

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）

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

要 旨

天体望遠鏡に用いられる反射鏡に代表される大型光学素子の大型曲面形状を対象とした形状測定機の開発を行っている。その際、逐次3点法だと各変位計の零点が同一直線上に無い場合、測定点数に応じた二次の誤差成分が測定結果に含まれてしまう問題がある。そこで、測定開始点と終了点での測定ヘッドの姿勢変化を利用した零点誤差の補正方法を提案し、シミュレーションによって有効性を確認した。

1. はじめに

近年、望遠鏡レンズなどに代表される1m台にもなる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。しかし、この測定方法は3本の変位計の零点が同一直線上に無い場合、誤差が生じてしまう問題がある。本報告では、測定開始点と終了点での測定ヘッドの姿勢変化を利用した補正方法を提案し、シミュレーションによって有効性の検証を行った。

2. 曲面形状における零点誤差の補正原理

2.1 逐次3点法の原理

逐次3点法は各変位計を等間隔で配置し、その間隔ごとに測定したデータを演算処理することで運動誤差を分離して形状を求める方法である。図1に示すように変位計間隔をd、表面形状をgとし、走査の際に生じる並進運動誤差、回転運動誤差をそれぞれe<sub>z</sub>、e<sub>θ</sub>とする。また、各変位計の零点が同一直線上に無い場合、中央の変位計と前方の変位計との零点の誤差をα<sub>F</sub>、後方の変位計との零点誤差をα<sub>R</sub>とすると、各変位計出力S<sub>3C</sub>、S<sub>3F</sub>、S<sub>3R</sub>は下記の式となる。

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

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

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

前方と中央の出力差をΔS<sub>3F</sub>(x<sub>i</sub>)、中央と後方の出力差をΔS<sub>3R</sub>(x<sub>i</sub>)とし、さらにそれらの差を求めることで運動誤差成分を取り除いた式(4)が求まる。

$$\Delta S_{3F}(x_i) - \Delta S_{3R}(x_i) = \{g(x_{i+1}) - g(x_i)\} - \{g(x_i) - g(x_{i-1})\} + \alpha \quad (4)$$

ただし、α = α<sub>F</sub> + α<sub>R</sub>とおく。各変位計の零点が一致していない場合、この式(4)のように誤差として残る。

図2は零点誤差が測定形状に与える影響を示しており、中央と後方の零点は同一直線上として考えている。零点誤差があれば、この図のように二次の誤差成分となって測定形状に影響する。

測定形状は初期値である測定開始点での形状G<sub>0</sub>と、測定位置x<sub>0</sub>とx<sub>1</sub>での形状差ΔG<sub>0</sub>を与えれば式(5)のように求まる。

$$f(x_i) = G_0 + n\Delta G_0 + \sum_{i=1}^n (n-i) \{ \Delta S_{3F}(x_i) - \Delta S_{3R}(x_i) \} + \frac{n(n-1)}{2} \alpha \quad (5)$$

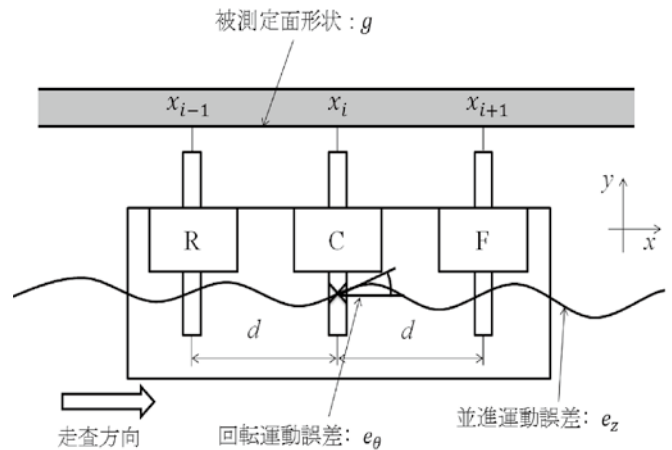


図1 逐次3点法の測定原理図

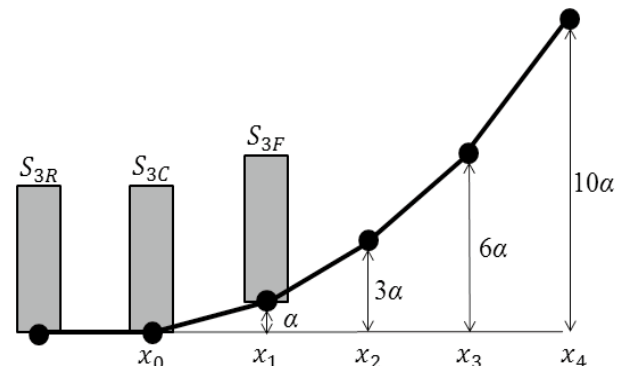


図2 零点誤差が与える影響

2.2 零点誤差の補正原理

逐次3点法は演算処理を行えば、運動誤差成分に関しても求めることができる。式(6)、(7)に示す。

$$e_y(x_i) = S_{3C}(x_i) - g(x_i) = S_{3C}(x_i) - f(x_i) + \frac{n(n-1)}{2} \alpha \quad (6)$$

$$de_{\theta}(x_i) = S_{3F}(x_i) - S_{3C}(x_i) - g(x_{i+1}) + g(x_i) = \Delta S_{3F}(x_i) - \Delta f(x_i) + n\alpha - \alpha_F \quad (7)$$

ここで、中央と後方の零点を同一直線上として考えることで、α<sub>R</sub> = 0となり、α = α<sub>F</sub>となる。従って、式(7)は下記の式となる。

$$de_{\theta}(x_i) = \Delta S_{3F}(x_i) - \Delta f(x_i) + (n-1)\alpha \quad (8)$$

測定形状を補正するためには零点誤差αを求める必要がある。方法として零点誤差が生じた場合、生じていない場

合の測定開始点と終了点における測定ヘッドの回転運動誤差を比較することで求まる。零点誤差が生じた場合の回転運動誤差を $e'_\theta(x_i)$ として、下記に式を示す。

$$\begin{aligned} d\Delta e_\theta(x_n) &= de_\theta(x_n) - de_\theta(x_0) \\ &= \{\Delta S_{3F}(x_n) - \Delta f(x_n)\} \\ &\quad - \{\Delta S_{3F}(x_0) - \Delta f(x_0)\} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d\Delta e'_\theta(x_n) &= de'_\theta(x_n) - de'_\theta(x_0) \\ &= \{\Delta S_{3F}(x_n) - \Delta f(x_n)\} \\ &\quad - \{\Delta S_{3F}(x_0) - \Delta f(x_0)\} + (n-1)\alpha \quad (10) \end{aligned}$$

式(9)、(10)を互いに引くことで零点誤差 $\alpha$ を求める。

$$\alpha = \frac{d\{\Delta e'_\theta(x_n) - \Delta e_\theta(x_n)\}}{n-1} \quad (11)$$

$d\Delta e'_\theta(x_n)$ は実測値での逐次3点法の処理結果となるため既知の値となるが、零点誤差の影響が含まれない $d\Delta e_\theta(x_n)$ については未知数である。しかし、測定ヘッドの回転運動誤差をオートコリメータ等で直接測定すれば求めることができる。従って、式(11)より $\alpha$ が求まり、測定形状 $f(x_i)$ から $n(n-1)\alpha/2$ 引けば本来の形状 $g(x_i)$ に補正することができる。

### 2.3 大型曲面形状への応用

本研究では大型曲面形状に応用するために、図3のように測定ヘッドを調整しながら測定を行う。 $y$ 軸方向の調整量を $h_a$ 、測定ヘッドの調整による回転角度を $\varphi$ とすると、調整量は以下のように出力の式に加わる。

$$S_{3C}(x_i) = g(x_i) + e_y(x_i) + h_a(x_i) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S_{3F}(x_i) &= g(x_{i+1}) + e_y(x_i) + de_\theta(x_i) \\ &\quad + h_a(x_i) + d \sin \varphi(x_i) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{3R}(x_i) &= g(x_{i-1}) + e_y(x_i) - de_\theta(x_i) \\ &\quad + h_a(x_i) - d \sin \varphi(x_i) \quad (14) \end{aligned}$$

しかし、 $e_y$ と $h_a$ 、 $de_\theta$ と $d \sin \varphi$ はそれぞれ同様な $y$ 軸方向成分、回転運動成分であるため、運動誤差成分と同様とみなし取り除いて考えることができる。この原理を利用し、2.2で述べた補正原理を大型曲面形状に応用する。

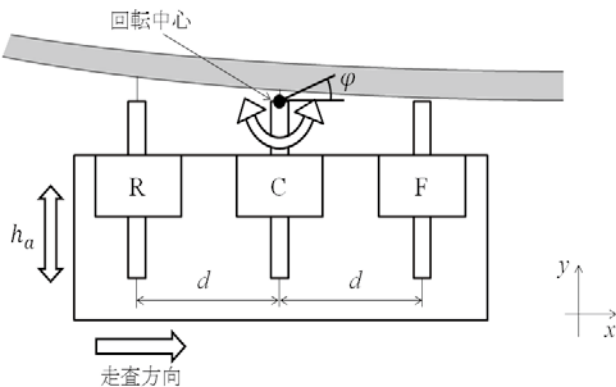


図3 測定ヘッドの調整方法

### 3. シミュレーションでの検証

変位計間隔を50mm、測定長を700mmとしてシミュレーションを行う。設定した理想形状は両端を自由端支持した長さ950mmのたわみ曲線とし、中心を2mmたわませた状態とした。並進運動誤差と回転運動誤差はそれ

ぞれ12μmの振幅と5μmの振幅をもつSin波形状の数値を与え、測定ヘッドの調整は曲線に沿って前方と後方の出力が0になるように $y$ 軸方向に調整、または回転運動させたとして考える。零点誤差 $\alpha$ は1μm生じたものとし、零点誤差補正前後の逐次3点法による処理形状と理想形状とを比較する。

零点誤差が生じた場合、回転運動誤差（回転調整量も含む）に現れる影響は測定点数に応じた一次成分であることが式(8)から分かる。実際にシミュレーションで確認した結果を図4に示す。図5は補正前後の処理形状と理想形状との差を示している。この結果から、零点誤差補正原理の有効性が確認できた。

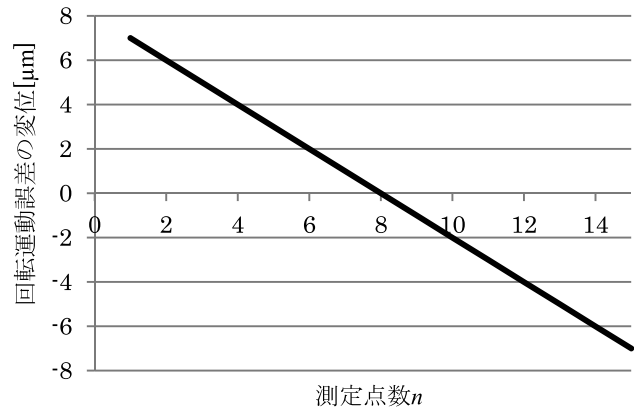


図4 零点誤差による回転運動誤差の変位

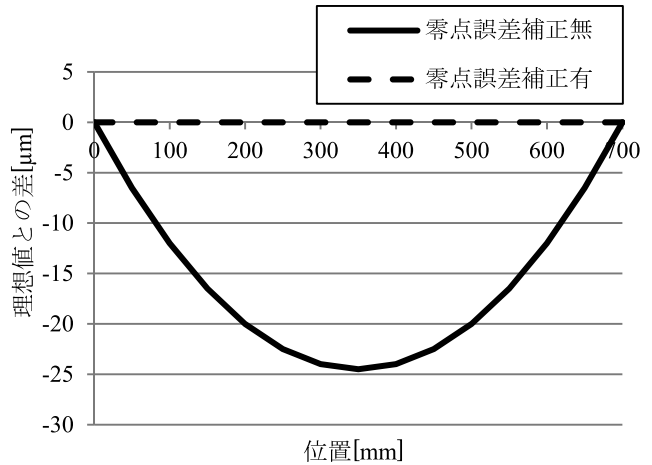


図5 シミュレーションによる補正結果

### 4. まとめ

逐次3点法を応用して大型曲面形状を測定した場合における零点誤差の問題について、補正方法を提案し、シミュレーション結果から有効性を確認した。今後、測定ヘッドの姿勢変化をオートコリメータ等を用いて測定し、実験値を用いた証明を行っていく。

### 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