

## 要旨

長尺試料を対象とした多点法にとって、センサ相互間のゼロ点の不一致（ゼロ点誤差）が重要で、特にナノメートルの分解能が問題になる領域ではその校正の精度と結果の安定性が真直形状測定結果の不確かさを左右する。本報告では種々のゼロ点校正法と校正結果の適用による長尺真直形状の確からしさをセンサのドリフトを考慮して理論的に評価した。

## 1. 研究の背景と目的

大型の工作機械において、その移動軌跡と長尺加工物の真直形状の高精度評価が必要になっている。重力によるたわみの影響で反転法が使えない方向の真直形状に対しては多点法が不可欠になり、その高精度の活用法が求められている。変位センサを3個使う3点法を長尺加工物に適用するとき、そのゼロ点誤差（中央の変位センサのゼロ点が両側のセンサのゼロ点を結ぶ線からずれる量）が結果の不確かさにとって最大の要因になることが筆者らの経験でも明らかになっている。本報告では、このゼロ点誤差を補正する種々の方法の特徴を整理して、多点法が到達できる精度限界について検討した結果を述べる。

## 2. ゼロ点の校正法

3点法のゼロ点校正法として、①改良型反転法基準法、②幅形状基準法、③3円板法、④両端傾斜角拘束法を取り上げる。校正法①は改良型反転法における非反転側直定規の形状を3点法による形状と比較する方法<sup>1)</sup>であり、校正法②は幅を構成する2直線を3点法で測定しゼロ点誤差（あるいはそれによる放物線誤差）を2倍に拡大検出する方法<sup>2),3)</sup>である。校正法③は、一種の幅基準であるが、専用の校正用治具として直径差が既知の3つの円板を固定した回転軸を用いる方法である。図1はこの原理を示す。ちょうど180度反転した位置で円板とセンサの間隔を測定する。ここで、中央の円板の中心が $\Delta R$ だけ偏心して回転軸に取り付けられているものとする。 $\theta = 0$ の場合、3点法の出力 $m(0)$ と、 $\theta = \pi$ の場合の出力 $m(\pi)$ は、

$$m(0) = m_A(0) - 2m_B(0) + m_C(0) = \Delta R + P_0$$

$$m(\pi) = m_A(\pi) - 2m_B(\pi) + m_C(\pi) = -\Delta R + P_0$$

となり、 $P_0$ が両者の平均値から次のように求められる。

$$P_0 = \{m(0) + m(\pi)\} / 2$$

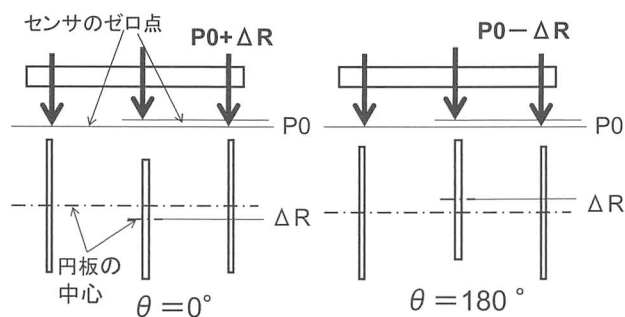


図1. 3円板法によりゼロ点校正の原理

校正法④は隣り合うセンサの差動出力から角度を近似して、次式を得る。

$$\mu_A(x) = \{m_2(x) - m_1(x)\} / d = f'(x) + Ep(x)$$

$$\mu_B(x) = \{m_3(x) - m_2(x)\} / d = f'(x+d) + Ep(x) + \alpha$$

ここで、 $\alpha$ は両角度センサの角度ゼロの軸が平行でないことによるゼロ点誤差を示す。これらから運動誤差を直接求めるには、次のようにセンサAの出力を $d$ だけシフトして

$$\mu_A(x+d) = f'(x+d) + Ep(x+d)$$

差を取ると、

$$Ep(x+d) - Ep(x) = \mu_A(x+d) - \mu_B(x) + \alpha$$

となり、ピッチング誤差形状の差分が得られる。これを逐次 $N$ 点加えていくと次式を得る。

$$Ep(Nd) - Ep(0) = N\alpha + \sum_{k=1}^N \{\mu_A(kd) - \mu_B(kd)\}$$

左辺は走査開始点( $x=0$ )と終了点( $x=Nd$ )でのステージの姿勢の変化であり、これは静止中に水準器等の姿勢検出システムで検出可能である。なお、角度センサを2本用いる角度2点法では、 $\mu_A$ 、 $\mu_B$ を直接出力することになる。

## 3. ゼロ点誤差校正結果の不確かさの比較

ゼロ点誤差による測定結果の不確かさは、ゼロ点誤差の

校正の不確かさ  $\sigma_c$  と、測定中のゼロ点ドリフトに起因する不確かさ  $\sigma_m$  を考えなければならない。また、 $\sigma_c$  にも校正法独自の要因  $\sigma_e$  と校正の所要時間に依存する  $\sigma_{cd}$  を考慮する。また、水平面を走査測定するためにプローブを 90 度回転するときの不確かさ  $\sigma_{90}$  を考慮すると、次式で表される。

$$\sigma^2 = \sigma_c^2 + \sigma_m^2$$

$$\sigma_c^2 = \sigma_e^2 + \sigma_{cd}^2 + \sigma_{90}^2$$

### 3. 1 基準の不確かさ

①の改良型反転法の不確かさ  $\sigma_e$  の要因は反転する側の補助試料の変形である。反転用補助試料は形状変化の少ない形状（例えば板の端面）と保持方法（例えばころの支持）を採用すればこの要因は十分小さくできる。

②の幅形状基準法での  $\sigma_e$  はプローブの反転による変化で、 $\sigma_{90}$  より小さいと考えられる。なお、これらの校正法では校正結果を繰り返し用いるため円板に記憶させるものとする。そのため、記録、読み出しに伴う不確かさ  $\sigma_{wr}$  が測定の際に加わる。長尺の試料を慎重に反転する改良型の場合に比べ、プローブの反転に要する時間は短くできる。

③の 3 円板法では、治具の有する不確かさ  $\sigma_e$  は十分小さいとみなせる。校正の所要時間は上記 2 例に比べて 1/10 以下に短縮される。水平面内での基準と鉛直面内での基準が計算で補正されるとしてその不確かさは  $\sigma_{wr}$  とともに、 $\sigma_{90}$  に包含される。

④の両端傾斜角拘束法では姿勢検出器の読みの不確かさが  $\sigma_e$  になる。プローブの回転が無いので  $\sigma_{90}$  は省略できる。

### 3. 2 校正結果を利用した測定結果の安定性

筆者らの経験によれば、多点法による真直形状測定をナノメートルレベルのセンサの分解能まで活かして実現しようとする、ゼロ点のドリフトがその校正基準と同様に確からしさを左右する。すなわち、校正結果の確からしさと測定の確からしさには時間的な要素も無視できなくなる。一回の全長走査測定所要時間  $T_L$  とし、各校正法における手順と校正所要時間は次の通りとした。

- ①改良型反転法：校正走査  $T_L$  → 反転作業  $1.0 T_L$  → 校正走査  $T_L$  → 記録、読出  $0.2 T_L$  → 測定  $T_L$
- ②幅形状基準：校正走査  $T_L$  → プローブ反転作業  $2 T_L$  → 校正走査  $T_L$  → 記録、読出  $0.2 T_L$  → 測定  $T_L$
- ③ 3 円板法： 記録、読出  $0.2 T_L$  → 測定  $T_L$   $0.2 T_L$ 、

- ④両端傾斜角拘束法：記録、読出  $0.2 T_L$  → 測定  $T_L$  → 記録、読出  $0.2 T_L$ （両端での静止時間）

シミュレーションに用いたゼロ点ドリフトは、図 2 に示す一般空調での実測値を用い、全長走査測定所要時間  $T_L$  を 3 分とした。測定は、全ての校正法で同じ時刻になるようにした。シミュレーションを行い、各校正法でのゼロ点誤差補正に使用した補正値を求めた結果、校正法①： $-0.084 \mu\text{m}$ 、校正法②： $-0.160 \mu\text{m}$ 、校正法③： $-0.199 \mu\text{m}$ 、校正法④： $-0.223 \mu\text{m}$  となり、図 3 に各校正法のゼロ点誤差補正を行ったシミュレーション結果を示す。

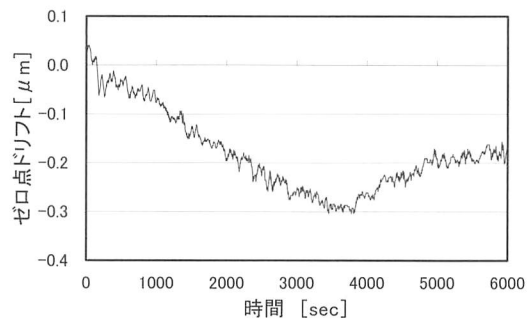


図 2 ゼロ点ドリフトの実測値

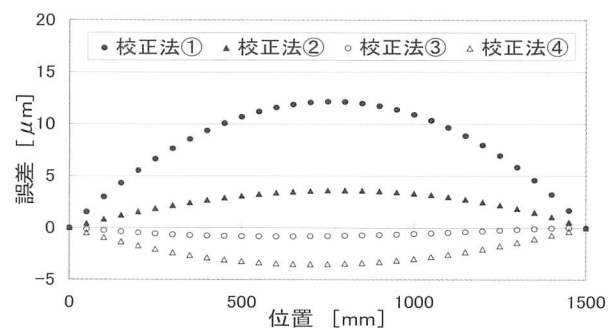


図 3 各校正法のゼロ点誤差補正の比較

## 4. まとめ

多点法によるゼロ点誤差の補正法について、特徴を整理し、ゼロ点ドリフトの実測値を用いて、ゼロ点のドリフトがその校正基準と同様に確からしさを左右することを明らかにした。

### 参考文献

- 1) 小林, 島田, 他：精密, 中国四国支部論文集, 鳥取(2005), 5-6
- 2) 清野：精密, 北海道支部論文集, 札幌(2006), 39-40
- 3) 久米, 他：精密工学会誌, 75-5(2009), 657-662