

## 三次元座標測定機の精度向上法\*

### (第2報, 三次元用ゲージによる校正)

大矢 誠<sup>\*1</sup>, 穂苅 久<sup>\*1</sup>, 田村 久司<sup>\*2</sup>

## A Method of Improving the Accuracy of the Three-coordinate Measuring Machine (2nd Report, Calibration Method Using the Three-dimensional Standard)

Makoto OYA, Hisashi HOKARI, and Hisashi TAMURA

A calibration method of the three-coordinate measuring machine (3CMM) is presented. Two types of three-dimensional standard gage made by the authors were used for the calibration test. In this method, the error vector was directly observed and determined by comparing the measured value with the true value of the gage. The discrete distribution of the error vector was thus obtained. This method is convenient for machine shop applications. Based on the proposed method, the calibration test was performed on the 3CMM. To verify the accuracy of the calibrated 3CMM, distance measurements were performed using the gage blocks, and the measured values were corrected. As a result, it was clarified that the error correction using the result of the calibration test improves the accuracy of the 3CMM.

**Key Words:** Measurement, Accuracy, Three-coordinate Measuring Machine, Three-dimensional Standard, Calibration, Error Vector

### 1. 緒 言

三次元座標測定機は、測定プローブの位置を直交三軸方向の座標として読取り、その値を電子計算機で演算処理することによって寸法や形状などを決定する測定機である。この測定機は、さまざまな形状をした物体に対して優れた寸法測定適用性を持ち、しかも短時間にそれができることから、現在の機械工業にとって必要不可欠な測定機となってきている。それゆえに、いっそうの高機能化を目指して、データ処理機能や操作性の向上、あるいは測定の高速度化や自動化に関する研究も行われている<sup>(1)</sup>。

他方、三次元測定機に対する要求の一つに高精度化がある。三次元測定機の構造はアッペの原理に従っていないから、真直度や直角度などの幾何学的な誤差の影響を避けることができず、これが精度低下の大きな原因になっている。精度低下の原因としては、このほかにも、スケール自身の誤差やキャリッジの移動による測定機各部の変形などが考えられるが、これらはす

べて測定機の系統誤差の要因である。系統誤差は、場合によっては取り除くことのできる誤差である。そこで、これらを取り除くことができるとすれば、三次元測定機の高精度化が期待できるであろう。

高精度化に関し、ハードウェアの面からは、測定機本体の構造の改良とか、各軸の案内方式や駆動方式の改良とかが試みられている<sup>(2)</sup>。一方、著者らはこれまでに、系統誤差をソフトウェア的に補正して高精度化を達成する方法を提案し、それを実現するための基礎的な研究を行ってきた<sup>(3)~(5)</sup>。この方法では系統誤差の分布をあらかじめ知っておく必要がある。そして、それを知るための実用的な手法として立体的なゲージを用いる方法を考え、そのためのゲージ、すなわち三次元測定機校正用のゲージ(三次元用ゲージ)を試作した<sup>(6)</sup>。

本報では、この三次元用ゲージを用いた三次元測定機の系統誤差(誤差ベクトル)決定法について述べる。また、それに基づき実機について校正実験を行い、離散的ではあるが測定機空間内における誤差ベクトルの分布を決定した。さらに、校正した測定機によって既知寸法を測定して誤差補正を行い、校正精度を検証したので、それについても述べる。

\* 昭和63年3月30日 第65期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年9月28日。

\*<sup>1</sup> 正員、長岡工業高等専門学校(〒940 長岡市西片貝町888)。

\*<sup>2</sup> 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2-8050)。

2. 三次元用ゲージによる校正法

2.1 校正法の原理 図1, 2に本法で用いたA, B 2種のゲージ形状を示す。各ゲージには精密鋼球が図示のように配置してあり、位置決め点は鋼球中心とする。そして*i*番めの鋼球中心位置*P<sub>i</sub>*はゲージ座標系 (*P<sub>1</sub>-UVW*) での座標, すなわち位置ベクトル *U<sub>i</sub>* (*U<sub>i</sub>, V<sub>i</sub>, W<sub>i</sub>*) によって表されている。*U<sub>i</sub>*は既知である<sup>(6)</sup>。ゲージ座標系は点*P<sub>1</sub>*を原点とし、 $\overline{P_1P_2}$ の方向を*U*軸とし、*W*軸は三点*P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>*を通る平面の法線方向である。したがってA, B両ゲージとも、これら三点*P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>*の座標は、次に示すように、その6成分が原理的に零である。

$$U_i = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad U_2 = \begin{Bmatrix} U_2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad U_3 = \begin{Bmatrix} U_3 \\ V_3 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

さて、図3に示すように、各ゲージの点*P<sub>1</sub>*を測定機座標系 (*R<sub>1</sub>-xyz*) の原点*R<sub>1</sub>*に、また点*P<sub>2</sub>*を*x*軸上のある点*R<sub>2</sub>*に、さらに点*P<sub>3</sub>*を*xy*面上のある点*R<sub>3</sub>*に一致させてゲージをセットすることができたとする。このときゲージの位置決め点*P<sub>i</sub>*の測定機空間内の位置を*R<sub>i</sub>*とすると、座標 *U<sub>i</sub>* は点*R<sub>i</sub>*の真の位置ベクトルを表し、これは既知である。一方、測定機でゲージの点*P<sub>i</sub>*を測定すれば、測定値は測定機座標系 (*R<sub>1</sub>*

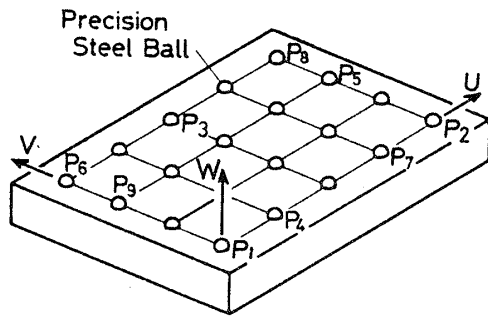


図1 A形ゲージの形状

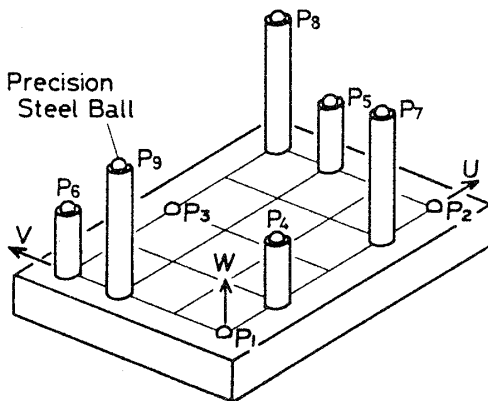


図2 B形ゲージの形状

*-xyz*) での位置ベクトル *x<sub>i</sub>* (*x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>*) を示す。測定値に偶然誤差が含まれないとした場合には、*x<sub>i</sub>* と *U<sub>i</sub>* との差が、この測定機のこの測定位置における系統誤差, すなわち誤差ベクトル  $\Delta x_i$  ( $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ ) になる。これより誤差ベクトル  $\Delta x_i$  は次のように決定できる。

$$\Delta x_i = x_i - U_i = \begin{Bmatrix} x_i - U_i \\ y_i - V_i \\ z_i - W_i \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

ゲージの三点*P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>*に注目する。それぞれの点は*R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>*に位置するから、それらを測定機で測定すると、点*R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>*の定め方より次のようになる。

$$x_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad x_2 = \begin{Bmatrix} x_2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad x_3 = \begin{Bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

式(1)~(3)より、三点*R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>*での誤差ベクトル  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  は次のようになる。

$$\Delta x_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \Delta x_2 = \begin{Bmatrix} x_2 - U_2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\Delta x_3 = \begin{Bmatrix} x_3 - U_3 \\ y_3 - V_3 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

2.2 誤差ベクトルの決定 前節のようにゲージの三点*P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>*と測定機空間内の三点*R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>*とをそれぞれ正しく一致させることは一般に困難である。そこで、実際の校正は対応するそれぞれの点がほぼ一致した状態で行うことになる。B形ゲージを例にとり、この状態を誇張して示したのが図4である。図4で*R<sub>1</sub>-U'V'W'*は測定機空間に設けた座標系で、ゲージの三点*P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>*を*R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>*に一致させた場合のゲージ座標系 (*P<sub>1</sub>-UVW*) と一致するものであり、ゲージの位置・姿勢を参照するために設けたものである。このとき*R<sub>1</sub>-U'V'W'*と*P<sub>1</sub>-UVW*はほぼ一致しているから、ゲージの点*P<sub>i</sub>*も前節の場合の点*R<sub>i</sub>*とほ

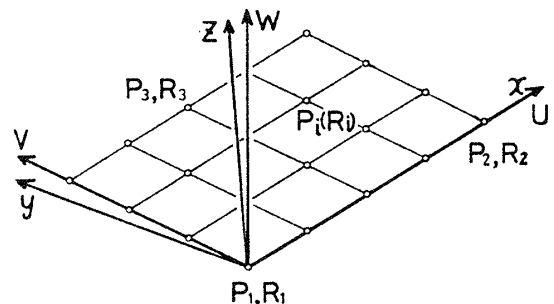


図3 ゲージ座標系 *P<sub>1</sub>-UVW* と測定機座標系 *R<sub>1</sub>-xyz* の関係 (三点*P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>*がそれぞれ*R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>*と一致している場合)

ほぼ一致している。

この場合にはゲージの位置決め点  $P_i$  の真の位置ベクトルを  $X_i(X_i, Y_i, Z_i)$  とすれば、この  $X_i$  とゲージ座標系での座標  $U_i$  とは次式の座標変換によって関係づけられる。

$$U_i = [C](X_i - X_1) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、ベクトル  $X_1$  は点  $P_1$  の真の位置ベクトル、また  $[C]$  は座標変換行列であり、これらを座標変換係数と呼ぶことにする。

座標変換行列  $[C]$  は次のような内容を持つものである。

$$[C] = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

また、 $l_i, m_i, n_i$  ( $i=1\sim 3$ ) は座標系  $R_1-U'V'W'$  に対する  $U, V, W$  各軸の方向余弦であり、次のような性質を持つ。

$$\left. \begin{aligned} \sum l_i^2 = \sum m_i^2 = \sum n_i^2 = 1 \\ \sum l_i m_i = \sum m_i n_i = \sum n_i l_i = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

さらに、座標変換行列については式(7)の条件より、

$$[C]^{-1} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

ゲージの点  $P_i$  は測定機空間内の点  $R_i$  とほぼ一致しているから、点  $P_i$  の位置での誤差ベクトルは近似的に点  $R_i$  での誤差ベクトル  $\Delta x_i$  に等しいと考えてよい<sup>(3)</sup>。したがって点  $P_i$  の座標測定値  $x_i$  を  $\Delta x_i$  で補正すれば、点  $P_i$  の真の位置ベクトル  $X_i$  を次式により

知ることができる。

$$X_i = x_i - \Delta x_i \dots\dots\dots (9)$$

そして、式(5)で示される座標変換を行うときに必要となる座標変換係数が既知であるとするれば、式(5)、(9)より次のように点  $R_i$  での誤差ベクトル  $\Delta x_i$  を決定することができる。

$$\Delta x_i = x_i - X_1 - [C]^{-1} U_i \dots\dots\dots (10)$$

ゲージの三点  $P_1, P_2, P_3$  がそれぞれ測定機空間内の三点  $R_1, R_2, R_3$  と一致した場合、すなわち  $P_1-UVW$  と  $R_1-U'V'W'$  とが重なる場合には、 $X_1$  が零ベクトル、 $[C]$  が単位行列となり、式(10)は式(2)と等しくなる。

**2.3 座標変換係数の決定** ゲージの三点  $P_1, P_2, P_3$  をそれぞれ先に定めた測定空間内の三点  $R_1, R_2, R_3$  にほぼ一致させてゲージをセットすれば、これら三点 ( $R_1, R_2, R_3$ ) での誤差ベクトルの6成分が原理的に零であることより、次のように座標変換係数を決定することができる。

ゲージの点  $P_1$  と座標原点  $R_1$  との距離が十分に小さければ、点  $P_1$  での誤差ベクトルは近似的に点  $R_1$  でのそれ  $\Delta x_1$  に等しいと考えてよく<sup>(3)</sup>、それは式(4)より零ベクトルである。したがって、点  $P_1$  の真の位置ベクトル  $X_1$  は式(9)より

$$X_1 = x_1 \dots\dots\dots (11)$$

のように求めることができる。すなわち、測定値がそのまま真の位置ベクトルとなる。

ゲージの点  $P_2, P_3$  はそれぞれ点  $R_2, R_3$  の近傍にあるから、その誤差ベクトルはそれぞれ  $\Delta x_2, \Delta x_3$  と近似的に等しい。しかもそのうちの3成分  $\Delta y_2, \Delta z_2, \Delta z_3$  が零であるから、式(10)より次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} l_2 U_2 &= y_2 - y_1 \\ l_3 U_2 &= z_2 - z_1 \\ l_3 U_3 + m_3 V_3 &= z_3 - z_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

式(12)で右辺は既知、左辺の  $U_2, U_3, V_3$  も既知であるから、上式より座標変換行列の9要素中独立な3要素  $l_2, l_3, m_3$  を決定することができ、さらに方向余弦に関する式(7)より座標変換行列  $[C]$  の全要素も決定できる。

**2.4 継ぎ足しによる校正** 本校正法は、最終的には、図5に示すように測定範囲を規則的に分割した点(格子点ということにする)での誤差ベクトルを決定するものである。2種類のゲージを用いることにしたのは、測定時にゲージとプローブの干渉を避けるためである。

前節までに示した方法では、A形ゲージによって  $z = 0$  mm 断面の20点について、B形ゲージによって

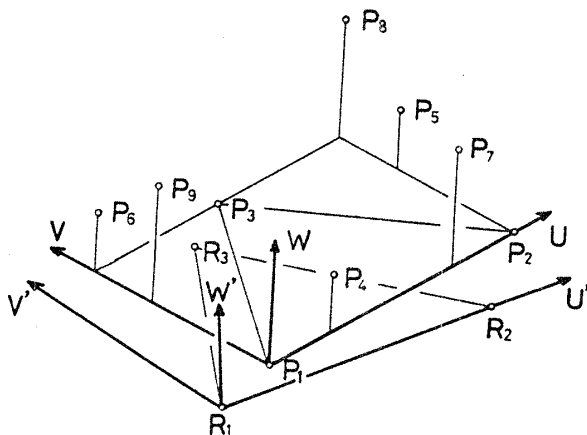


図4 座標系  $P_1-UVW$  と  $R_1-U'V'W'$  の関係 (三点  $P_1, P_2, P_3$  がそれぞれ  $R_1, R_2, R_3$  と一致していない場合)

図5に示した  $R_1 \sim R_9$  の9個の格子点について、その誤差ベクトルを決定できる。いずれの場合もゲージの三点  $P_1, P_2, P_3$  はそれぞれ測定機空間の三点  $R_1, R_2, R_3$  にほぼ一致している。そして、これら三点の誤差ベクトル  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  の6成分〔式(4)参照〕が原理的に零であることによって座標変換係数が決定できた。そして、それから誤差ベクトルを求めていたのである。

$z=80\text{ mm}, 160\text{ mm}$  の断面については、それぞれ三つの格子点  $R_4, R_5, R_6$  と  $R_7, R_8, R_9$  の誤差ベクトルが既知である。そこで、これらの断面上の格子点については、各断面位置にA形ゲージを配置して測定し、そのときの測定結果を次のようにして継ぎ足し、それからその誤差ベクトルを決定する。

$z=80\text{ mm}$  断面については、A形ゲージの三点  $P_4, P_5, P_6$  (図1) がそれぞれ格子点  $R_4, R_5, R_6$  (図5の●印の位置) とほぼ一致するようにゲージをセットし、各位置決め点の座標  $x_i$  を測定する。このとき点  $P_4, P_5, P_6$  での誤差ベクトルは格子点  $R_4, R_5, R_6$  でのそれ(既知)に等しいとしてよいから<sup>(3)</sup>、式(9)より  $X_4, X_5, X_6$  は既知となる。すなわち、これら三点に関する座標変換式(5)では、 $U_i$  と  $X_i$  とが既知であり、座標変換係数  $X_i, [C]$  が未知である。座標変換係数には  $X_1, Y_1, Z_1$  と、例えば  $l_2, l_3, m_3$  の合計6個の未知数が含まれるが、この三点の各3成分に関する計9本のスカラ式からなる式(5)を用いてこれらを決定することにする。それには、 $i=4, 5, 6$  としたときの式(5)の残差  $r_i$  を

$$r_i = U_i - [C](X_i - X_1) \dots \dots \dots (13)$$

$i=4, 5, 6$

で定義し、残差平方和を最小とする、いわゆる最小二乗法を用いる。すなわち、残差平方和を

$$S = \sum (r_i \cdot r_i) \dots \dots \dots (14)$$

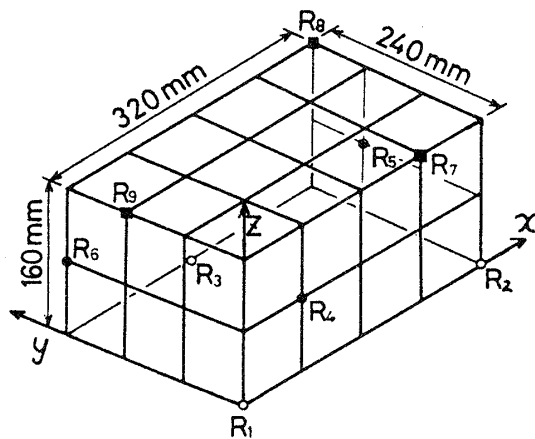


図5 校正領域の分割と格子点位置

とし、 $S$  を  $X_1, Y_1, Z_1, l_2, l_3$ , および  $m_3$  でそれぞれ偏微分した式が零となるようにこれら6個の未知数を定める。このようにして  $z=80\text{ mm}$  の断面にA形ゲージを置いたときの座標変換係数が決まったので、ゲージの各点  $P_i$  の測定結果  $x_i$  と  $U_i$  (既知) とを式(10)に代入すれば、点  $R_i$  での誤差ベクトルを求めることができる。

$z=160\text{ mm}$  断面についても同様に、3箇所の格子点 ( $R_7, R_8, R_9$ , 図5の■印の位置) を用いて継ぎ足しを行う。このように、少なくともゲージの三点と三つの格子点とがほぼ一致するようにゲージを移動すれば継ぎ足しが可能であり、校正範囲を図5よりも拡大することができる。ただし、誤差の伝ばもあるので、無制限に拡大できるという性質のものではない。

**2.5 測定プローブの形に関する制限** 本報で提案する校正法では、使用する測定プローブの形は、図6のプローブ1のように、その先端がほぼ  $z$  軸上にあるものと仮定している。そして、校正実験でもそのようなプローブを用いている。

測定プローブの姿勢、すなわち各座標軸に対するプローブの傾きは、その移動とともに変化するものと考えられるが、本法では図6の  $P, P'$  における誤差ベクトルを求めているので、結局このプローブの姿勢変化をも含めた誤差ベクトルを求めていることになる。ただし、プローブの  $z$  軸回りのいわゆるローリングによる姿勢変化の影響はうけていない。

先端が  $z$  軸からオフセットしているプローブ2の場合には、ローリングによる姿勢変化の影響を無視することができなくなる。すなわち、ある位置でのオフセット  $d$  (ベクトル) が既知であったとしても、それは他の位置でのベクトル  $d'$  を表すものではない。したがって、プローブ1を用いて校正した結果を直接プローブ2の場合に適用することはできない。

オフセットのある場合には、例えばプローブ1を用

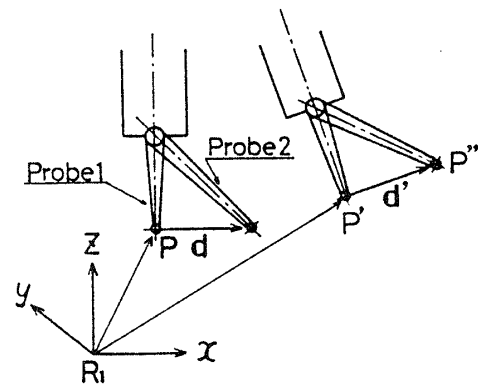


図6 プローブオフセットの影響

表 1 座標変換係数

$\mathbf{x}_1 = \begin{Bmatrix} -0.5445 \\ 0.3171 \\ -0.0909 \end{Bmatrix} \text{ (mm)}$	$[C] = \begin{bmatrix} 0.9999999 & -0.0003209 & 0.0000245 \\ 0.0003209 & 0.9999999 & 0.0002472 \\ -0.0000246 & -0.0002472 & 0.9999999 \end{bmatrix}$
--	--

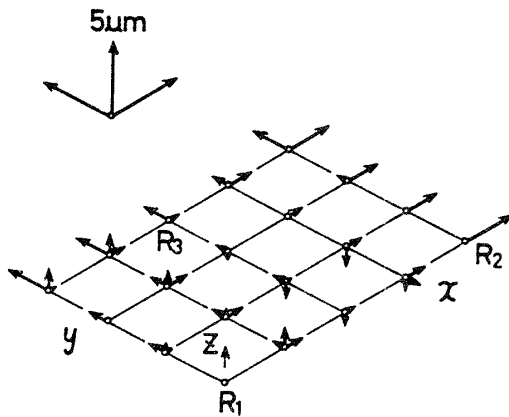


図 7 A形ゲージによる校正結果

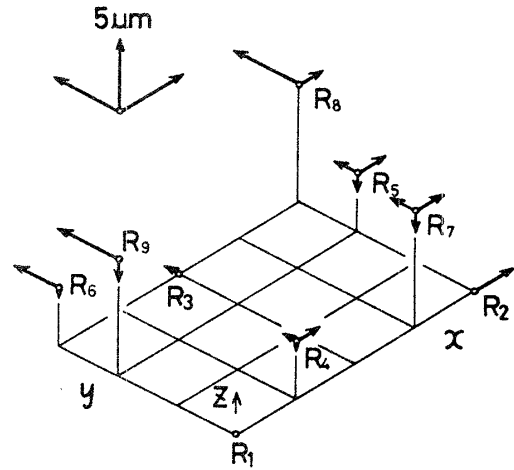


図 8 B形ゲージによる校正結果

いた本法によって点  $P'$  での誤差ベクトルを決定しておき、別の方法によりこの位置でのプローブの姿勢変化 (これはベクトル  $d$  の点  $P'$  まわりの回転のみによる変化) を知れば、プローブ先端  $P''$  の真の位置ベクトルを定めることができるようになる。

### 3. 校正実験

**3.1 実験条件** 校正を行った三次元測定機はブリッジ形の構造のものであり、各軸の案内方式として空気ベアリングを用いた手動機で、既報の B 機<sup>(4)</sup>である。この測定機では座標の検出に反射形のリニアスケールが用いられており、その最小読取り値は  $1\mu\text{m}$  である。測定には電気接点式タッチ信号プローブを用いた。また、測定実験はすべて室温  $20\pm 1^\circ\text{C}$  の恒温室内で行った。

この測定機の測定範囲は  $x, y, z$  各軸についてそれぞれ  $400\text{ mm}, 300\text{ mm}, 300\text{ mm}$  の大きさであるが、その中央部分 ( $320\text{ mm}\times 240\text{ mm}\times 240\text{ mm}$ ) について校正する。すなわち、図 5 と比較すると高さ ( $z$  軸) 方向が  $80\text{ mm}$  延長されている。ゲージの位置決め点は各軸とも  $80\text{ mm}$  間隔に配置してあるから、校正領域内の  $80$  箇所の格子点で誤差ベクトルを決定することにした。

**3.2 実験方法** この校正ではほぼ  $z=0, 80, 160, 240\text{ mm}$  の各断面位置に A 形ゲージをセットして測定し、各鋼球中心の座標  $x_i$  を求める。また、B 形ゲージの三点  $P_1, P_2, P_3$  (図 2 参照) をほぼ  $z=0\text{ mm}$  と  $80$

$\text{mm}$  の断面に置き、それぞれの位置で同様の測定を行う。そして、これらの測定結果を 2.4 節に記した方法で継ぎ足す。

鋼球中心を決定する際には、偶然誤差の影響を避けるために、一つの鋼球については異なる位置を 10 点測定し、最小二乗法によってその中心の座標を定めた。各鋼球については、この 10 点の位置が、対応するそれぞれの 10 点とほぼ同じ位置となるようにして測定し、測定プローブの位置検出感度の方向性の影響を避けるようにした。この一連の測定には約 1 時間を要した。

**3.3 校正結果** 図 7 は、A 形ゲージにより決定した  $z=0\text{ mm}$  断面での誤差ベクトルを各軸成分ごとに示したものである。この断面では誤差ベクトルの  $x, y$  軸成分の変化が大きく、この二軸成分はそれぞれの軸方向に増加している様子がみられる。 $z$  軸成分はこれらと比較すればその値、変化ともに小さい。

このときの座標変換係数は 2.3 節の方法で決定したものである。その値を表 1 に示す。表 1 によれば、ゲージの点  $P_i$  は原点  $R_1$  の近くにセットされ、 $U, V, W$  の各軸の傾きも非常に小さくなっている。したがって、位置決め点  $P_i$  は対応する格子点  $R_i$  の近くにあることになるから、 $P_i$  の位置での誤差ベクトルの値は対応する格子点  $R_i$  でのそれ  $\Delta x_i$  に等しいと考えてよい。また、測定機へのゲージのセッティングがこの程度の正確さであれば、それは容易である。

図 8 は B 形ゲージを用いて求めた  $R_1\sim R_9$  の格子点

での誤差ベクトルを各軸成分ごとに示したものである。この図から、誤差ベクトルの  $y$  軸成分が高さ ( $z$  軸) 方向に大きく変化する様子がわかる。

二点  $R_2, R_3$  については、図7と図8の結果は本来等しくなるはずであるが、実験結果では  $\Delta x_2, \Delta x_3, \Delta y_3$  の差がそれぞれ  $0.6 \mu\text{m}, 1.0 \mu\text{m}, 0.7 \mu\text{m}$  となり、いずれも B 形ゲージによる値が小さくなった。この理由としては、両ゲージの検定精度や校正実験における偶然誤差などが考えられる。しかし、その差はこの測定機の最小読取り値を越えない程度であるから、校正実験の精度はゲージの精度も含めて実用上十分なものであると判断している。

図9は校正範囲全体の誤差ベクトル分布を示したものである。この測定機の場合には誤差ベクトルの  $y$  軸成分の値が大きく、 $x$  と  $y$  の2軸成分は全体的に正の値となっている。これに対して  $z$  軸成分は負の値を示しているが、他の二軸成分に比較してその値は小さい。

表2に継ぎ足し前後の誤差ベクトルの値を示す。すなわち、B形ゲージによって決定した三点  $R_4, R_5, R_6$  での誤差ベクトルの値(図8)と、その値を用いてA形ゲージの測定結果を継ぎ足した場合の値とを比較し

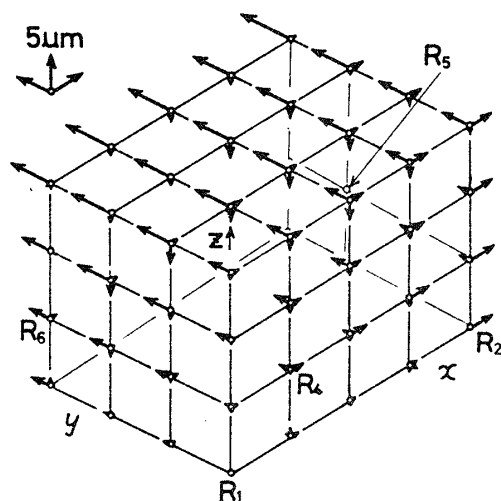


図9 継ぎ足しにより決定した誤差ベクトル分布

たものである(図8と図9の点  $R_4, R_5, R_6$  における誤差ベクトルの比較)。表2によれば継ぎ足し前後の誤差ベクトルの値は良く一致していることがわかる。他の位置でもほぼ同程度の精度で継ぎ足しのできたことを確認している。

#### 4. 検証

校正した測定機の精度を検証するために同測定機で既知寸法を測定し、校正結果を用いて誤差を補正してみた。長さの基準としては  $160 \text{ mm}$  から  $430 \text{ mm}$  の10種の寸法のブロックゲージを用い、校正領域内の種々の位置と方向でその寸法を測定した。測定にはプローブの位置検出感度の方向性の影響がないようにした<sup>(3)</sup>。そして、その測定値とブロックゲージの呼び寸法との差を寸法測定誤差とした。また、測定値の補正には図9の誤差ベクトル分布を用い、格子点以外の測定位置については直線補間で計算した誤差ベクトル<sup>(5)</sup>を用いて補正を行った。

測定例として、 $430 \text{ mm}$  と  $330 \text{ mm}$  の二つのブロックゲージの測定結果を表3に示す。表3にはブロックゲージの呼び寸法、ゲージの両端(Surface 1, Surface 2)のおおよその位置、寸法測定誤差、そして補正後の値が示してある。例1は  $5 \mu\text{m}$  の寸法測定誤差が補正により  $0.2 \mu\text{m}$  となり、その効果が顕著な例である。一方、例2は逆に、補正によって測定精度が劣化する例である。

図10は、横軸に寸法測定誤差を、縦軸に補正後の値

表2 継ぎ足し前後の誤差ベクトル ( $\mu\text{m}$ )

Measuring Point	$\Delta X_i$ (B-gauge)	$\Delta X_i$ (A-gauge)
$R_4$	2.3	2.0
	1.4	1.8
	-0.6	-0.6
$R_5$	3.0	3.2
	1.8	1.9
	-1.1	-1.1
$R_6$	1.1	1.2
	4.0	3.5
	-0.7	-0.7

表3 寸法測定例

Example Number	Nominal Length (mm)	Measuring Surface (mm)		Measured ( $\mu\text{m}$ )	Corrected ( $\mu\text{m}$ )
		Surface1	Surface2		
1	430	320	30	5.0	0.2
		0	210		
		0	240		
2	330	320	82	0.3	1.8
		181	86		
		2	211		

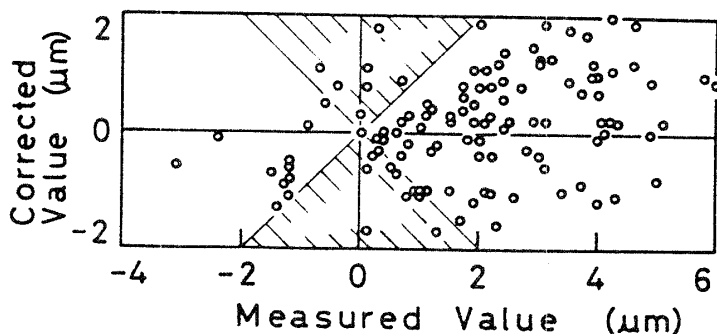


図 10 補正前後の寸法測定誤差

をとり、約 120 回の測定結果を散布図の形で表したものである。図 10 によれば、この測定機で寸法を測定したときの誤差は  $-2\ \mu\text{m}$  ~  $+6\ \mu\text{m}$  の範囲に分布し、特にプラス側にかたよることがわかる。この測定機の場合には、その誤差ベクトル分布が図 9 のようになっているから、寸法の測定値は真値より大きくなることが多い。しかし、補正をすることによって測定精度は  $\pm 2\ \mu\text{m}$  以内になる。また、補正の効果は測定長、すなわちブロックゲージの長さに関わらないことも確認した。なお、図中の斜線部分は、補正することによって逆に測定精度が劣化していることを示している部分であるが、その場合にも補正後の値が  $\pm 2\ \mu\text{m}$  を越えることはなかった。

以上の検証結果より、三次元用ゲージによる校正結果を用いて誤差を補正することが測定精度の向上に有効な手段であることがわかった。また、図 9 に示した結果はこの三次元測定機の誤差ベクトル分布を良く表現していると言えよう。

## 5. 結 言

三次元測定機を校正する方法として、三次元用ゲージによる校正法を示した。本法は、原理的には、三次元用ゲージの位置決め点の座標測定値とゲージ寸法(座標)とを比較し、測定機の位置検出誤差を誤差ベクトルの形で決定する方法である。具体的には、それ

は、離散的ではあるが測定空間内の誤差ベクトル分布を決定する方法である。校正範囲と校正点数とはゲージの大きさと位置決め点の数によって制限されるが、継ぎ足しによってある程度それを拡大することが可能である。

提示した方法に基づき実機について校正実験を行い、80 箇所誤差ベクトルを定めた。この程度の校正点数であれば、測定は約 1 時間で行うことができる。また、校正結果を用いて誤差を補正すれば測定精度の向上を確認した。

本報で提示した校正法は、プローブの  $z$  軸回りのローリングによる姿勢変化を除いた系統誤差要因を同時に観測するものである。 $z$  軸回りのローリングによるプローブの姿勢変化のみを単独に観測することができれば、その結果と本法の結果とを用いて、測定プローブの形式や取付け位置が変化した場合についても誤差補正ができる。次報では、このプローブの姿勢変化を検出する方法について報告する予定である。

## 文 献

- (1) 兼田, 機械技術, 34-3 (昭 61), 107.
- (2) 三輪・荒井, 精密機械, 52-8 (昭 61), 1296.
- (3) 大矢・穂苺・田村, 機論, 51-471, C (昭 60), 2851.
- (4) 大矢・穂苺・田村, 機論, 52-473, C (昭 61), 336.
- (5) 大矢・穂苺・田村, 機論, 52-484, C (昭 61), 3236.
- (6) 大矢・穂苺・田村, 機論, 53-485, C (昭 62), 117.