工作機械上での3点法円筒度測定 に関する研究 (第1報)*

——逐次断面式を用いた場合——

垣野 義昭** 北沢 治郎***

In Situ Measurement of Cylindricity by the 3-Point Method

——In the Case of Successive Sectional Measurement——

Yoshiaki KAKINO, Jiro KITAZAWA

A new method is developed for in situ measurement of cylindricity by employing an extended principle of the 3-point roundness measurement. Different from the measurement performed on a dedicated measuring instrument, the workpiece form error is measured right on the working position by utilizing the spindle rotation and feed motion of the machine tool. In the present paper, described is a method by which the measurements by the 3-point method are processed by digital calculation technique so as to eliminate the substantial rotating error of the spindle and straightness error of the feed motion. Measurements of the cylindrical form error by the 3-point method and those by the radius method are conducted to verify this 3-point method. The results exhibit fairly good agreement of the measured diameter deviation, out-of-roundness error the curvature of axis and cylindricity error by the 3-point method with those measured by the radius method.

1. 緒 言

従来、円筒度の高精度な測定は、軸方向に動かさしうるピックアップを備えた半径法真円度測定器によるしかなかった¹⁾²⁾。しかし半径法真円度測定器においては、非常に高精度な回転軸と基準面を必要とすること、装置に適応性がなく、生産現場での使用に不向きなこと、測定が容易でないこと、インプロセス計測に適していないことなどの問題点がある。

そこで3点法真円度測定法を応用して、工作機械上で円筒度を測定する方法を開発することとした。加工機械とは別個の測定器上に工作物を移して測定する場合と異なり、加工位置に取付けたまま加工機械の主軸の回転運動と直線送り運動を利用して円筒度を測定する場合には、加工機械のもつそれらの運動の誤差が大きいため、それらの影響を排除が必要がある。そのため本研究ではピックアップからの検出量にデジタル処理を施して、測定系の主軸の回転誤差と真直度誤差の影響を除いて、被測定体の円筒形状誤差のみ測定する。

本研究においてはまず逐次断面式を用いた測定法の理論的解析を行い、この結果に基づいて4個のピックアップとマスターを備えた測定器を試作した。次にこの測定器を通常の工作機械に取付けて、中ぐり加工した穴の円筒度を測定した。さらにその結果を半径法円筒度測定器で測定した結果と比較検討した。

2. 円筒形状の数学モデルと理論的解析

2.1 円筒形状の数学モデル

円筒形状は基準円筒に、各断面における直径のばらつき(以後直径偏差と呼ぶ)、真円度プロフィールおよび中心軸の曲がりの三つを総合してできる形状であると言える。そこで円筒形状を表す数学モデル $y(\theta, z)$ を図1に示すように最小自乗法により定まる基準直線の回り、後藤ら³⁾が行ったようにフーリエ展開、直交多項式展開を用いて表すと次のようになる。

$$y(\theta, z) = R_0 + R(z) + \sum_{i=2}^{\infty} C_i(z) \cos(i\theta - \varphi_i(z)) + \sum_{j=2}^{\infty} (e_{xj} \cos \theta + e_{yj} \sin \theta) P_j(z) \quad (1)$$

ここで第2項の $R(z)$ は z の位置における直径である。第3項は z の位置での断面形状をフーリエ展開で表したものである。 $C_i(z)$ はフーリエ係数の i 山の高さ、 $\varphi_i(z)$ は i 山の位相である。第4項は中心軸の曲がり、すなわ

* 原稿受付 昭和53年3月24日。昭和51年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和51年10月12日)および昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和52年10月15日)にて発表。

** 正会員 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)

*** 京都大学工学部

図1 一般の円筒形状

図2 運動誤差を持つ測定系

図3 3点法円筒度測定系

ち z の位置における断面形状の基準直線からの偏心量を表している。 ex_j, ey_j はこの偏心量の直交する2方向成分を z 方向に直交多項式近似したときの j 次の係数である。 j が2次以上であるのは、中心軸の曲がりを最小自乗法に基づいた基準直線の回りで表しているからである。

2.2 測定系における円筒形状の数学モデル

いま図2に示す測定系において1個のピックアップで測定する場合を考える。この場合にはピックアップには前節で述べた円筒形状のほかに、回転軸の振れ回りとピックアップの軸方向の送り運動誤差が検出される。ある高さ z の位置において、回転軸の振れまわりは回転角 θ の位置における基準直線からの偏心量として検出される。これを $y_1(\theta, z)$ とすると次のようになる。

$$y_1(\theta, z) = \epsilon_x(\theta, z) \cos \theta + \epsilon_y(\theta, z) \sin \theta \quad (2)$$

一方ピックアップの軸方向の送り運動誤差の検出量は高さ z の位置において回転角 θ に依存しないから、 $y_2(z)$ で表すと次のようになる。

$$y_2(z) = s(z) \quad (3)$$

結局、図2の測定系におけるピックアップの検出量 $y(\theta, z)$ は式(1)の円筒形状 y_0 に式(2)の y_1 、式(3)の y_2 を加え合わせたものである。すなわち

$$\begin{aligned} y(\theta, z) &= y_0(\theta, z) + y_1(\theta, z) + y_2(z) \\ &= R(z) + \sum_{i=2}^{\infty} C_i(z) \cos(i\theta - \varphi_i(z)) \\ &\quad + \sum_{j=2}^{\infty} (ex_j \cos \theta + ey_j \sin \theta) P_j(z) \\ &\quad + \epsilon_x(\theta, z) \cos \theta + \epsilon_y(\theta, z) \sin \theta + s(z) + K \end{aligned} \quad (4)$$

ここで K は式(1)の R_0 の代わりに置いたものであり、

ピックアップを測定の初めにセットするとき決まる量である。

2.3 3点法円筒度測定の理論的解析

本節では、まず各断面における直径偏差と断面形状を求める測定法の解析を行い、次に各断面について得られた検出データの処理法を述べる。さらに中心軸の曲がりを求める測定法の解析とデータの処理法を述べる。

仮定1. 円筒形状の母線は軸方向になめらかである。

仮定2. 回転軸の振れとピックアップの軸方向の振れにより、測定しようとする断面位置がわずかに変わるが、真円度プロフィールはそれによって変化しない。

この二つの仮定が成立しなければ、円筒形状の適切な関数近似はできず、無数の断面について測定しなければならない。

1) 各断面における直径偏差と断面形状の測定法の解析

図3に3点法円筒度測定系を示す。PU1, PU2, PU3は各ピックアップとそれがセットされている位置であり、それらの間の開き角は α, β である。点Oは三つのピックアップの指示方向の交点であり、点O'は回転中心であり、一般に変動するものとする。

式(4)を用いて、PU1での検出量 $y_{PU1}(\theta, z)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} y_{PU1}(\theta, z) &= R(z) + \sum_{i=2}^{\infty} C_i(z) \cos(i\theta - \varphi_i(z)) \\ &\quad + \sum_{j=2}^{\infty} (ex_j \cos \theta + ey_j \sin \theta) P_j(z) \end{aligned}$$

$$+\varepsilon_X(\theta, z)\cos\theta+\varepsilon_Y(\theta, z)\sin\theta+s(z)+K_1 \quad (5)$$

同様に PU 2, PU 3 での検出量 $y_{PU2}(\theta, z)$, $y_{PU3}(\theta, z)$ を求め, それぞれに倍率 $1, a, b$ を乗じて加え合わせた合成検出量を $Y(\theta, z)$ とすると

$$\begin{aligned} Y(\theta, z) = & (1+a+b)R(z) \\ & + \sum_{i=2} f_i C_i(z) \cos(i\theta - \varphi_i + \delta_i) \\ & + (1+a \cos \alpha + b \cos \beta) \\ & \times \sum_{j=2} (e_{Xj} \cos \theta + e_{Yj} \sin \theta) P_j(z) \\ & + (a \sin \alpha - b \sin \beta) \\ & \times \sum_{j=2} (e_{Xj} \cos \theta - e_{Yj} \sin \theta) P_j(z) \\ & + (1+a \cos \alpha + b \cos \beta) \\ & \times \{ \varepsilon_X(\theta, z) \cos \theta + \varepsilon_Y(\theta, z) \sin \theta \} \\ & + (a \sin \alpha - b \sin \beta) \\ & \times \{ \varepsilon_Y(\theta, z) \cos \theta - \varepsilon_X(\theta, z) \sin \theta \} \\ & + (1+a \cos \alpha + b \cos \beta) s(z) \\ & + K_1 + aK_2 + bK_3 \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここで f_i は拡大率, δ_i は位相ひずみと呼ばれるものであり, 次式で与えられる。

$$\begin{aligned} f_i = & \{ (1+a \cos i\alpha + b \cos i\beta)^2 + (a \sin i\alpha - b \sin i\beta)^2 \}^{1/2} \\ \delta_i = & \tan^{-1} \{ (a \sin i\alpha - b \sin i\beta) / (1+a \cos i\alpha + b \cos i\beta) \} \end{aligned} \quad (7)$$

式 (6) において

$$\left. \begin{aligned} 1+a \cos \alpha + b \cos \beta &= 0 \\ a \sin \alpha - b \sin \beta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

を満たすように a, b を定めると

$$\begin{aligned} Y(\theta, z) = & (1+a+b)R(z) \\ & + \sum_{i=2} f_i C_i(z) \cos(i\theta - \varphi_i + \delta_i) \\ & + K_1 + aK_2 + bK_3 \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

上式から測定系の回転軸の振れまわりとピックアップの送り運動誤差の影響を合成検出量から除けることがわかる。また円筒度は形状精度の一つであり, 直径の絶対値に関する情報は不必要であるので, $K_1 + aK_2 + bK_3$ は省いてもさしつかえない。故に

$$\begin{aligned} Y(\theta, z) = & (1+a+b)R(z) \\ & + \sum_{i=2} f_i C_i(z) \cos(i\theta - \varphi_i + \delta_i) \end{aligned} \quad (10)$$

2) 検出量の処理法

3 個のピックアップ PU 1, PU 2, PU 3 の間の開き角 α , β から式 (8) を使って a, b を計算する。次に各々のピックアップの検出量にそれぞれ $1, a, b$ を乗じて加え合わせ, 合成検出量 $Y(\theta, z)$ を作り, これを各断面について測定

する。この合成検出量 $Y(\theta, z)$ を 1 断面のものについて平均値を求めるとともにフーリエ解析する。

式 (10) からわかるように合成検出量の円周方向の平均値は $(1+a+b)R(z)$ であるので, これを $(1+a+b)$ で除すことによって直径偏差 $R(z)$ が求まる。次に, 各断面における合成検出量をフーリエ解析した結果から, 2 山以上の山数 i の高さを拡大率 f_i で除し, 位相の項から δ_i を差し引くことにより, 真円度プロファイルの山の高さ $C_i(z)$ と位相 $\varphi_i(z)$ を求めることができる。

以上のようにして求めた $R(z)$, $C_i(z)$, $\varphi_i(z)$ を次のように直交多項式近似する。

$$\left. \begin{aligned} A_i(z) &= C_i(z) \cos \varphi_i(z) = \sum_{j=0} A_{ij} P_j(z) \\ B_i(z) &= C_i(z) \sin \varphi_i(z) = \sum_{j=0} B_{ij} P_j(z) \\ R(z) &= \sum_{j=1} R_j P_j(z) \end{aligned} \right\} (i \geq 2) \quad (11)$$

3) 中心軸の曲がりの測定法の解析

いまピックアップ 1 により $\theta=0^\circ$ の母線形状を測定すると式 (5) より検出量 $y_{PU1}(0, z)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} y_{PU1}(0, z) = & R(z) + \sum_{i=2} C_i(z) \cos \varphi_i(z) \\ & + \sum_{j=2} e_{Xj} P_j(z) + \varepsilon_X(0, z) + s_0(z) + K_1 \end{aligned} \quad (12)$$

ここで $s_0(z)$ は $\theta=0^\circ$ の位置でのピックアップ 1 の軸方向運動に伴う真直度誤差の PU 1 自身のセンシティブ方向の成分である。

式 (11) を用いて式 (12) を書き直すと

$$\begin{aligned} y_{PU1}(0, z) = & \sum_{j=1} R_j P_j(z) + \sum_{i=2} \sum_{j=0} A_{ij} P_j(z) \\ & + \sum_{j=2} e_{Xj} P_j(z) + \varepsilon_X(0, z) + s_0(z) + K_1 \end{aligned} \quad (13)$$

となる。母線形状測定時には軸は静止しているので, 上式中の測定軸の振れ $\varepsilon_X(0, z)$ には軸方向の 1 次の項までしか含まれていない。

そこで $s_0(z)$ を何らかの方法で測定し, $y_{PU1}(0, z) - s_0(z)$ を求め, これを直交多項式分解し, 2 次以上の j 次の直交多項式に対し, 係数 $(R_j + \sum_{i=2} A_{ij} + e_{Xj})$ が求まる。この係数から 2) の処理で求められている R_j, A_{ij} を減ずれば e_{Xj} が求められる。

$\theta=90^\circ$ について上と同様のことを行えば e_{Yj} が求められる。

3. 実験装置と方法

3.1 半径法円筒度測定

(1) 被測定体 外径 200 mm, 内径 140 mm, 長さ

図4 被測定体と測定区間

400 mm のアルミニウム合金の管の内面の円筒度を測定した。この穴は中心軸の曲がりが見れやすいようにラムタイプの横中ぐり盤で加工した。その表面粗さは $1.2 \mu\text{m}$ R_{max} である。

(2) 測定区間 図4に示すように端面より7mm入ったところを最初の測定断面とし、15mmおきに20断面、285mmの区間について測定した。

(3) 測定器および測定方法 測定は Taylor Hobson 社製円筒度測定器タリセンタ (システム1) を用いて行った。測定に当たっては円筒形状をそのまま出すために、偏心補正は行わず、基準円の直径の指定なしで行った。また回転軸に対してピックアップの軸方向送り運動が平行でないと直径偏差が正確に求まらないので、 180° 相対する母線形状を測定テーブルを回転させずに測定した。このような相対する母線形状を数本測定した。

3.2 3点法円筒度測定

(1) 被測定体および測定区間 半径法と同じ。

(2) 使用工作機械 三菱 エリコン高速旋盤 DMOa 型を用いた。被測定体をチャックで支持し、被測定体が回転し、ピックアップが軸方向に移動する。

(3) 測定器 図5に今回試作した3点法円筒度測定器を示す。ピックアップの開き角 α, β はそれぞれ $50^\circ, 40^\circ$ とした。

(4) 直径偏差と断面形状の測定法 図6に測定風景を示す。測定器を往復台に取付け、これを被測

図5 試作した3点法円筒度測定器

定体穴に追い込む。各測定断面位置で、主軸を最低の回転数 32 rpm で回転させ、ピックアップ1, 2, 3の信号をデータレコーダに収録した。

(5) 中心軸の曲がりの測定法 往復台の軸方向送り運動に再現性がある場合とないとした場合について測定した。すなわち $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ のところの母線形状を測定した。 $\theta=0^\circ, 90^\circ$ の母線形状の測定の際には図7④に示すように円筒度誤

差の非常に小さいマスター ($30\phi \times 300$, 円筒度 $1 \mu\text{m}$) を穴に置き、これをピックアップ1の反対側に取付けたピックアップ4でトレースして、ピックアップ1の軸方向送り運動誤差を検出する。 $\theta=180^\circ, 270^\circ$ のところでは母線形状の測定のみを行う。

(6) 往復台の軸方向送り運動の再現性の測定 マスターを心押台とチャックで支持し、ピックアップ1の位置に取付けたピックアップで測定区間を行きと帰りについて数回トレースして測定した。

(7) 測定データの処理の流れ 測定したデータの処理の流れを図7に示す。

4. 実験結果と考察

4.1 真円度誤差

実験に用いた被測定体は他の山数に比べて、2山, 3山成分が大きい。これらの山数について、各測定断面位置において、3点法と半径法で求めた真円度プロファイルのフーリエ係数を図8に示す。この図よりどの断面においても2山, 3山成分のフーリエ係数は良くあっていることがわかる。一例として3山成分の比較的大きい5番目の断面と、2山成分の比較的大きい18番目の断面につい

図6 3点法円筒度測定装置のセットアップ

図7 3点法円筒度測定法のデータ処理の流れ

図8 各断面位置における半径法と3点法で求めたフーリエ係数の2山, 3山成分の比較

て, 半径法と3点法で測定された真円度プロフィールを図9に示し, 18番目の断面のフーリエ係数を図10に示す。いずれの場合も両者が良く一致していることがわかる。

4.2 直径偏差

3点法と半径法で求めた直径偏差を図11に示す。この図において二つの方法で測定した直径偏差は比較的良く

一致しており, 3点法が測定系のもつ誤差の影響を小さくして直径偏差を正確に求められることがわかる。

4.3 中心軸の曲がり

3点法と半径法で求めた中心軸の曲がりの $\theta=0^\circ$ と 90° の2方向成分を図12に示す。この測定においてはマスターを用いるよりも, ピックアップの軸方向送り運動誤差の再現性を利用した方が半径法に近い中心軸の曲がりが求められている。これは後者では送り運動誤差に $2\mu\text{m}$ 以内の良い再現性があったこと, および後者では検出量の解析の際に直径偏差に関する情報を用いていないのに対し, 前者では用いているためと思われる。また前者においてはマ

スターのセッティングによる誤差が存在した可能性もある。

4.4 円筒度

3点法円筒度測定により得られた真円度プロフィール, 直径偏差および中心軸の曲がりに関する情報より, 円筒形状の数学モデルを作ったが, これより最小自乗法で評

図9 半径法と3点法で測定された真円度プロフィールの比較

図10 18番目の断面の真円度プロフィールのフーリエ係数の比較

価した円筒度を求めたところ $20.5 \mu\text{m}$ となった。ただし中心軸の曲がりに関する情報はピックアップの軸方向送り運動誤差の再現性を利用する方法により求めた結果を用いた。

それに対し、半径法により得たデータを用いて最小自乗法で評価した円筒度を求めたところ、 $19 \mu\text{m}$ となった。このことより3点法によっても正確に円筒度が測定できていることがわかる。

4.5 測定系のもつ誤差

3点法は検出量から測定系の誤差を除いて形状に関する情報を得ているが、逆にデジタル処理の利点を生かして既知の円筒形状に関する情報を検出量から差し引くことにより、ピックアップに検出される測定系の誤差を求めることができる。いま半径法で測定した円筒形状が

図11 半径法と3点法で求めた各断面における直径偏差の比較

(a) $\theta=0^\circ$

(b) $\theta=90^\circ$

図12 $\theta=0^\circ, 90^\circ$ の面に投影した中心軸の曲がりの比較

正しい形状であると仮定して、測定系の誤差を求めたところ、本測定系の主軸には最小領域円半径差で評価して $15 \mu\text{m}$ もの回転軸の振れまわりが存在した。またチャック側で基準直線に対して $80 \mu\text{m}$ もの偏心成分が測定系に存在していた。このように大きな誤差が存在している測定系においても、3点法を用いることにより前節までに述べたように正確に円筒形状を測定できることがわか

る。

5. 結 論

工作機械上での3点法円筒度測定に関する研究によって得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 真円度誤差, 直径偏差, 中心軸の曲がりからなる円筒形状を, フーリエ級数と直交多項式を用いた数学モデルで表し, 3個のピックアップから検出量を解析して, この数学モデルの係数を求めれば被測定体の円筒形状を把握できる。
- (2) 工作機械のように軸の振れまわりと軸方向送り運動誤差をもつ3点法円筒度測定系において, これらが検出量に及ぼす影響を定式化し, 円筒形状の数学モデルと組合わせて, ピックアップの検出量の数学モデルを作った。
- (3) 3個のピックアップの合成検出量をフーリエ解析し, 式(10)の関係を使って, 回転軸の振れまわりと

測定系の軸方向送り運動誤差の影響を除いて, 真円度プロフィールと直径偏差を精度良く測定することができた。

- (4) 母線形状を数本測定し, マスタバーを用いてピックアップの軸方向送り運動誤差を検出するか, その再現性を利用して中心軸の曲がりを精度良く測定することができた。

最後に本研究に多大の御協力をいただいた三菱重工(株), 東芝機械(株), 大阪機工(株)の方々に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 後藤充夫, 飯塚幸三: 円筒形状誤差の一解析法, 精密機械, **41**, 5 (1975) 477.
- 2) T. Tsukada et al.: An Evaluation of Form Errors of Cylindrical Machine Parts by Spiral Tracing Method, Proc. 18th Int. MTDR Conf., (1977) 529.

情 報

(p.1385より続く)

いるため, カメラなどは現在先進国貿易に占める輸出占有率が53.5%に達している競争力の強さが続くものと期待されている。

これに反して食料品は12.2%から9.2%, 繊維4.6%から1.8%, 輸送機械10.7%から7.9%など, 構成比の低下が目立つ業種も多い。中進国の躍進期を迎え, 今後, 急激な産業構造の変化を避けることができないとみられている。

素材産業でも, 圧倒的な技術力を誇る鉄鋼がかろうじて10.8%(現在11.3%)の水準を保つ程度だとしている。

80年代は国際環境上では前述したように中進国の躍進の時期に当たるため, わが国の産業調整の進行は両独以上のドラスチックなものになる可能性が高く, 特に軽

工業, 化学系装置工業ではわが国の劣勢が予測されている。

しかし, 機械工業では中進国側の技能労働力の蓄積に制約があるため, 技術集約型商品の国際競争力は引き続き維持され, 中進国との国際分業の展開はむしろ, わが国経済の効率の維持に貢献することになる, としている。

一方, ①消費内容のサービス化, ②公共サービスの拡充, ③電算機利用によるサービス部門の技術進歩——などにより第三次産業は今後高成長を続け, 石油危機以後続いている製造業から第三次産業への労働力のシフトはますます顕著になり, 雇用不安の解消に貢献するものとみている。

(服部 敏夫)