温度環境の変化による三次元測定機の 精度変化に関する研究

Thermal Effects on the Accuracy of Three-dimensional Coordinate Measuring Machine

○学 栄田 雅美 (新潟大 院) 学 青木 純 (新潟大 院) 正 大矢 誠 (新潟大)

Masami EIDA, Niigata University, Igarashi2-8050, Niigata-shi, Niigata

Jun AOKI, Niigata University

Makoto OHYA, Niigata University

Key Words: Accuracy, Measurement, Three-dimensional Coordinate Measuring Machine, Temperature Variation, Thermal Effect, Error Compensation

1. 緒言

三次元測定機においては、高精度化、高速・高加減速化が求められてきたが、近年はこれらに加えて温度環境への対応が強く求められている。これは三次元測定機を加工ラインで使用したいと言う要求が強いためである。一般に、温度環境の変化に伴い、測定機の各部に熱膨張、熱収縮が発生し、測定機の熱変形となって測定精度を低下させる。現場環境に対応できる三次元測定機には、精度を低下させる熱的要因を極力排除すると同時に、ソフトウェアによる温度補正なども併用し熱による精度変動を安定的に吸収するシステムが必要となる。

温度環境は多くの要因により空間的にも時間的にも変化する。また、測定機と被測定物の熱容量に違いがあるため、両者の温度および温度勾配にも違いが生じる。そのため、環境温度が変化する際に測定機と被測定物の伸縮に差が生じ、その結果、測定精度が変化する。

そこで本研究では、三次元測定機の環境温度の変化に対する精度の安定性向上を目的とし、測定機と被測定物の熱容量の違いによる伸縮の時間遅れを考慮に入れた補正方法について検討する。また様々な温度環境下で熱容量の異なるゲージの寸法と各部の温度を測定して補正を試み、手法の妥当性を検証する。

2. 測定対象と測定環境

測定対象とした三次元測定機は、図1に示す MITUTOYO 製 F403 である。

Fig.1 Three-dimensional Coordinate Measuring Machine

本体はブリッジ・ベッド形の構造で、測定範囲はX,Y,Z 各軸方向にそれぞれ 400, 300, 300mm、各軸案内はエアベアリングである。座標検出には、最小読み取り値 1 μm の反射形リニアスケールを用いており、スケールは各軸の案内面に直接貼り付けてある。測定にはタッチプローブを用い、すべて手動で行った。

測定は恒温室内で行い、空調機の設定温度を様々に変化させることによって室温を変化させた。図2に室温、ゲージ、測定機のスケールの変化の様子の一例を示す。空調機はオン・オフ制御のため、設定温度に対して約±1℃の周期的な変動がみられる。

温度の測定には、自作の銅・コンスタンタン熱電対を用いた。各軸スケール、被測定物の温度は、絶縁処理した熱電対の接点をそれぞれの表面に貼り付けて測定した。

3. 誤差補正方法

温度変動時に伴う寸法測定誤差の変化の原因は、主に各軸方向のスケールと被測定物の温度差から生じる伸縮の差によるものと考えられ、その伸縮にはそれぞれ固有の時間遅れがあると思われる。そこで、本研究では、次式によってスケールの応答とゲージの応答を個別に計算し、両者を重ね合わせることで誤差を予測し、補正を試みた。ここで入力として、実測温度を用い、それぞれスケール、ゲージの温度と室温との重みつき平均をとっている。

$$C_1 Y_1' + C_2 Y_1 = T_1(t) \quad ; \quad Y_1 = \text{スケールの伸縮}$$

$$D_1 Y_2' + D_2 Y_2 = T_2(t) \quad ; \quad Y_2 = \text{ゲージの伸縮}$$

$$\text{Error} = Y_2 - Y_1 \quad ; \quad \text{寸法測定誤差}$$

ただし、入力として T_1 (または T_2) は、次式のようにスケール(またはゲージ)と室温の重み (w_1, w_2) 付き平均を用いた。

$$T_1 = w_1 \cdot T_s + (1 - w_1) \cdot T_r \quad ; \quad \text{スケールの代表温度}$$

$$T_2 = w_2 \cdot T_d + (1 - w_2) \cdot T_r \quad ; \quad \text{ゲージの代表温度}$$

$$T_r \quad ; \quad \text{室温} \quad T_s \quad ; \quad \text{スケール温度}$$

$$T_g \quad ; \quad \text{被測定物温度}$$

測定対象とした三次元測定機は、環境温度の変化に対する平面度・直角度の変化は小さいことがわかっている⁽¹⁾。本研究では補正係数 C_1, C_2, D_1, D_2 が、熱容量の違い、温度環境の変化の様子および測定方向によってどのように変わるかについて実験的に調べ、この補正方法の妥当性を検証する。

4. 測定方法

本実験では熱容量の異なる2種類のU型ハイトマスタ(MITUTOYO 製 HMU-600 および HMC-600)と、オプティカルフラットにブロックゲージを密着させたものを測定し、寸法測定誤差を求めた。各々の質量はそれぞれ42kg, 13kg, 0.7kgであり、熱容量はそれぞれ18.56KJ/K, 5.75KJ/K, 0.30KJ/K程度である。以後、これらをゲージA, B, Cと呼んで区別する。ブロックゲージ、ハイトマスタの測定面間の寸法を測定する際にはタッチ信号プローブの方向性の影響を避けるために、両測定面を同一方向から測定するようにした。これによってプローブ径の補正の必要もない。

測定開始から2時間は設定温度20℃の状態での測定した後、室温を25℃まで変化させ、その後10時間測定を続けた。寸法測定誤差は、各々の測定面で座標(20点)を測定することにより面間距離を求め、この値から20℃におけるゲージ寸法を差し引いた値を寸法測定誤差とした。

5. 測定結果と考察

X, Y各軸方向に3種類のゲージA, B, Cを配置し、環境温度を様々に変化させながら、前述の方法で室温が変動している状態での寸法測定誤差を継続して求め、その結果から補正式の係数 C_1, C_2, D_1, D_2 を算出した。この係数を用いて補正を行なった結果の一例を図3に示す。

図2、図3の横軸はいずれも経過時間であり、図2は経過時間に対する温度変化、図3はX軸方向におけるゲージA, B, Cの寸法測定誤差と補正量を示している。

図3より、設定温度を20℃から25℃に変化させた時に生じる寸法測定誤差の急変に対応した補正量が得られていることがわかる。その後も測定誤差の緩やかな変動にほぼ対応して補正量も変化している。各ゲージの補正後の誤差標準偏差は、ゲージA, B, Cについてそれぞれ $0.3\mu\text{m}$, $0.4\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$ であった。このことから、各ゲージとも高い精度での補正が可能であると判断できる。

図4は、ゲージの熱容量と測定結果から得られた係数 C_1, C_2, D_1, D_2 の関係を示したものである。係数 C_1 と D_1 および C_2 と D_2 はそれぞれ同程度の値を取り、 C_1, D_1 は熱容量の違いによらずほぼ一定の値となった。また、 C_2, D_2 は熱容量に比例して大きくなる傾向がある。この係数は温度環境の変化のさせ方を変えても変わることがなかった。Y軸方向の測定結果についても、同様の結果が得られた。

Fig.2 Changes of Room Temperature

Fig.3 X-axis Positioning Error and Corrected Result

Fig.4 Coefficients of Correction versus Gauge Type

6. 結言

環境温度変動時のスケールと被測定物の伸縮の時間遅れを考慮に入れた補正方法について検討した結果、この方法が三次元測定機の環境温度変動時の精度の安定化に効果的であることがわかった。補正係数の値は、X, Y各軸においてそれぞれ、温度変化の様子によらずほぼ一定の値を取り、係数 C_1, D_1 は被測定物の熱容量によらず一定であり、 C_2, D_2 は熱容量に比例していることがわかった。

さらに多くの測定例について検証する必要があるが、スケールと被測定物の伸縮の時間遅れを考慮に入れた本補正方法によれば、様々な温度環境下で安定した測定を行なうことが可能になると考えられる。

参考文献

- (1) 大矢、三次元測定機の精度に及ぼす温度環境の影響、日本機械学会論文集 C 編、65-631, (1999), 1247
- (2) 大矢 他 2 名、三次元座標測定機の精度向上に関する基礎的研究、日本機械学会論文集 C 編、511-471, (1985), 2851