三次元測定機における測定精度改善のための 測定値補正方法*

古谷涼秋** 大崎 求*** 大園成夫** 加藤純一†

Calibration Method for Improving the Accuracy of Three Coordinate Measuring Machine

Ryoshu Furutani, Motomu Osaki, Shigeo Ozono and Jun-ichi Kato

This paper describes the calibration functions to improve the accuracy of measurement by 3CMM, and the method for deciding the parameters in these functions. The parameters are decided in comparison with the standard form. The calibration functions transform the measured values into corrected values. The parameters of functions depend on the error characteristics of 3CMM measuring space and are determined by measuring the geometry of the standard form. The experiment shows that the form deviation of the circular disk used for the standard is reduced to half by this calibrating method.

Key words: three coordinate measuring machine(3CMM), errors of 3CMM, accuracy, calibration method, standard form, standard circle

1. はじめに

三次元測定機の精度についてのこれまでの研究は、プローブに精度測定用の特殊なものを用いたり、別の測定機を三次元測定機上に設置したりという特殊な条件のもとでの精度の測定方法や、精度を決定する要因を求める研究が多い^{1)~3)}。これらの研究では、既に真の座標値の分かっている点(基準点)を三次元測定機によって測定し、得られた測定座標値と比較することによって、精度や精度の決定要因を求めている。

しかし、三次元測定機の精度を求める上で重要なのは、三次元空間内の個々の点の真の座標値を知ることである。また、特殊な条件下で精度を向上させるのではなく、三次元測定機の測定環境で測定精度を向上させることが望ましい。また、三次元測定機の測定範囲全体にわたって精度を向上させるのではなく、測定に必要な限られた範囲の精度を向上させれば十分であるので、測定座標値の補正のためのパラメータはその範囲内では一定と考えられる。

そこで、本論文では、三次元測定機による測定座標値を基準点の座標値と比較することによって、測定座標値を補正し、真の座標値により近い座標値を得る手法について述べる。そのために、まず、三次元測定機

の誤差要因と、三次元測定機の測定値と真の座標値の関係を定式化する。次に、この式に含まれるパラメータを決定するための基準について検討し、実験によって測定座標値と基準との比較を行い、三次元測定機の測定座標値の補正を行う。

2. 三次元測定機の補正のモデル

2.1 三次元測定機の誤差要因

三次元測定機の誤差要因として 図 1 に示すように、

- XYZ の各軸間の角度 (E_{XY}, E_{YZ}, E_{ZX})
- 各軸のヨーイング, ローリング, ピッチング
- スケール誤差
- 各軸のたわみ

を考える。

本章では、これらの誤差要因と三次元測定機の測定点 $P(x, y, z)$ とその真の座標値 $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ とを関係付ける。求める関係は、 $\bar{P} = f(P)$ である。以下順次この関数 $f(P)$ を求めて行く。

2.2 軸間の直角度, ヨーイング, ローリング, ピッチングの影響

Y 軸のヨーイング, ローリング, ピッチングは、三次元測定機の真の座標値を軸回りの回転によって、測定座標値へと変えるが、図 2 のような門型構造の三次元測定機では、X 軸、Z 軸は Y 軸と共に姿勢を変えるので、Y 軸のヨーイング, ローリング, ピッチング

* 原稿受付 平成 2 年 9 月 20 日。1990 年度精密工学会春季大会
学術講演会(平成 2 年 3 月 30 日)にて発表

** 正会員 東京大学工学部 (東京都文京区本郷 7-3-1)

*** 学生会員 東京大学工学部

† 正会員 理化学研究所 (和光市広沢 2-1)

E_{XY}, E_{YZ}, E_{ZX} :Angles between X-Y axis, Y-Z axis, Z-X axis
 α_Z :Yawing angle of Z-axis
 β_X :Rolling angle of X-axis
 γ_Z :Pitching angle of Z-axis
 x, y, z :Reading of scale

Fig. 1 Error factors in 3CMM

は、他のパラメータに含めることができる。また、X軸のピッチングは、Y軸のローリングと同じ効果を生じ、X軸のヨーイングは、XY軸間の角度と同じ効果を生じる。さらに、Z軸の延長線にプローブがあるので、Z軸のローリングは、座標値を変化させない。

以上のことから、ヨーイング、ローリング、ピッチングについては、X軸のローリング β_X 、Z軸のヨーイング α_Z 、Z軸のピッチング γ_Z だけを扱えばよい。

図1に示した向きに各軸のなす角とヨーイング、ローリング、ピッチングを考える。三次元測定機の真の座標値は、ヨーイング、ローリング、ピッチングによる軸回りの回転によって、三次元測定機の測定座標値に変化するので、まず、これらの軸回りの回転の変換マトリックスを求めると、

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_Z & \sin \gamma_Z & 0 \\ 0 & -\sin \gamma_Z & \cos \gamma_Z & 0 \\ 0 & y(1 - \cos \gamma_Z) & -y \sin \gamma_Z & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} \cos \alpha_Z & 0 & -\sin \alpha_Z & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_Z & 0 & \cos \alpha_Z & 0 \\ x(1 - \cos \alpha_Z) & 0 & x \sin \alpha_Z & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_X & \sin \beta_X & 0 \\ 0 & -\sin \beta_X & \cos \beta_X & 0 \\ 0 & y(1 - \cos \beta_X) & -y \sin \beta_X & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。ただし、 R_1 は、X軸回りのZ軸のピッチングによる回転マトリックス、 R_2 は、Y軸回りのZ軸

Fig. 2 A structure of 3CMM

のヨーイングによる回転マトリックス、 R_3 は、X軸回りのX軸のローリングによる回転マトリックス。

したがって、真の座標値 $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ は、

$$(\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z} \ 1) = (x \ y \ z \ 1) R_1 R_2 R_3 \quad (4)$$

で、三次元測定機の測定座標値 $P(x, y, z)$ より求められる。

次に、三次元測定機のXYZ軸間の角度が図1に示したように、 E_{XY}, E_{YZ}, E_{ZX} であるとき、真の座標値と測定座標値の関係を求める。

図1に示すように、点 O, P_1, P_2, P_3 を定めると、

$$O\bar{P}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$P_1\bar{P}_2 = \begin{pmatrix} x \cos(\frac{\pi}{2} - E_{XY}) \\ x \sin(\frac{\pi}{2} - E_{XY}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$P_2\bar{P}_3 = \begin{pmatrix} -z \sin(E_{ZX} - \frac{\pi}{2}) \cos(\frac{\pi}{2} - E_{XY}) \\ z \sin(E_{ZX} - \frac{\pi}{2}) \sin(\frac{\pi}{2} - E_{XY}) \\ z \sin E_{YZ} \end{pmatrix} \quad (7)$$

これらをまとめると、

$$O\bar{P}_3 = (\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z} \ 1) = (x \ y \ z \ 1) R_4 \quad (8)$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} \sin E_{XY} & \cos E_{XY} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \sin E_{ZX} \cos E_{XY} & 0 \\ 0 & 0 & \sin E_{YZ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

となる。

式(4)、式(9)より、真の座標値 $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ と測定座標値 $P(x, y, z)$ の関係は、

$$(\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z} \ 1) = (x \ y \ z \ 1) R_1 R_2 R_3 R_4 \quad (10)$$

となる。

2.3 スケール誤差の影響

スケール誤差には、三次元測定機のスケール誤差と測定環境の温度変化によるスケールの伸縮がある。スケール自身の誤差と温度の影響を扱うために、スケール誤差を次のような一次式で近似する。

$$(\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z} \ 1) = (x \ y \ z \ 1) R_0 \quad (11)$$

ここに、

$$R_0 = \begin{pmatrix} A_X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_Y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_Z & 0 \\ B_X & B_Y & B_Z & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

2.4 たわみの影響

門型構造の三次元測定機では、図3に示すように、三次元測定機のXY軸は三次元測定機の自重によるたわみを生じる。X軸に生じるたわみの大きさを δ_X 、Y軸に生じるたわみの大きさを δ_Y とし、接線とX軸の間の角度を ϵ_X 、接線とY軸の間の角度を ϵ_Y とする。このとき生じた角度 ϵ_X 、 ϵ_Y は、三次元測定機の構造に応じて、2.2節のピッチング、ローリング、ヨーイングに加えられる。

したがって、式(10)では定数であったピッチング、ローリング、ヨーイングの項に角度 ϵ_X 、 ϵ_Y の影響が加わる。これらの影響は、 β_X を $\beta_X + \epsilon_X$ 、 α_Z を $\alpha_Z + \epsilon_X$ で置き換え、 $\bar{z}$ から δ_X 、 δ_Y をひくことによって、補正式に含めることができる。

(a) X-axis

(b) Y-axis

δ_X, δ_Y : Deflection of X-axis and Y-axis
 ϵ_X, ϵ_Y : Slope of X-axis and Y-axis

Fig. 3 Deflection and slope of X-axis and Y-axis

ここでは、門型構造の三次元測定機を例にとり、X軸のたわみはZ軸の荷重により、Y軸のたわみはX

軸とZ軸の荷重によるものとする。Z軸には、Z軸の先端のプロープの質量による荷重しかかからないので、Z軸のたわみは無視できるとすると、

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_X &\doteq K_X x(x - L_X)(2x - L_X) \\ \epsilon_Y &\doteq -3K_Y(L_Y + 2y)^2 \\ \delta_X &\doteq K_X x^2(x - L_X)^2 \\ \delta_Y &\doteq 2K_Y[L_Y + 2y]^3 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となる(ただし、 K_X 、 K_Y は比例定数、 L_X はX軸の長さ、 L_Y はY軸の長さの1/2)。

先に β_X を $\beta_X + \epsilon_Y$ 、 α_Z を $\alpha_Z + \epsilon_X$ に置き換えたので、式(10)より、 xy について非線形な補正式が得られる。式(10)、式(13)をまとめると、

$$(\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z} \ 1) = (x \ y \ z \ 1) R_1 R'_2 R'_3 R_4 R_5 \quad (14)$$

ここに、

$$R'_2 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_Z + \epsilon_X) & 0 & -\sin(\alpha_Z + \epsilon_X) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_Z + \epsilon_X) & 0 & \cos(\alpha_Z + \epsilon_X) & 0 \\ x(1 - \cos(\alpha_Z + \epsilon_X)) & 0 & x \sin(\alpha_Z + \epsilon_X) & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$R'_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_X + \epsilon_Y) & \sin(\beta_X + \epsilon_Y) & 0 \\ 0 & -\sin(\beta_X + \epsilon_Y) & \cos(\beta_X + \epsilon_Y) & 0 \\ 0 & y(1 - \cos(\beta_X + \epsilon_Y)) & -y \sin(\beta_X + \epsilon_Y) & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\delta_X - \delta_Y & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

が得られ、この式の $(x \ y \ z)$ に式(11)の結果を代入することによって、補正式が得られる。

3. 基準円盤を用いた三次元測定機の補正

2章で、三次元測定機の誤差要因と三次元測定機の測定座標値から真の座標値を求めるための式を求めた。本章では、2章で求めた式のパラメータ(誤差要因)を決定するための基準について考察する。三次元測定機の測定座標値 $P(x, y, z)$ を補正するためには、真の座標値と比較する必要がある。この真の座標値を三次元測定機上に設ける方法として、

(1) より高精度の測定機でプロープの座標値を測定する⁴⁾。

(2) 規則的に配置された点を三次元測定機によって測定する^{5)~7)}。

という2つの方法がある。

(1)の方法では、より高精度の測定機が必要であり、三次元測定機をその測定機の場合へ持っていくなどの

準備が必要であるが、三次元測定機の測定座標値を真の座標値と直接比較できるので、測定座標値の補正が簡単であるという長所がある。(2)の方法は、精度の良いマスタワークを測定し、その測定値から間接的に三次元測定機の精度を求める方法である。例えば、文献7)では、精度良く加工された円盤(基準円盤)をマスタワークとして用いて三次元測定機の精度を求めている。この方法は、マスタワークを測定して得られた形状とマスタワークの真の形状とを比較する方法で、マスタワークの形状精度が保証されていれば、特殊な装置を必要としない簡便な方法である。しかし、三次元測定機の測定精度や誤差要因の特定にとどまっておらず、測定座標値の補正には至っていない。

本論文は、前章までに求めた結果を利用して、測定座標値の補正を簡便に行うことが目的である。そのために、マスタワークを用いることにする。そしてマスタワークが基準円盤のような高精度の円形輪郭を有するものであれば、基準円盤上の点を三次元測定機で測定した点 $P(x, y, z)$ は、三次元測定機に誤差がなければ、真円を描くはずであり、点 P が、真円にならないのは、三次元測定機に誤差があるからである。逆に言えば、三次元測定機の測定座標値を補正した結果、点 P が真円を描くようになれば、正しく補正が行われたことになる。それゆえ、三次元測定機の補正用のパラメータは、点 P が真円となるように決定すればよい。点 P の描く円が真円にどれだけ近いかは、円盤の中心座標を (C_x, C_y) 、半径を R とすると、点 P が描く円の半径の分散

$$\frac{1}{N} \sum_i^N (\sqrt{(x_i - C_x)^2 + (y_i - C_y)^2} - R)^2 \quad (18)$$

で表わせるので、式(18)を小さくするように、補正用のパラメータを決めれば、点 P が真円に近い曲線を描き、三次元測定機の測定座標値を補正することができる。

4. 実験

4.1 実験条件

本章では、3章で述べた考え方に従って三次元測定機の定盤上に水平に基準円盤(真円度 $0.3\mu\text{m}$)を設置し、三次元測定機の測定点を補正した結果を示す。実験には、三次元測定機 FN503 (ミットヨ) を用い、プローブは、PH-9(Renishaw) を用いた。測定は、CNC モードで行い、測定点は基準円盤円周上の等間隔の 360 点である。この 360 点を $R-\theta$ 表示したものが、図 4(a) である。これを見ると低周波のうねりがあることがわかる。これらの測定点は、プローブの異なる点で測定

されており、プローブは、その構造のために測定対象に接触したことを検出する感度が場所によって異なるので、このような低周波のうねりが生じたと考えられる。そこで、プローブ全体を Z 軸回りに回転させ、プローブの角度を変えて同様にデータをとることによって、プローブの方向性による影響を除くことにする。

4.2 プローブの方向性の除去

基準円盤上でとられた点を $F(\theta)$ で表わす。 $F(\theta)$ は基準円盤の中心から測定点までの長さ、 θ は図 5 のようにとる。また、プローブ PH-9 を図 5 のように回転させる。このときの回転角 φ を使って、プローブの方向性によって生じる動径方向の変位を $f_p(\theta - \varphi)$ と表わし、プローブの方向性を除去した測定値を $f_c(\theta)$ と表わすと、プローブの角度を φ_1 として基準円盤上で測定された点 $F_1(\theta)$ と、プローブの角度を φ_2 として測定された点 $F_2(\theta)$ は、それぞれ

$$\begin{cases} F_1(\theta) = f_c(\theta) + f_p(\theta - \varphi_1) \\ F_2(\theta) = f_c(\theta) + f_p(\theta - \varphi_2) \end{cases} \quad (19)$$

と表わせる。 $f_c(\theta)$ はプローブの角度に依存しないから、異なるプローブ角度で円盤を測定した時のプローブの方向性の影響の差を $F_d(\theta)$ とすると、

$$\begin{aligned} F_d(\theta) &= F_1(\theta) - F_2(\theta) \\ &= f_p(\theta - \varphi_1) - f_p(\theta - \varphi_2) \end{aligned} \quad (20)$$

となる。

次に、 $f_p(\theta)$ をフーリエ展開して、

$$f_p(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (21)$$

と表わして、式(20)に代入して、実験に用いたプローブの角度($\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \frac{\pi}{24}$)を使って、整理すると、

$$F_d(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} (a'_n \cos(n\theta) + b'_n \sin(n\theta)) \quad (22)$$

$$\begin{cases} a'_n = (1 - \cos(n\frac{\pi}{24}))a_n + \sin(n\frac{\pi}{24})b_n \\ b'_n = -\sin(n\frac{\pi}{24})a_n + (1 - \cos(n\frac{\pi}{24}))b_n \end{cases} \quad (23)$$

となる。ここで、 $F_d(\theta)$ を $f_p(\theta)$ と同様に、

$$F_d(\theta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \quad (24)$$

とすると、式(22)と式(24)とから、

$$\begin{cases} (1 - \cos(n\frac{\pi}{24}))a_n + \sin(n\frac{\pi}{24})b_n = A_n \\ -\sin(n\frac{\pi}{24})a_n + (1 - \cos(n\frac{\pi}{24}))b_n = B_n \end{cases} \quad (25)$$

となり、 A_n, B_n は、測定値の差 $F_d(\theta)$ をフーリエ変換することによって、得られるので、式(25)を解き、 $a_n,$

(a) Before removing the probe effect

(b) After removing the probe effect

Fig. 4 Measurement results of a standard circle

b_n を求めることができる。したがって、プローブの方向性を表す関数 $f_p(\theta)$ が決定され、式(19)から、三次元測定機の影響だけによる基準円盤の測定結果 $f_c(\theta)$ が得られる。この $f_c(\theta)$ を図4(b)に示す。このデータを再度 (x, y, z) のデータに戻したものが補正する対象となる。

4.3 測定点の補正

次に、プローブの方向性の影響を除去されたデータに対して、式(18)が最小になるように、最小二乗法を用いてパラメータを調整する。このとき、基準円盤の中心座標と半径が分かっている必要があるが、中心座標は、三次元測定機にどのようにセットしたかによって変わってしまい、真の中心座標は分からないので、中心座標と半径を三次元測定機の誤差要因のパラメータと同等のパラメータとして扱う。

Fig. 5 A standard circle and a probe angle

Table 1 Error factors and their experimental values

Error factor		Value
A_X		1.00001
B_X	mm	-2.69952×10^{-3}
A_Y		9.99985×10^{-1}
B_Y	mm	2.45361×10^{-3}
α_Z	rad	8.23968×10^{-10}
β_X	rad	2.18674×10^{-3}
γ_Z	rad	-2.17510×10^{-3}
E_{XY}	rad	1.570796
E_{YZ}	rad	1.570796
E_{ZX}	rad	1.570803
K_X	mm ⁻³	2.51002×10^{-21}
K_Y	mm ⁻²	-9.76159×10^{-23}
L_X	mm	1.56992×10^3
L_Y	mm	4.40682×10^2
C_z	mm	1.80924×10^2
C_y	mm	1.64442×10^2
R	mm	1.27107×10^2

パラメータは表1に示すようになり、これらのパラメータを用いると、補正された測定座標値 (x', y', z') が得られる。得られた結果を R - θ 表示したのが図6である。

図4(b)と図6は、マスタワークの形状精度を測定した結果を表わしており、図4(b)の形状偏差は $8.0\mu\text{m}$ であり、図6の形状偏差は $4.4\mu\text{m}$ である。三次元測定機の測定座標値を補正した結果は、真円になるはずであり、形状偏差が小さいほど補正がうまく行われていることになる。この実験では、形状偏差が約1/2になっており、三次元測定機の補正が有効に行われていることが分かる。図6の形状偏差が $4.4\mu\text{m}$ となったのは、測定座標値の Z 軸方向の補正がなされていないためであると考えられる。

Fig. 6 Measurement results of a standard circle with calibrated coordinates

なお、測定時間は360点を測定するのに約30分、補正パラメータを計算するための計算時間は、SUN3/60で約5分であった。

また、表1のパラメータを使って、呼び寸法100mmのブロックゲージの寸法を三次元測定機の定盤上の30か所で測定した結果、補正前の平均値は100.0028 mm、標準偏差は1.8 μ mとなり、補正後の平均値は100.0026 mm、標準偏差は1.1 μ mとなった。平均値ではあまり違いはないが、三次元測定機に対して同じ座標値を測定するように指令を送って測定した時の標準偏差が約1 μ mであったことを考えると、十分に補正されていると考えられ、補正後の標準偏差は補正前に比べて、0.7 μ mだけ小さくなっており、補正後の測定値の方がより安定した結果になっていることがわかる。

5. 結 論

本論文では、三次元測定機の使われる環境下で三次元測定機の測定座標値を補正するための手法として、マスタワークを用いた手法について述べた。さらにマスタワークとして基準円盤を用い、実験によって三次元測定機の測定座標値の補正を行い、以下の結論を得た。

(1) 実際の測定環境下で補正できるように、

- XYZの各軸間の角度
- 各軸のヨーイング、ローリング、ピッチング
- スケール誤差
- 各軸のたわみ

を含んだ補正式を導出した。

- (2) マスタワーク上の測定点がマスタワークの理想形状と一致するように補正パラメータを決定し、測定座標値の補正を行う方法を示した。
- (3) 本論文の方法によりマスタワークを測定した結果、マスタワークの形状偏差を約1/2(4.4 μ m)に改善することができた。
- (4) 本論文の方法によってブロックゲージの寸法を測定した結果、補正後の方が標準偏差で0.7 μ mだけ安定した結果が得られた。
- (5) プローブの方向性の影響の除去方法について示した。

参 考 文 献

- 1) 中村哲夫: 三次元測定機の測定誤差の評価法, 計量管理, 31, 10, (1982)581-587.
- 2) 薛 軍, 大園成夫, 高増 深: 三次元座標測定機の案内精度の測定試験と精度検討, 精密機械, 50, 3, (1984)556-560.
- 3) H.Kunzmann, K.Busch and F.Wäldele: Numerical Error-Correction of a Coordinate Measuring Machine, Proc. ISMQC, (1984)278-282.
- 4) H.O.Y.Tikka: Tetra-Test-Geometric Calibration Method, VDI BERICHTE, NR.761, (1989)81-86.
- 5) E.Träpet and F.Wäldele: Determination of the Parametric Errors of Co-ordinate Measuring Machines and Machine Tools Using Reference Objects, VDI Ber., Nr.761, (1989)163-175.
- 6) I.Brezina: Metrological Testing of Coordinate Measuring Machines, VDI Ber., Nr.761, (1989)55-60.
- 7) W.Knapp: Circular Test for Three Coordinate Measuring Machines and Machine Tools, Prec. Eng., 5, 3, (1983)115-124.