



# 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1報)\*

—温度ドリフトの評価および補正—

大西 徹\*\* 高瀬 省徳\*\* 高増 潔\*\*\*

Study on Improvement Methods of CMM (Coordinate Measuring Machine) in Workshop Environment  
— Evaluation and Correction of Thermal Drift —

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 clarify the difference of thermal drift and conventional temperature correction in thermal errors of length and position measurement, and propose the simple model of thermal drift and correction method. Additionally the thermal drift of CMM in workshop environment is tested and corrected experimentally. From these results, we confirmed the availability of the proposed methods.

**Key words:** CMM, coordinate measuring machine, workshop environment, thermal drift correction, thermal error

## 1. 緒 言

三次元測定機 (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、この 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<sup>1)</sup>。

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、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、このような現場環境で 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とする。

本報では、現場環境で一番問題となる温度の影響について検討した。温度の影響については、工作機械を中心に多くの

研究が行われている。工作機械は熱源を持っていることもあり、温度ドリフトの影響などを評価するための ISO 規格、JIS 規格も作られている。測定機器に対しても、温度補正に関連する測定の不確かさの評価、温度ドリフトの評価に対して ISO 規格が作られている<sup>2)~4)</sup>。

しかし、CMM に対しては、複雑な構造のため温度の時間的、空間的な変化によるたわみなどの変形のモデル化や有限要素法解析が行われ、温度変化により変形が生じない構造の研究が行われている。また、実際の CMM の温度変形を実験的に評価し、モデルとの比較や補正方法の提案も行われているが、比較的高精度の CMM が対象で、比較的良好な温度環境で行われている研究が大部分であり、現場環境に着目して温度を広い範囲で評価している研究はない<sup>5)~9)</sup>。

ここで、温度補正は、CMM のスケールおよびワークの熱膨張補正 (CMM 付属の温度に依存する補正機能) であり、これに対して、温度ドリフトは、温度補正に含まれない、CMM 構造体などの熱膨張の影響による誤差を示す。

本報では、現場環境に置かれた CMM の温度状況を測定するとともに、温度補正と温度ドリフトの影響のモデル化を行い、現場環境において温度補正と温度ドリフトの影響を推定し、実験的に評価した。さらに、モデルと温度測定を利用して温度ドリフト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. 現場環境の温度状態

まず、現場環境に設置した CMM の温度環境について調査した。図 1 に代表的な汎用機のひとつである門移動型の CMM の X, Y, Z 軸と温度計の配置の関係を示す。対象とした CMM の大きさ (幅, 奥行き, 高さ) は 1.6 m × 2.0 m × 2.7 m 程

\* 原稿受付 平成 18 年 6 月 13 日

\*\* 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)

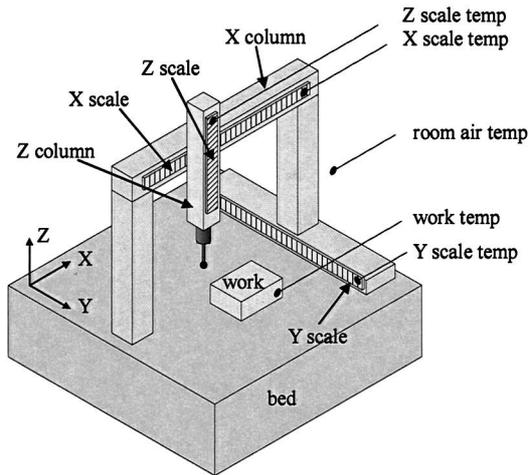


Fig. 1 Arrangement of 5 thermometers on work, X scale, Y scale, Z scale and room air

度, 測定範囲 (X 軸, Y 軸, Z 軸) は 850 mm × 1000 mm × 600 mm である。CMM を設置した部屋は, 空調のない一般的な工場環境で部屋の大きさはおよそ 22 m × 36 m, 天井の高さ 8 m である。メーカーが保障する測定精度 (JIS B 7440-2) は  $E = 3.9 + 5L/1000 \mu\text{m}$  で, 温度範囲としては 18 ~ 28 °C, 温度変化として 2 °C/h および 1 °C/m を要求しているため, 以下の実験はメーカーが要求する温度条件を満たしていないことになる。X, Y, Z 各軸のスケール, 測定定盤上の測定対象および室温を計測する測温抵抗体 (温度精度: ±0.3°C) を 5 つ配置した。

図 2 に 5 つの温度計を用いて, 夏 (2003 年 8 月 11 日) と冬 (2002 年 12 月 19 日) の朝 9 時 30 分から夕方 19 時 30 分の間, 30 分ごとに温度を測定した例を示す。夏と冬における現場環境の温度変化の様子および CMM の場所による温度の分布の様子が分かる。位置的に床に近い測定定盤にある Y スケールの温度が低く, 高い位置にある Z スケールの温度が高いこと, 測定定盤にある測定物の温度は測定定盤 (Y スケール) と室温の間の温度を取ることが分かった。温度の分布は夏で最大 1.6 °C, 冬で最大 1.3 °C であった。

表 1 に夏と冬における 30 分間, 60 分間および 1 日間のワーク, X, Y, Z スケール, 室温の最大温度差を示す。この結果から, 夏の場合の 60 分間の最大温度差は 0.3 °C で, 30 分間よりも Y 軸以外は 0.1 °C 大きく, 冬の場合の 60 分間の最大温度差は 0.5 °C で, 30 分間よりも 0.2 °C 大きくなっているが, 午後の温度に限ると冬のほうが安定していることが分かった。

時間がかかる測定においては, 温度変化および温度分布の変化による温度ドリフトが測定結果に影響することが予想される。

### 3. 温度ドリフトのモデル

温度ドリフトをモデル化するために, 簡単な長さ測定を例として考えてみる。図 3 で, まず時刻  $m_1$  でスケールのゼロ点  $l_{s1}$  を設定し, 時刻  $m_2$  でワークの長さ  $l_{s2}$  を測定し, その差  $l_{s2} - l_{s1}$  からワークの長さ  $l_w$  を求めることとする。ここで, スケール, ベース, ガイドおよびワークの熱膨張係数をそれぞれ  $\alpha_s, \alpha_b, \alpha_g, \alpha_w$  とし, 時間  $m_1$  における各要素の温度を  $t_{s1}, t_{b1}, t_{g1}$ , 時刻  $m_2$  における温度を  $t_{s2}, t_{b2}, t_{g2}$ ,

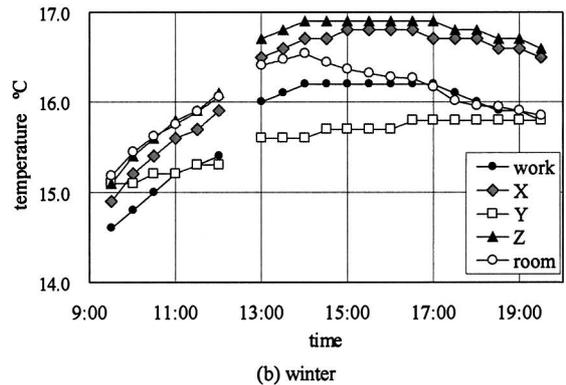
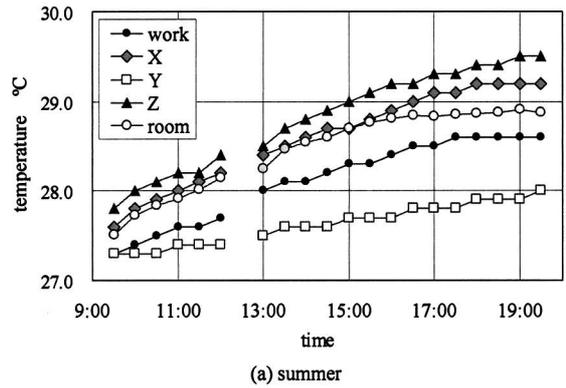


Fig. 2 Examples of temperature day variations (5 thermometers) at workshop without air conditioning in summer and winter

Table 1 Maximum differences of temperatures at work, X, Y, Z scales and room air on 30, 60 minute and 1 day in summer and winter; unit is °C

season time	summer			winter		
	30 min	60 min	1 day	30 min	60 min	1 day
work	0.1	0.2	1.3	0.2	0.4	1.6
X	0.2	0.3	1.6	0.3	0.5	1.9
Y	0.1	0.1	1.7	0.1	0.1	0.7
Z	0.2	0.3	0.7	0.3	0.5	1.8
room	0.2	0.3	1.4	0.3	0.5	1.4

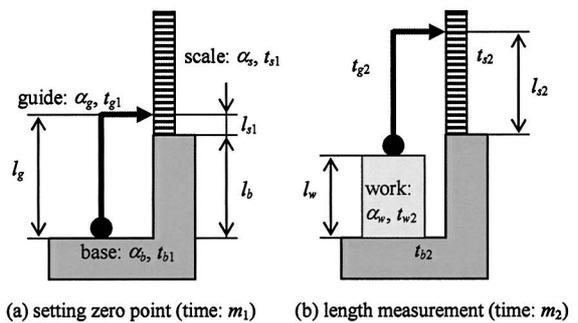


Fig. 3 Model of thermal drift in length measurement of work

$t_{w2}$  とする。

式 (1) は時刻  $m_1$  におけるスケール, ベースおよびガイドの長さ  $l_{s1}, l_b, l_g$  の関係を示す。同様に式 (2) は時刻  $m_2$  におけるスケール, ベース, ガイドおよびワークの長さ  $l_{s2}, l_b, l_g, l_w$  の関係を示す。長さはすべて 20 °C を基準に考えている。この 2 つの式からワークの 20 °C における長さ  $l_w$  は式 (3) により計算できる。式 (3) において, 時刻  $m_1$  と  $m_2$  の間の

各要素の温度変化を  $dt_s, dt_b, dt_g$  と置くと、式 (4) のように表すことができる。

$$l_g(1 + \alpha_g(t_{g1} - 20)) = l_b(1 + \alpha_b(t_{b1} - 20)) + l_{s1}(1 + \alpha_s(t_{s1} - 20)) \quad (1)$$

$$l_g(1 + \alpha_g(t_{g2} - 20)) + l_w(1 + \alpha_w(t_{w2} - 20)) = l_b(1 + \alpha_b(t_{b2} - 20)) + l_{s2}(1 + \alpha_s(t_{s2} - 20)) \quad (2)$$

$$l_w(1 + \alpha_w(t_{w2} - 20)) = l_{s2}(1 + \alpha_s(t_{s2} - 20)) - l_{s1}(1 + \alpha_s(t_{s1} - 20)) + l_b\alpha_b(t_{b2} - t_{b1}) - l_g\alpha_g(t_{g2} - t_{g1}) \quad (3)$$

$$l_w(1 + \alpha_w(t_{w2} - 20)) = (l_{s2} - l_{s1})(1 + \alpha_s(t_{s2} - 20)) + l_{s1}\alpha_s dt_s + l_b\alpha_b dt_b - l_g\alpha_g dt_g \quad (4)$$

$$dt_s = t_{s2} - t_{s1}, \quad dt_b = t_{b2} - t_{b1}, \quad dt_g = t_{g2} - t_{g1}$$

ここで、時刻  $m_1$  と  $m_2$  の間での温度変化が無視できる場合は、式 (5) のようになり、これがいわゆる寸法測定における温度補正である。温度補正では、ワークおよびスケールの温度を測定し、その温度によるワークおよびスケールの熱膨張を補正する技術である。dt に関連する項が無視できる場合、例えば測定時間が短い場合や材料の熱膨張係数が同じで膨張が打ち消しあう場合には、温度補正により長さ測定における熱膨張の影響をなくすることができる。このような条件が満たされない場合には、温度補正を行っても式 (6) の  $l_{drift}$  が温度ドリフトとして残ることになる。 $l_{drift}$  の大きさは、各要素の温度変化と寸法および熱膨張率の関係で決定する。

$$l_w(1 + \alpha_w(t_{w2} - 20)) = (l_{s2} - l_{s1})(1 + \alpha_s(t_{s2} - 20))$$

$$l_w = \frac{(l_{s2} - l_{s1})(1 + \alpha_s(t_{s2} - 20))}{1 + \alpha_w(t_{w2} - 20)} \quad (5)$$

$$\approx (l_{s2} - l_{s1})(1 + \alpha_s(t_{s2} - 20) - \alpha_w(t_{w2} - 20))$$

$$l_{drift} = l_{s1}\alpha_s dt_s + l_b\alpha_b dt_b - l_g\alpha_g dt_g \quad (6)$$

#### 4. 現場環境のCMMにおける温度ドリフト

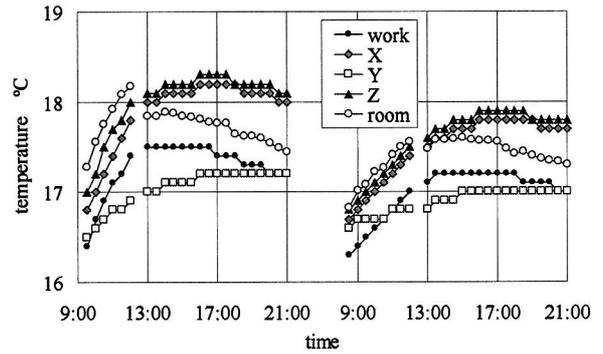
前述のCMMの温度ドリフトを調べるため、Xコラムの基準点から770mmの測定定盤上に設置した直径25.4mmの参照球の中心座標値  $(x, y, z)$  を、30分ごとに2日間(2003年1月21日~22日)にわたって測定した。2日間の温度変化と参照球の中心座標の変化を図4に示す。室温の変化によって球の中心座標値が変動していることがわかる。 $x$ 座標の変動は、 $y$ 座標および $z$ 座標の変動に比べて大きく、1日で20 $\mu\text{m}$ 以上であることが確認できる。さらに、この変動は、測定翌日には0 $\mu\text{m}$ 近辺まで戻ってきている。

$x$ 座標の温度ドリフトを図3と同じように、図5によってモデル化する。ここで、式(6)よりこのモデルの温度ドリフト  $l_{drift-CMM}$  は、式(7)のようになる。

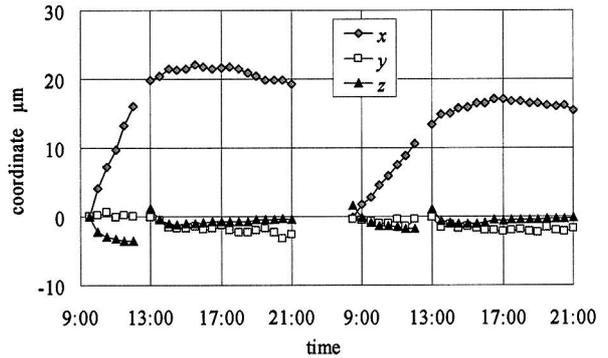
$$l_{drift-CMM} = l_{cx}\alpha_{cx}dt_{cx} - l_{sx}\alpha_{sx}dt_{sx} - l_{by}\alpha_{by}dt_{by} \quad (7)$$

ここで、それぞれの記号を以下のように定義する。

- $l_{cx}$ : X軸の基準点から球のXスケールの読み位置までの距離
- $l_{sx}$ : Xスケールの基準点からXスケールの読み位置ま



(a) temperature variations



(b) coordinate variation of sphere center

Fig. 4 Variation of temperatures (5 thermometers) and coordinates of sphere center in 2 days without air conditioning

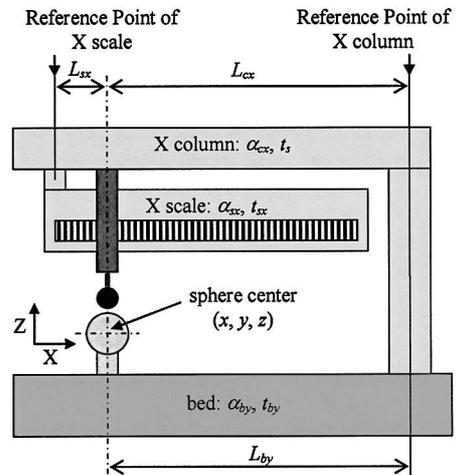


Fig. 5 Model of thermal drift of CMM for x-coordinate of sphere center

での距離

- $l_{by}$ : X軸の基準点から球の位置までの距離
- $\alpha_{cx}$ : Xコラムの熱膨張係数
- $\alpha_{sx}$ : Xスケールの熱膨張係数
- $\alpha_{by}$ : 定盤の熱膨張係数
- $dt_{cx}$ : Xコラムの温度変化
- $dt_{sx}$ : Xスケールの温度変化
- $dt_{by}$ : 定盤の温度変化

以下の計算では、球の位置に関連する  $l_{cx}$  および  $l_{by}$  は 770 mm,  $l_{sx}$  は 260 mm とし、各要素の熱膨張係数を Xコラム (アルミ)  $\alpha_{cx} = 23.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , Xスケール (鉄)  $\alpha_{sx} = 10.4$

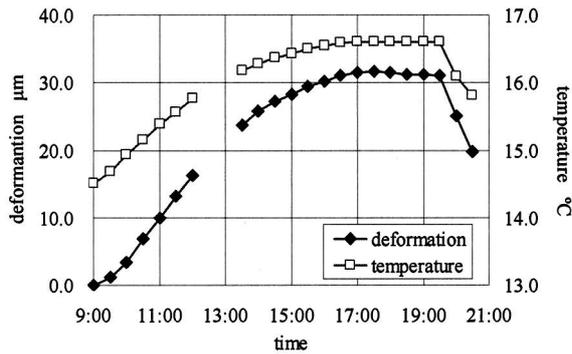


Fig. 6 Relationship between deformation and temperature of X column; deformation is measured by electric micrometer

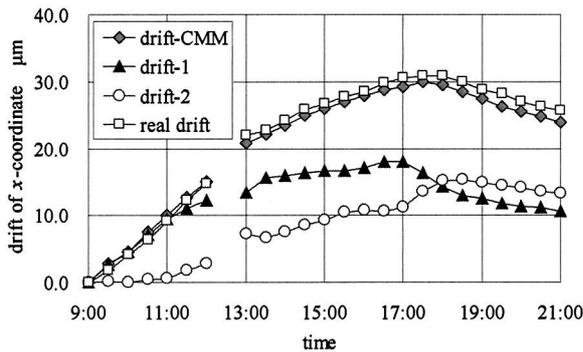


Fig. 7 Comparison between real drift and simulated drifts drift-CMM, drift-1 and drift-2 of x-coordinate of sphere center

$\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 定盤 (石)  $\alpha_{by} = 5.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , コラムや定盤の温度としては各軸スケールの温度計の値を使用した。

図 6 に式 (7) の  $l_{cx}\alpha_{cx}dt_{cx}$  項, つまり, 温度変化による X コラムの伸縮変化を電気マイクロメータで測定した結果を示す。この図から, コラムが温度変化により伸縮していることがわかり式 (7) のモデルの妥当性が確認できた。

式 (7) の温度ドリフトを室温が変化することによる温度ドリフトと, 各部材の温度分布が変化することによる温度ドリフトの 2 つに分けてみる。全ての部材 (スケール, 定盤, コラム) が室温と同様に变化とした場合の温度ドリフト  $l_{\text{drift-1}}$  は,  $dt_{cx} = dt_{sx} = dt_{by} = dt_r$  と見なせる場合 ( $dt_r$ : 室温変化) であり, 式 (8) で定義される。また,  $l_{\text{drift-CMM}}$  と  $l_{\text{drift-1}}$  の差で, 部材の熱容量や熱伝導, 室温の分布の変化による温度ドリフトを式 (9) で定義した  $l_{\text{drift-2}}$  とする。

$$l_{\text{drift-1}} = (l_{cx}\alpha_{cx} - l_{sx}\alpha_{sx} - l_{by}\alpha_{by})dt_r \quad (8)$$

$$l_{\text{drift-2}} = l_{\text{drift-CMM}} - l_{\text{drift-1}} \\ = l_{cx}\alpha_{cx}(dt_{cx} - dt_r) - l_{sx}\alpha_{sx}(dt_{sx} - dt_r) - l_{by}\alpha_{by}(dt_{by} - dt_r) \quad (9)$$

図 7 に実際の温度ドリフトと式 (7), (8) および (9) でシミュレーションした結果を示す。この図から, 測定開始 2 時間程度は, 室温が変化することによる温度ドリフト ( $l_{\text{drift-1}}$ ) がほとんどであり, 部材の熱容量や熱伝導, 室温の分布の変化による温度ドリフト ( $l_{\text{drift-2}}$ ) は, 部材の熱容量のためピークが 1 時間程度遅れていることが分かる。また, 実際の温度ドリフトとシミュレーションによって得られた値とは, 2  $\mu\text{m}$  以内で一致した。このことから, 温度ドリフトモデルの妥当性と, 温度ドリフトの補正が温度測定から可能であることが分かった。

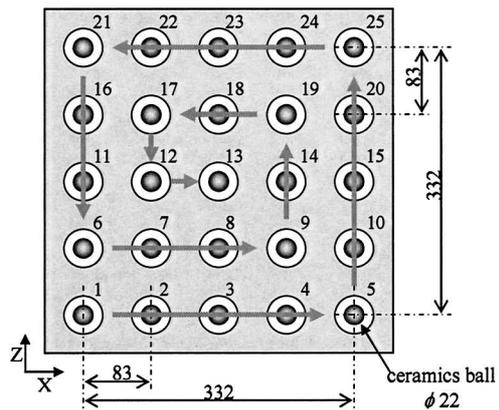


Fig. 8 Ball-plate measurement sequence in forward measurement; from ball 1 to ball 13

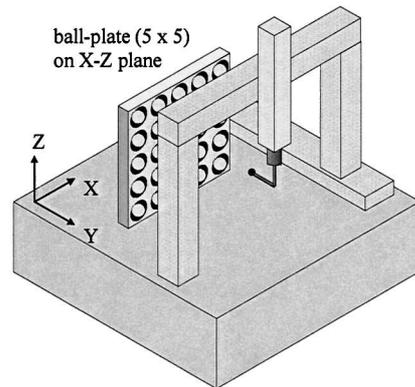


Fig. 9 Setting of ball-plate on X-Z plane; measuring center coordinates of 25 spheres

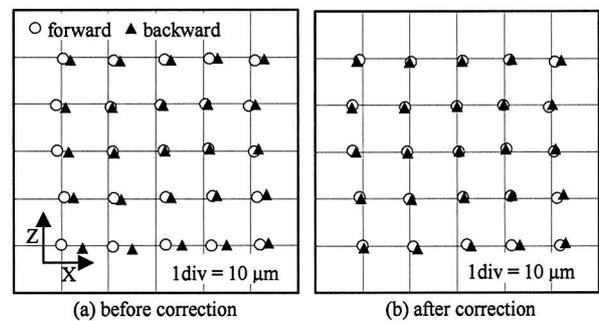


Fig. 10 Result of thermal drift of sphere centers before and after thermal drift correction of x-coordinate of sphere centers

### 5. ボールプレート測定における温度ドリフトの補正

スチール製のプレート上に直径 22 mm のセラミック球を 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, 温度ドリフト補正の可能性を検討した。測定方法は, 各球の位置を図 8 に示すように, 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)<sup>10) 11)</sup>。1 サイクルの測定の所要時間は 30 分で, 図 9 に示すように, X-Z 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。

温度ドリフトの大きい x 座標に対して, 温度測定結果を用いて式 (7) による温度ドリフト補正を行った。温度ドリフト

補正をする前と後のボールの中心座標の名目位置からのずれを図10に示す。また、表2に代表的な球の測定順序およびドリフト補正前後の forward 測定と backward 測定との x 座標の差を示す。これらの結果から、温度ドリフト補正を行うことにより、forward 測定と backward 測定との差は小さくなり、その差が最大であった球1(始点と終点)で 4.5 μm から 0.3 μm となった。平均で 1.5 μm あった x 座標の差が平均で 0.5 μm と 1/3 に減少し、温度ドリフト補正が可能になったことが確認できた。

表3に温度状態の冬の例(図2(b))を用いて、ボールプレートを測定した時の代表的な球の x 座標における、温度補正と温度ドリフトを測定時間30分と60分の2つの場合について示す。この結果から、温度補正は最大 0.4 μm で、最大 7.1 μm となる温度ドリフトよりも小さくなっている。また、測定時間60分の場合の温度ドリフトは、30分の場合の1.7倍程度になっていることが確認できる。このことから、現場環境の測定においては、測定時間が長い場合には温度ドリフトの影響が大きくなり、温度補正だけでは不十分なことが確認できた。

## 6. 結 言

現場環境におけるCMMの高精度化における問題点として、温度ドリフトについて考察し、実際の現場環境の温度変化を調査した。また、温度ドリフトのモデルを作り、これをCMMに適用し、その有効性を確認した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 温度補正と温度ドリフトの違いを簡単な寸法測定モデルによって示した。
- (2) 現場環境でのCMMによる測定で、測定時間が長い場合には温度ドリフトの影響が大きいことを理論的および実験的に指摘した。
- (3) 温度ドリフトを補正值として、ドリフト補正を行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、現場環境における温度ドリフト以外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、経年変化などの管理方法について検討し、現場環境のCMMの高精度化を目指す。

## 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。

**Table 2** Differences of x-coordinate of some sphere centers in forward and backward measurement

no. of ball	1	25	7	19	13
sequence of forward	1	9	17	21	25
sequence of backward	50	42	34	30	26
before correction (μm)	4.5	1.8	1.5	0.4	0.1
after correction (μm)	0.3	1.1	0.3	0.1	0.1

**Table 3** Comparison between temperature correction and thermal drift for x-coordinate of some sphere centers in winter

measuring time		30 min			60min		
no. of ball		1	3	5	1	3	5
temperature correction (μm)		0	0.1	0.4	0	0.1	0.4
thermal drift (μm)	Drift-CMM	4.1	2.5	0.9	7.1	4.3	1.6
	Drift-1	3.3	1.9	0.5	5.6	3.1	0.8
	Drift-2	0.8	0.6	0.4	1.5	1.2	0.8

## 参 考 文 献

- 1) 高増潔: パーチャル三次元測定機計測, 計測と制御, 40, 11 (2001) 801.
- 2) JIS B 6193: 2003 (ISO 230-3: 2001 と同等) 「工作機械—熱変形試験方法通則」.
- 3) ISO TS 16015, Geometrical product specifications(GPS)—Guide to the handling of temperature influences on measurements.
- 4) J. Bryan, International Status of Thermal Error Research, Annals of the CIRP 39/2, 1990, 645.
- 5) A. Balsamo, D. Marques, S. Sartori, A Method for Thermal-Deformation Corrections of CMMs, Annals of the CIRP 39/1, 1990, 557.
- 6) J.-P. Kruth, P. Vanherck, C. Van den Bergh, Compensation of Static and Transient Thermal Errors on CMMs, Annals of the CIRP 50/1, 2001, 377.
- 7) J.-P. Kruth, P. Vanherck, C. Van den Bergh, B. Schacht, Interraction between workpiece and CMM during geometrical quality control in non-standard thermal conditions, Precision Engineering 26, 2002, 93.
- 8) M.H. Attia, S. Fraser, A generalized modelling methodology for optimized real-time compensation of thermal deformation of machine tools and CMM structures, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, 1999, 1001.
- 9) 阿部誠, 高増潔, 大園成夫, 沢辺雅二: 空間座標の比較測定によるCMMの構成(第1報)—パラメトリックエラーモデルの構成とそのシミュレーション—, 精密工学会誌, 66 (3), 2000, 483.
- 10) 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.
- 11) 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, 第8号(2005).