超精密静圧エアスピンドルのラジアル方向 回転精度の評価法*

野口 昭 治** 塚 田 忠 夫*** 坂 本 淳†

An Evaluation Method of Radial Accuracy for Ultrahigh Precision Air Spindle

Shoji NOGUCHI, Tadao TSUKADA and Atsushi SAKAMOTO

In this paper, the authors newly developed the vector indication method to understand radial run-out of ultrahigh precision air spindle. The run-out of rotating spindle was measured by two sensors located perpendicularly to each other on horizontal plane. The new algorithm was presented to get the instantaneous vector of displacement of spindle center for digital processing. It was made clear that the vector indication method was able to confirm the behavior of spindle motion more clearly than Lissajou's figure. Furthermore, the authors removed the form errors of master ball used as the measuring target and the difference between two sensor gains.

Key words: spindle, air spindle, Lissajou's figure, run-out, radial accuracy, vector, rotation accuracy, ultrahigh precision.

1. は じ め に

静圧エアスピンドルは、転がり軸受を使用したスピンドルと比較して剛性や負荷容量は小さいが回転精度が高いために、超仕上げ用研削スピンドルやCD製造検査装置等に使用されている。しかし、回転精度が高くなるにつれて、リサーチ法など従来の方法では、軸心の振れの方向などが十分な精度で把握し難くなってきており、いくつかの回転精度評価法が提案されてきた¹⁾²⁾。また、回転精度が高くなると、測定器系のノイズ対策、使用する複数センサのゲイン調整などの問題が付随して生じてくる。

このような背景から、本研究では、微小な変位を高精度で測定する際の問題点とその対応を含めて、静圧エアスピンドルの新しいデジタル処理によるラジアル方向回転精度評価法“ベクトル表示方式”の開発について報告する。本研究で開発する“ベクトル表示方式”は、スピンドルの振れを離散化したデジタルデータにより、振れのベクトルを得るアルゴリズムと表

示法であり、新しい回転精度評価法である。

2. リサーチ法の問題点

ラジアル方向回転精度の測定法としてよく用いられているリサーチ法の原理を図1に示す。わずかに偏心したマスターボールの変位を直交する2方向から測定し、オシロスコープ上に表示する方法である。回転精度は偏心が作り出す基礎円に重畳され変動量によって評価される。

図2に示すリサーチ図形は、回転角に対応した基礎円上の始点から引いた軸心振れのベクトルの終点の

Fig.1 Principle of Lissajou's figure

* 原稿受付 平成3年11月28日

** 正 会 員 日本精工(株)(藤沢市鶴沼神明1-5-50)

*** 正 会 員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

† 学生会員 東京工業大学工学部大学院

Fig.2 Lissajou's figure(1500 rpm)

軌跡として描いたものである。通常は、複数回転によるリサーチ図形の幅が再現性、最大半径と最小半径の差が回転精度であるとしている。しかし、図2のように始点と終点の位置が明示されていない限り、任意の回転角における軸心の振れの方角と大きさをリサーチ図形から判断することは困難であり、リサーチ図形の半径方向の変動だけで軸心の振れとする方法は正確性を欠いている。

また、測定データにはマスタボールの形状誤差も含まれているため、 $0.1\mu\text{m}$ を上回るような高い回転精度の測定では、信頼性が低くなると考えられる。

3. 回転精度評価方法

2方向のデータからコンピュータを用いてリサーチ図形を得る場合、測定データを離散化してデータに含まれる偏心成分を取り除き、振れ成分を基礎円に重畳させることになる。最も簡便な手法は、真円度測定で行われているように³⁾、各測定方向でそれぞれ偏心補正を行い、各方向で得た回転中心が一致するものと仮定して表示することである。この方法は簡便ではあるが、上述の仮定が常に成立するものではない。そのために、本研究では直交する2方向の回転中心を一致させる偏心除去方法を新たに試みる。

回転するマスタボールに対して2個のセンサを直交させた場合の幾何学的な関係を図3に示す。回転中心からセンサ原点までの距離を R_0 、センサAの原点に対するセンサBの原点のずれを C 、センサA, Bの出力を S_{a1} , S_{b1} 、偏心量を e 、そのX,Y方向成分を a, b 、偏心方向を α 、回転角を θ_1 とする。まず、センサAの出力に対して最小二乗法により偏心を補正したデータを S'_{a1} とし、最小二乗円の半径を R とおく。偏心量が非常に小さいとすれば、次の近似式が得られる。

Fig.3 Geometry of measured data

$$\begin{aligned} R_0 + S_{a1} &= R + S'_{a1} + e \cos(\theta_1 - \alpha) \\ &= R + S'_{a1} + a \cos \theta_1 + b \sin \theta_1 \end{aligned} \quad (1)$$

したがって

$$\begin{aligned} S'_{a1} &= R_0 - R + S_{a1} - a \sin \theta_1 - b \cos \theta_1 \\ &= S_{a1} + \Delta R - a \sin \theta_1 - b \cos \theta_1 \\ \Delta R &= R_0 - R \end{aligned} \quad (2)$$

同様にセンサBについて

$$\begin{aligned} R_0 + C + S_{b1} &= R + S'_{b1} + e \cos(\theta_1 + \pi/2 - \alpha) \\ &= R + S'_{b1} - a \sin \theta_1 + b \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (3)$$

であるので

$$\begin{aligned} S'_{b1} &= R_0 - R + S_{b1} + C + a \sin \theta_1 - b \cos \theta_1 \\ &= S_{b1} + \Delta R' + a \sin \theta_1 - b \cos \theta_1 \\ \Delta R' &= \Delta R + C \end{aligned} \quad (4)$$

式(2),(4)で考える中心は同一であるので、 a, b, R は両式とも同じでなければならない。これは、 $\sum \{(S'_{a1})^2 + (S'_{b1})^2\}$ を最小にすることであり、 $a, b, \Delta R, \Delta R'$ は、次式を解くことによって求まる。

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a \\ b \\ \Delta R \\ \Delta R' \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \sum (S_{a1} \cos \theta_1 - S_{b1} \sin \theta_1) \\ \sum (S_{a1} \sin \theta_1 + S_{b1} \cos \theta_1) \\ \sum S_{a1} \\ \sum S_{b1} \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、スピンドル1回転当たりのデータ数を N とし、等間隔でかつ偶数になるようにすれば、 $A_{11}=A_{22}=A_{33}$

$=-A_{44}=\sum I, A_{12}=A_{21}=A_{34}=A_{43}=A_{13}=A_{31}=A_{24}=A_{42}=A_{14}=A_{41}=A_{23}=A_{32}=0$ となる。したがって、式(5)は次のようになる。

$$\begin{aligned} a &= \sum (S_{a1} \cos \theta_1 - S_{b1} \sin \theta_1) / N \\ b &= \sum (S_{a1} \sin \theta_1 + S_{b1} \cos \theta_1) / N \\ \Delta R &= -\sum S_{a1} / N, \Delta R' = -\sum S_{b1} / N \end{aligned} \quad (6)$$

データの補正は式(2),(4)によって行う。

θ_1 におけるスピンドル軸心の振れ S_1 とその方向 ψ_1 は

$$S_1 = \{(S'_{a1})^2 + (S'_{b1})^2\}^{1/2} \quad (7)$$

$$\psi_1 = \arctan(S'_{b1} / S'_{a1}) \quad (8)$$

となる。

以上のアルゴリズムを含めて、 ψ_1 と S_1 の関係を本研究では“ベクトル表示法”と呼ぶことにする。

4. 測定精度向上の工夫

4.1 測定精度向上のための対応

本研究は、後述する新しい回転精度評価における精度を向上させるために、次項のような工夫を加える。

- (1) マスタボールの形状誤差とスピンドルの回転誤差の分離。
- (2) 複数センサを使用する場合のセンサ相互のゲイン調整。
- (3) フィルタによる信号の位相遅れの影響とその対応。

4.2 マスタボールの形状誤差の補正

マスタボールの形状誤差とスピンドルの回転誤差を分離する方法として、本研究ではマルチステップ法⁴⁾を用いる。マルチステップ法はリバーサル法など他の形状誤差分離方法と比較して、マスタボールやセンサのセッティング誤差の影響を受け難いという特長がある⁵⁾。図4にマルチステップ法を示す。

Fig.4 Principle of multi-step method

る⁵⁾。図4にマルチステップ法を示す。

マスタボールをスピンドルのある決まった位置に対して方位 $\eta_k = 2\pi(k-1)/2m$ に設定し、 $2m$ 回の測定を行う。ここで、 $k=1, 2, \dots, 2m$, m : 整数である。マスタボールの形状誤差、スピンドルの回転振れをそれぞれ $F_a(\theta)$, $E_a(\theta)$ とおき、 F_a , E_a が 0 次の項を省略した次式のフーリエ級数で表すことができるものとすれば、

$$F_a(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \{A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)\} \quad (9)$$

$$E_a(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \{C_n \cos(n\theta) + D_n \sin(n\theta)\} \quad (10)$$

スピンドルに対してマスタボールの位相 η_k を変えたステップ k における測定データを $S_k(\theta)$ とおくと、

$$S_k(\theta) = F_a(\theta - \eta_k) + E_a(\theta) \quad (11)$$

偏心除去後、 k に関する式(11)の和を求めると、

$$\sum_{k=1}^{2m} S_k(\theta) = \sum_{k=1}^{2m} F_a(\theta - \eta_k) + \sum_{k=1}^{2m} E_a(\theta) \quad (12)$$

右辺第2項は、 $\sum E_a(\theta) = 2mE_a(\theta)$ であるので式(12)は次式のように書き換えられる。

$$E_a(\theta) = \left\{ \sum_{k=1}^{2m} S_k(\theta) - \sum_{k=1}^{2m} F_a(\theta - \eta_k) \right\} / 2m \quad (13)$$

$\eta_k = \pi(k-1)/m$ の関係を式(13)に代入すると、

$$\begin{aligned} E_a(\theta) &= \sum_{k=1}^{2m} S_k(\theta) / 2m - \sum_{n=1}^{\infty} \{A_{2mn} \cos(2mn\theta) \\ &\quad + B_{2mn} \sin(2mn\theta)\} \end{aligned} \quad (14)$$

となる⁵⁾。式(14)の右辺第2項は、本方法では除去できないマスタボールの形状成分であるが、高周波成分が小さいものとすれば省略することができる。

式(11), (14)からマスタボールの形状は、 $k=1$ のときのデータを基にして、

$$F_a(\theta) = S_1(\theta) - E_a(\theta) \quad (15)$$

となる。マルチステップ法による補正に代わって、式(14)の値をデータベースとしてもち、マスタボールの形状誤差を補正することもできる。

図5にセンサAで測定したデータと式(15)の補正を行った結果を示す。この方法によって測定データの精度を向上させることができる。

4.3 センサ相互のゲイン調整

精密測定において複数のセンサを使用する場合には、それぞれのセンサやアンプのゲインが一致していることが必要である。図6は使用する2個のセンサのゲイ

ンを調整するために本研究で工夫した手法である。圧電素子に正弦波電圧（本研究では5Hz）を加えてスチールボールを変位させ、対抗して設置されたセンサA、Bの変位を測定する。センサAのゲインを基準としてセンサBのゲインを求め、センサBの測定データを補正すればセンサ間のゲインを一致させることができる。

4.4 フィルタの適用

高次のノイズを除去するために、一般にアナログローパスフィルタが使われる。図7(a)は、1500rpmで回転するスピンドルの振れ（返信）を図3のセンサA(ADE Micro Sense 3401-R02)により測定したデータにアナログローパスフィルタ(NF回路設計ブロック:E-3201, 24dB/oct)を適用した結果である。カットオフ周波数を低くすると位相差が生じてくるので、上述したマスターボールの形状誤差補正などが行えなくなるおそれがある。そのために、以下のような非再帰形数値フィルタ(Non-recursive Digital Filter)の適用を試みる。

非再帰形数値フィルタとは出力が入力項のみの有限和で与えられる方式をいう。ISO/TC57/SC1-N87 “ISO

Draft proposal for metrological characteristics of phase corrected filters for the use in electrical contact stylus instruments” の方式を利用すれば、サンプリング間隔を $\Delta\theta$ 、フィルタに対する入力データを $S(i\Delta\theta)$ 、出力を $S^*(i\Delta\theta)$ とおくと

$$S^*(i\Delta\theta) = \Delta\theta \sum_{k=-M}^M h(k) [S\{(i-k)\Delta\theta\} + S\{(i+k)\Delta\theta\}] + \Delta\theta h(0) S(i\Delta\theta) \quad (16)$$

$$h(k) = \exp\{-\pi(k\Delta\theta/\alpha\lambda_c)^2\} / \alpha\lambda_c$$

ここで、 λ_c はカットオフ値、 α は λ_c においてゲインが50%になる係数で $\alpha=0.4697$ である。この場合、減衰率は約12dB/octとなる。また、 M は $h(k)$ が十分に小さいと判断される値、例えば $h(0)$ の1%程度とする。図7(b)にカットオフ値 $\lambda_c = \pi/5$ としたデジタルフィルタの適用例を示す。位相遅れのない結果が得られてい

ることが分かる。

5. 測定装置と測定結果

5.1 測定装置と測定条件

本研究で開発したラジアル方向回転精度測定装置の概略を図8に示す。ダイレクトドライブ静圧エアスピンドル（多孔質絞り形プロトタイプ）に取付けたマスタボールの変位を直交する2方向から測定し、ロータリエンコーダのパルス（最大1024p/rev）により離散化する。マスタボールの偏心調整部やセンサの取付け部の詳細を図9に示す。マスタボールの偏心調整はワッフルプレートで行い⁶⁾、マルチステップ法のための位相は割出しデバイス（三菱重工：ハースカプリング）により行う。非接触センサは、粗動と微動、上下調整ができるステージに固定されている。

Fig.8 Schematic view of measuring system

Fig.9 Detail of measuring device

Table 1 Experimental conditions

Sensors	ADE-Micro Sense
Range	$\pm 2.5 \mu\text{m}$
Number of data	512 data/rev
Number of index for multi-step method	$2m=8$
Air pressure	0.4 MPa
Speed of revolution	300–3000 rpm

本研究での測定条件を表1に示す。測定値のばらつきなどの検討のために、同一条件で8周分のデータを連続して収集する。また、マルチステップ法のためのマスタボールの分割は8等分とする。

5.2 測定結果

図10(a)は本研究の方式による軸心の振れのベクトル表示、図10(b)はリサージュ図形である。図10(b)には図2のように振れのベクトルを付け加えてある。図10(b)のリサージュ図形では、軸心があたかも偏って振れているように見えるが、振れのベクトルを見れば分かるように、法線方向の偏差を振れであると解釈してしまうためである。実際には、リサージュ図形に表示されているベクトルを順次追跡した図10(b)から分かるように、スピンドル1回転の間に軸心が2サイクル変動している。振れのベクトル表示がない一般のリサージュ図形からは、このような現象を明確に把握することは困難である。

リサージュ図形に最小二乗円を当てはめ、そこから法線方向偏差をリサージュ法による振れ δ_L とし、図10(a)のベクトルの大きさ δ_v との差を図11に示す。リサージュによる方法は振れが小さく評価されており、特に図11(a)において振れのベクトルが基礎円の接線方向に近い場合、差が大きくなる。以上の結果のまとめとして、表2に各種実験条件下での最大

振れ（両振幅）を示す。8周分のデータによるばらつきは、標準偏差で $0.003 \mu\text{m}$ 程度（測定器の分解能を上回るので参考値とする）であった。高精度スピンドルにとって重要な軸心の最大振れは、リサージュ図形の最大振幅が最も小さくなっており、前述したようにリサージュの振れの幅は必ずしも軸心の振れを表していないことを示している。ま

(a)Vector indication developed in this paper

(b)Lissajou's figure showing vectors

Fig.10 Vector indication of spindle motion error

Fig.11 Difference between σ_L and σ_v

た、研究の手法による値が最も大きく評価されている。これは、X、Y方向独立に偏心を補正する方が自由度が大きい（式(2)、(4)の $a, b, \Delta R$ がX、Y方向共通であるとする本研究に対して、X、Y方向の $a, b, \Delta R$ が独立であるとする）ことによる自由度の増大）ことによる。スピンドルを使用する側から考えると、振れが大きい評価法の方が最悪の事態が予測できるという利点があるばかりでなく、振れのベクトル表示により、スピンドルの回転精度の低下の原因追求の可能性が生まれる。

Table 2 Maximum run-out of rotating spindle

Speed of rotation rpm	By vector indication method μm	Independent method in X, Y directions μm	Lissajou's figure method μm
300	0.042	0.037	0.027
750	0.040	0.035	0.027
1500	0.041	0.035	0.022
3000	0.048	0.044	0.036

6. お わ り に

超精密スピンドルのデジタル処理によるラジアル方向回転精度評価法の開発を行った本研究における主な結論は次のとおりである。

- (1) 直交するX、Y方向で測定された振れのデータに対して、最小二乗法により偏心補正をし、偏心をベクトル表示する手法を提案した。
- (2) リサーチ法より本研究で提案したベクトル表示法の方が、スピンドルの振れの状況が詳細に把握できることを確かめた。
- (3) X、Y方向独立にデータを処理する方法やリサーチ法より、本研究の方法による振れの方が大きく評価されることを明らかにし、本研究の手法が精密スピンドルの精度評価に有効であることを確かめた。
- (4) X、Y方向の振れを測定する2個のセンサのゲイン調整を行う手法を考案した。
- (5) スピンドルの振れとマスタボールの形状を分離する工夫を行った。

最後に、本研究は(財)メカトロニクス技術高度化財団の研究費補助を受けて行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) P.D.Chapman: A Capacitance Based Ultra-precision Spindle Error Analyser, Prec. Eng., 7, 3(1985)129.
- 2) 新野秀憲ほか: 超精密回転軸の性能評価, 1986年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1986)499.
- 3) T.Tsukada & T.Kanada: Measurement of Cylindrical Form Errors Using a Non-contact Detector, Prec. Eng., 4, 3(1982)153.
- 4) D.J.Whitehouse: Some Theoretical Aspects of Error Separation Techniques in Surface Metrology, J.of Phys., Ser.E, Sci. Instr., 9(1976)537.
- 5) 塚田忠夫ほか: 円筒形状測定における系統的誤差の補正とその評価, 設計工学会誌, 23, 9(1988)291.
- 6) 垣野義昭ほか: 軸の回転精度に関する研究 (第2報), 精密機械, 44, 6(1978)730.