



## 機械加工のためのインプロセス計測技術

河野 嗣 男

東京都立科学技術大学 〒191 日野市旭が丘 6-6

(1993年11月4日受理)

### In-Process Measurement for Machining

Tsuguo KOHNO

Tokyo Metropolitan Institute of Technology, 6-6, Asahigaoka, Hino 191

#### 1. はじめに

あらゆる生産工程にとって、製品の信頼性を維持し、生産性を高めてゆくために、測定・検査は不可欠である。これらは、古くから主として人の目と手によって行われ、近代になってからはノギスやマイクロメータによる定量的な測定に進んできた。最近では、半導体の生産工程で光計測を主とする種々の測定手段を駆使して、自動化と加工精度を急速に向上させている。

現在の生産ラインにおける計測・検査工程は、通常、加工や組立工程の間に置かれ、不合格となった製品や部品は、再加工や補正作業を受けたり、時には破棄されることもある。これらの検査工程は厳しきもさまざまで、全品検査であったり抜取り検査のこともあり、しばしば単純な生産合理化の観点から、検査工程を省略しようとする傾向がある。しかしながら、生産ラインの後の方で廃棄が生じることになれば、大きな損失をこうむることになる。適切な工程設計やラインの運営が望まれる所以である。また、機械加工精度向上の要求が一層強まることが予想されるので、これからはむしろ積極的に検査工程を強化する必要がある。オンマシンやインプロセス計測による加工精度の向上が重要な課題となる。さらに、その情報が生産ライン全体に供給されて、欠陥品の排出を未然に防ぎ、歩留りないし生産性の飛躍的な向上に結びつくことが期待される。

#### 2. インプロセス計測

工程中の計測・検査を分類してみると、①プリプロセス (pre-process) 計測、②オンマシン (on-machine,

stop and measure or process intermittent) 計測、③インプロセス (in-process or real-time) 計測、④アフタープロセス (after-process) 計測、となる。ここでは、オンマシン計測は、工作機械と計測装置ないしセンサーの場所的な一体化であり、インプロセス計測は、それらの作業を時間的にも一体化し、加工と計測を同時に行うものとする。

機械加工の誤差は、それが繰返しあるいは定常の範囲内なら、これをあらかじめ測定し、そのデータに基づき補正することができる。一般には、このことを作業手順の制御などとともに計算機加工制御とよんでいる。しかし、要求精度が上がってくると、環境や機械のランダムな要因による誤差が支配的になり、予測したり繰返したりすることが困難になる。そこで、実時間計測によるインプロセス計測加工制御が必要になってくる。

#### 3. インプロセス計測制御の事例

インプロセス計測は、その測定値による実時間加工制御を可能にする。単結晶ダイヤモンド工具による切削加工は、研削ないし研磨加工など他の加工法に比較して、表面創成のメカニズムが単純であり、インプロセス計測加工制御の適応が容易である。

大型の超精密旋削加工機として有名なアメリカローレンスリバモア国立研究所の LODTM (large optics diamond turning machine)<sup>1)</sup>には、七つのレーザー干渉計センサー、5個の静電容量変位計等、多くのセンサー類が使用されている。これらのセンサーは、テーブルや加工物、工具などの位置や角度などを加工中に測定する。LODTMでは、その加工精度 25 nm に見合った加工中

の位置決め精度が必要とされるので、各機械要素の位置は、機械本体とは別に設けた metrology frame (測定基準台) からのそれぞれの位置を 0.6 nm の分解能で測定し、加工制御を行っており、大掛かりなインプロセス計測加工制御の例である。

誤差はすべての機械要素に存在し、これらの精度向上、環境を含めての実時間制御を行うのが理想的である。考えてみれば、切削加工の場合、最終的な加工精度は加工物と工具の相対的な位置関係で決まり、絶対的な位置決めによって決まるのではない。加工面基準制御加工法 (WORFAC; workpiece referred form accuracy control)<sup>2)</sup> は、LODTM に代表されるような、機械要素すべての精度を上げ、さらに温度や振動などの加工環境を厳密に制御する従来の精度向上法とは違い、加工物と工具の相対的な位置のみを制御する単純で安価な方法である。つまり、さまざまな誤差要因により、工具工作物の間隔が変動した時に、この量を実時間計測し、工具の先端位置を制御する。図1は、加工面基準制御加工法の有効性を示すための実験配置概要図で、光触針 (HIPOSS)<sup>3)</sup> または静電容量センサーなどの非接触変位センサーが、平面切削加工物の表面を検出する。その信号は、ピエゾ素子で駆動される微小切込み工具台 (micro-tool servo) に供給され、工具の切込み量を制御する。図2に、人為的に加えた外乱が制御によって除去される効果を示す。制御を行わない時は、外乱の動きがそのまま表面に加工され、制御を行った場合には、それ

がきれいに除去されているのがわかる。

加工面基準制御加工法を円筒切削に応用した別の実験では、図3に示すように、HIPOSS を加工点の反対側に配置して行われ、外乱ばかりでなく、工作機械固有のいくつかの誤差も同時に除去できることが示された<sup>4)</sup>。コンピュータシミュレーションにおいても、外乱や加工機械の運動誤差などが大きく改善されることが示されている。ここで新たに見いだされたのは、センサー検出量をそのまま工具切込み量としてフィードバックするこれまでの方法では、参照面に誤差があるとそれを忠実に転写してゆくが、検出量に1より小さい係数 ( $m$  と呼ぶ) を乗じて制御量とすることにより、第一参照面の形状誤差を収束・消滅してゆけることで、シミュレーションでも実験でも確認されている。図4(a)に、 $m=0.9$  の場合に正弦波うねり誤差が制御により抑制され、上方の小さいうねり波形に改善されるシミュレーション結果の一例

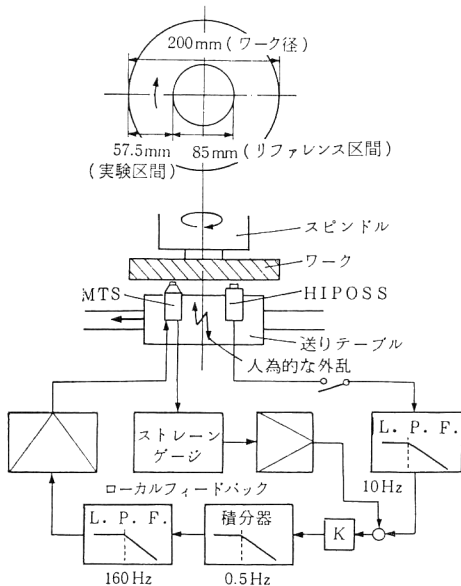


図1 加工面基準制御加工法実験配置概要図

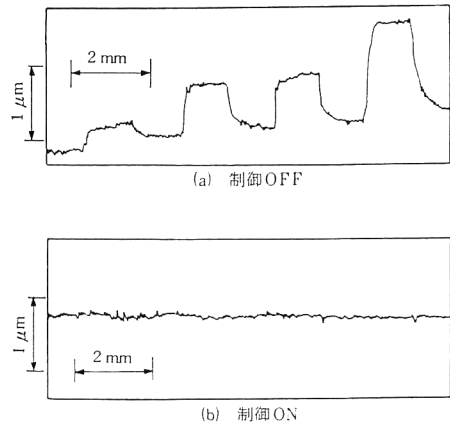


図2 外乱除去実験結果

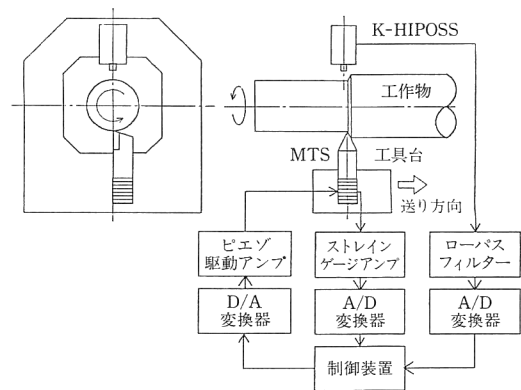


図3 円筒切削における加工面基準制御加工法実験配置図



研削・研磨やダイヤモンド切削により鏡面を加工した場合、ニュートンゲージによる検査のほか、環境の整った測定室において干渉計によってさらに精密な形状誤差測定が行われる。この目的のために、フィゾー干渉法によるレーザー干渉計が市販されており、縞走査の機能をもち、干渉縞解析により、P-V 値、RMS 値、等高線や三次元鳥観図など多様なデータを提供してくれる。超精密旋盤に市販のフィゾー干渉計を搭載し、切削鏡のオンマシン計測実験が行われ、主軸の温度上昇による伸びの加工表面形状への影響などが測定されている<sup>7)</sup>。表面あらかさが悪いと良い干渉縞が得られないし、非球面などで適当な基準面がないと縞が密になりすぎる、そして振動や空気揺らぎが大きいと縞画像の取得が困難になる等の問題点があり、これらの解決が課題である。現在建設中の“すばる”望遠鏡では、口径 8 m の主鏡が 1~2 年のうちに研磨工程に入るが、そこでのオンマシン計測にも、フィゾー干渉計が主要な計測装置に予定されている。

ゾーンプレートは、通常同心円状の縞からなる一種の回折格子で、写真ないし計算機ホログラフィ、または電子ないしレーザービーム描画等の技術を使って作られる。これにレーザー光が入射すると、透過光と回折光とに分れる。代表的な凹面鏡測定用ゾーンプレート干渉計では、前者が測定凹面鏡の中心に集光して参照光となり、後者が凹面鏡全面に広がって反射され、測定光となる。両者はゾーンプレートに戻って互に逆の作用を受け、検出面で干渉縞を作る。この干渉計の特長は、参照面が測定面と一体になっているため、振動や揺らぎに強いという点にある。事実、オンマシン実験で主軸回転中にも安定した測定ができることが確認されており、さらにインプロセス計測としても使用できることが期待されている。近年、明るい光学系つまり F ナンバーの小さな球面や非球面が要求され、測定が困難な場合が多くなっているが、図 6 に示すようなゾーンプレートの高次回折を利用した干渉計が報告された<sup>8)</sup>。回折角を大きくするには、通常ゾーンプレートの縞間隔を狭くするが、製作

上困難なので、往復共高次の回折光を測定光とし、透過光を参照光に利用することにより、F ナンバーの大きいままの観測レンズが利用でき、低次数光を有効に遮断できる小さなアパーチャーが使用できる等の利点をもつ。レーザー描画装置で位相型のゾーンプレートを作成する際、レジストの厚さを加減して測定光と参照光の強度をバランスさせ、3 次までの回折光による干渉縞を得ている。

ハルトマンテストは、多数の光ビームを測定面に当て、面の傾斜による結像位置のずれを点像パターンから測定して面形状を求める方法で、古くから使用されてきた。また、計算機を使って光線追跡により設計される光学系の、実験的測定法でもある。オンマシン・インプロセス計測用にファイバグレーティングを使う方法<sup>9)</sup>が開発されている。各ファイバーが円柱レンズとなって多数の点像を作り、これらが 2 次光源となって互いに干渉し、干渉条件を満たす方向に広がる多数の鋭いビームを発生する。これらのビームが凹面鏡で反射されてイメージセンサーで検出され、ハルトマンテストの原理で信号処理が行われる。通常ハルトマン法で使う多数のアパーチャーをもつ隔板を鏡面付近に置く必要がなく、オンマシン・インプロセス計測に利用可能である。現時点での測定精度は約  $0.1 \mu\text{m}$  で、安定した測定法であるがインプロセス測定に応用するには工具によって隠される部分の処理法や信号処理の高速化等さらに改善の努力が必要である。

## 6. インプロセス計測加工制御の将来展望

機械加工のためのインプロセス計測技術を概観した。その中心となっているのは光学的な計測技術である。非接触、高精度、高速、並列性、高信頼などの優れた特長は、すでに定評があり、さらなる発展の可能性を秘めている。HIPOSS の例にあるように、ナノメータの分解能をもつ光センサーが、切削現場で手軽に使用できることも実証されている。光の回折による横方向の分解能限界も、フォントントネル顕微鏡ないし近視野顕微鏡により、ナノメータサイズの横方向分解能が可能であり、原子レベルの加工におけるインプロセス計測への適応が期待されている。

インプロセス計測加工制御は 10 年以上前から試みられてきた。残念ながら、広く普及する兆しはまだ見えていない。その理由は、これまでの機械部品の精度向上が著しく、計測制御に頼る余地を機械自身の精度向上でカ

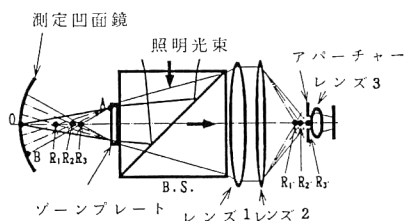


図 6 高次回折利用ゾーンプレート干渉計光路図

バーしてきたためと思われる。しかし、現在の超精密機械の精度は、すでにナノメートルの領域に入ろうとしていて、加工環境や微小振動の問題も簡単には解決できない範囲に近付いており、精度要求はますます厳しく多様になっている。つまり、生産におけるオンマシン・インプロセス計測は、これから本格的に必要とされる時代に入るのである。この時点で、インプロセス計測の有効性を総合的に実証する研究開発が必要である。加工面基準制御加工法のカバーする範囲を拡大し表面あらさから比較的大きな面形状までを計測するシステムとする。4節で述べたスキッドを内蔵するセンサーと、5節で取上げたゾーンプレート干渉計ないしハルトマン形状測定法を組合せて、この領域をカバーし、機械精度、外乱、そして環境などの影響を受けずに、計測システムの精度で加工できることを示すことが、普及のために重要である。現場への実用化は、その後になるであろう。

## 文 献

- 1) R.R. Donaldson, *et al.*: "Design and construction of a large, vertical axis diamond turning machine," UCRL-89738 (SPIE 27th Annu. Int. Tech. Symp.) (1983) p. 1.
- 2) 河野嗣男, ほか: "インプロセス計測加工精度補償の研究 (第1報) —加工面基準制御加工法の原理と基礎実験—", 精密工学会誌, **54** (1988) 1463-1468.
- 3) T. Kohno, *et al.*: "High precision optical surface sensor," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 103-108.
- 4) 河野嗣男, ほか: "インプロセス計測加工精度補償の研究 (第3報) —汎用旋盤を用いた円筒切削の制御—", 精密工学会誌, **59** (1993) 951-955.
- 5) 水野伸一, ほか: "非接触微小変位計 HIPOSS ワイドレンジの特性と応用", 精密工学会秋季講演論文集 (1987) pp. 221-222.
- 6) 山谷 充, ほか: "スキッド式光触針の研究", 精密工学会秋季講演論文集 (1993) pp. 193-194.
- 7) 田代発造, ほか: "超精密切削金属鏡のオンマシン干渉計測1 (フィゾー干渉計による測定)", 精密工学会春季大会講演論文集 (1989) pp. 981-982.
- 8) 野村 俊, ほか: "高次回折光によるゾーンプレート干渉法 (Fナンバーの大きい観測レンズを用いる方法)", 精密工学会秋季講演論文集 (1993) pp. 225-226.
- 9) 岩井智昭, ほか: "ファイバースコーピングハルトマンテストによる切削金属鏡のオンマシン測定", 精密工学会春季大会講演論文集 (1989) pp. 169-170.