

三次元座標測定機の精度向上法*

(第1報, 三次元用ゲージの試作)

大矢 誠**, 穂苅 久**, 田村 久司***

A Method of Improving the Accuracy of the Three-Coordinate Measuring Machine (1st Report, A Trial Production of the Three-Dimensional Standard)

Makoto OYA, Hisashi HOKARI, and Hisashi TAMURA

The trial production and the inspection test of a three-dimensional standard gauge equipment are carried out. Two types of equipment are designed for the calibration test of the three-coordinate measuring machine (3 CMM). Each equipment is fabricated from precision steel balls arranged on a base plate—(1) 20 pieces of ball are placed in a rectangular lattice shape on nearly the same plane—(2) 3 of 9 pieces are spaced on three different heights. The measuring probe is positioned on the balls and the center coordinates are measured to determine the three-dimensional relation of each ball position. The inspection test of the standard gauges are performed with the 3 CMM whose discrete distribution of the error vector is already known. The repeatability and the reproducibility are observed in the test. As a result, the standard gauge equipment built as a trial proved to be adequate for practical use in the calibration test of other 3 CMM.

Key Words: Measurement, Accuracy, Three-Coordinate Measuring Machine, Three-Dimensional Standard, Inspection, Error Vector

1. 緒 言

三次元座標測定機の精度検査法に関する研究には、案内精度などから測定機の精度を求めようとするもの⁽¹⁾⁽²⁾や、種々の要因により生ずる誤差をまとめて評価し、測定機の総合精度を求めようとするもの⁽³⁾などがある。

これにたいして、著者らはこれまでに、三次元測定機の誤差の系統成分のみに注目し、これを補正して測定機の精度の向上を目指した基礎的な研究を行ってきた。すなわち、測定機の座標系とは別に理想的な基準直角座標系を定義し、測定機の系統誤差をこの基準座標系での誤差ベクトルとして表現した⁽⁴⁾。さらに測定空間内での誤差ベクトルの離散的な分布の決定法⁽⁵⁾と、誤差(ベクトル)補正法⁽⁶⁾とを示した。

ところで、離散的な誤差ベクトル分布を決定するための最も簡単な実用的な方法は、三次元的なゲージがあれば、それを直接測定し、その測定結果とゲージの寸法とを比較する方法であろう。そこで、この方法を実現するために、三次元用ゲージを試作することにし

た。ゲージの検定(立体的な寸法の決定)には三次元測定機を用いた。この測定機は、これまでの研究により、その誤差ベクトル分布が知られているものである⁽⁵⁾。

本報では、まず三次元用ゲージに関して考察した後、実際にゲージを製作し、その検定を行った結果について報告する。また、ゲージの検定に伴う種々の測定誤差に関する測定実験結果についても述べる。

このゲージを用いれば、他の三次元測定機の離散的誤差ベクトル分布を簡単に知ることができる。そして、この誤差(ベクトル)を補正すれば、その測定機の精度は向上する、と考えるのである。

2. ゲージの検定に用いた三次元測定機

試作ゲージの検定には三次元測定機を用いた。この測定機は、 x, y, z 各軸のそれぞれ 320 mm, 240 mm, 160 mm の範囲を 80 mm 間隔に等分割した 60 箇所の格子点位置における誤差ベクトルがわかっている(図1)。すなわち、この測定機では、 i 番めの格子点 P_i の座標を測定すれば、その点の真の位置ベクトルが得られるようになっている⁽⁵⁾。

ここで、真の位置ベクトルとは、この測定機に設定した理想的な直角座標系である基準座標系(O-XYZ

* 昭和61年10月25日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和61年5月21日。

** 正員、長岡工業高等専門学校(〒940 長岡市西片貝町888)。

*** 正員、新潟大学工学部(〒951-21 新潟市五十嵐2-8050)。

系)で点 P_i を観測したときの位置ベクトルのことである。この基準座標系の原点は、測定機座標系 ($O-xyz$ 系) と共通の点 O である。また、測定機の x 軸上の点 P 、 y 軸上の点 Q および原点 O の3点から XY 平面と Z 軸の方向を決定し、2点 O, P の方向で X 軸を決定するようになっている⁽⁴⁾。

ところで、立体的に配置したいいくつかの“点”でプローブを位置決めできるような“物体”があり、誤差ベクトルのわかっている測定機でそれを測定すれば、その“物体”の各点の正しい位置関係を決定することができる。そして、この“物体”をゲージとすることができる。また、このようにして得られたゲージを他の三次元測定機で測定してみて、その結果とゲージ各点の位置関係を比較すれば、その測定機の位置決め点での誤差ベクトルが決定できる。

3. ゲージの形状と検定法

3.1 ゲージの形状 試作するゲージは、図1に示した格子点での誤差ベクトルを知るために用いるものとする。これらの格子点へのプローブの位置決めは、精密な鋼球と逆テーパ形状のプローブを組合せることで容易に実現できる。そこで、三次元用ゲージとしては、プローブと鋼球とが干渉することなく容易に測定ができ、しかも、この格子点の各位置での誤差ベクトルを決定することができるようにするために、本研究では2種類の形状のゲージを試作した。

A形ゲージは図2に示すように、20個の鋼球をほぼ一平面上に配置した。この形状、配置ならば干渉はない。また、このゲージは高さの異なる平面での測定に用いるものである。しかし、これだけでは、ほぼ一平面上に並んだ観測点の座標測定しかできない。そこで、これに対して、B形ゲージでは、高さの異なる平面上の点を同時に測定できるように、各3個の鋼球が、高

さの異なるほぼ平行な平面上に配置してある(図3)。この形状であれば、測定時のプローブと鋼球支持部との干渉を避けることができ、しかも各鋼球の立体的な位置関係を測定することができる。そして、これら二種のゲージを併用することで、他の三次元測定機の、図1に示したような格子点での誤差ベクトルが決定でき、結局その測定機を校正することができるのである。

3.2 ゲージの検定法 2種のゲージを2章に記した三次元測定機で測定し、それぞれの各鋼球の位置関係を正しく決定し、ゲージを検定した。すなわち、各ゲージ上に設定した座標系に対する鋼球の中心位置座標を定めた。このゲージの座標系 (P_1-UVW 系) は、A形ゲージについては図2に示す3点 P_1, P_5, P_{18} により決定する。この方法は、鋼球中心 P_1 を原点とし、3点 P_1, P_5, P_{18} を通る平面で基準面 (W 軸の方向) を定め、2点 P_1 と P_5 の方向で基準軸 (U 軸) を定めて、これをA形ゲージの座標系とするものである。測定結果はこの座標系での値に座標変換して表す。したがって、点 P_1 の座標は $(0, 0, 0)$ 、点 P_5 は $(U_5, 0, 0)$ 、点 P_{18} は $(U_{18}, V_{18}, 0)$ のようになる。B形ゲージの基準点は P_1 、

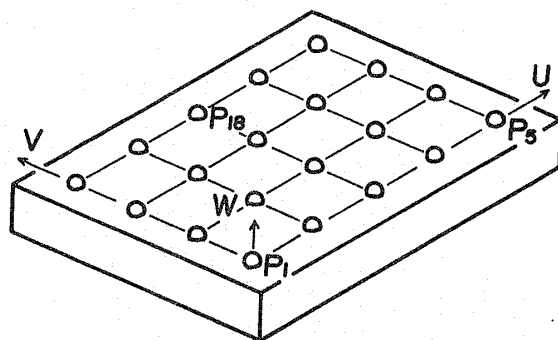


図2 A形ゲージの形状

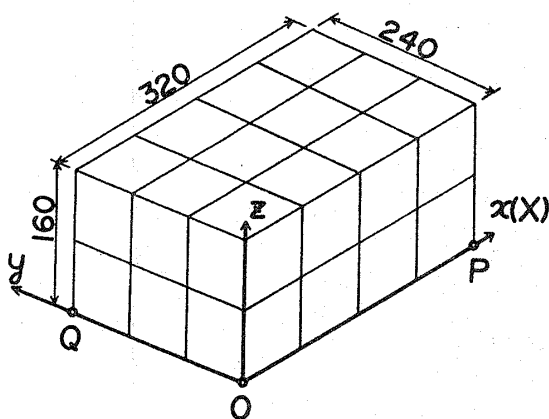


図1 三次元測定機に定めた格子点

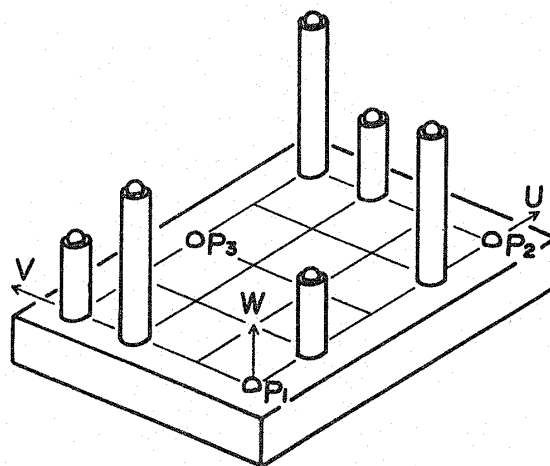


図3 B形ゲージの形状

P_2, P_3 の3点である。そして、その座標系はA形ゲージと同様にして決定する。このようにゲージの座標系を導入した理由は、これらのゲージで他の三次元測定機を校正するとき、各鋼球中心がゲージの座標系で表されていた方が都合がよいからである。

4. ゲージの製作と検定

4.1 試作ゲージの仕様と測定環境 試作したゲージの鋼球配置は、図1に示した測定機の格子点位置とほぼ一致するようにした。これらの格子点における測定機の誤差ベクトルは既知である⁽⁶⁾。ゲージの構造は、鋳鉄製定盤を基盤上に固定し、そこに直径20mmの精密鋼球を接着して固定したものである。B形ゲージの場合には、高さ80mm、160mmの支柱に鋼球を接着し、その支柱底面を定盤に接着して固定した。各ゲージは基盤下部の3点で支持してある。

鋼球中心の測定には逆テーパープローブを用いた。また、測定実験は $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ の恒温室内で行った。

4.2 ゲージの検定 A, B両ゲージを図1の格子点とほぼ一致するように置き、逆テーパープローブを用いて座標測定を行った。各位置をそれぞれ4回繰返し測定し、この結果を1回の検定とした。4回の繰返し測定の中で他と大きく異なる測定値は棄却し、特に大きな偶然誤差の影響を避けた。

三次元用ゲージとしては、高い繰返し精度と長期の寸法安定性が特に重要である。さらに、測定力の変化、測定に用いるプローブの種類や形状の違い、プローブの近接方向の違いやその他の測定条件の変化に対しては鈍感であることが望ましい。そこで各ゲージの鋼球

位置の決定と同時に、これらについても実際に調べてみた。

4.2.1 繰返し精度 各鋼球中心位置を4回繰返して測定したとき、各点の座標測定値のばらつきは各軸成分とも、 $\pm 1\mu\text{m}$ 以下であった。このばらつきは、スケールの量子化誤差と測定機の繰返し誤差とが主な原因であると考えられる。この検定を同じ日に10回行い、繰返し精度を調べてみた。その結果、各点の各軸成分のばらつきは標準偏差ですべて $1\mu\text{m}$ 以下であった。また、ばらつきの幅の最大値はA形ゲージで $1.8\mu\text{m}$ 、B形ゲージで $2.7\mu\text{m}$ であった。したがって短時間内の繰返し精度は良好であると判断した。

4.2.2 再現性 ゲージの鋼球位置の長期安定性を確認するために約5箇月間、検定を継続した。その回数はA, B両ゲージともに約120回である。ゲージの座標系に変換した各鋼球位置座標について、その平均値 (U_i, V_i, W_i)、標準偏差 ($\sigma U_i, \sigma V_i, \sigma W_i$)、ばらつきの幅 ($[U_i], [V_i], [W_i]$) を表1と表2に示す。この測定結果のばらつきには、4.2.1項の繰返し精度に加え、恒温室温度の変化、各軸案内面や鋼球の洗浄度の違い、ゲージ自身の微少な変形や測定機の誤差分布の変化などが総合的に含まれていると考えられる。そのために前項の繰返し精度に比べ、ばらつきは全体が大きくなっている。しかし標準偏差で最大約 $1.1\mu\text{m}$ 、ばらつきの幅の最大値は約 $6\mu\text{m}$ であった。また各座標値が時間的に変化するような傾向は見られなかった。したがって、この程度の期間内であれば、試作したゲージの寸法安定性は実用上十分であることが確認できた。

4.2.3 その他の誤差要因 測定力の変化に関し

表1 A形ゲージ検定の再現性

i	U-Component			V-Component			W-Component		
	U_i (mm)	σU_i (μm)	$[U_i]$ (μm)	V_i (mm)	σV_i (μm)	$[V_i]$ (μm)	W_i (mm)	σW_i (μm)	$[W_i]$ (μm)
1	0.000	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
2	79.997	0.6	2.3	0.001	0.4	2.3	-0.011	0.4	1.9
3	159.991	0.5	2.3	0.001	0.5	2.8	-0.014	0.4	1.7
4	239.995	0.6	2.8	0.000	0.6	3.1	-0.005	0.3	1.8
5	319.985	0.6	2.5	0.000	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
6	-0.010	0.4	2.0	80.006	0.7	3.3	0.027	0.4	1.6
7	79.990	0.7	3.0	80.004	0.5	2.4	0.010	0.4	1.9
8	159.984	0.7	3.1	80.003	0.5	2.8	0.001	0.4	1.8
9	239.991	0.6	2.4	80.009	0.5	2.6	0.008	0.3	2.1
10	319.998	0.7	3.2	80.011	0.4	1.7	0.018	0.4	1.8
11	-0.002	0.6	3.8	160.016	0.8	3.9	0.026	0.4	2.9
12	80.003	0.8	3.9	160.010	0.6	3.3	0.022	0.3	1.6
13	160.005	0.8	3.4	160.007	0.6	2.7	0.020	0.3	1.7
14	240.005	0.7	3.1	160.005	0.6	2.6	0.019	0.4	1.9
15	320.005	0.8	3.5	160.011	0.4	2.0	0.010	0.4	2.5
16	0.002	0.9	3.6	240.008	0.7	3.9	-0.004	0.4	2.5
17	80.008	0.9	4.8	240.005	0.6	3.1	-0.001	0.5	2.5
18	160.005	0.9	5.5	240.000	0.6	3.1	0.000	0.0	0.0
19	240.015	0.7	4.1	240.004	0.6	3.0	-0.003	0.4	2.7
20	320.024	0.9	4.6	240.009	0.5	2.9	-0.007	0.7	3.0

表 2 B形ゲージ検定の再現性

i	U-Component			V-Component			W-Component		
	U _i (mm)	σU _i (μm)	[U _i] (μm)	V _i (mm)	σV _i (μm)	[V _i] (μm)	W _i (mm)	σW _i (μm)	[W _i] (μm)
1	0.000	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
2	319.985	0.8	4.2	0.000	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
3	160.014	0.9	5.1	240.010	0.7	3.6	0.000	0.0	0.0
4	80.013	0.6	2.9	-0.044	0.5	2.6	79.355	0.4	1.8
5	319.693	1.0	5.6	159.959	0.9	5.5	79.484	0.5	3.0
6	-0.094	0.8	4.5	239.886	0.7	3.9	79.209	0.6	3.0
7	240.161	0.9	5.6	0.125	0.6	3.2	159.393	0.6	4.8
8	320.191	1.1	5.2	239.999	0.9	4.5	159.476	0.5	3.8
9	-0.069	0.6	3.5	160.115	0.8	4.0	159.972	0.6	3.4

ては、測定機のz軸のバランスを変化させて座標測定を行ってみた。測定力の変化はおおむね1Nから10N程度である。これらの繰返し測定の結果は4・2・1項の精度と同程度であった。

プローブに関しては、その取付け角度を変え、あるいは同形状の逆テーパプローブ二つを付け換えて測定した。さらに電気接点式タッチ信号プローブを用いても測定してみた。いずれの場合もプローブの近接方向を種々変化させて測定を行ってみたが、これらの結果も先の繰返し精度の範囲内であった。

さらに恒温室温度を10°Cから25°Cまで強制的に変化させて測定を行ってみた。このときには測定機とゲージとの伸縮に相似性がないことから鋼球位置は大きく変化した。特にB形ゲージにその影響が顕著であった。B形ゲージでは座標変化量の最大は、U、V、W各軸方向成分でそれぞれ22μm、18μm、12μmほどであった。これに対してA形ゲージでは、U、V、W各軸方向でそれぞれ10μm、9μm、5μmほどの変化幅であった。ただし、どちらの場合にも、室温を20°Cに戻せば元の精度に戻ることを確認した。室温変化が20°C±1°Cであれば、4・2・2項に記したように、鋼球位置の安定性は十分保たれていることの確認ができた。

二つのゲージをxy面内で180度回転して検定を行ってみた。A形ゲージについては、高さの異なる位置でも回転させて検定した。そして、検定結果が、ゲージの回転や、その位置(高さ)の違いによらないことを確認した。したがって、ゲージの検定に用いた三次元測

定機は正しく校正されていると考えてよい。

5. 結 言

三次元座標測定機の系統誤差成分を短時間に測定することのできる実用的な方法の一つとして、三次元用ゲージを用いる方法が考えられる。そこで、このためのゲージを2種類製作し、すでに誤差ベクトルのわかっている三次元測定機でこれを検定した。そして、その検定精度についても調べてみた。その結果、試作したゲージは短期間内の繰返し精度が高く、測定環境が一定であれば、その立体的な寸法も長期間安定に保たれることがわかった。また各種の測定条件の変化に対しても試作したゲージの寸法安定性は十分であることもわかった。したがって、他の三次元測定機の校正、および精度向上に本ゲージを用いることができる。

次報では、このゲージを用いた他の三次元測定機の校正結果と、その校正後の測定機の精度向上について報告する予定である。

文 献

- (1) 薛・大園・高増, 精密機械, 50-3 (昭59), 556.
- (2) 垣野・岩本・井原・亀井・伊勢, 精密機械, 51-6 (昭60), 1244.
- (3) 矢野・中村, 精密機械, 44-10 (昭53), 1223.
- (4) 大矢・穂苅・田村, 機論, 51-471, C (昭60), 2851.
- (5) 大矢・穂苅・田村, 機論, 52-473, C (昭61), 336.
- (6) 大矢・穂苅・田村, 機講論, No. 861-1 (昭61-6), 31.