マルチプローブ型円筒形状測定機の開発*

遠 藤 勝 幸** 高 偉*** 清 野 慧***

Development of a Cylindrical Figure Measuring Instrument Based on a New Multi-probe Method

Katsuyuki ENDO, Wei GAO and Satoshi KIYONO

A new multi-probe method was proposed for cylindrical figure measurement of heavy and large sized cylinders. Six displacement probes, which are placed in three cross-sections around the cylinder workpiece, are employed in this method for the purpose of separating the cylinder figure errors from the motion errors of the cylinder spindle and the probe carriage. The probe numbers in the three cross-sections are three, two and one, respectively. The roundness profiles at each position along the central axis of the cylinder are measured first using the three probes placed in the same cross-section based on the conventional three-probe method. The deviations of average radius and the horizontal and vertical straightness of the central axis of the cylinder can also be evaluated through employing the outputs of the six probes, leading to a complete figure measurement result. The measurement is not affected by the scanning motion errors and the probe zero-adjustment errors. Taper-shaped cylinders can also be measured with this method. A prototype instrument capable of measuring a large cylinder with a length of up to about 1,650mm was designed and built to realize the proposed multi-probe method. Experiments were also carried out to confirm the effectiveness of the instrument.

Keywords: precision measurement, cylindrical figure, multi-probe method, deviation of radius, error separation

1. 結 言

印刷機械や圧延機械などに使われるロールには、その大きさとの比で見たときに、極めて厳しい形状精度が要求されている。たとえば、ある印刷機械用ロールは、長さが1,600mm、直径が90mm、重量が約60kgfあるが、5 μ m以下の円筒度が要求されている。しかし、現在市販されている汎用の真円度測定機で、この大きさに対応できるものは見当たらない。

一般に円筒度は、半径法による真円度測定機により測定される¹⁾。これは、測定対象、あるいはプローブを回転させ、測定対象の測定位置におけるプローブの出力をプロットするものである。この方法では、基準として高精度な回転系が必要になるため、市販の真円度測定機では空気軸受けなどによるきわめて高精度の運動機構により、0.02 μ m程度の回転精度を実現している。また、軸方向の形状測定は、プローブを軸方向に移動させるガイドの真直度と、回転軸とガイドの平行度に依存するため、高精度なものでは、0.05 μ m/100mm程度の真直度と0.2 μ m/350mm程度の平行度をもつガイドを用いている。

しかし、このように高精度な基準を中～大型の円筒形状測定に用いることは困難であり、測定対象の傾き誤差（アンギュラーモーション）や平行移動誤差（ラジアルモーション）、ガイドの真直度や回転軸との平行度などに起因するプローブの運動誤差が、プローブ出力に無視できない大きさで混入することは避けられない。

一方、複数のプローブを用いて、演算により運動誤差を除去する、いわゆるソフトウェアデータムによる形状測定の研究が、真円度、真直度、平面度測定などへの適用を中心に、古くから行われている^{2)~5)}。また、円筒形状への適用も試みられている^{6)~8)}。垣野らは3点法によって測定した軸直角断面形状と平均半径偏差を軸方向に並べているが⁶⁾、曲がりに対応する断面形

状の相対位置には、別の高精度な基準バーを必要としている。戸沢らは、2点法により測定した母線形状を並べて円筒形状を得ているが⁷⁾、両端面の相対位置を別の方法で決めておかねばならない。また、2点法であるため、測定時のピッチング誤差は除去されない。Gaoらは、ピッチング誤差を取り除くために、3点法を用いて円筒の母線形状を測定している⁸⁾。さらに、プローブのゼロ点調整誤差の累積による放物線誤差を取り除くために、対向した3本のプローブを用いている。しかし、この方法では、母線の傾きを得ることができないため、円筒のテーパを求めることは難しい。筆者らも、円筒上のらせんを、多点法による真直度測定に置き換えて測定する試みを行ってきたが⁹⁾、曲がりやテーパの再現にはいたらなかった。

本研究では、ソフトウェアデータムの手法を拡張し、複数断面にプローブを配置した測定法を提案する。この方法により、円筒の軸直角断面形状（各断面の、平均円との差を示す形状）、平均半径の軸方向への変化、中心軸の曲がり（中心軸の直線からの差を示す形状）の一括測定を試みたので、以下に報告する。なお、本論文では、以降、この軸直角断面形状を真円誤差形状、中心軸の曲がりを中心軸真直誤差形状、と呼ぶこととする。

2. 測 定 原 理

2.1 観測方程式

運動誤差を伴った測定を、図1のようにモデル化する。図1において、 Σ_{XYZ} は、空間に固定された機械座標系、 $\Sigma_w X_w Y_w Z_w$ は、ワークに固定されたワーク座標系、 $\Sigma_z X_z Y_z Z_z$ は、Z方向に移動するプローブステージに固定されたプローブステージ座標系である。 $e_{wx}(\theta)$, $e_{wy}(\theta)$, $\tau_{wx}(\theta)$, $\tau_{wy}(\theta)$ は、それぞれワークのラジアルモーションとアンギュラーモーション、 $e_{zx}(z)$, $e_{zy}(z)$, $\tau_{zx}(z)$, $\tau_{zy}(z)$ は、それぞれプローブステージの平行移動誤差、傾き誤差である。 ϕ_i , d_i は、プローブ*i*の取り付け角度とZ_z軸方向の取り付け位置を Σ_z で表したものである。 θ はワークの回転角度、 z

*原稿受付 平成14年7月9日

**正 会 員 福島県ハイテクプラザ（郡山市待池台1-12）

***正 会 員 東北大学工学研究科（仙台市青葉区荒巻字青葉01）

Fig.1 Error motion model

Fig.2 Cylinder model

は Σ 上でのプローブステージの移動量を表す。また、ベクトル

$${}^w\mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} \{r_0 + m_i(\theta, z) + m_{i0}\} \cos \varphi_i \\ \{r_0 + m_i(\theta, z) + m_{i0}\} \sin \varphi_i \\ d_i \end{pmatrix}, {}^m\mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} \{r_0 + q(\theta + \varphi_i, z + d_i)\} \cos(\theta + \varphi_i) \\ \{r_0 + q(\theta + \varphi_i, z + d_i)\} \sin(\theta + \varphi_i) \\ z + d_i \end{pmatrix}$$

は、測定点の位置ベクトルをそれぞれ Σ_s と Σ_w で表したものである。ここで、 r_0 はワークの基準半径、 $m_i(\theta, z)$ はプローブ i の出力、 m_{i0} はプローブ i のゼロ点調整誤差、 $q(\theta, z)$ は円筒座標で表したワーク形状である。このとき、ワーク形状 $q(\theta, z)$ 、運動誤差、およびプローブ出力 $m_i(\theta, z)$ の関係を表す観測方程式は、次のようになる。

$$m_i(\theta, z) = q(\theta + \varphi_i, z + d_i) + m_{i0} + e_1(\theta, z)d_i \cos \varphi_i + e_2(\theta, z)d_i \sin \varphi_i + e_3(\theta, z) \cos \varphi_i + e_4(\theta, z) \sin \varphi_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし、} \quad e_1(\theta, z) &= \tau_{xy}(z) - \tau_{wy}(\theta) \\ e_2(\theta, z) &= \tau_{xz}(z) - \tau_{wx}(\theta) \\ e_3(\theta, z) &= -e_{sx}(z) + e_{wx}(\theta) - \tau_{wy}(\theta)z \\ e_4(\theta, z) &= -e_{sy}(z) + e_{wy}(\theta) - \tau_{wx}(\theta)z \end{aligned}$$

運動誤差に関する項 $e_1 \sim e_4$ はワークの基準半径 r_0 に比べて十分小さいものとする。さらに、図2に示すように、ワークの形状を Σ_w 上で分解して次のように表現する。

$$q(\theta, z) = h_x(z) \cos(\theta) + h_y(z) \sin(\theta) + r_a(z) + r(\theta, z) \quad (2)$$

ここで、 $h_x(z)$ 、 $h_y(z)$ ：中心軸真直誤差形状の、水平方向(X_w 軸方向)及び垂直方向(Y_w 軸方向)への射影。

$r_a(z)$ ：位置 z における、断面の平均半径偏差。

$r(\theta, z)$ ：位置 z における、真円誤差形状

である。また、平均半径偏差 $r_a(z)$ は、断面の平均半径から基準半径 r_0 を差し引いた値であり、テーパなどのような Z_w 軸方向への径変化を意味する。さらに、 $h_x(z)$ 、 $h_y(z)$ 、 $r_a(z)$ 、 $r(\theta, z)$ は、 r_0 に比べて十分小さいものとする。

2.2 測定手順

まず、図3のように、6本のプローブをワークの周囲に配置する。プローブ1～3はワークの同一断面(断面 n)の円周上、プローブ4～5は断面 $n+1$ の円周上、プローブ6は断面 $n+2$ 上

Fig.3 Procedure of measurement

に置く。断面 n 、 $n+1$ 、 $n+2$ の間隔は等間隔 d とする。プローブ1～6の周方向の配置角は $\varphi_1 \sim \varphi_6$ とする。また、軸方向の配置(プローブステージの基準位置からの距離) $d_1 \sim d_6$ は、 $d_1 = d_2 = d_3 = 0$ 、 $d_4 = d_5 = d$ 、 $d_6 = 2d$ となる。これらの配置は、2.3節以降の解析が得られるように、発見的に決定した。

測定は、以下の手順で行う。まず、プローブステージを Z 軸上に固定し、ワークを回転させ、各プローブの出力データを収集する。つぎに、プローブステージを d だけ移動する。再びワークを回転させてデータを収集する。以上を繰り返す。

プローブステージの基準位置がワーク軸上の $z = z_0 + nd$ 上にあるとき、各プローブの出力は、式(1)(2)から、式(3)のように表すことができる。ただし、簡単のため、以後、 $z = z_0 + nd$ 、 $r_n(\theta) \equiv r(\theta, z)$ 、 $r_{na} \equiv r_a(z)$ 、 $h_{nx} \equiv h_x(z)$ 、 $h_{ny} \equiv h_y(z)$ 、 $m_{ni}(\theta) \equiv m_i(\theta, z)$ ($i = 1 \sim 6$)、 $e_{ni}(\theta) \equiv e_i(\theta, z)$ ($i = 1 \sim 4$)とする。

$$\begin{pmatrix} m_{n1}(\theta) \\ m_{n2}(\theta) \\ m_{n3}(\theta) \\ m_{n4}(\theta) \\ m_{n5}(\theta) \\ m_{n6}(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_n(\theta + \varphi_1) \\ r_n(\theta + \varphi_2) \\ r_n(\theta + \varphi_3) \\ r_{(n+1)}(\theta + \varphi_4) \\ r_{(n+1)}(\theta + \varphi_5) \\ r_{(n+2)}(\theta + \varphi_6) \end{pmatrix} + \mathbf{r}_{na} + \mathbf{m}_0 + \begin{pmatrix} h_{nx} \cos(\theta + \varphi_1) \\ h_{nx} \cos(\theta + \varphi_2) \\ h_{nx} \cos(\theta + \varphi_3) \\ h_{(n+1)x} \cos(\theta + \varphi_4) \\ h_{(n+1)x} \cos(\theta + \varphi_5) \\ h_{(n+2)x} \cos(\theta + \varphi_6) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{ny} \sin(\theta + \varphi_1) \\ h_{ny} \sin(\theta + \varphi_2) \\ h_{ny} \sin(\theta + \varphi_3) \\ h_{(n+1)y} \sin(\theta + \varphi_4) \\ h_{(n+1)y} \sin(\theta + \varphi_5) \\ h_{(n+2)y} \sin(\theta + \varphi_6) \end{pmatrix} + \mathbf{P}^T \begin{pmatrix} e_{n1}(\theta) \\ e_{n2}(\theta) \\ e_{n3}(\theta) \\ e_{n4}(\theta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、

$$\mathbf{r}_{na} = (r_{na} \quad r_{na} \quad r_{na} \quad r_{(n+1)a} \quad r_{(n+1)a} \quad r_{(n+2)a})^T \quad (4)$$

$$\mathbf{m}_0 = (m_{10} \quad m_{20} \quad m_{30} \quad m_{40} \quad m_{50} \quad m_{60})^T \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d \cos \varphi_4 & d \cos \varphi_5 & 2d \cos \varphi_6 \\ 0 & 0 & 0 & d \sin \varphi_4 & d \sin \varphi_5 & 2d \sin \varphi_6 \\ \cos \varphi_1 & \cos \varphi_2 & \cos \varphi_3 & \cos \varphi_4 & \cos \varphi_5 & \cos \varphi_6 \\ \sin \varphi_1 & \sin \varphi_2 & \sin \varphi_3 & \sin \varphi_4 & \sin \varphi_5 & \sin \varphi_6 \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.3 真円誤差形状と平均半径偏差

断面 n における真円誤差形状 $r_n(\theta)$ と平均半径偏差 r_{na} は、次の手順によって求める²⁾。まず、同一断面にあるプローブの出力 $m_{n1}(\theta) \sim m_{n3}(\theta)$ に定数 $b_1 \sim b_3$ を乗算した後加算し、運動誤差を除去する。なお、このとき $h_{nx}(z)$ 、 $h_{ny}(z)$ も、ともに消去される。

$$\begin{aligned} m_n(\theta) &\equiv b_1 m_{n1}(\theta) + b_2 m_{n2}(\theta) + b_3 m_{n3}(\theta) \\ &= b_1 r_n(\theta + \varphi_1) + b_2 r_n(\theta + \varphi_2) + b_3 r_n(\theta + \varphi_3) \\ &\quad + b_1 (r_{na} + m_{10}) + b_2 (r_{na} + m_{20}) + b_3 (r_{na} + m_{30}) \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 $b_1 \sim b_3$ は次の式(8)を満たすように選ぶ。

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \\ \cos \varphi_2 \\ \cos \varphi_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_2 \\ \sin \varphi_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$\times$ はベクトル積を表す。つぎに、得られた積和結果 $m_n(\theta)$ にフーリエ変換をほどこす。

$$F(m_n(\theta)) = H(\omega) \cdot R_n(\omega) + \{b_1(r_{na} + m_{10}) + b_2(r_{na} + m_{20}) + b_3(r_{na} + m_{30})\} \cdot 2\pi\delta(\omega) \quad (9)$$

$$\equiv M_n(\omega)$$

ここで、 ω は空間周波数、 $R_n(\omega)$ は断面 n の真円誤差形状 $r_n(\theta)$ のフーリエ変換結果である。伝達関数 $H(\omega)$ は次式により表される。

$$H(\omega) = b_1 \exp(j\omega\phi_1) + b_2 \exp(j\omega\phi_2) + b_3 \exp(j\omega\phi_3) \quad (10)$$

$M_p(\omega)$ を $H(\omega)$ で除して逆フーリエ変換する.

$$F^{-1}\left(\frac{M_n(\omega)}{H(\omega)}\right) = r_n(\theta) + r_{na} + \frac{b_1 m_{10} + b_2 m_{20} + b_3 m_{30}}{b_1 + b_2 + b_3} \quad (11)$$

右辺第3項はプローブのゼロ点調整誤差に起因する定数であり、プローブのゼロ点調整誤差が測定中にドリフトしないならば、断面を移動しても変化しない。このため、真円誤差形状 $r_n(\theta)$ と相対的な平均半径偏差 r_m を得ることができる。

2.4 中心軸真直誤差形狀

2.3 節で得られた各真円誤差形状 $r_n(\theta)$ を 6 本のプローブ出力から除き、定数 $a_1 \sim a_6$ を乗算して加算することにより、運動誤差を除いた中心軸真直誤差形状に関する式を得る。

$$\begin{aligned}
g_n(\theta) &\equiv a_1\{m_{n1}(\theta) - r_n(\theta + \phi_1)\} + \cdots + a_6\{m_{n6}(\theta) - r_{(n+2)}(\theta + \phi_6)\} \\
&= \{h_{(n+2)x} - 2h_{(n+1)x} + h_{nx}\}a_6 \cos(\theta + \phi_6) \\
&\quad + \{h_{(n+2)y} - 2h_{(n+1)y} + h_{ny}\}a_6 \sin(\theta + \phi_6) + C_n
\end{aligned} \tag{12}$$

ただし, $\mathbf{P} \cdot \mathbf{a} = (0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ (13)

$$\mathbf{C}_n = (\mathbf{r}_{na} + \mathbf{m}_0) \cdot \mathbf{a} \quad (14)$$

$$\mathbf{a} = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6)^T \quad (15)$$

定数 $a_1 \sim a_6$ は、同次式(13)を解くことにより決定する。式(12)において、中心軸真直誤差形状に関する項は、右辺第1項と第2項の係数として現れ、プローブのゼロ点調整誤差と平均半径偏差に関する項は、定数 C_n に集約される。この定数 C_n は $g_n(\theta)$ から容易に除去することができ、次式を得る。

$$\begin{aligned}\tilde{g}_n(\theta) &\equiv g_n(\theta) - C_n \\ &= \{h_{(n+2)x} - 2h_{(n+1)x} + h_{nx}\}a_6 \cos(\theta + \varphi_6) \\ &\quad + \{h_{(n+2)y} - 2h_{(n+1)y} + h_{ny}\}a_6 \sin(\theta + \varphi_6)\end{aligned}\quad (16)$$

式(16)により得られた $\tilde{g}_n(\theta)$ から, 中心軸真直誤差形状に関する係数を求める. これらの係数は, 異なる 2 つの θ での値をもとに得ることができるが, 偶然誤差などの影響を低減するために, 式(17)のように 4 分割した θ に関する積分値を用いて求める.

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} h_{(n+2)x} - 2h_{(n+1)x} + h_{nx} \\ h_{(n+2)y} - 2h_{(n+1)y} + h_{ny} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{4a_6} \begin{pmatrix} \cos \phi_6 & -\sin \phi_6 \\ \sin \phi_6 & \cos \phi_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \int_0^{\pi/2} \tilde{g}_n(\theta) d\theta - \int_{\pi}^{3\pi/2} \tilde{g}_n(\theta) d\theta \\ \int_{\pi/2}^{\pi} \tilde{g}_n(\theta) d\theta - \int_{3\pi/2}^{2\pi} \tilde{g}_n(\theta) d\theta \end{pmatrix} \\ &\equiv \begin{pmatrix} h''_{nx} \\ h''_{ny} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)で得られるのは，中心軸真直誤差形状 h_{mx} , h_{ny} の Z_w 軸方

向への近似二階微分に相当する量であるため、これの二重積分を行えば、この曲線を得ることができる。たとえば、測定ステップが $1 \sim N$ であり、断面 $1 \sim N+2$ まで測定し、両端面（断面 1 と断面 $N+2$ ）を基準とすると、 h_m は次のように求めることができる。

$$\begin{pmatrix} h_{1x} \\ h_{2x} \\ \vdots \\ h_{(N+1)x} \\ h_{(N+2)x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & 1 & -2 & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ h_{1x}^* \\ \vdots \\ h_{Nx}^* \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$h_{m\gamma}$ も同様にして求めることができる。プローブのゼロ点調整誤差は、 C_n とともに除去されているため、二重積分演算におけるゼロ点調整誤差の累積に起因する放物線誤差は、あらわれない。

3. 測定実験

3.1 実験装置

図 4 に、実験装置の概略図を示す。図 4 では、簡単のためにプローブを 1 本に省略しているが、実機には 6 本のプローブを取り付けている。測定に用いたプローブは、てこ式の電気マイクロメータ（㈱東京精密製 E-DT-LM）である。ワークは、ハーモニックドライブで減速されたサーボモータ 1 により回転する。本装置で測定可能なワークの大きさは、長さが約 300mm～約 1,650mm、直径が約 40mm～約 160mm である。

プローブステージは、サーボモータ 2 により、ピッチ 5mm のボールねじで減速され、Z 軸方向に移動する。今回測定実験で設定したプローブの配置は、 $\varphi_1=0.00^\circ$, $\varphi_2=117.18^\circ$, $\varphi_3=218.34^\circ$, $\varphi_4=34.38^\circ$, $\varphi_5=156.42^\circ$, $\varphi_6=255.06^\circ$, $d=50\text{mm}$ である。これら配置角度は、プローブ固定後、あらかじめ突起のあるワークを測定し、 ω_1 を基準とした相互相関関数を用いて算出した。

Fig.4 Schematic of the developed instrument

Fig.5 Schematic of the measurement system

ワークの回転角度 θ は、2000P/Rのロータリエンコーダにより検出する。プローブステージのZ軸方向の移動量 z は、サーボモータ2内のエンコーダ(2048P/R)の出力を使用して求める。このとき、分解能は約 $2.4\mu\text{m}$ となるが、若干のバックラッシュがあると考えられる。測定中のプローブ出力は、ロータリエンコーダの出力に同期して一旦波形記録計内のメモリに記録され、測定終了後GP-IBを介してパーソナルコンピュータに転送し、計算処理される。なお、プローブ出力には、アンプ内で25Hzのローパスフィルタ処理が行われている。測定系ブロック図を、図5に示す。

測定実験に用いたワークは、径 $\phi 50\text{mm}$ 、長さ 700mm の、研削加工、およびクロムめっきが施されたシャフトである。比較的小型のワークを用いたのは、測定結果を市販の真円度測定機と比較するためである。ただし、装置の機械的干渉などによる可動範囲の制限から、実験での測定長は 300mm である。ワークを横に置いたことにより、自重による弾性変形が生じると考えられるが、ワークの回転運動が十分に遅く、ワークの形状が軸対称である場合、これは常に重力方向に同じ形状で変形していると考えられる。そのため、相対的にプローブステージのガイドレールが曲がっているとみなすことができ、運動誤差除去演算によりこの影響は取り除かれる。また、ワークのチャッキングによって曲げモーメントが生じるが、本研究では、これは十分に小さいとみなし、無視する。

3.2 真円誤差形状と平均半径偏差の測定結果

図6上段に、 $z=80\text{mm}$ における真円誤差形状 $r_n(\theta)$ の測定結果を示す。また、比較のために、同じワークの同じ部分を市販の真円度測定機で測定した結果を図6下段に示す。いずれもカットオフフィルタは設定していない。試作機での測定速度は、 6rpm である。図において、試作機による測定結果は市販測定機には見られない高周波の成分(88,90山)を含んでいる。これは、3点法伝達関数 $H(\omega)$ が、この成分において値が小さくなることに起因しているため、適当なプローブ配置により回避できるものと考えられる。そのほかの点においては、試作機はほぼ真円誤差形状を再現している。

図7に平均半径偏差 r_{na} を示す。測定開始断面($z=80\text{mm}$)における値を0とした。ここにも、同じく市販の真円度測定機による結果を重ねて示す。可動範囲の制限から、 300mm までの測定結果である。このワークは、やや径が細くなっていくことが読み取れる。

3.3 中心軸真直誤差形状の測定

同軸度が小さいワークの場合、式(17)で得られる h_{mx} , h_{my} の近似二階微分値は、プローブ間隔 d に応じた、非常に小さい値となる。たとえば、中心軸真直誤差形状が、長さ 300mm 、両端面で $0\mu\text{m}$ 、最凸部 $4\mu\text{m}$ の放物線のととき、近似二階微分値は、

$$h_{(n+2)x} - 2h_{(n+1)x} + h_{nx} = 3.56 \times 10^{-7} \times d^2 \text{ mm} \quad (19)$$

程度の値となる。これは、 d が広いほど有利となることを意味する。また、同じ長さを測定する場合、 d が狭ければ、測定ステップ数が多くなり、積分時の偶然誤差等の累積が大きくなるため、やはり d は広いほうが有利である。ただし、 d が広い場合、横分解能が低下する。そこで、中心軸真直誤差形状が十分緩やかであると仮定し、図8のように開始断面をずらして測定した結果を最小自乗的にフィットさせ、近似的に横分解能を向上させる。今回の測定実験では、開始断面は 10mm ずつ6回ずらし、6本の測定結果をフィットさせた。全測定長は 300mm で、

Fig.6 Measured roundness profile $r_n(\theta)$ at $z=80\text{mm}$

Fig.7 Measured deviation of average radius, r_{na}

Fig.8 Fitting of the straightness profile of central axis

測定ステップ数(断面数)は31回である。

図9、図10に h_{mx} の測定結果を示す。図9はフィッティングさせる前の6本の測定結果、図10がフィッティング後の結果である。図10には、比較のために、市販の真円度測定機で測定した結果を重ねて示す。形状の傾向がほぼ再現されていることがわかる。図11にはフィッティングした h_{my} の結果を示す。

3.4 総合形状評価

3.2節で得られた真円誤差形状と平均半径偏差、及び3.3節で得られた中心軸真直誤差形状をもとに、総合的な円筒形状を求めた。

図12が X_w - Y_w 平面に投影した円筒形状の測定結果である。円筒度は、測定開始断面($z=80\text{mm}$)と終了断面($z=380\text{mm}$)を基準として、 $10.0\mu\text{m}$ となる。図13に測定結果の3次元表示と、母線形状を示す。図の濃淡は、中心軸真直誤差形状成分を除いた、真円誤差形状と平均半径偏差の値を示す。

Fig.9 Measured horizontal straightness profile of central axis, h_{mx}
(X_w - Z_w Plane, before fitting)

Fig.10 Combined horizontal straightness profile of central axis, h_{mx}
(X_w - Z_w plane, after fitting)

4. 結 言

以上の結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 中～大型の円筒形状測定を想定した、ソフトウェアデータによる、真円誤差形状、平均半径偏差、中心軸真直誤差形状含んだ総合的な円筒形状の測定法を提案した。
- (2) 本手法は、6本のプローブを円筒表面上に配置し、周方向には逆フィルタリングによる3点法、軸方向には積分による3点法に相当する演算を行うものである。
- (3) 本手法では、ワークのアンギュラーモーション、ラジアルモーション、プローブステージの平行移動誤差、傾き誤差、ワーク回転軸とプローブステージガイドの平行度、および自重によるワークの弾性変形の影響を除去できる。
- (4) 本手法には、各プローブのゼロ点調整誤差の累積による、放物線誤差が現れないところに特徴がある。
- (5) 試作装置により実験を行い、市販測定装置とほぼ同様の結果（最大機差は真円誤差形状で $0.8\mu\text{m}$ 、中心軸真直誤差形状で X_w - Z_w 平面内 $0.5\mu\text{m}$ 、 Y_w - Z_w 平面内 $0.6\mu\text{m}$ 、平均半径偏差で $0.2\mu\text{m}$ ）を得た。これより、従来正しい評価法のなかった中～大型の円筒形状が、本手法により測定可能となることが確認された。

測定結果の誤差要因としては、各プローブの校正・特性のばらつきなどが考えられる。今後、これらの影響を定量的に評価する必要がある。

参 考 文 献

- 1) JIS B 7451, 真円度測定機, (1997)

Fig.11 Combined vertical straightness profile of central axis, h_{my}
(Y_w - Z_w plane, after fitting)

Fig.12 Measured cylindrical profile (X_w - Y_w view)

Fig.13 Measured cylindrical figure (3D view)

- 2) 青木保雄, 大園成夫: 3点法真円度測定法の一展開, 精密機械, **32**, 12(1966)832.
- 3) 田中宏明, 佐藤壽芳: 逐次2点真直度測定法の基本特性に関する研究, 日本機工学会論文集, **C**, **48**(1982)1930.
- 4) 清野慧, 奥山栄樹: 平面のうねり形状測定に関する研究(第2報)—形状測定とデジタルフィルター, 精密工学会誌, **54**, 3(1988)513.
- 5) 小尾誠, 小林義之: 逐次3点法を応用した円周上の変位測定(測定原理と測定誤差の考察), 日本機工学会論文集, **C**, **58**(1992)1278.
- 6) 垣野義昭, 北沢治郎: 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—, 精密機械, **44**, 11(1978)1386.
- 7) 戸沢幸一, 佐藤壽芳, 大堀真敬, 駒崎正洋: 工作機械の真直度と加工精度の関連に関する研究, 日本機工学会論文集, **C**, **47**(1981)909.
- 8) Wei Gao, Jun Yokoyama, Hidetoshi Kojima, Satoshi Kiyono: Precision measurement of cylinder straightness using a scanning multi-probe system, Precision Engineering, **26**-3, (2002)279.
- 9) 遠藤勝幸, 高偉, 清野慧: マルチプローブ型円筒形状測定機の開発(第2報)—測定結果の誤差評価—, 2002年度精密工学会春季大会論文集, (2002)714.