研 究

旋削加工におけるインプロセス測定に ついての一考察(第1報)*

——測定に及ぼす表面粗さ、振動、検出遅れ、曲面の影響——

白 石 昌 武**

A Study of In-process Measurement in Turning (1st Report)

——The Effect of Surface Roughness, Vibration, Time Lag of Measurement and Curvature——

Masatake SHIRAISHI

This paper deals with problems of in-process measurement for Geometrical Adaptive Control (GAC) in turning. It is generally said that errors of a measuring instrument should be at least five times smaller than the required tolerance in the actual environment on a machine tool. In use a measuring instrument should be capable of withstanding vibration and temperature change and must operate in the presence of coolant, cutting fluid, smoke and so on. Before actual use of a new measuring apparatus developed by the author, various measures are taken against those disturbances and satisfactory results are obtained through several experiments. In this paper, the influence of surface roughness, vibration, time lag of measurement and curvature of a machined surface are discussed and measures against these effects are experimentally investigated.

Key words: in-process measurement, geometrical adaptive control, turning operation, measuring apparatus development, measurement error, environment influence, disturbances measures.

1. 緒 言

旋削加工における形状寸法適応制御^{1)~3)}(geometrical adaptive control: GAC と略す)とは、加工中に形状、寸法を測定して、工作機械-工具-工作物系の温度変化、弾性変形、工具摩耗等により生ずる工作物の形状、寸法誤差を減少または除去するように制御する方式である。従来開発された GAC 用のインプロセス測定装置には、機械的方法によるもの⁴⁾、空気的方法によるもの⁵⁾⁶⁾、電気的方法によるもの⁷⁾⁸⁾、光学的方法によるもの⁹⁾¹⁰⁾などその数も多いが、現場のふん囲気で使用できる測定装置となると、これらのいずれもが種々の問題点をかかえている。測定装置としては実際に使用される環境内で、所要精度の少なくとも 1/5 の測定精度を保証することが必要であると Tipton⁴⁾は述べているが、旋削中の測定では表面粗さや振動などの影響を受け、さらに切削油剤や切りくずなどの悪い環境下で測定を行うため、これまでの測定装置の性能は要求精度まで十分達しているとは言い難い。このように実際の切削環境下において、

使用に耐え得る良好な測定装置の開発が現在の GAC の大きな課題とされている。有力な測定法として光学的方法による装置も種々開発されているが、外乱の対策法に関する報告は見当たらない。

筆者はすでに光学的方法による工作物寸法誤差のインプロセス測定装置を創案し、それによる良好な寸法制御結果を得ている¹¹⁾。装置の製作及び使用に際しては種々の外乱に対する対策を施し、測定精度を確保するようにした。それによって本装置が実際の使用にかなり耐えるものであることが確かめられ、あわせて今後さらに良好な測定装置を開発する際の指針が得られた。そこで本報告ではインプロセス測定における種々の外乱の中の、表面粗さ、振動、検出遅れ及び曲面の各影響についての対策法を実験的に検討する。

2. インプロセス測定装置の概要

測定装置の詳細は前報¹¹⁾において報告したので、ここでは簡単な説明にとどめる。図 1(a)に示すように切削直後の工作物の寸法誤差を検出できるよう、刃先直下 1 mm の工作物表面に $\phi 0.7$ mm のレーザ光を照射し、その表面上のレーザスポットの像を、レーザ光軸から鉛直方向 θ の角度で置かれた受光装置 D 内の光導電素子

* 原稿受付 昭和 54 年 5 月 1 日。精機学会日立地方講演会(昭和 50 年 10 月 9 日)にて発表。

** 正 会 員 茨城大学工学部(日立市中成沢町 4-12-1)

図1 インプロセス測定装置の概要

上に結ぶ。レーザスポットは寸法誤差に応じて変位するから、その変位量を実像の移動量、すなわちA, B 2個の光導電素子の差動的抵抗変化として取り出し、ブリッジ回路で電圧に変換して測定するという極めて簡単な方法である。特性試験の結果、測定装置の分解能は $1\mu\text{m}$ となっている。なお本報告では図のように素子A, Bの間に円形の黒色遮蔽板S(大きさは $\phi 6.0\text{mm}$ で実像より若干小さい)を用いているが、測定原理は前報と同様で、実像の縁の部分を検出して測定が行われる。

光学的方法とした理由は、切削油剤や切りくずの影響を小さく抑えるよう測定点から受光装置までの距離を大きくとるためであり、この調節は光学系によって自由に行えるからである。またそれらの影響をできるだけ回避するため、測定系に保護カバーPを取付けた。レーザ光の照射方法としては、工具及び刃先の強度を考えてそれらに穴加工などをせず、(b)に示すように横切れ刃角を -5° にして行った。レーザ光(He-Ne ガスレーザ、波長 $0.63\mu\text{m}$)を用いた理由は、高輝度であること及びレ

ンズで容易にスポットを小さく絞れることによる。

なお実験における諸元は以下のごとくである。

旋盤：池貝鉄工製 ANC 25 型二軸制御旋盤、ベッド上の振り 500mm 、両心間最大距離 1000mm

被削材：構造用炭素鋼 S 45 C、炭素工具鋼 SK 2 (各 $\phi 75\text{mm} \times 300\text{mm}$)

切削条件：切削速度 $110 \sim 181\text{m/min}$ 、送り $0.08 \sim 0.1\text{mm/rev}$ 、切込み $0.3 \sim 0.5\text{mm}$ 、工具：超硬 P 10 (0, 6, 6,

6, 30, $-5, 0.5$)

3. 表面粗さの影響

工作物表面からの反射光は表面粗さに依存するので、粗さの違いが測定に影響すると考えられる。これを調べるのに反射光の取扱いを波動光学的立場と幾何光学的立場とに分けて検討する。

3.1 波動光学的立場

照射光としてコヒーレント光を用いていることから、反射光にスペックルパターンが生じ、その強度は粗さに関係する。そこで本測定法に関しては主にスペックルの大きさが問題となる。図1の観測系における結像面のスペックルの平均的な大きさ d は、 R をレンズ瞳の径、 l を像面距離、 λ をレーザ光の波長とすると、

$$d = \frac{L}{R} \lambda \quad (1)$$

で与えられる¹²⁾。つまりスペックルの平均的な大きさは粗さに無関係で、観測系により決まる。それが十分小さ

図2 実像の強度分布測定結果

図3 ビーム径の大きさによる表面粗さの影響

くなるように観測系が設定されれば、受光部内の実像はあたかもスペckルがなく、全体が一樣な明るさを示すかのように見え、スペckルパターンの測定への影響が小さく抑えられるものと考えられる。図2は式(1)に従い $d = 0.74$ 及び $8.7 \mu\text{m}$ となるように観測系を設定した場合、粗さの異なる工作物について、受光部内の実像の強度を $\phi 0.08 \text{ mm}$ のピンホールを持つ光導電素子により求めた結果である。図は実像の中心から半径方向への距離を η とし、 $R_{\text{max}} = 13.4 \mu\text{m}$ のときの像の中心 ($\eta = 0$) の強度を1に正規化してある。データより d が $0.74 \mu\text{m}$ の場合はいずれの表面粗さについてもほぼ同じような強度分布が得られているのに対し、 d が $8.7 \mu\text{m}$ ではこれらの特性と異なり、 R_{max} の値によって分布状態が違ってくることから、スペckルの大きさが影響しているのが認められる。また特に d が大きい場合は、粗さの減少に伴い強度が減少する傾向が見られるが、これは表面が滑らかになるとスペckルパターンのコントラストが低下することから説明できる¹³⁾。実像の大きさは $\phi 6.4 \text{ mm}$ で、図のように強度は η の増加と共に急激に減少し、像の輪郭の $\eta = 3.0 \text{ mm}$ 以降では減少がゆるやかとなる。これは像本来の強度性質によるものであり、そのため輪郭付近は d 及び R_{max} の相違による強度分布の違いが目につかず、ほぼ同じような分布特性となっている。

以上よりスペckルパターンの影響を小さく抑えるため、観測系として $d = 0.74 \mu\text{m}$ 程度となるよう $L = 50 \text{ mm}$ 、 $R = 40 \text{ mm}$ とし、さらに図2において強度分布の違いが目につく実像の $\eta = 3.0 \text{ mm}$ までを黒色遮蔽板S (図1(a)参照)で遮蔽した。

3.2 幾何光学的立場

照射するレーザー光のビーム径が小さくなると、工作物

表面からの反射光分布は表面の微小素面の傾きに依存するようになる。仕上切削における送り量を考えれば、工作物表面の送りマークは大略 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ となるから、これがビーム径を決める一つの目安となる。図3は粗さの異なる工作物について、ビーム径を変えた場合の工作物変位量 Δd と測定装置出力電圧 E_o との定常特性を調べた結果である。ビーム径 $\phi 0.08 \text{ mm}$ の場合は粗さの増加と共に測定値のばらつきが大となり、特に微小素面の傾きの影響を受けやすいと考えられる送り 0.2 mm/rev についてはそれが著しい。これに対し $\phi 0.7 \text{ mm}$ では粗さが増加してもばらつきは全体的に小さく抑えられ、良好な線形関係にある。これはビーム径が大きい場合には、表面からの反射光が受光部で平均的にとらえられるためと考えられる。受光角 θ を変えた場合ばらつきの程度に大きな違いは認められない。 $E_o \propto \Delta d \sin \theta \propto \Delta x \sin \theta^{10)}$ (Δx : 実像の移動量) の関係から得られるように、 θ を大きくすれば出力は大となるが、それによって線形範囲は減少する ($\theta = 10^\circ$ で $310 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 20^\circ$ で $140 \mu\text{m}$ の線形範囲となっている)。

これよりビーム径は送りマークの大きさを考慮した上である程度大きくする必要があり、この考え方は検出端にノズルを用いるような空気式測定法にも適用できるものと考えられる。また測定装置の線形範囲を大きくするには受光角度 θ を小さくすることである。

4. 振動の影響

旋盤における振動には、電動機や制御系内に存在する強制因子によって生ずる強制振動と切削機構に関連して発生する自励びり振動とがあり、これらの振動振幅が増大すると測定に影響する。図4(a)は本測定装置による種々の振動測定結果を、比較的振幅が大きい場合につ

図4 本測定装置による振動測定例

いて示したものである。各データについて周波数及び入力換算振幅を調べると、① 2.5 Hz, 10.1 μm , ② 数十 Hz, 8.8 μm , ③ 13.5 Hz, 6.8 μm となり、NC 旋盤における寸法精度限界が1~10 μm であることを考えると、これらの影響は大きい。そこでこれらのノイズを除去するため遮断周波数1 Hz, 落込み特性を24 dB/octとした低域フィルタ回路を用いることにした。これによって図4(a)の中では影響が最も大きい周波数2.5 Hzの無負荷時の振動振幅は0.6 μm まで減衰することになり(フィルタの特性として、周波数2.5 Hzでは出力が-24.6 dBとなり、 $20 \log 17 \div 24.6 \text{ dB}$ から $10.1/17 = 0.6 \mu\text{m}$)、測定結果にはほとんど現れないと考えられる。同図(b)はこれを確かめたデータで、ほぼ(a)に近い振動状態にフィルタを用いて得られた結果である。図を見るといずれの場合も振幅は認められないくらい著しく減衰しており、フィルタの効果が現れている。

さて本来ならば、このような平滑化は測定装置の分解能を低下させるため好ましいことではない。一方前報¹¹⁾で述べたように切削中の測定では、工作物の回転と $\phi 0.7 \text{ mm}$ のビーム径によって送り方向の工作物表面の凹凸がもともと平滑化されて測定され、微小な変化分などは検出されない状態にある。これを確かめるため、まず図5(a)に示す方法により送り方向の表面凹凸を調べることにした。図において、切削点Pより工作物表面上、回転軸方向への直線Zの任意の位置に反射板を取付け、

光電式パルス検出器を用いて工作物1回転ごとのパルスを得るようにする。レーザスポットは直線Zの近傍を走査して行き、その時切削中に得られる表面測定結果は例えば(a)の①となる。②は上述の1回転ごとのパルス列を示したものであるから、これらのパルスに対応する①のデータの×印点の値は直線Zに沿う送り方向の凹凸を、また×印間の値は円周方向のそれを表していると解釈できる。従ってサンプリング点である×印点での値のみを求めて行けば、切削中における送り方向の凹凸が得られる。そこで図のように本測定装置からの出力をA-D変換し、と同時に光電式パルス検出器からのパルス信号をマイクロコンピュータに入力する。このパルスに対応する測定データの値をメモリーにストアし、測定終了後D-A変換を行ってサ

ンプルされた値のみを記録した。(b)にその一例を示す。これは次の図6(a),(b)の②に示す原波形について求めたもので、結局図5(b)と図6②の結果を比較することにより、切削中の表面凹凸の測定状態が把握できる。図5(c)はこの両者を比較プロットした結果で、工作物長さ60 mmについて示してある。上記の方法ではサンプリング間隔によってデータの波形は異なるが、切削時の送り量を考えればサンプリング間隔は狭い。(c)のように切削条件が異なるにもかかわらず、いずれの場合も両者はほぼ一致しており、これによって切削中は送り方向の表面凹凸が測定されることが確かめられた。

図6(a),(b)のデータは、① 工作物を回転せず送りのみをかけた場合、② 切削中、③ 前述のフィルタ回路を切削中に用いた場合の表面測定結果である。図5(c)の結果から、図6(a),(b)における①と②のデータに含まれる情報は本質的に同じとなり、それらを比較評価することの妥当性は立証される。図において(a)と(b)では切削条件は異なり、いずれも①については高周波成分が大きく現れている。これに対し②の切削中ではそれらが平滑化されており、(a),(b)いずれの場合も周波数が1 Hz以上の高周波成分などはもともと検出されておらず、フィルタを用いた③の結果と大略一致していることがわかる。

以上より切削中の測定では、低域フィルタ回路を用いてもそれによる測定精度の低下という問題は起こらず

図5 送り方向の表面凹凸

図4に示したように振動の影響のみを除去できる。

5. 検出遅れの影響

本測定は刃先直下 Δl の位置にレーザ光を照射して行われる。従って工作物軸方向の検出遅れはないが、段付き丸棒のように工作物径が変化する場合、切削点と測定点とのギャップ Δl に相当する検出遅れのためレーザスポットが変位し、測定誤差を生ずる。図7(a)において工作物半径が r_1 から r_2 に変化し、それに伴いスポットが Q_1 から Q_2 に移動したとする。このとき次式で示されるスポットの変位量 $\Delta a(=P_2Q_2-P_1Q_1)$ に相当する測定誤差を生ずる。

切削速度：120m/min，送り：0.1mm/rev，切込み：0.5mm，
工作物：S45C，工具：超硬P10

(a) 例1

切削速度：181m/min，送り：0.08mm/rev，切込み：0.3mm，
工作物：S45C，工具：超硬P10

(b) 例2

図6 工作物表面の測定例

Δl (mm)	Δa (μm)
1.0	6.6
0.7	3.3
0.4	1.0
0.3	0.6

(b) Δl と Δa との関係の変位

図7 検出遅れの影響

$$\Delta a = r_2(1 - \cos \varphi_2) - r_1(1 - \cos \varphi_1) \approx \frac{\Delta l^2}{2} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (2)$$

実験では工作物径は主に $\phi 75$ mm から $\phi 50$ mm の間で切削しているので、例としてこの範囲の径の変化によるスポットの変位量を式(2)より求める。 $\Delta l = 1.0$ mm, $r_1 = 37.5$ mm, $r_2 = 25$ mm より $\Delta a = 6.6 \mu\text{m}$ となり, $r_1 = 37.5$ mm に対して測定装置の初期調整を行うとすれば、直径で $13.2 \mu\text{m}$ の測定誤差を生ずる。この誤差は Δl のわずかな減少で急激に小さくすることができる。そ

図8 検出遅れに伴う測定誤差の実測値

の効果を式(2)を用いて調べた結果を図7(b)に示す。計算結果より例えば $\Delta l = 0.4\text{mm}$ のときは $\Delta a = 1.0\mu\text{m}$ となり、測定誤差は極めて小さくなる。そのための方法としてスポット径を現行の $\phi 0.7\text{mm}$ より小さくし、レーザ光をさらに刃先近くに照射できるようにすることである。これは必ずしも困難なことではなく、実際にスポット径を $\phi 0.4\text{mm}$ まで絞り、 $\Delta l = 0.4\text{mm}$ とすることが可能であった。問題はスポットを小さくすることによりすでに指摘した表面の凹凸の影響が大きくなるということである。上記のスポット径 $\phi 0.4\text{mm}$ は仕上切削時の送りマークの2~4倍程度の大きさと推察されるが、この程度のスポット径であれば表面凹凸の影響は小さく、かつ $\Delta l = 0.4\text{mm}$ にして遅れの影響も小さくできると考えられる。

図8はこれを確かめたデータである。これは①に示すように長さ250mm、テーパ1/10に切削した工作物S45Cの表面測定を行った結果である。この場合、工具の熱変形によって工作物径が減少する寸法誤差が現れ、そのまま測定したのでは意味がないので、補正切削を施した後測定した。測定装置の初期調整は A_1 点で行い、測定方向を $A_1 \rightarrow A_2$ とした。まず $\Delta l = 0.4\text{mm}$ の②の場合、 A_2 点での測定値を見ると測定開始点の A_1 点の値とほとんど変わらず、計算でも $1.0\mu\text{m}$ と示されたように測定誤差は無視し得る程小さい。これに対しギャップ Δl が大きい③の場合は、 A_2 点での測定誤差が約 $7\mu\text{m}$ と大きく、計算結果の $6.6\mu\text{m}$ に非常に近い。②と③を比較した場合、スポット径が小さい②のデータの方に微小な変化が若干多く現れ、表面の凹凸の影響を受けているようにも見受けられるが、この程度の微小な変化は測定上の支障とはならない。

6. 曲面の影響

工作物表面が曲面を持つ場合、この曲面を測定物体の

(b) 実像の強度分布測定結果

図9 測定物体が傾き角 α を持つ場合

傾き角 α で置き換え、図1の測定系に従って示した図9(a)の測定状態について考察する。測定物体が傾いて α が増加すると受光装置に入射する光量が減少し、その光量は物体表面の形状に関する。金属表面は拡散反射を考えると考えられ、拡散光の角度依存性は容易には求められないため、この解析的取扱いは困難である。一方、本測定法では受光部内の実像は大部分が遮蔽されており、寸法誤差によって実像の輪郭部分が光導電素子上へ移動して測定が行われるから、 α の増加に伴う実像の輪郭付近の強度減少を実験的に調べることで、 α の影響を把握できる。

図9(b)の①のデータは図2の場合と同様の方法により α を変えた場合の実像の強度を実測した結果で、 $\alpha = 0^\circ$, $\eta = 0$ のときの強度を1に正規化してある。これを見ると実像の中心付近の強度減少は大きい、議論の対象となっている輪郭付近の $\eta = 3.0\text{mm}$ について、データの $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 45^\circ$ における強度を $I_0, I_{10}, I_{20}, I_{45}$ とし、 I_0 に対する強度比を求めると、 $I_{10}/I_0 = 0.96$, $I_{20}/I_0 = 0.93$, $I_{45}/I_0 = 0.88$ となり、各比の値の違いは比較

図10 α を変えた場合の測定装置の定常特性

的小さく抑えられていることから、輪郭付近は α の影響が小さいことがわかる。これはすでに述べた像本来の強度性質によるばかりでなく、レーザ光の可干渉性が寄与しているものと考えられる。同図(b)の②はこれを確かめたデータで、光源としてレーザ光の代わりにスポット径を $\phi 0.7\text{ mm}$ とした白色光(タングステンランプ)を用いた結果である。図よりレーザ光を用いた場合に比べて α の増加に伴う強度減少が全体的に大きく、 $\alpha > 40^\circ$ では測定不可能となっており、またレーザ光の場合のように $\eta = 4.0\text{ mm}$ 付近までの測定が困難であった。この両者の相違はレーザ光と白色光との干渉度の違いによって生じたものと考えられ、このことから本測定法にレーザ光を用いた意義が認められる。

図10は図3の場合と同様の方法で α を変えた場合の測定装置の定常特性を調べた結果である。これを見ると α を 0° から 40° まで変えた場合の測定誤差は、変位量 $20\text{ }\mu\text{m}$ について約 $3\text{ }\mu\text{m}$ 以内に収まっており、変位量が小さく、かつ傾き角が 40° 付近までであれば α の影響が小さいことが確かめられる。

7. 結 論

本報告によって次の結論が得られた。

- (1) 結像系に基づく寸法測定においては、その測定法として像の輪郭部分を用いることにより、スペックルパターンや測定物体の傾きの影響を小さく抑えることができる。
- (2) 表面粗さの影響を小さくするには、送りマークの大きさを考慮した上で検出端を大きく(送りマーク

の2~3倍以上)することである。

- (3) 振動の影響を除去するためには低域フィルタ回路の使用は有効であり、工作物表面の測定状態を考えると、それを用いたことによる測定精度的な問題は起こらない。
- (4) 検出遅れを小さくするには切削直後を測定する必要がある、そのためには(2)の表面粗さの影響を考慮した上で検出端を小さくして、それを刃先に近接できるようにすることである。これを考えると光学的測定法は適当と考えられる。またこの方法は検出点から観測位置までの距離を大きくとれる利点を持つ。
- (5) レーザ光を用いる利点は、ここでは曲面の影響を小さく抑える役割の一端をも担い得る点にある。

参 考 文 献

- 1) M. G. Jona: Contribution to the Development of Geometrical Adaptive Control in Turning, Proc. 11th Int. MTDR Conf., Sept. (1970) 429.
- 2) M. G. Jona: Scope and Possibilities of Geometrical Adaptive Control, Ann. CIRP, **XIV**, (1971) 305.
- 3) J. Peklenik: Geometrical Adaptive Control of Manufacturing Systems, Ann. CIRP, **XVIII**, (1970) 265.
- 4) H. Tipton: In-process Measurement and Control of Workpiece Size, Reprint from MTP, Oct. (1966) 93.
- 5) M. Bath and R. Sharp: In-process Control of Lathes Improves Accuracy and Productivity, Proc. 9th Int. MTDR Conf., Sept. (1968) 1209.
- 6) Th. Stöferle and B. Bellmann: Continuous Measuring of Flank Wear, Proc. 16th Int. MTDR Conf., Sept. (1975) 531.
- 7) G. Spur u. F. Leonards: Sensoren zur Erfassung von Prozesskenngrößen bei der Drehbearbeitung, Ann. CIRP, **24/1**, (1975) 349.
- 8) G. Spur u. F. Leonards: Kontinuierlich arbeitende Verschleißsensoren für ACO Systeme bei der Drehbearbeitung, Randolph Haufe Verlag, Freiburg/Br., (1978) 517.
- 9) D. Bake, J. Gantlin u. F. Piwonka: Entwicklung neuer Sensoren für geometrische AC-Systeme an Drehmaschinen, ZWF 68, **1**, (1973) 14.
- 10) 竹山秀彦, 高田孝次: 旋削加工精度のインプロセス制御, 精密機械, **43**, 3 (1977) 343.
- 11) 白石昌武: 旋削加工における工作物の寸法制御, 精密機械, **45**, 2 (1979) 208.
- 12) 山口一郎: レーザスペックルを用いた変形測定, 精密機械, **40**, 9 (1974) 739.
- 13) H. Fujii and T. Asakura: Roughness Measurements of Metal Surfaces using Laser Speckle, J. Opt. Soc. Amer., **67**, 9, (1977) 1171.