旋削加工における工作物の寸法制御*

白石 昌武**

A Dimensional Control of Workpiece in Turning Operation

Masatake SHIRAISHI

The present paper deals with a feedback control of workpiece dimension in finish turning operation on an NC-lathe. In order to perform the control, a new equipment is developed by making use of laser tube and photoconductive cell. The measuring method is quite simple and effective results are obtained through various experiments. Tool post is automatically moved in the direction to reduce the error and as a consequence, the diameter error was suppressed within $\pm 15 \mu\text{m}$ by the control.

1. 緒 言

NC 旋盤の発展は目覚ましいものがあり、その制御方式にはいろいろあるが、工作物寸法に対して工具刃先からのフィードバックは行われていない。切削中に生ずる種々の誤差要因が寸法精度に及ぼす影響は大きく、NC 旋盤と言えどもその位置決め制御のみでは十分な精度が得られないことは周知の通りである。そのためこれまでも工作物寸法に関する最適制御の研究がいくつか試みられ^{1)~5)}、成果が得られている。

本報告では、レーザと光導電素子を用いた光学的方法による非接触寸法測定装置を試作している。測定法は半径法による極めて簡単な方法で、仕上切削を対象とした場合の諸測定において、安定性、精度共に使用に十分耐える結果が得られた。そこで、測定装置を NC 旋盤に適用し、自動的に補正が行える装置を組込んで工作物寸法のフィードバック制御を実施した。工作物寸法の精度限界は NC 装置の最小設定単位に依存し（ここでは直径で $\pm 10 \mu\text{m}$ ）、制御の結果直径誤差は最小設定単位に近い約 $\pm 15 \mu\text{m}$ 以内に抑えられたので、以下にその詳細について述べる。

2. 非接触寸法測定装置

2.1 寸法測定法

図 1 に測定装置の概要を示す。レーザ装置 L (He-Ne ガスレーザ、波長 $0.63 \mu\text{m}$ 、出力 0.6 mW) を刃物台に取付け、切削直後の工作物の寸法測定が行えるよう、工具刃先直下 1 mm の工作物表面に、水平方向からレーザ

光を工作物回転中心に対して直角に照射する。工作物表面は拡散反射を考えると考えられ、照射された場所は二次光源 (大きさ $\phi 0.7 \text{ mm}$) となるから、この光源からの反射光の一部をレーザ光軸から鉛直方向 θ の往復台上に取付けられた受光装置で検出する。すなわち反射光を光学系 O で集光し、矩形窓 M を通して受光部 D の中央部にほぼ矩形形状の実像 (縦 7.6 mm 、横 2 mm) を結ばせる。受光部には CdSe 光導電素子が配置されており、CdSe は図の斜線で示すように一對の電極をはさみ、矩形形状のもの 2 個 (A および B、縦 8 mm 、横 2 mm) が上下方向に焼結されている。したがって実像が受光部の中央に位置している場合は A と B の照射面積は等しく、それらの抵抗値は同じである。いま誤差要因によって工作物半径が点線のように Δd だけ微小変位したとすると、実像は受光部上 P_1 から P_2 まで $P_1P_2 = \Delta x$ だけ移動し、A と B に入射する光量に差が生じて、移動量に応じた差動的抵抗変化が得られる。この抵抗変化を図 2 のブリッジ回路で電圧に変換し、直流増幅器を通して記録計および電圧

図 1 測定装置の概要

* 原稿受付 昭和 53 年 5 月 20 日。精機学会郡山地方講演会 (昭和 50 年 6 月 7 日) および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)

R_A, R_B : CdSe A, B の内部抵抗, R_C : ブリッジ調整用抵抗

図2 ブリッジ回路

計を動作させる。

工作物の変位量とブリッジ出力電圧との関係を求めるため、各記号を次のように定める。

a : 二次光源から光学系 O までの距離, f : 光学系 O の焦点距離, d_1 : 二次光源の大きさ, d_2 : 実像の大きさ (縦方向の大きさ) とすると,

$$d_2 = \frac{f}{a-f} d_1 \quad (1)$$

となる。工作物に Δd の半径誤差が生じた場合の実像の移動量 Δx は、式 (1) で $a \rightarrow a + \Delta d \cos \theta$, $d_1 \rightarrow \Delta d \sin \theta$ として求められるから、 $a \gg \Delta d \cos \theta$ を考慮すると、

$$\Delta x \approx -\frac{f}{a-f} \Delta d \sin \theta \quad (2)$$

となる。

また光導電素子の特性として、内部抵抗 R は近似的に表面照度 L_s と照射面積 S の積に反比例し、この場合 L_s は一定と考えて、

$$R \propto \frac{1}{S} \quad (3)$$

となる。実像が Δx だけ移動した場合は図1より $\Delta S = k \Delta x$ (k : 定数) と表せるから、式 (3) について次式が得られる。

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{\Delta S}{S} = -\frac{k \Delta x}{S} \quad (4)$$

次に図2でブリッジ出力電圧 E_o は次式となる。

$$E_o = \left(\frac{R_B}{R_A + R_B} - \frac{1}{2} \right) E_i \quad (5)$$

ブリッジの平衡状態から、実像の移動によって A, B の内部抵抗 R_A, R_B がそれぞれ $R_A = R - \Delta R$, $R_B = R + \Delta R$ と変化した場合には、式 (5) は次式となる。

$$E_o = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} E_i \quad (6)$$

したがって式 (2), 式 (4), 式 (6) から

$$E_o \approx -\frac{1}{2} \frac{k f E_i \sin \theta}{S(a-f)} \Delta d \quad (7)$$

となり、工作物の変位量 Δd とブリッジ出力電圧 E_o と

(a) 旋盤の静止状態

(b) 切削中

(c) 旋盤の静止状態で低域フィルタ回路を通した場合

切削速度: 116 m/min, 切込み: 0.3 mm, 送り: 0.08 mm/rev, 工作物: 炭素工具鋼 SK 2 ($\phi 74$ mm $\times$ 300 mm), 工具: 超硬 P 20

図3 工作物表面の測定例

は線形関係にある。

2.2 寸法測定装置による諸測定結果

測定装置の寸法測定の妥当性を確かめるため、NC 旋盤にこれを取付け、諸測定を試みた。旋盤はベッドの振り 500 mm, 両心間最大距離 1 000 mm の二軸制御旋盤で、同時二軸制御装置を備えている。測定に当たり、切削中の発煙、切削油剤、切りくずの影響に対しては、測定点に空気 ($2.2 \text{ kgf/cm}^2 \cdot \text{gage}$) を吹付け、受光装置に保護カバーを取付けるなどの対策を施した。レーザ光の輝度が高いこともあって、発煙や多少の切削油剤に対してはほとんど影響ないことが確かめられている。また各種の振動および工作物表面の凹凸の影響については、測定信号をフィルタを通して平滑化した。この場合、切削中の振動には、旋盤の強制振動とびり振動とが考えられ、実験の結果前者については数 Hz, 後者については十数 Hz 以上のものが測定に影響することがわかった。また工作物を切削中に測定する場合と旋盤の静止状態で測定する場合とでは、その表面の測定状態が異なってくる。図3(a)は炭素工具鋼 SK 2 を外周切削した後、その表面を旋盤の静止状態で往復台のみを移動させて測定した結果の一部である。また(a)について、送り速度を(a)の場合と同じくして切削中に測定した結果を(b)に示す。(a)と(b)とではデータにかなりの相違が見られ、(a)の場合は送り方向の凹凸に対応したデータが得られているのに対し、(b)では凹凸が平均化され、分解能が低下して図のような結果になっている。つまり(b)の場合は二次光源が $\phi 0.7$ mm の大きさを持つので、送り速度 0.08 mm/rev に対し測定の際は 8 周期分 ($0.7 / 0.08 = 8.75$ より) の送りマークを含み、この分の送り方向の凹凸も測定しながら円周方向の測定が行われる。円

図4 工作物の変位量に対する測定装置出力電圧の定常特性

周方向の凹凸はもともと送り方向のそれに比べて小さく、したがってこの場合に測定される凹凸は送り方向のそれが大部分と考えられ、しかもその凹凸が回転のため分解能の低下により平均化されて見え、結局送り方向の平均化された凹凸を測定して行くようになる。この両者の違いは、(a)の静止状態での測定値に約2 Hz以上の高周波成分が含まれているため生じたものであり、(a)の測定では切削条件を種々変えた場合にも、二次光源の大きさ $\phi 0.7$ mmに対しては上の例と同程度の高周波成分が得られている。したがってこの両者の測定状態をできるだけ同じくするには、(a)の測定における2 Hz以上の高周波成分を除去し、平滑化すればその目的が達成される。そこですでに述べた振動の影響も考え、遮断周波数1 Hz、フラット領域から遮断周波数への落込み特性を24 dB/octとした低域フィルタ回路を用いることにした。図3(c)は(a)の場合について、フィルタを通した結果で、(b)の切削中のそれとかなり近づいたデータとなっている。

まず式(7)に示した線形関係を確かめるため、工作物の変位量に対する測定装置出力電圧の定常特性試験を行い、図4の結果を得た。データから $\theta=10^\circ$ および 20° のいずれの場合についても良好な線形性が得られており、同一変位量に対する出力電圧をそれぞれ E_{10} および E_{20} とすると、式(7)に示されたように $E_{10}/E_{20} \approx \sin 10^\circ / \sin 20^\circ$ がほぼ成立する。

次に図5は工具摩耗に伴う工作物径の変化を、(a)切削中と、(b)切削終了後室温静止状態で往復台のみを動かして測定した場合との結果を示したものである。摩耗の影響が大きく現れるように、炭素工具鋼SK2を超硬P20で切削を行った。データから主軸側に向かって工作

図5 工具摩耗に伴う工作物径の変化の測定例
切削速度: 176 m/min, 送り: 0.06 mm/rev, 切込み: 0.3 mm,
工作物: SK2 ($\phi 70$ mm $\times$ 250 mm), 超硬 P20, 乾切削

図5 工具摩耗に伴う工作物径の変化の測定例

物径が増加しており、(b)より切削終了時における半径誤差は10 μ mとなっている。切削終了後の刃先を顕微鏡で測定したところ12 μ mの刃先後退が認められ、(b)に示された誤差10 μ mにかなり近いこと、さらに(a)と(b)との測定結果に大きな違いがないことから、誤差の主原因は工具摩耗であり、工作物全長にわたって安定かつ正確に寸法測定が行われていると判断できる。

ここで測定誤差について考えてみる。本測定法は図1に示したように工作物半径の変化を測定する方法であり、したがってその場合には工作物と測定装置間の相対変位による測定誤差が問題となる。その主なものとしては①工作物のたわみによる誤差、②縦送り案内面と工作物回転中心との平行度の狂いによる誤差、③機械の駆動系のガタによる誤差が考えられる。

解析によればセンタ作業における工作物のたわみの最大値 $\delta_{\max}$ は次式で与えられる⁶⁾。

$$\delta_{\max} = \frac{64FL^3}{3\pi ED^4} (17 - 12\sqrt{2}) \quad (8)$$

ここに、 F : 背分力 (kgf), L : 工作物長さ (mm), D : 工作物直径 (mm), E : 工作物のヤング率 (kgf/mm²) である。本報告は仕上切削を対象としており、その場合に切削条件を種々変えて切削動力計で背分力を測定したところ、最大で50 kgfであった。これは $\phi 75$ mm $\times$ 450 mmの炭素工具鋼SK2を切込み0.5 mmで切削した場合で、そのときの最大たわみ量を式(8)より求めると、 $E = 4.0 \times 10^4$ kgf/mm²より $\delta_{\max} = 0.6$ μ mとなり、極めて小さな値である。この結果から判断すると特に工作物径が小さくなったり長さが長くなれば限り、仕上切削では工作物のたわみによる誤差は小さいものと考えられる。

旋盤の機械的精度は、機械の調整によってかなり向上させることができる。使用したNC旋盤については、JIS B 6202の精度検査法に基づき主なる部分について調整を行い、良好な結果を得ている。しかし静的状態での精度が良好であっても、上に述べた②の平行度の関係

図6 図5(b)について本測定値とUMMによる測定値との比較

図7 実験装置の構成

は旋盤の熱的状態などによって変化するため一概に論ずることはできない。ここで言えることは、図5の(a)と(b)のデータを比較した場合に両者に大きな相違がないことから、機械の変形による影響は比較的小さく、したがって半径法による寸法測定でも使用に十分耐えるものであるということである。

図6は図5(b)について、万能測定顕微鏡(以後 UMM と略す) による測定結果との比較を行ったものである。本測定法による値は、測定値をそのまま2倍して直径誤差として示してある。UMMによる測定値には、装置自体が持つ測定誤差 $\pm 2 \mu\text{m}$ が含まれており、一方本測定値にはすでに述べたような測定誤差が含まれるため、測定結果の比較評価は極めて困難であるが、データから両者がほぼ同じ傾向を示していることは、本測定法による測定の正確さを立証するものと考えて差支えない。

3. 実験装置と寸法補正法

寸法制御においては、寸法測定値が精度限界を超えた場合に補正を要する。精度限界はNC装置の最小設定単位に依存し、ここではそれが直径で $\pm 10 \mu\text{m}$ である。図7に自動補正を行うために製作したパルス発生装置と実験装置全体の構成を、また図8には寸法制御の簡略化し

図8 寸法制御の簡略化したブロック線図

たブロック線図を示す。

図2のブリッジ回路で電圧に変換された測定信号は、低域フィルタ回路および直流増幅器を通り2台のコンパレータに接続され、あらかじめ設定された基準電圧との電圧比較が行われる。測定電圧がその符号に対応する側のコンパレータの基準電圧を超えた場合にはコンパレータが動作し、リレー回路が働いて1パルスを発生する。このパルスでNC装置の送り機構を駆動し、刃物台を最小設定単位だけ工作物径方向に進退させて補正する。レーザ装置は刃物台に、受光装置は往復台に取付けられてあるので、補正直後のブリッジ回路は原理的には再び平衡状態となる。実験では $\theta = 20^\circ$ にして受光装置を取付け、その場合には変位量 $5 \mu\text{m}$ が測定装置出力電圧 $E_v = 0.2 \text{ V}$ に対応するので(図4参照)、工作物に $5 \mu\text{m}$ の半径誤差が生じた時点で1パルスの補正ができるよう、コンパレータの基準電圧 $\pm E_r$ を $\pm 0.2 \text{ V}$ に設定した。測定中切りくずが受光装置先端にからみ付き、測定不可能となるようなやむなき状態の場合は、シーケンス回路を動作してパルス発生装置の誤動作を防ぐとともに、その影響が取除かれるまで測定および送りを自動的に一時中断した。

測定系の調整は、工作物を切削開始点から 2 mm 切削した時点で送りを一時停止し、ブリッジの平衡をとって行い、以後切削および測定を続行した。

4. 寸法制御結果

実験は仕上切削に対して行い、乾切削および切削油剤としてスピンドル油を用いた場合について試みた。工作物には構造用炭素鋼 S45C と炭素工具鋼 SK2 を、またチップには超硬 P20 を用いたが、この組合せは工具摩耗や工具の熱膨張などの誤差要因によって生ずる寸法変化ができるだけ大きく現れるように選んだものである。切削終了後工作物を室温になるまで放置した後、旋盤の静

切削速度：120 m/min，送り：0.08 mm/rev，切込み：0.3 mm，工作物：S45C ($\phi 76 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$)，乾切削
図9 寸法制御による工作物径の変化の測定記録

止状態で往復台を移動させ、本測定装置で寸法測定を行った。

図9はS45Cについて、(a)切削中、(b)切削終了後室温静止状態、(c)寸法制御を行わない場合の結果を示したものである。同様に切削条件を変えた場合についての結果を図10に示す。

実験結果全体を通じて寸法制御の効果が良く現れている。まずS45Cの切削では主軸側に向かって工作物径が減少していることから、工具の熱膨張が誤差の主原因と考えられ、2回の補正(図中●印)を行って切削を終了している。測定装置のブリッジ回路は補正パルス発生後直ちに再び平衡状態となる訳であり、図9(a)の切削中の測定装置出力を見ると、補正パルス発生直後にはほぼゼロになっている。このようにして切削した工作物を室温まで冷却して再び寸法測定を行った同図(b)の結果を見ると、(a)の補正直後の測定装置出力がゼロになった所でやはり測定装置出力はゼロに近い値となっている。このことから工作物の熱変位も小さいものと考えられる。(a)の測定では2回切りくずが短時間レーザ光を遮ることがあったが、その影響を除いては(a)と(b)の測定結果にほとんど差がないことから、切削中における寸法測定の妥当性が再び確かめられる。(c)は(a)と同一切削条件により寸法制御を行わない場合についての結果で、切削終了時では直径誤差が40 μm にも達している。各データを調べると、それぞれの補正時点における実際の補正量が、NC装置の1パルスに対応する10 μm と必ずしも一致してないが、これは主として調整

●：補正位置
図10 寸法制御結果

困難な駆動系のガタなどの機械に基づく誤差によるものと考えられ、そのため精度限界である $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内には入っていない。図9(b)と図10(a)を比較した場合、切削油剤を用いた後者の切削では、その冷却効果のため前者の場合よりも補正時期が遅くなっている(前者の場合の補正は切削開始点から120 mm および 250 mm 付近で行われている)。また切削油剤の使用を除いて他の切削条件が等しいこの両者は、補正位置は異なるが寸法変化

の様子が比較的類似していることから、この程度(約 3 l/min)の切削油剤の使用は測定にほとんど影響ないものと考えられる。これはすでに述べたように切削中に測定点に高圧空気を吹付けて、油膜を大部分取除くようにしたためである。

次に SK 2 の切削では工作物径が主軸側に向かって増加しており、工具摩耗が誤差の主原因と考えられる。切削条件がほぼ等しい(b)と(c)において、切削油剤を用いた後者の場合には、その潤滑効果のためと思われるが前者の場合よりも補正時期が遅くなっている。しかしいずれの場合も2回の補正を行って切削を終了している。切削終了後の刃先を顕微鏡で測定したところ、(b)の場合は 17 μm 、(c)の場合は 14 μm の刃先後退が認められ、このことは2回の補正を必要とすることを意味している。

なお切削条件を種々変えた場合についても、図 9、図 10 の場合と同様に制御の効果が得られている。

以上述べたように、S 45 C および SK 2 のいずれの場合についても、寸法制御により直径誤差は精度限界である NC 装置の最小設定単位(直径で $\pm 10 \mu\text{m}$)に近い約 $\pm 15 \mu\text{m}$ 以内に抑えられ、測定装置によるフィードバック制御の有効性が確かめられた。

5. 結 論

旋削加工中の工作物寸法を非接触で連続検出できる測定装置として、レーザと光導電素子を用いた光学的方法による装置を試作し、それを NC 旋盤に適用して工作物寸法のフィードバック制御を行い、以下に示す結論を得た。

(1) 理論的考察から、工作物の変位量と測定装置出力

電圧とは線形関係にあり、そのことが定常特性試験によっても得られた。

(2) 仕上切削を対象とした諸測定結果から、本測定装置は安定性、精度共に使用に十分耐えるものであることが確かめられた。

(3) 制御の結果、直径誤差は精度限界である NC 装置の最小設定単位(直径で $\pm 10 \mu\text{m}$)に近い約 $\pm 15 \mu\text{m}$ 以内に抑えられ、本測定装置によるフィードバック制御の有効性が確かめられた。

今後の課題として、本報告では半径法による測定でも十分な寸法精度の向上が得られたが、これを直径法で行えるようさらに研究を深める必要がある。

終わりに、本研究を進めるに当たり常に暖かい御教示を賜りました東京工業大学森永智昭助教授に深く感謝致します。また実験に協力して頂いた日本大学大学院生安井明仁氏に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) M. Bath & R. Sharp: In-process Control of Lathes Improves Accuracy and Productivity, Prepr. 9th Int. MTDR Conf., MS, 14, (1968) 1209.
- 2) 竹山秀彦ほか: 旋削加工精度のインプロセス制御, 精密機械, 43, 3 (1977) 343.
- 3) J. B. Richards: Application of Advanced Technology in Precision Numerical-control Machining, ASTM Tech. Paper, MR 69-159, (1969) 1.
- 4) 本多庸悟ほか: 計算機・適応制御旋削加工システムの試み(第2報), 精密機械, 40, 3 (1974) 244.
- 5) 白石昌武ほか: NC 旋盤における工作物寸法制御の一検討, 精機学会日立地方講演会講演論文集(1977) 109.
- 6) たとえば, 日本機械学会編: 機械実用便覧(改訂第3版)(1963) 147.