現場環境における三次元測定機の高度化に関する研究 (第2報)* - 直角誤差補正-大西 徹** 高瀬省徳** 高増 潔***

Study on Improvement Methods of CMM (Coordinate Measuring Machine) in Workshop Environment – Correction of Squareness Error –

Tohru OHNISHI, Shotoku TAKASE and Kiyoshi TAKAMASU

In recent years, the CMM (Coordinate Measuring Machine) quickly has been spreading in the manufacturing industry. With this phenomenon, the environmental condition and installation site of CMMs has been changed from the temperature control room to the workshop environment and the production line without air conditioning. However, even in severe environment the demand to high accuracy measurements by CMM has been enhancing still more. Therefore, the methods to evaluate and realize the high accuracy measurements by CMM in workshop environment have been investigated. In this paper, we propose the evaluation and correction method of squareness errors using MCG (Machine Checking Gauge). Additionally the performances of CMM in workshop environment and temperature-controlled room are tested and corrected experimentally. From these results, we confirmed the availability of the proposed methods.

Key words: CMM, coordinate measuring machine, workshop environment, squareness error correction

1. 緒 言

三次元測定機(座標測定機, Coordinate Measuring Machine, 以下 CMM)は、機械部品の三次元形状、寸法、位置などを測 定するために、広く機械産業分野で利用されている測定機で あり、CMMの高精度化は、品質保証のうえで必要不可欠な要 求である.生産システムが、グローバル化していく中で、部 品を国際的に発注、受注することが生産の効率化において重 要となり、CMMによる測定は、測定室や恒温室で使われてい る状況から広く工場や生産現場(以下、現場環境)で使われ るようになってきている.一方、このようなシステムでは、 部品の設計、加工、組立工程を通して、品質保証を効率的に 行い測定の不確かさを評価することが、コスト面からも重要 な技術となっている¹⁾²⁾.

CMM を利用した測定における不確かさの評価については, 多くの研究があるが CMM の精度評価,幾何学誤差の補正, 測定戦略の影響などが大部分で,測定環境の影響を考慮した ものは少ない.しかし,現場環境で CMM を使う場合には, 温度,振動,ゴミ,供給空気などの環境の影響や校正方法, 経年変化などの管理方法が問題となる.本研究では,現場環 境で CMM を使う場合に問題となる要因を解析し,問題解決 のための提案を行うことにより,現場環境における三次元測 定の高度化を行うことを目標にする.

現場環境に置かれた CMM の不確かさの要因は,以下のように分類できる.

(1) 環境条件による不確かさ

- ** 正 会 員 (財)機械振興協会 技術研究所 (東京都東久留米市 八幡町 1-1-12)
- **** 正 会 員 東京大学工学系研究科(東京都文京区本郷 7-3-1)

- 温度変化による熱膨張
- 温度変化による温度ドリフト
- 振動,ゴミ,供給空気など
- (2) CMM 本体の運動学誤差による不確かさ
 - 直角誤差
 - 真直度誤差,姿勢誤差
 - スケール誤差
- (3) プロービングシステムによる不確かさ
 - ゴミ, 摩耗
 - 測定力

前報¹⁾では温度変化による不確かさについて検討し,温度 ドリフトを補正する方法を提案した.本報では,CMM の 21 個の幾何学誤差のうち,寄与率が高く,現場環境で校正可能 と考えられる直角誤差について検討した.CMM の幾何学誤差 は、レーザ測長機やボールプレートを用いて校正する手法の 研究が行われている³⁾⁻⁶⁾.これらの手法はかなり完成度が高い 手法であるが,実施するためのコストや手間もかなり大きく なってしまう.また,これらの手法は,良い温度環境で行う 必要があり,温度変化が大きい現場環境では,温度ドリフト の影響が大きいため,測定時間が長くかかる手法の適用は難 しい.

CMM の直角誤差は,幾何学誤差補正がされた CMM が作る 機械座標系における X 軸, Y 軸および Z 軸が,理想的にはお 互い直交する必要があるが,それからどれだけずれているか で評価される.一般的には直角度誤差と言われているが,幾 何公差における形状偏差(真直度誤差)を含んでいる直角度 とは意味が異なるので,本報告では「直角誤差」と表現する. 直角誤差を評価する手法としては,他の幾何学的誤差を含め てステップゲージ,ボールプレートなどのアーティファクト やレーザ測長機を利用する方法が提案されている.前述した

^{*} 原稿受付 平成 18 年 12 月 14 日

ように,現場環境においてこれらの手法を使うことにはかな り限界がある⁴⁾⁻⁶⁾.

一方,変位計を内蔵するダブルボールバー (Double Ball Bar) を利用した DBB 法が,工作機械の運動精度評価に利用されて いる⁷⁾⁻¹⁰. DBB 法は,簡単な方法で短時間に,工作機械の運 動精度を評価できると同時に,工作機械の校正にも利用され ている. DBB 法を CMM へ適用することも可能であるが,よ り安価で手軽な方法として,マシンチェックゲージ (Machine Checking Gauge,以下 MCG,レニショー製)を利用した方法 が提案されている⁶.

MCG は主に, CMM の中間検査に使用されることが多く, CMM の状態を日常的に評価することのみに使われている.本 報では,現場環境に置かれた CMM と恒温室の置かれた CMM の直角誤差を, MCG を用いて測定するとともに,測定結果を 利用して直角誤差を補正する手法を提案し,その効果を実験 により確認した.

2. MCG による CMM の幾何学誤差の評価

2.1 MCG の構成と使用方法

図1にMCGの構成を示す.MCGはベースの上に径4mm のピボットボールのついた支柱とアームにより構成され,ピ ボットボール上に3個のボールでキネマチック(運動学的) に支持されたアームの先端に,スタイラスボールを備えた形 をしている.また,アームはカーボンファイバー製で熱膨張 係数は1.0×10⁶/Cとなっている¹¹.

まず, ピボットボールを測定し, その中心座標を原点とする. 次に, アーム先端のフォーク状のバーにプローブを引っ掛けた状態で, CMM を駆動してアームを指定の位置へ移動する. その位置で, プローブをスタイラスボールへ接触することで, 原点から *R* だけ離れた球面上の測定点の座標値 (*x*, *y*, *z*)を得ることができる. *R* としては, 101 mm, 151 mm, 226 mm, 380 mm, 532 mm, 685 mm のアームが用意されている.

図2に示すように水平方向に45度間隔で8ヵ所,水平面より+45度および-45度の位置で同様に各8ヵ所,合計24ヵ 所の測定位置で繰り返し3回の測定を行う.この72点の座標 は、理想的にはすべて原点から R の距離の座標にあるので、 理想的な球からの偏差により CMM の幾何学誤差を評価でき る.また、すべての測定の終了後に、もう一度、ピボットボ ールの中心座標を測定することで測定中の温度ドリフトを確 認できる.

以上のような測定は、一般的な数値制御の CMM では、す べて自動的に行うことができる.1回の測定は20分程度で行 うことができるため、現場環境で日常的に使用することが可 能である.

2.2 MCG のデータ処理手法

72 個の測定データの座標値 (x_i, y_i, z_i) から, ピボットボー ルの中心座標のずれ量 (x_0, y_0, z_0) および直角誤差 (t_{xy}, t_{zx}, t_{zy}) を求める.まず, ピボットボールの中心座標のずれ量は球の 方程式を利用して,式(1)の S_c を最小にする最小二乗球の 中心から求めることができる.

次に、CMM の各軸の直角誤差は**図 3** に示すように 3 つの パラメータで表現できる. CMM の機械座標系 (*x*, *y*, *z*) と直 角誤差のない座標系 (*X*, *Y*, *Z*)の関係を, *X* 軸と*x* 軸は等しい, *xy* 平面と *XY* 平面は等しいとして表現する. 直角誤差として *y* 軸の *Y* 軸からの角度誤差 *t_{xy}*, *z* 軸と *Z* 軸からの *X* 軸方向の角



Fig. 1 Construction and set up of Machine Checking Gauge (MCG), R is length between centers of pivot ball and stylus ball¹¹



Fig. 2 Location of measuring positions by MCG; 8 positions on 3 difference Z levels (+45°, 0°, -45°)¹¹)



Fig. 3 Coordinate systems and squareness errors by 3 angle error parameters t_{xyy} , t_{zx} and t_{zy} , XYZ is coordinate system without squareness errors and xyz is machine coordinate system with squareness errors.

度誤差 t_{xx} , z 軸と Z 軸からの Y 軸方向の角度誤差 t_{xy} の 3 つ のパラメータで記述ができる. これらのパラメータは角度として表現される.

直角誤差のパラメータは,式(2)の近似による式(3)の *S*_q を最小とする条件で,最小二乗法により求めた.ここで,r は ピボットボールの中心とアーム先端のスタイラスボールとの 平均距離である.

$$\tilde{S}_{c} = \sum_{i=1}^{n} \left((x_{i} - x_{0})^{2} + (y_{i} - y_{0})^{2} + (z_{i} - z_{0})^{2} - r^{2} \right)$$
(1)

$$X = x + y \sin t_{xy} + z \sin t_{zx} \approx x + yt_{xy} + zt_{zx}$$

$$Y = y \cos t_{xy} + z \sin t_{zy} \approx y + zt_{zy}$$

$$Z = z \sqrt{1 + \tan^2 t_{zx} + \tan^2 t_{zy}} \approx z \cos t_{zx} \cos t_{zy} \approx z$$
(2)

$$S_q = \sum_{i=1}^n \left(\left(x_i + y_i t_{xy} + z_i t_{zx} \right)^2 + \left(y_i + z_i t_{zy} \right)^2 + z_i^2 - r^2 \right)$$
(3)

2.3 MCG のシミュレーション

2

アームの長さを 100 mm とし、3 つの直角誤差パラメータ



Fig. 4 Simulations of output geometrical errors from MCG measurements on different squareness errors

を種々に変化させた場合,水平面(0°),水平面より+45° および-45°のXY平面における測定誤差をシミュレーショ ンにより示した(図4). 図4(a)および(b)の水平面の± 45°方向の比率で, t_{xy} の推定が可能であることが分かる.同 様に,図4(a),(c)および(e)より+45°および-45°の ずれのX方向と大きさで t_{xy} が推定可能であり,図4(c),(d) および(e)より+45°および-45°のずれのY方向と大きさ で t_{xx} の推定が可能であることがわかる.

この結果は、式(3)の S_q を最小とするような最小二乗法の当てはめ結果と一致する.以上より、MCGにより直角誤差パラメータが推定可能なことを確認した.

3. 現場環境における CMM の MCG による評価結果

3.1 アームの長さと直角誤差の関係

現場環境に置かれた CMM-1 と恒温室に置かれた CMM-2 に ついて, MCG を用いて直角誤差の評価を行った. **表 1** に評価 に使った CMM の仕様を示す. CMM-1 は一般的な CMM で門 移動タイプ, CMM-2 は高精度タイプの CMM で門固定タイプ である.

図5に CMM-1 と CMM-2 における MCG のアーム長さ(101 mm, 151 mm, 226 mm, 380 mm) と直角誤差の測定結果を示 す. CMM-2 は測定範囲の制限のため, アーム長さ 380 mm は 測定できなかった. この図から, CMM-1 の場合, アーム長さ が長くなるほど直角誤差が小さくなる傾向があることが分か った. 特に t_{xx} については, アーム長さ 101 mm と 380 mm で 3 sec 以上の差が確認できる. これは, 部分的な直角度の 悪さが影響していると考えられる.

CMM-2 の場合, t_{xy} , t_{zx} , t_{zx} ともにアーム長さに関係なく, 直角誤差はほぼ一定であるが, t_{xx} の直角誤差が 5 sec 程度あ り,この CMM の直角誤差の許容値 1.5 sec を大きく超えてい る. これは, 経年変化などの影響が考えられる.



(a) CMM-1: normal accuracy and moving bridge type CMM



(b) CMM-2: high accuracy and fixed bridge type CMM

Fig. 5 Relationship of length of MCG arm and squareness errors for 2 types of CMM (CMM-1 and CMM-2)

3.2 温度変化と直角誤差の関係

図6に現場環境に置かれているCMM-1の,冬の1日の室 温と直角誤差の変化を,図7に1年間の平均室温と直角誤差

Table 1 Specifications of CMM-1 and CMM-2

	CMM-1	CMM-2
Modes of operation	CNN	CNN
Type of CMM	Moving bridge	Fixed bridge
Measurement range (XYZ mm)	850×1000×600	$700 \times 550 \times 400$
Indicating digit (µm)	0.1	0.1
Type of probing system	Touch trigger	Parallel twin
Error of indication $E(\mu m)$	3.9 + 5L/1000	0.8 + L/800
Type of room (°C)	Workshop	20±0.5

の変化のようすを示す. これらの図から、1 日の直角誤差の 変化は少なく、最大 0.6 sec であったが、1 年の直角誤差の変 化は、 t_{xy} で 1.1 sec, t_{y} で 2.5 sec, t_{xx} で 0.5 sec となり、1 年間でほぼもとの直角誤差の値に、戻っていることが確認で きた. この変化は、測定のばらつきより大きく、室温の変化 に応じて直角誤差が変化していることを示している.

図8に平均室温と直角誤差の関係を示す. 平均室温によって、直角誤差が変化していることが分かった. 平均室温と直角誤差の変化はほぼ線形で, t_{xy} では-0.07 sec $^{\circ}$ C, t_{zy} では+ 0.20 sec $^{\circ}$ C, t_{zx} では-0.03 sec Cとなっている.

 t_{zy} の変化が一番大きくなっている.これは、図9に示すように CMM-1 の構造が門移動形であり、 t_{zy} 方向の測定では Z コラムと X コラムからなる大きな門構造 (Y-bridge) が移動する. 門構造に対してエアーベアリングの支持部の距離が狭いため、 t_{zy} の誤差が大きくなる.これに対して t_{zx} 方向の測定では、門が移動しないで Z コラムだけが X 方向および Z 方向に移動するため、誤差が小さくなっていると考えられる.

この CMM の構造から直角誤差 1 sec は, 最大で 10 μ m の 測定誤差が生じる.このため,この CMM の測定精度から考 えると,平均室温が 3 ℃以上変化したら,直角誤差が測定結 果に影響すると考えられる.また,年間の温度変化が 10 ℃ 以上ある測定環境を考えると,4 章に示すような直角誤差補 正が必要となり,直角誤差を 1 sec 以内にするためには,最 低でも 2 γ 月に 1 度程度の直角誤差測定が必要となると考え られる.

4. ボールプレート測定による直角誤差補正の評価

スチール製のプレート上に直径 22 mm のセラミック球を 25 個,83 mm ピッチで、5×5 のアレイ状に配置したボール プレート(Retter 社)を用いて、前項に示した直角誤差補正方 法の有効性を検討した。測定方法は、温度ドリフトによるヒ ステリシスの影響を抑えるため、各球の位置を渦巻状に球 1 から中心の球 13 まで順番に測定を行い(forward 測定)、つぎ に、球 13 から先と同じ経路で球 1 まで順番に測定を行った (backward 測定)¹²⁷⁻¹⁴⁾.1 サイクルの測定の所要時間は 30 分 で、XY 平面および YZ,XZ 平面の各平面にボールプレート を設置し、繰り返し5 回の測定を行った。

直角誤差の大きい CMM-1 の冬期と夏期の場合および CMM-2 の XZ 平面に対して, MCG で直角誤差を評価した繰 り返し 5 回の平均値を補正値として直角誤差補正を行った. 表 2 に直角誤差補正をする前と後のボールプレートで評価し た直角誤差の値を示す. CMM-1 では, 最大 4.4 sec あった直 角誤差を 0.5 sec まで減少させることができた.

また, 図 10 に CMM-1 の冬期の XY 平面および CMM-2 の XZ 平面における直角度補正前後のボールの中心座標の名目 位置からのずれを示す. CMM-1 では最大 7.3 μm の誤差を



Fig. 6 Variation of squareness errors and room temperature in a day on CMM-1



Fig. 7 Variation of squareness errors and room temperature in a year on CMM-1



Fig. 8 Relationship between room temperature and squareness errors



Fig. 9 Position of supporting air-bearings of CMM-1 (moving bridge type CMM)

 Table 2
 Result of squareness errors before and after squareness errors correction

ty	pe of CMM		CMM-1		CMM-2
	plane	XY	YZ	XZ	XZ
winter	before correction	4.4	4.1	-1.0	-4.9
	after correction	-0.2	-0.3	-0.3	-0.1
summer	before correction	3.6	2.6	-0.8	-
	after correction	-0.3	-0.5	0.2	-

2.2 µm へ, CMM-2 では最大 8.2 µm の誤差を 2.8 µm へ減少 させ, 直角誤差補正の効果を確認することができた. これら の結果から, 恒温室に置かれている CMM および現場環境に 置かれている CMM においても, MCG による直角誤差補正を 行うことにより, 直角誤差の補正が可能になったことが確認 できた.

5. 結 言

現場環境における CMM の高度化における問題点として, 直角誤差について考察し, MCG による評価法を検討した.ま た,現場環境と恒温室に置かれた CMM の直角誤差を MCG により評価し,直角誤差補正の有効性をボールプレートの測 定により確認した.得られた結論は以下のとおりである.

- (1) MCG により, 簡易で短時間に現場環境で CMM の直角 誤差の評価する手法を示した.
- (2) 現場環境におかれた CMM と恒温室に置かれた CMM の 直角誤差を評価するとともに,現場環境においては直角 度が室温によって変動していること,定期的な測定およ び補正が必要なことを指摘した.
- (3) MCGによって評価した直角誤差の値を補正値として、 直角誤差補正を行なうことの有効性を、ボールプレート の測定により確認した.

今後は,現場環境の問題点である振動,ゴミ,空気などの環 境の影響や校正方法,プロービングシステムの評価などの管理方法 について検討し,現場環境のCMMの高度化を目指す.

謝 辞

この研究は, 競輪の補助金を受けて行われたことを付記し て謝意を表します.

参考文献

- 大西徹,高瀬省徳,高増潔:現場環境における三次元測定機の 高度化(第1報) -温度ドリフトの評価および補正-,精密工 学会誌 73,2 (2007) 270.
- 2) 高増潔:バーチャル三次元測定機計測,計測と制御,40,11(2001) 801.
- M. Abbe, K. Takamasu, S. Ozono: Reliability on calibration of CMM, Measurement 33 (2003) 359.
- W. Knapp, U. Tschudi, A. Bucher: Comparison of different artefacts for interim coordinate-measuring machine checking, Precision







(b) XZ plane on CMM-2



Engineering, 13, 4 (1991) 277.

- P.C. Miguel, T. King, J. Davisc: CMM verification: a survey, Measurement 17, 1 (1996) 1.
- P.C. Miguel, T. King: Co-ordinate measuring machines Concept, classification and comparison of performance tests, International Journal of Quality & Reliability Management, 12, 8 (1995) 48.
- 7) 垣野義昭、井原之敏、亀井明敏、伊勢徹:NC工作機械の運動精 度に関する研究(第1報)-DBB法による運動誤差の測定と評 価一、精密工学会誌、52,7(1986)1193.
- 51 垣野義昭,井原之敏,中津義夫:NC工作機械の運動精度に関する研究(第2報)-DBB 法による運動誤差原因の診断-,精密工学会誌,52,10(1986)1739.
- 9) 垣野義昭,岩本祐一,井原之敏,亀井明敏,伊勢徹:誤差ベクトルによる3次元測定機の補正とDBB検定法の評価,精密機械, 51,6 (1986) 1244.
- Emmett Curran et al. : Quick check error verification of coordinate measuring machines, Journal of Materials Processing Technology, 155-156 (2004) 1207.
- 11) RENISHAW Catalog: The Machine Checking Gauge.
- E. Trapet et al. : Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine, PTB, (1998).
- 13) 大澤尊光,高辻利之,黒澤富蔵:幾何学的ゲージ持ち回り比較の問題,精密工学会誌,67,2 (2001) 256.
- 14) 大澤尊光,高辻利之,黒澤富蔵,梅津健太:座標測定機用二次 元幾何ゲージ校正に関する技術情報,産総研計量標準モノグラ フ,8 (2005).