なのが特徴  
(牧野フライス製作所による)

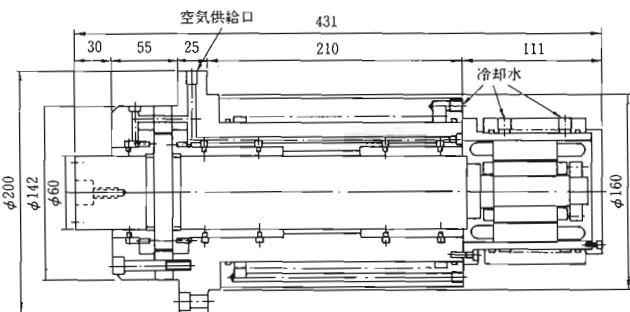


図2 空気静圧軸受による高速リリング専用主軸  
(東芝機械による)

表1 高速・高精度主軸開発関連の技術課題

項目	技術課題	
主軸	動バランスの取れる設計 工具系を含めた軸の危険速度	
軸受	転がり	潤滑方法, 高精度軸受
	空気	焼付き(タッチダウン), 高圧空気軸受
	磁気	焼付き(タッチダウン), コスト
回転速度	DN値300万以上, ビルトインモータ	
回転精度	サブミクロン以下	
熱変形	主軸の伸びを抑制した設計 冷却方法の検討	
静・動剛性	軸の危険速度を押さえる設計 高ダンピング構造の設計	
動バランス	使用範囲の上限で要素ごとに取る方法 動バランスの修正のできる設計	
自動交換	自動交換の可能な設計 工具装着精度の高い設計 自動交換機構の動バランスと振動の抑制	
コスト	転がり軸受を使った主軸と同程度 省エネルギー仕様	
維持管理	簡単なこと	
その他	高速ロータリージョイントの開発	

### 3. 工具-主軸系 - 高速・高精度 対応インタフェース

回転する工具を保持するときに問題となるのが、振れ回りとそれによる振動である。とくに回転速度が上がるとわずかの偏心質量も大きな遠心力となって現れて振動を発生させる要因になる。また、突き出しの長い工具を使用すると主軸全体の危険速度が下がって共振を起こしやすくなる。工作機械の設計において無視されやすいのが工具を含めた系としての主軸の設計である。

ところで、高速・高精度な工具と主軸とをつなぐインタフェースとして最近注目を集めているのが、2面拘束形インタフェースである。代表的なものは、HSK、KM、NC5である。それぞれ形状とクランプ機構に特徴があるものの、装着精度は従来の7/24テーパを使った工具よりも優れている。図4は、同一の工具を10回以上繰り返して装着したときの半径方向の位置である。このデータはアーヘン工科大学と黒田精工とで測定した結果であるが、いずれも $\pm 0.3\mu\text{m}$ の範囲にある。軸方向の位置も同様に高い。した

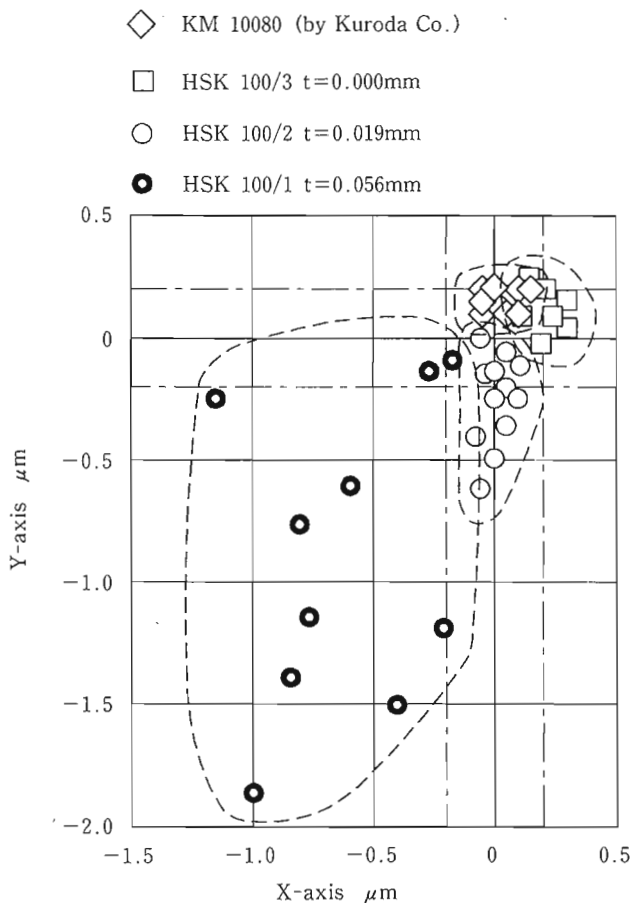


図4 同一工具を繰り返して装着したときの半径方向の位置  
工具突き出し長さ100mmの位置で測定、図中のtは  
しめしろ。  
KM10080はトヨタ自動車仕様のツールで、160mmの  
位置で測定

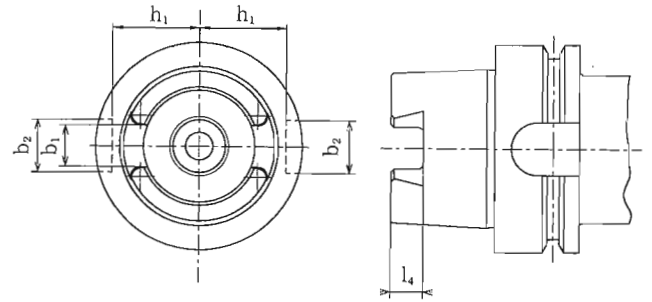


図5 標準のHSK-A型を修正し、アンバランスをなくした  
インタフェース

がって、従来の7/24テーパの場合の10倍以上高い繰返し精度をもっていることから精度的には優れているといえる。しかし、例えばHSKの場合は、もともと通常の切削速度に対応するように設計され、しかも安全性に重点が置かれて設計されたものであるためにアンバランスを発生させる要因となる非対称形状となっている。このような非対称形状が存在すると動バランスをとることは必ずしも容易でない。

動バランスは同一の軸直角断面内で修正しなければ意味がない。ある一断面で動バランスを修正しても回転速度が変わると逆に動バランスの狂いを大きくしてしまう可能性がある。したがって、高速・高精度な主軸を設計しようとするならば、当然ながら図5に示すように幾何学的に対称な形状とするのが望ましいことになる。

これと関連して、クランプ機構も動バランスを狂わす大きな要因の一つになっている。長いドロワーに皿ばねを入れてクランプ力を発生させる従来の構造では、ドロワーが振動を誘起して主軸全体を加振することがある。そのため、皿ばねをやめて形状精度の高いコイルばねを採用するようになってきている。

### 4. 送り機構-1Gを超える加速度

送り駆動機構の高速化の面で、最近とくに注目を集めているのが、リニアモータの応用とパラレルメカニズムである。これらはいずれも1Gを超える立ち上がり時の加速度を実現するために採用をしようとしたことである。いずれの技術ともアメリカで最初に具体化されたもので、日本の工作機械業界に与えた影響は大きい。

リニアモータを使ったマシニングセンタは、送り速度120 m/minを容易に実現できることはすでに実証されている。また、位置決めリニアスケールを使ったフィードバックを採用することで高精度化は実現はできているようである。図6は、インガソル社(アメリカ)の開発したリニア

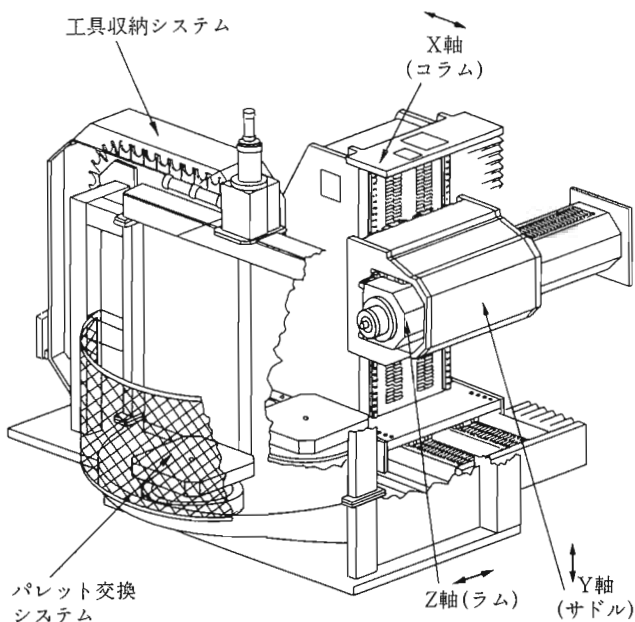


図6 リニアモータを採用したマシニングセンタ  
(インガソル社による)

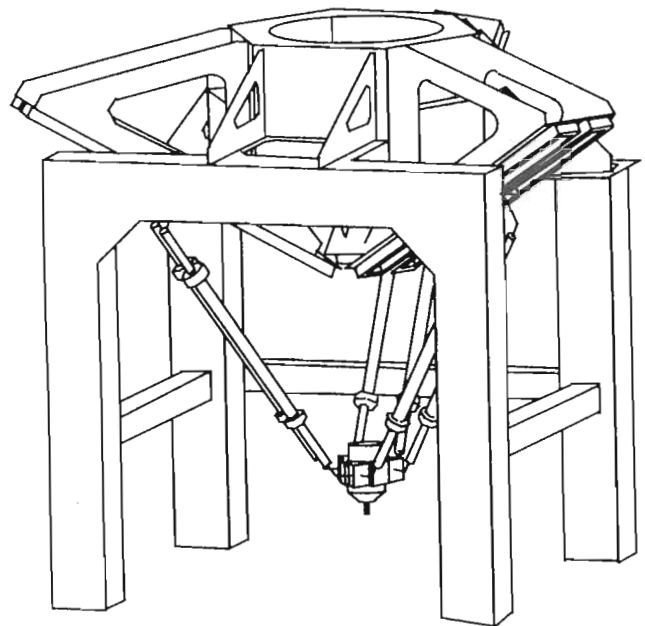


図7 パラレルリンク機構を採用したミリング加工専用機  
ATC機能はない(豊田工機による)

モータ採用のマシニングセンタ<sup>(2)</sup>である。この機械の特徴は、3軸ともリニアモータ駆動方式を採用した点である。通常のマシニングセンタの場合、軸の一端にサーボモータを取り付けていた。それが偶然にもモータの発熱を外部にいち早く逃がすことができたが、リニアモータではモータの発熱がテーブルやサドルに直接伝わり、逃げ場がない。そのため、モータの冷却をどのように行うかが今まで以上に重要な技術となっている。

一方、高速化に対して懐疑的な意見も聞かれる。例えば、リニアモータを使って送りをいくら速くしても主軸の回転速度が対応していないために、切削送りとしては120m/minもの速い速度を必要としない。リードの大きなボールねじを使って60m/minまで出せるので、それほど速くしなくても十分に対応できるという意見である。

工作機械の速さは切削速度や送り速度の速さだけでなく、工具交換、割り出し、位置決めなどの非切削時間を短縮することが重要である。とくにタクトタイムの短い製品の加工では非切削時間がトータルの機械加工時間の75%にもなるということを考えると、加工時間を短縮するよりも非加工時間を短縮する方がトータルの加工時間を減らすことが容易になる。このような考えを推し進めていけば、当然ながら送り速度、とくに立ち上がり時間を短くし、早送り速度を速くすることは重要である。

一方、日本国内でもパラレルリンク機構を採用した工作機械が実用レベルで試作された<sup>(1)</sup>。図7はミリング加工専用機で、現在のところ精度的には在来のマシニングセンタに及ばないが、そこそこの精度を確保しているようである。

この機械の場合、3対のパラレルリンクを使って、主軸ヘッドを加工空間内の任意の位置に位置決めしたり、直線補間、円弧補間などができる。加速度は1Gを超えている。なお、この機械のもう一つの特徴は軸の制御装置にパソコンをベースとしたコントローラを採用した点である。

パラレルリンク機構は、よく知られているように、在来の直交座標系で構成される工作機械とは異なり、運動の基準となる直線や平面を持たない。そのため、例えばX軸に平行な直線を切削しようとした場合には、移動の範囲を一点ずつ計算し、直線補間と同じことをしなければならない。送り速度が速くなれば、高速の計算速度が要求される。精度を上げようとするれば補間の間隔を小さくしなければならず、計算容量は膨大になる。現時点では予め計算しておいた動きのすべてをメモリに貯えておいて運動を制御する方式が取られているが、いずれは計算しながら制御する方式が必要になる。

パラレルメカニズムでは、すでに述べたように基準面を持たず、また自由度も高いことから従来のような幾何学的な運動試験方法が適用できず、パラレルメカニズムに適した新たな性能評価技術、例えば空間精度の評価が必要になる。その上で、評価に基づいた誤差補正方法を考えていかなければならないと思われる。

## 5. 高速・高精度化のための評価技術

性能評価技術は、工作機械の高速・高精度化を図った場合に必須の技術である。アメリカでは商務省標準技術研究所

(NIST)がアメリカ機械学会(ASME)をサポートする形で、ユーザの立場から新しい評価技術の開発が進んでいる。これを反映して、最近、日本のメーカは、アメリカのユーザから今まで経験したことがない試験項目を要求されている。その一つは空間精度の評価<sup>(7)</sup>である。航空機産業を中心としてこの精度評価を要求するようになってきた。図8に測定方法図の概略を示すが、加工空間を立方体と仮定してその立方体のひずみの大きさを評価しようとするもので、位置決め精度試験方法と同様の方法で行う。測定は、角度を調整できる反射鏡と干渉計から構成されたレーザー測長器を使って行い、同時に2軸以上を制御して立方体の4面の対角線に沿って主軸に固定した反射鏡を等間隔に位置決めし、そのときの対角線に沿って測定した移動距離とNC側の設定値との偏差を求める。測定を実際に行ってみると干渉計と反射鏡の設定に時間がかかる。

もう一つが円運動精度試験である。これはよく知られた方法であるが、従来、マシニングセンタの製品の評価や、組立段階での機械本体あるいはNCの調整に用いられてきた。これをNC旋盤やターニングセンタにも適用しようという試みがアメリカでなされているが、ターニングセンタに適した測定装置は少ない。これ以外には微小な円弧の補間精度を測定することも最近要求されはじめている。円弧補間精度試験は、従来のJISやISO規格に基づいた幾何学的運動試験や位置決め精度試験では得られない制御系の追従誤差などを的確に評価できる試験方法で、高速・高精度化にとってきわめて重要な試験方法になっている。すでに述べたが、円運動させた場合に半径が縮小することはよく知られているが、コーナ部で運動の向きを切り替え

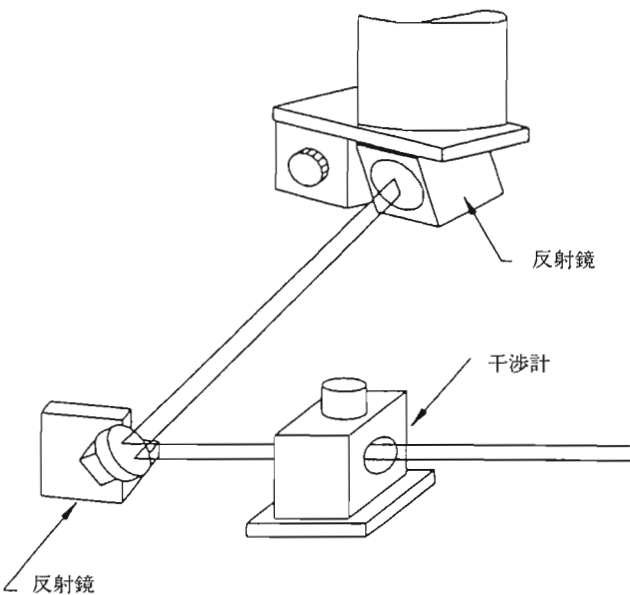


図8 空間精度の測定方法 (ASMEによる)

たときには近回り現象を起こす。これも高速化すれば一層近回りを起こし、精度を大きく損なう原因となっている。この種の評価には筆者の開発した2つの距離センサと直角定規とを組み合わせる方法が簡単で、適している。図9に原形を示すが、距離センサとして通常の電気マイクロメータを使い、基準として直角定規を使って測定する方法<sup>(8)</sup>で、電気マイクロメータの出力をXYレコーダに記録すれば、容易に軌跡を求めることができる。また、この測定原理は、微小な円弧補間時の軌跡の測定に適用できるだけでなく、距離センサを変えることによって従来困難であったターニングセンタの円運動試験も可能な汎用性の高い方法である。

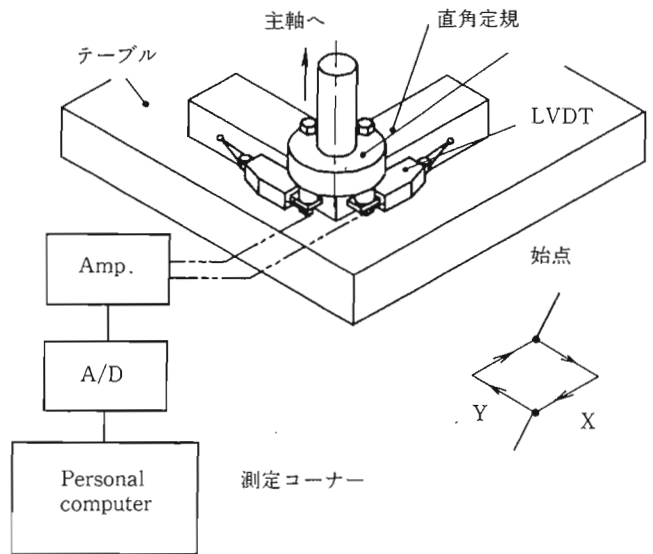


図9 コーナ部運動誤差測定方法

表2 高速・高精度送り機構の技術開発課題

機構の構成	直交3軸の構成方法 パラレルメカニズムの設計方法
案内	高剛性・高減衰性の案内の設計
送りねじ	高剛性・大リードねじの開発
送りモータ	リニアモータの応用技術 ダブルモータによる両端駆動技術 ロータリーモータによる直接駆動技術
冷却	ボールねじの冷却方法の開発 リニアモータの冷却方法の開発
制御	長尺スケールの高精度化 高速応答CNC技術 追従誤差の最小化 H無限大制御技術の応用 高精度位置決め技術
評価	空間運動精度 空間位置精度 高速運動精度

## 6. あとがき

冒頭にも述べたように工作機械産業は、製造業を支える重要な技術であり、工作機械産業の衰退した国は必ず製造業が衰退したことは歴史が証明してきた。それは単に工作機械を製造して販売するだけでなく、工作機械のユーザに必要な生産技術のノウハウを工作機械メーカーが開発してきたからである。そこにはユーザとメーカーとの相互に依存した関係があった。この関係は工作機械技術の発展にとってきわめて重要な意味を持っている。単に安価な機械を売ればそれで済む世界は限られていると思われる。

こうした意味から、絶えず新しい技術に挑戦することは、日本の工作機械産業、ひいては製造業の発展に大きく寄与していくものと確信している。

本稿では、著者が面白いと感じた技術を中心に取り上げたが、これ以外にも表1や表2に示した多くの技術が育ってきているはずである。本稿が今後の工作機械産業の発展に少しでも貢献できればと思っている。

## 文 献

- (1) 豊田工機：プレスリリース(1996-7)
- (2) 小山 宏：インガソール社マシンにみる高速加工技術, 機械と工具, Vol. 40, No.5(1996), pp.16-19.
- (3) 田中克敏：高速切削を実現する超精密空気静圧スピンドル, 機械と工具, Vol.40, No.5(1996), pp. 26-30.
- (4) 中村 誠：磨き不要の高品位面/乾式でリブ加工が可能—金型の高速・高品位微細加工に, ツールエンジニア(1994), pp.116-119.
- (5) 堤正臣, 多田圭吾：間欠形オイルミスト潤滑による工作機械主軸の高速化, 日本機械学会論文集, 60, (1994), pp.2911-2916.
- (6) 森田尚起：高速切削対応マシニングセンタの実際, 機械と工具, Vol.40, No.5(1996), pp.31-34
- (7) ASME B5.54: Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers, (1992), pp. 69-71.
- (8) L. Chen and M. Tsutsumi: Measurement and Compensation of Corner Tracking Errors of CNC Machine Tools, Int. JSPE (contributed) (1996)



堤 正 臣

昭和22年、三重県生まれ。東京工業大学大学院博士課程終了。その後、東京工業大学助手、助教授を経て、現在東京農工大学大学院教授。専門は、工作機械の制御と評価、CAD/CAM、ツーリング技術など。