

逐次三点法による曲面形状測定器の開発
—曲率拡大の試み—

大阪電気通信大学大学院 ○緩目雄大 大阪電気通信大学 宇田 豊, 島田尚一
精密計測研究所 清野 慧 株式会社ナガセインテグレックス 井村諒介

要 旨

逐次三点法には零点誤差が生じるという問題がある。これまでの研究^{[1][2][3][4]}では、測定ヘッドの測定開始点と終了点での角度差を検出し、零点誤差補正を行う補正方法を提案し、光電式オートコリメータを用いて補正方法の有効性を確認した。本報では、光電式オートコリメータの測定範囲を越える曲率の零点誤差補正について検討し、測定範囲 1m 以上での有効性を確認した。

1. はじめに

近年、望遠鏡レンズなどに代表される 1m 台の大型光学素子の曲面形状を 0.1μm 以下の精度での測定が求められている。この要求を満たす一つの方法として、実態基準を用いず、測定装置の運動誤差を分離できる逐次 3 点法が挙げられる^[1]。本研究では前報^{[2][3]}で零点誤差補正方法の有効性を確認できたので曲率を拡大し測定範囲を 1m 以上での有効性を確認する。

2. 逐次三点法の原理, 零点誤差補正方法, 曲面形状測定法

逐次 3 点法は、図 1 に示すように、測定ユニットに変位計 3 本を等間隔 d で配置して、測定を行う。表面形状を g, 走査テーブルの並進運動誤差 e_z, 回転運動誤差 e_θ とすると、各変位計の出力 S₃₀, S_{3F}, S_{3R} は下記の式となる。

$$S_{3C}(x_i) = g(x_i) + e_z(x_i) \quad (1)$$

$$S_{3F}(x_i) = g(x_{i+1}) + e_z(x_i) + de_{\theta}(x_i) \quad (2)$$

$$S_{3R}(x_i) = g(x_{i-1}) + e_z(x_i) - de_{\theta}(x_i) \quad (3)$$

これらの出力の 2 階差を求め、初期値 (x₀ での形状 G₀ と x₁ と x₀ 出の形状差 ΔG₀) を与えれば式(4)のように運動誤差を含まない形状が求まる。

$$f(x_n) = G_0 + n\Delta G_0 + \sum_{i=1}^n (n-i) \{ \Delta S_{3F}(x_i) - \Delta S_{3R}(x_i) \} \quad (4)$$

しかし、3 本の変位計が同一直線上に無い場合、すなわち前方の出力に零点誤差 α があると、変位計出力 S_{3F} は下記の式となり、

$$S_{3F}(x_i) = g(x_{i+1}) + e_z(x_i) + de_{\theta}(x_i) + \alpha \quad (5)$$

算出される形状に次式の零点誤差による影響の 2 次成分が加わる。

$$\text{零点誤差} = \frac{n(n-1)}{2} \alpha$$

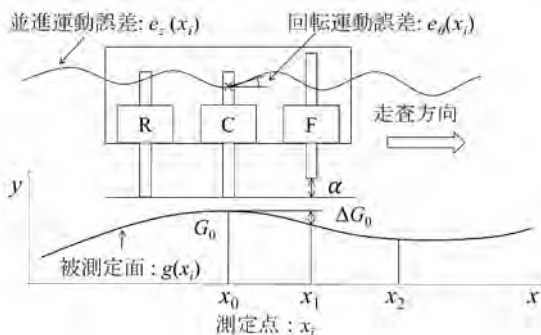


図 1 逐次三点法の原理図

次に零点誤差補正方法について述べる。逐次三点法は形状と運動誤差を分離できる特徴を利用し、測定ユニットの測定開始点と終了点での回転運動誤差の差を算出する。この計算値 dΔe'_θ には零点誤差の影響は含まれる。光電式オートコリメータ等の角度検出器により、零点誤差の影響を受けない回転運動誤差 (実測値 dΔe_θ) は測定可能である。計算値と実測値を比較して零点誤差を求め、再度処理形状から零点誤差の影響を引くことで補正できる。以下に実測値 dΔe_θ, 計算値 dΔe'_θ を示す。また de_θ(x₀), de_θ(x_n) はそれぞれ測定開始点, 終了点の姿勢変化量を示している。

$$d\Delta e_{\theta}(x_n) = de_{\theta}(x_n) - de_{\theta}(x_0) \\ = \{ \Delta S_{3F}(x_n) - \Delta f(x_n) \} - \{ \Delta S_{3F}(x_0) - \Delta f(x_0) \} \quad (6)$$

$$d\Delta e'_{\theta}(x_n) = \{ \Delta S_{3F}(x_n) - \Delta f(x_n) \} \\ - \{ \Delta S_{3F}(x_0) - \Delta f(x_0) \} + (n-1)\alpha \quad (7)$$

これらの差を求めることで式(8)のように α が求まる。

$$\alpha = \frac{\Delta de'_{\theta}(x_n) - \Delta de_{\theta}(x_n)}{n-1} \quad (8)$$

曲面形状に応用する場合、変位計の検出範囲を超えないように、図 2 のように回転と Y 軸方向を調整する。回転方向調整と Y 軸方向調整は、走査テーブルの運動誤差として演算処理され、曲面形状を求めることができる。

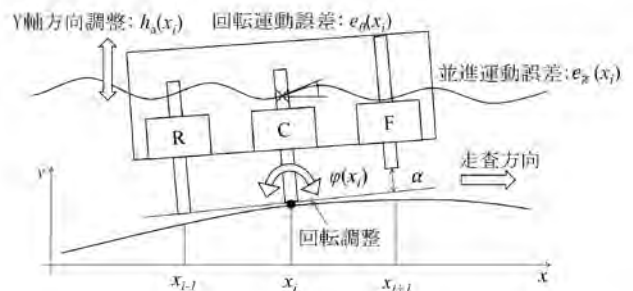


図 2 曲面形状測定図

3. 実験装置

Y 軸方向調整の直動ステージと回転方向調整のゴニオステージを組み込んだ実験装置の構成図を図 3 に示す。零点誤差補正を行うため、図 4 のように測定ヘッドの姿勢変化を検出するため、光電式オートコリメータが設置してある。光電式オートコリメータの測定範囲

円を超える曲率での形状測定は、光電式オートコリメータを角度の基準とし、測定開始点と終了点での測定ヘッドの姿勢変化をゴニオステージの移動量を読み取り、角度差を求める。

測定物は長さ1 m以上のステンレスとガラス板を使用した。測定物の中央を押し出すことで曲面形状を作成している。

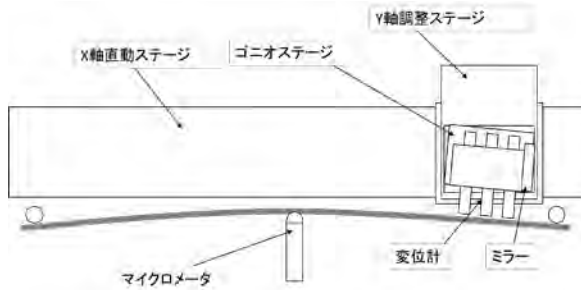


図3 実験装置構成図

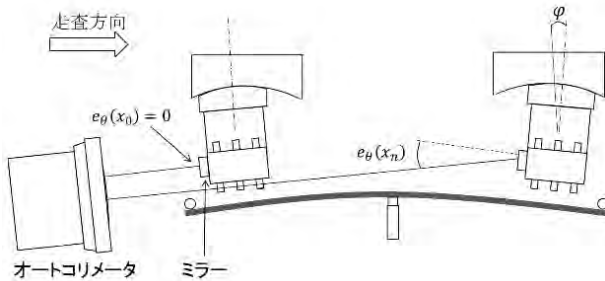


図4 角度検出図

4. 評価方法と結果

変位計間隔は30mmとして、押し出し量約5mmのステンレスと、押し出し量を約3mmのガラス板で測定を行う。測定を複数回行い、得られた結果の平均を基準とし、平均との差を比較することで生じる誤差の再現性を評価する。

ステンレスの零点誤差補正前を図5、補正後を図6に示す。また、ガラス板の零点誤差補正前を図7、補正後を図8に示す。ステンレスの場合、補正前のばらつきは約75.7 μm が、補正することにより約17.1 μm に低減した。ガラス板では、補正前のばらつきは約33.2 μm が、約5.6 μm に補正できた。それぞれ補正前と比較して零点誤差の影響を低減できているが、ステンレス板とガラス板でのばらつきが異なった。この原因として、測定に使用している接触式変位計の接触圧により、測定物の形状変化が、ガラス板に比べ、ステンレス板のほうが大きいためと考えられる。また、前報でガラススケールでのばらつき（測定範囲720mm、光電式オートコリメータだけの零点誤差補正）が0.56 μm に比べ、大きくなった原因として、ゴニオステージの誤差、空気揺らぎが考えられる。

5. 結言

前報で提案した零点誤差補正原理を曲率の拡大とともに測定範囲を1m以上の測定物を試作機によって測定した結果、十分に有効であることが確認できた。今後、空気の揺らぎによる影響を受けない高精度な水準器で測定ヘッドの傾斜角度を測定し零点誤差の補正を行う。

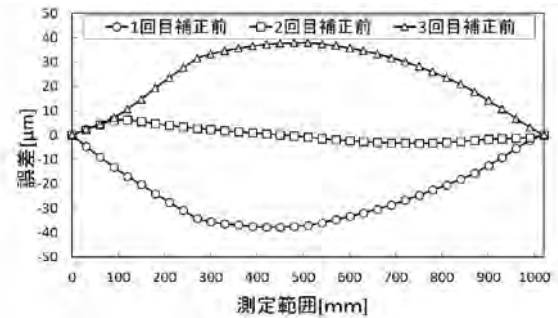


図5 ステンレスでの零点誤差補正前の測定結果

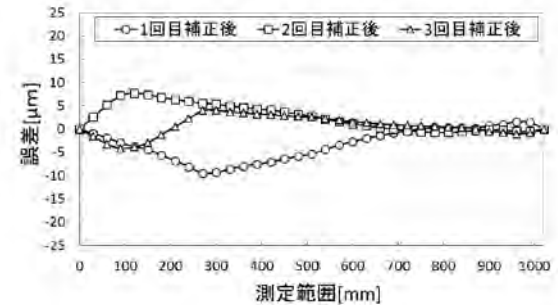


図6 ステンレスでの零点誤差補正後の測定結果

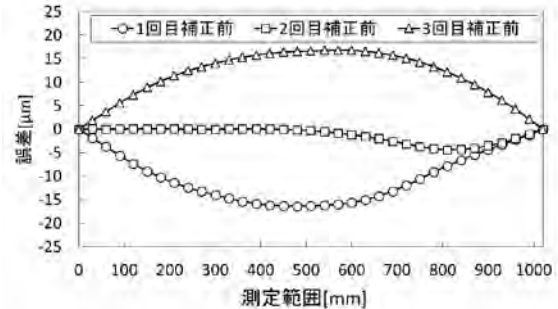


図7 ガラス板での零点誤差補正前の測定結果

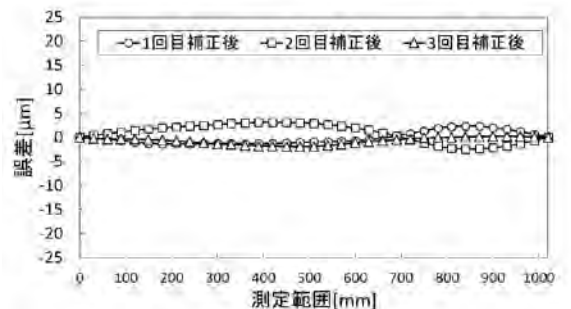


図8 ガラス板での零点誤差補正後の測定結果

参考文献

- [1] 玉川 智之, 他: 逐次3点法による大型光学素子の形状測定機の開発, 2014年度精密工学会秋季大会
- [2] 玉川 智之, 他: 逐次3点法による大型曲面形状測定機の開発 (第1報 零点誤差の補正方法の原理), 2015年度精密工学会北海道支部学術講演会
- [3] 鯨目 雄大, 他: 逐次3点法による曲面形状測定器の開発 (第2報 零点誤差補正方法の実験による確認), 2015年度精密工学会北海道支部学術講演会
- [4] 玉川 智之, 他: 逐次3点法による大型曲面の形状測定法 2016年度精密工学会春季大会