

## 真円度評価における高精度化の一手法

産業技術総合研究所 直井 一也, 渡部 司, 藤本 弘之, 高辻 利之

Hight precision evaluation method for roundness

AIST K.Naoi T.Watanabe, H.Fujimoto, T.Takatsuji

The multistep error separation technique is high precision measuring and evaluation technique. The application of error separation technique to roundness measuring instruments is investigated experimentally, using digital computer. This method separates systematic spindle motion error from roundness error including un-isolated components which depends on step number of multistep method. This un-isolated components is a factor of the error for high precision evaluation of roundness. We developed a technique which can separate systematic spindle error and feature of roundness over high harmonics. This technique evaluates roundness error using combined roundness components which are analyzed by multistep methods of different steps.

## 1. はじめに

真円度の測定方法には、2点法、3点法などがある。高精度の真円度測定には、真円度測定機を用いた測定が行われる。しかし、測定対象の真円度をより高精度に評価をしようとした場合、測定データから真円度測定機のスピンドルの回転運動誤差成分をのぞく必要がある。この手法として反転法やマルチステップ法、マルチプローブ法がある。マルチプローブ法では、複数のセンサの特性の違いが評価結果に影響を与えるため、本研究ではマルチステップ法を用いた。

マルチステップ法では、有限のステップ数で測定対象と測定系に位相差を与えるために、形状成分と回転誤差成分とを分離できないステップ数に依存したフーリエ成分が存在する。よってステップ数が多ければ、分離ができないフーリエ成分が少なくなるため、測定対象の形状の評価精度が向上する。しかし、ステップ数が多くなると測定時間が増加し、測定中の環境を維持することが必要となる問題がでてくる。

そこで、本研究ではさらに従来では分離できないフーリエ成分を分離し、少ないステップ数のマルチステップ法から得られた評価結果を組み合わせることにより、より高精度の真円度評価を行うことを目的とする。

## 2. 本手法の原理

図1のように、試料を回転テーブルに設置し、これに対して位相差を与え、方位  $\varphi_k = \frac{2\pi}{m} \times (k-1)$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) に設定して、ステップ数が  $m$  回の測定を行う。まず、図1(a)に示す  $k=1$  のステップの極座標系を基準として考える。回転テーブルに対して試料を  $\varphi_k$  だけ位相を変えた図1(d)のステップ  $k$  における測定データを  $S_k(\theta)$  とすると、試料の形状誤差成分と測定機の回転運動誤差成分をそれぞれ  $F(\theta)$ 、 $E(\theta)$  とすると、測定されたデータを  $S_k(\theta)$  は次のようになる。

$$S_k(\theta) = F(\theta - \varphi_k) + E(\theta) \quad (1)$$

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \{A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)\} \quad (2)$$

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \{C_n \cos(n\theta) + D_n \sin(n\theta)\}$$

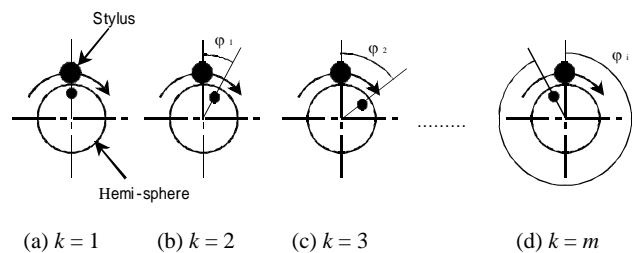


Fig.1 Model of multi-step method

ここで、(1)式を用いて相対的な位相  $\varphi_k$  を変化させた  $S_k(\theta)$  に対して  $\mu_m(\theta)$  を計算する。

$$\begin{aligned} \mu_m(\theta) &= \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m S_k(\theta) \\ &= E(\theta) + \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m F(\theta - \varphi_k) \\ &= E(\theta) + \sum_{l=1}^{N/m} (A'_{lm} \cos lm\theta + B'_{lm} \sin lm\theta) \\ &= E(\theta) + F^{(m)}(\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで  $F^{(m)}(\theta)$  は、 $F(\theta)$  の  $m$  の整数倍のフーリエ成分の和を示す。

測定された  $S_k(\theta)$  と得られた  $\mu_m(\theta)$  より、

$$f_m(\theta) = S_k(\theta) - \mu_m(\theta) \quad (4)$$

$f_m(\theta)$  が得られる。これは、 $m$  の整数倍のフーリエ成分が含まれない  $F(\theta)$  を表していることになる。

次に組み合わせ法を説明する。異なるステップ数から求められた  $f_m(\theta)$ 、 $f_n(\theta)$  を組み合わせることにより、 $m \times n$  のステップ数で求めた形状成分と同等の結果を得る方法である。

ステップ数が  $n$  回の測定を行うと、同様にこれより  $f_n(\theta)$  が求められ、これは  $n$  の整数倍のフーリエ成分が含まれていない。これを  $\varphi_i = \frac{2\pi}{m} \times (i-1)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 位相シフトした  $m$  個の

データから  $\mu_{n,m}(\theta)$  を求める。

$$\begin{aligned} \mu_{n,m}(\theta) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_n(\theta - \varphi_i) \\ &= f_n^{(m)}(\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

これは、 $f_n(\theta)$  から  $m$  の整数倍の成分を取り出したことになる。

従って(4),(5)式より、 $f_m(\theta)$  に対して  $m$  の整数倍の成分を補った  $f_{msn}(\theta)$  を求めることができる。

$$f_{msn}(\theta) = f_m(\theta) + \mu_{n,m}(\theta) \quad (6)$$

### 3. 実験

回転精度校正用標準球をマルチステップ法により試料形状成分と真円度測定機の回転誤差成分の分離し、形状の評価を行った。

テーラーホブソン社製タリロンド 73UHPR を用いて測定を行った。測定装置の概観を図 2 に示す。

測定点は、1 周あたり 2000 点で測定を行った。



Fig. 2 Roundness measurement instrument

マルチステップ法を用いて測定したデータから位相組合せ法を適用して評価した結果を示す。まず、測定系に対して測定対象に位相差を 5 ステップ(0, 72, 144, 216, 288), 8 ステップ(0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315)度与え、測定を行った。

まず、(5)式を適用し 8 ステップのマルチステップ法により回転精度校正用標準球の形状を求める。この形状データには、8 の整数倍のフーリエ成分が含まれていない。そこで、(6)式により 5 ステップのマルチステップ法より求めた形状成分から 8 の整数倍のフーリエ成分を取り出す。これらの形状を図 3 に示す。

(7)式のようにこれら 2 つのデータを組み合わせることにより得られた形状データは、40 ( $5 \times 8$ ) の整数倍のフーリエ成分をのぞいたすべての成分が含まれていることになる。この形状との 40 ステップのマルチステップ法を用いて求めた形状のフーリエ成分の 100 山成分までを図 4 と図 5 に示す。次に表 2 に図 4、図 5 で比較した形状データから求められた最小自乗中心による真円度の評価結果を示す。また、他国の標準研究所で多く行われている 10 ステップのマルチステップ法を適用した真円度の評価結果も示す。図 4 と図 5 から 2 つの結果は良く一致している。また、真円度の値もよく一致している。

計 13 ( $8 + 5$ )ステップのマルチステップ法の測定を行うことにより、40 ステップのマルチステップ法を適用した際に得られる形状データと同様の成分が得られることが確認された。

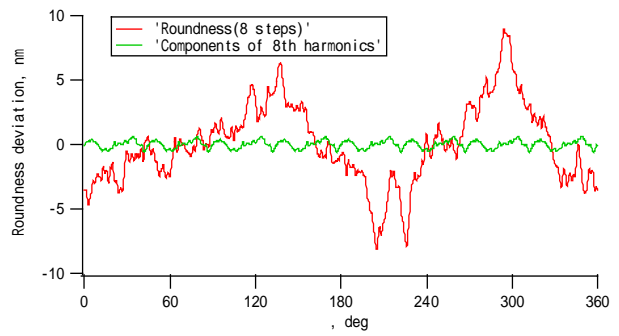


Fig.3 Feature and components of 8<sup>th</sup> harmonics of hemi-sphere

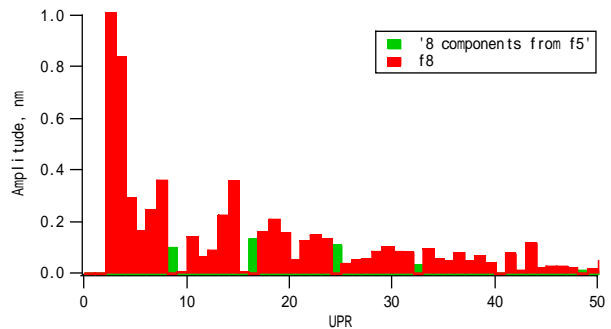


Fig.4 Harmonics component of hemi-sphere feature  
( Combined method )

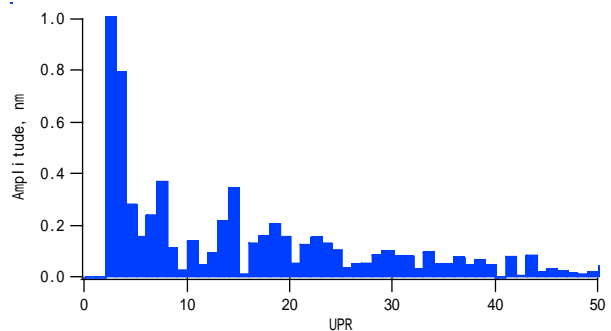


Fig.5 Harmonics components of hemi-sphere feature ( 40 step )

Table 2. Evaluation result

Number of steps	Roundness deviation, nm
Combined ( $5 \times 8$ )	17.09
40	16.99
10	16.26

### 4. おわりに

以上の結果から本手法を用いることにより、少ないステップ数のマルチステップ法を組み合わせることにより、従来マルチステップ法を適用した際に評価が分離できなかったフーリエ成分も含めた形状評価が可能となった。

これにより、通常では測定時間がかかるマルチステップ法を用いた高精度の真円度測定・評価を短時間かつ高精度に行うことが可能となる。