三次元用ゲージに関する研究*

(ゲージ形状の安定性と三次元測定機の校正実験)

大 矢 誠^{*1}

Three-Dimensional Gage (Long-Term Stability of the Gage and Calibration Test of Coordinate Measuring Machine)

Makoto OHYA

To improve the accuracy of CMM (coordinate measuring machine), the numerical error correction of systematic error components ascertained by the calibration procedure is employed. One way to calibrate CMM is to take advantage of the three-dimensional gage made for experimental purposes by the author. It is necessary that the gage is inspected correctly and measured with high accuracy with respect to repeatability and reproducibility. Furthermore, the shape of the gage or the relative positions of steel balls used as measuring points should remain unchanged for a long time. This paper describes the experiments on the accuracy of the gage, repeatability and reproducibility of measuring the gage, and the long-term stability of the measuring points, and gives the results of tests.

Key Words: Measurement, Accuracy, Coordinate Measuring Machine, Calibration, Three-Dimensional Gage, Long-Term Stability

1. 緒 言

三次元測定機の精度向上を目的として、測定機の誤差をソフトウェア的に補正する方法を用いる場合がある。そのためには測定機を校正し、系統誤差を補正可能な形で定めておく必要がある。測定機の校正法としてはいくつかの方法が提案されているが^{(1)~(3)}、著者は既報⁽⁴⁾において三次元測定機校正用の立体的なゲージ(三次元用ゲージ)を用いた校正法を提案した。

三次元用ゲージを用いた校正法の概要は次のようである。ゲージにはプローブを位置決めするための点(ゲージ点)が設けてあり、検定によってゲージ点の真の位置を定めておく。そして、校正しようとする測定機でゲージ点の座標を測定すれば、得られた測定値と真の位置との差より各ゲージ点におけるプローブの位置決め誤差として測定機の誤差を求めることができる。したがって、ゲージ点の位置は常に一定でなければならない。既報では、約5箇月間ゲージの検定を繰返し行い、ゲージ点の位置が安定に保たれることを確認し報告した⁽⁵⁾。

三次元用ゲージによる測定機の校正法が有効に機能するには、ゲージが正しく検定されている必要がある。さらにゲージ点測定の再現性が高く、かつゲージ形状すなわちゲージ点の位置が長期間安定に保たなければならない。そこで、ゲージの検定を継続して行い、ゲージの検定精度、測定の再現性およびゲージ形状の長期間の安定性について調べ、試作ゲージの有用性を検証した。また、ゲージの再検定の方法について検討を加えた。さらに、実機について行った校正実験結果についても報告する。

2. 三次元用ゲージの概要と検定精度

2.1 三次元用ゲージの形状 形状の異なる2種類のゲージをそれぞれA形ゲージ、B形ゲージと呼ぶことにし、図1にその形状を示す。各鋼球の中心位置をゲージ点 $P_1, P_2, \dots$ とし、そこにプローブを位置決めするものとする。ゲージ点の位置は、座標系 P - UVW における座標として表すことにし、それぞれ $(U_1, V_1, W_1), (U_2, V_2, W_2), \dots$ のように示す。この2種類のゲージを1組として用い、図2に示すように三次元測定機の測定範囲に配置した60箇所の格子点 $R_1, R_2, \dots, R_{60}$ における誤差ベクトル⁽⁶⁾を定めて測定機を校正する。なお、ゲージは鋳鉄製定盤にベアリ

* 原稿受付 平成3年10月1日。

^{*1} 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐二の町8050)。

2.3 検定の再現性 ゲージの検定試験では、再現性・繰返し性の影響を避けるために、数日の期間に10回程度ゲージの測定を繰返し行い、その平均値を検定結果とした。ゲージ点の位置は、3点(A形ゲージでは P_1, P_5, P_{18} , B形ゲージでは P_1, P_2, P_3)を基準点とする座標系 P_1 - UVW における座標として表示する。

再現性・繰返し性の評価は次の方法によって行った。繰返し測定より求めた平均値をゲージ点位置の真値とし、各ゲージ点について真値と測定値の距離を求める。その平方和が最小になるように各回ごとにゲージ点座標を算出し、ばらつきを調べた。表3はB形ゲージについて求めたゲージ点座標のばらつきの幅を示したものである。これによれば、ばらつきの幅は最大2 μm 程度となっている。A形ゲージの場合にはさらに良好な再現性を示した。

3. ゲージ形状の安定性とゲージの再検定

3.1 ゲージ点位置の変化 試作ゲージの形状が長期間安定に保たれていることを確認する目的で、1986年より約5年間に5回(B形ゲージでは約4年間に4回)の検定実験を行い、ゲージ点の位置の変化を調べた。

表4は、A形ゲージについての測定時期(西暦年)とゲージ点座標の U 成分との関係、および座標の平均値、標準偏差、ばらつきの幅を示したものである。A形ゲージには一部のゲージ点で特に大きな変化がみられた。すなわち、1989年と1990年の間でゲージ点 P_{18} の座標 U_{18} が大きく異なっている。また、 P_{18} に隣接したゲージ点 P_{17}, P_{11}, P_{12} の変化も大きい。これはその中間時期に取扱い上の不注意から P_{18} 付近のゲージ基盤を変形させたことが原因である。これらのゲージ点座標の W 成分も同時期に大きく変化していた。しかし、そのほかのゲージ点および V 成分にはゲージの変形の影響はなかった。位置の変化は前述の4箇所のゲージ点を除けば最大1.8 μm であるから、ゲージの変形がなかったとすればこの程度の安定性を持つと考えてよい。

表5はB形ゲージのゲージ点座標の変化を各成分ごとに示したものである。ゲージ点 P_8 の U 成分(U_8)が1989年と1990年の間に6 μm 変化しているが、これを除けば最大3 μm の変化である。このゲージは、2・3節に記したように繰返し性と再現性に関してA形ゲージに劣っている。さらに、長期間の安定性に関して同様にA形ゲージに劣っていることがわかる。

3.2 ゲージの変形の検出 表4, 5に見られるように、同一の三次元測定機によってゲージの測定を定期的に行っていると、ある時期に測定結果が大きく変化する場合がある。その原因はゲージの変形、またはゲージを測定している測定機の精度変化のどちらかと考えられる。

測定機の精度変化であれば、校正は正しく行われ

表3 B形ゲージ検定の再現性 (μm)

No.	Difference between Max. and Min.		
	U_i	V_i	W_i
1	1.7	1.9	2.0
2	1.9	1.9	2.1
3	2.1	2.1	1.5
4	1.6	1.6	2.0
5	2.0	1.1	1.1
6	2.0	1.6	2.4
7	1.7	1.0	2.2
8	1.4	2.6	2.3
9	1.5	2.0	2.1

表4 A形ゲージの経年変化 (U 成分)

No.	1986 (mm)	1987 (mm)	1989 (mm)	1990 (mm)	1991 (mm)	average	σ (μm)	width (μm)
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0
2	79.9957	79.9949	79.9945	79.9947	79.9948	79.9957	0.5	1.2
3	159.9900	159.9894	159.9892	159.9895	159.9896	159.9900	0.3	0.8
4	239.9955	239.9951	239.9955	239.9949	239.9951	239.9955	0.3	0.6
5	319.9881	319.9881	319.9893	319.9887	319.9878	319.9893	0.6	1.5
6	-0.0078	-0.0076	-0.0069	-0.0069	-0.0068	-0.0068	0.5	1.0
7	79.9901	79.9894	79.9901	79.9896	79.9902	79.9902	0.4	0.8
8	159.9852	159.9849	159.9847	159.9848	159.9848	159.9852	0.2	0.5
9	239.9931	239.9923	239.9930	239.9924	239.9928	239.9931	0.3	0.8
10	320.0028	320.0027	320.0040	320.0036	320.0022	320.0040	0.7	1.8
11	0.0010	0.0010	0.0015	0.0034	0.0031	0.0034	1.2	2.4
12	80.0047	80.0037	80.0042	80.0052	80.0051	80.0052	0.6	1.5
13	160.0075	160.0067	160.0064	160.0071	160.0069	160.0075	0.4	1.1
14	240.0087	240.0074	240.0082	240.0085	240.0078	240.0087	0.5	1.3
15	320.0106	320.0105	320.0112	320.0117	320.0101	320.0117	0.6	1.6
16	0.0059	0.0056	0.0064	0.0099	0.0087	0.0099	1.9	4.3
17	80.0106	80.0093	80.0096	80.0119	80.0115	80.0119	1.1	2.6
18	160.0086	160.0077	160.0078	160.0090	160.0090	160.0090	0.6	1.3
19	240.0194	240.0182	240.0189	240.0191	240.0191	240.0194	0.4	1.2
20	320.0310	320.0309	320.0318	320.0316	320.0305	320.0318	0.5	1.3

る。校正結果はこれまでとは異なるが、その測定機の誤差分布を正しく表している。したがって校正された測定機を用いてゲージの設置位置を変えてゲージ点を測定し誤差を補正すれば、その結果は繰返し精度の範囲でゲージ点位置の真値と一致する。

一方、ゲージの変形のためにB形ゲージ、または継足しに関与するA形ゲージのゲージ点($P_1, P_5, P_{18}, \dots, P_{11}$ の9点)の位置が変化した場合には、継足しの精度が低下するので、どのゲージ点が変わったかを知ることができる。また、A形ゲージの継足しに関与しないゲージ点が変わった場合には、校正は見かけ上正しく行われるが、その結果は測定機の誤差分布を正しく表してはいない。したがって、設置位置を変えてゲージを測定して誤差を補正してみると、その結果はゲージ点の真値(変位前の検定値)と異なる。これより、ゲージ点番号も含めて位置の変化があったことがわかる。

3・3 三次元用ゲージの再検定 校正作業に支障が生じるほどにゲージが変形した場合には再検定を行わなければならない。最も簡便な方法は、校正対象としている測定機を用いることである。再検定が必要なゲージ点の数が少なければ、それが可能である。

前節に記したように変化の生じたゲージ点番号が特定できたとする。これまでどおりの方法によって校正を行うことはできるが、変化のあったゲージ点に対応する格子点について求めた誤差ベクトルの値は意味を

もたない。そこで、ゲージの設置位置を変えて測定する。すなわち、2・2節のようにゲージを180度回転させたり平行移動させることによって、再検定すべきゲージ点が誤差ベクトル既知の格子点位置に対応するようにゲージを設置して測定する。これによってゲージ点の正しい位置を決定することが可能になる。

B形ゲージを例にとり、ゲージ点 P_4 と P_8 の位置が変化したものとして再検定のシミュレーションを行ってみた。まず、A形ゲージによって格子点 $R_1 \sim R_{20}(Z=0 \text{ mm})$ の誤差ベクトルを決定する。こうしておけば、B形ゲージのゲージ点 P_1, P_2, P_3 をそれぞれ R_1, R_5, R_{18} の位置において測定し、ゲージ点 P_5, P_6 に対応する格子点 $R_{35}, R_{36}(Z=80 \text{ mm})$ および P_7, P_9 に対応する $R_{44}, R_{51}(Z=160 \text{ mm})$ での誤差ベクトルを求めることができる。また、ゲージを180度回転しゲージ点 P_1, P_2, P_3 を格子点 R_{20}, R_{16}, R_3 にそれぞれ一致させて測定すれば、格子点 R_{26}, R_{25} および R_{57}, R_{50} での誤差ベクトルが得られる。これより、測定機の $Z=80 \text{ mm}$ および 160 mm の断面ではそれぞれ4箇所の格子点における誤差ベクトルが既知となるので、A形ゲージの測定結果を継足すことができ、その測定機を校正することができる。そして、その校正結果を用いてB形ゲージのゲージ点 P_4, P_8 の正しい位置を定めることができる。表6にシミュレーションの結果を示す。測定値はゲージの置き方によって大きく異なっているが、校正結果を用いて誤差を補正した後の座標値はゲージ

表5 B形ゲージの経年変化

axis	No.	1986(mm)	1987(mm)	1989(mm)	1990(mm)	average	$\sigma (\mu\text{m})$	width(μm)
Ui	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0
	2	319.9938	319.9932	319.9946	319.9947	319.9941	0.7	1.5
	3	160.0140	160.0138	160.0129	160.0143	160.0137	0.6	1.4
	4	80.0135	80.0124	80.0148	80.0125	80.0133	1.1	2.4
	5	319.6950	319.6950	319.6972	319.6954	319.6956	1.1	2.3
	6	-0.1062	-0.1063	-0.1040	-0.1034	-0.1050	1.5	2.9
	7	240.1757	240.1749	240.1775	240.1769	240.1763	1.2	2.6
	8	320.1902	320.1887	320.1865	320.1927	320.1895	2.6	6.2
	9	-0.0811	-0.0810	-0.0790	-0.0792	-0.0801	1.1	2.1
Vi	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0
	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0
	3	240.0118	240.0109	240.0111	240.0110	240.0112	0.4	0.9
	4	-0.0381	-0.0382	-0.0374	-0.0373	-0.0378	0.5	0.9
	5	159.9592	159.9579	159.9592	159.9595	159.9590	0.7	1.6
	6	239.8994	239.8991	239.9005	239.9013	239.9001	1.0	2.2
	7	0.1154	0.1153	0.1172	0.1175	0.1163	1.2	2.2
	8	240.0012	239.9996	240.0027	240.0015	240.0013	1.3	3.1
	9	160.1287	160.1279	160.1289	160.1304	160.1290	1.1	2.5
Wi	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0
	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0
	3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0	0.0
	4	79.3587	79.3579	79.3585	79.3589	79.3585	0.4	1.0
	5	79.5015	79.5012	79.5027	79.5021	79.5019	0.6	1.5
	6	79.1803	79.1799	79.1777	79.1789	79.1792	1.1	2.6
	7	159.3970	159.3967	159.3981	159.3985	159.3976	0.8	1.8
	8	159.4941	159.4943	159.4942	159.4960	159.4947	0.9	1.9
	9	159.9571	159.9566	159.9565	159.9579	159.9570	0.6	1.4

表 6 ゲージ点再検定のシミュレーション (B形ゲージ P_4 , P_8 ゲージ点)

(mm)

gage point		Measured Value		Corrected Value		True Value
		$\theta = 0$	$\theta = 180$	$\theta = 0$	$\theta = 180$	
P_4	U_4	80.0092	80.0112	80.0133	80.0142	80.0135
	V_4	-0.0422	-0.0322	-0.0379	-0.0382	-0.0381
	W_4	79.3599	79.3597	79.3592	79.3599	79.3587
P_8	U_8	320.1775	320.1861	320.1900	320.1901	320.1902
	V_8	240.0030	240.0054	240.0014	240.0019	240.0012
	W_8	159.4924	159.4914	159.4947	159.4931	159.4941

(a) 1986年11月

(b) 1990年8月

図 3 校正結果 (誤差ベクトルの分布)

の置き方にはよらず、さらに真値との差も $1\mu\text{m}$ 以下である。

4. 三次元用ゲージによる校正実験

4.1 継足し精度の向上 本校正法は2種類の形状のゲージを1組として用い、測定結果を継足すことによって立体的な測定範囲の校正を行っている。この継足しの際に、測定誤差が伝ばすることは避けられない。しかし、継足しによって校正範囲を拡大しようとする場合には誤差の伝ばを最小限に抑える必要がある。

そのためにはA形ゲージの測定結果を継足すための

表 7 鋼球半径のばらつき

(μm)

No.	CMM with $0.1\mu\text{m}$ Scale		CMM with $1\mu\text{m}$ Scale	
	σ	width	σ	width
1	0.3	0.7	0.5	1.4
2	0.1	0.2	0.7	2.0
3	0.1	0.3	0.5	1.4
4	0.1	0.2	0.4	1.1
5	0.1	0.2	0.5	1.6
6	0.1	0.2	0.6	1.7
7	0.1	0.3	0.5	1.6
8	0.2	0.5	0.5	1.4
9	0.1	0.2	0.7	2.1
10	0.2	0.4	0.5	1.4
11	0.6	1.5	0.6	1.7
12	0.1	0.3	0.5	1.4
13	0.3	0.8	0.4	1.1
14	0.1	0.4	0.7	2.1
15	0.2	0.5	0.9	2.6
16	0.2	0.6	0.6	1.7
17	0.1	0.1	0.7	1.8
18	0.1	0.4	0.7	2.0
19	0.2	0.6	0.6	1.7
20	0.2	0.6	0.5	1.6

基準点の数を増やすことがまず考えられる。しかし、試作したB形ゲージは継足しに最小限必要な3点ずつのゲージ点しかないので、測定のしやすさを損なわない範囲でゲージ点数を多くする必要がある。また、B形ゲージは再現性および長期間の安定性についてもA形ゲージに劣ることが明らかになったので、ゲージ点数を多くするとともに、支柱と基盤を一体化するなど形状・構造を改善する必要があると考えている。

4.2 校正実験結果 三次元用ゲージを用いて実機を校正した結果を図3に示す。図3は各格子点における誤差ベクトルの各軸成分を矢印の大きさに示したものである。図3の(1)と(2)は同一の測定機の校正結果であるが、約4年の時間経過があり、その間に測定機本体下部のジャッキの高さ調整を行っている。X軸方向の誤差成分が変化しているのはそのためと思われる。Y軸およびZ軸方向の誤差成分には大きな変化はない。この校正実験はA形ゲージ3回、およびB形ゲージ1回の測定によって行われ、測定に要する時

表 8 ゲージ点の座標測定値のばらつき (B形ゲージ)

(μm)

No.	CMM with 0.1μm Resolution Scale						CMM with 1μm Resolution Scale					
	Ui		Vi		Wi		Ui		Vi		Wi	
	σ	wid.	σ	wid.	σ	wid.	σ	wid.	σ	wid.	σ	wid.
1	0.8	2.1	0.6	1.4	0.7	1.6	0.6	1.5	1.1	2.9	1.0	2.6
2	1.3	2.8	0.8	1.9	1.3	2.7	0.7	1.6	0.3	0.9	0.8	2.1
3	0.3	0.9	0.7	1.7	0.5	1.1	0.7	2.1	0.5	1.7	0.5	1.3
4	0.8	1.9	0.6	1.4	0.2	0.6	0.5	1.2	0.4	1.0	0.8	2.1
5	1.2	2.8	0.3	0.9	0.6	1.6	0.6	1.8	0.3	0.9	0.3	0.7
6	1.3	2.9	1.3	3.5	1.0	2.7	0.3	0.8	0.4	1.0	0.7	1.9
7	0.5	1.1	0.6	1.5	0.8	1.7	0.6	1.6	0.4	1.0	0.8	2.2
8	0.8	1.8	0.7	1.7	1.2	2.7	0.4	1.0	0.9	2.0	0.7	2.0
9	1.1	2.6	0.5	1.3	0.4	1.0	0.6	1.7	0.6	1.6	0.5	1.2

間はほぼ1時間である。

4・3 高精度三次元測定機への適用 三次元用ゲージを用いて最小読取り値 0.1 μm の三次元測定機の精度検査を行った。対象とした測定機は測定範囲 400, 300, 200 mm の CNC 駆動機で、座標検出にはレーザスケールが用いられている。ゲージは、各測定位置でティーチングを行い CNC 動作によって繰返し測定を行った。繰返し回数は各ゲージの各測定位置ともにそれぞれ 7 回である。

表 7 は A 形ゲージの 20 個の鋼球半径について、7 回の測定値の標準偏差とばらつきの幅を示したものであり、1 μm 読みの測定機についての結果も同時に示してある。0.1 μm 読みの測定機では、鋼球半径のばらつきは標準偏差で約 0.2 μm であり、1 μm 読みの測定機と比べて 1/3 程度である。したがって、鋼球半径の測定精度に関しては最小読取り値の違いが現れている。

表 8 は B 形ゲージのゲージ点座標を繰返し測定した際のばらつきを標準偏差とばらつきの幅で表し、2 機種について比較したものである。これによれば、位置検出の精密さに関しては両機はほぼ同等程度の精度である。したがって、試作した三次元用ゲージはこの 0.1 μm 読みの測定機の校正にも用いることができるものと思われる。

5. 結 言

三次元測定機校正用のゲージに関して、検定の精度、測定の再現性、校正方法とその校正精度について調べ、以下のことがわかった。

(1) 検定精度はゲージ点座標の各軸成分について最大 2 μm である。

(2) ゲージ検定の再現性も同等程度であるが、B 形ゲージの再現性がやや劣っている。

(3) ゲージ形状は長期間安定に保たれていたが、B 形ゲージのゲージ点位置の変化がやや大きい。

(4) 数点程度のゲージ点位置の変化であれば、校正する測定機を用いてゲージの再検定ができる。

(5) 検定精度、測定の再現性、長期間の安定性などから判断して、位置の測定精度が標準偏差で 1 μm 程度の三次元測定機の校正用として本ゲージの実用性は高い。ただし、B 形ゲージの形状・構造には改良が必要であると考えている。

本ゲージは一定の温度環境下での使用を前提とし、測定実験はすべて 20°C ± 1°C の恒温室内で行ったものであり、温度変化が大きい場合には今のところ対応できない。しかし、ゲージ本体に熱膨張係数の低いインバー合金などの素材を用いてゲージの変形を抑えることができれば、種々の温度環境下での校正が可能になるものと思われる。

文 献

- (1) Burdekin, M., ほか 1 名, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 195-20 (1981), 231.
- (2) Zhang, G., ほか 4 名, *CIRP Ann.*, 34-1 (1985), 435.
- (3) Busch, K., ほか 2 名, *Precision Eng.*, 7-3 (1985), 139.
- (4) 大矢・穂苅・田村, 機論, 54-503, C (1988), 1445.
- (5) 大矢・穂苅・田村, 機論, 53-485, C (1987), 119.
- (6) 大矢・穂苅・田村, 機論, 51-471, C (1985), 2851.