

# 曲面形状のナノ計測に関する研究

東北大院 ○渡辺 陽司, 荒井 義和, 東北大工 清水 浩貴, 高 偉, 清野 慧

## 要 旨

レンズに入射するコリメートビームの入射位置を変えることで、任意の曲げ角を与えられる。これを利用し、レーザオートコリメーション法を法線角度変化の大きい測定対象に適用できるように拡張する手法を提案する。設計形状より求めた面の法線方向からビームを入射し、形状誤差によって生じるずれ角を高精度に計測し、演算で形状を求める。提案手法による凹面ミラーの形状計測実験を行い、繰り返し誤差 20nm という結果を得た。

## 1. 緒言

球面収差を補正した非球面レンズや、X線顕微鏡、X線望遠鏡に使われるX線ミラー<sup>1) 2)</sup>などに代表される非球面、自由曲面形状はさまざまな分野で利用されており、より高精度な加工、計測が要求されている。これら曲面形状の一般的な要求加工精度は形状誤差 100nm 以下で、形状測定に要求される精度はその 1/10 ぐらいが目安とされる<sup>3)</sup>。

従来の形状計測技術に、比較的平坦な形状をレーザオートコリメーション法を用いて測定するものがあるが<sup>4)</sup>、急角度表面の測定には対応できない。

本研究では、これらの問題に対処するためレーザオートコリメーション法を急角度表面に適応できるよう拡張し、試料面法線角誤差を検出することによって、曲面形状を高精度に測定する手法を提案する。

## 2. 測定原理

### 2-1. 屈折レンズ

図1に示すように焦点距離  $f$  の屈折レンズに1本のコリメートビームをレンズの中心軸から  $w$  だけ離れた位置に入射すると、そのビームは式(1)に示す  $\alpha(w)$  という角度で曲げられる。

$$\alpha(w) = \tan^{-1} \frac{w}{f} \quad (1)$$

ただし、このとき実際にはレンズの収差による焦点距離  $f$  の変化があるので、このビームの曲げ角  $\alpha(w)$  は式(2)のように表せる。

$$\alpha(w) = \tan^{-1} \frac{w}{f(w)} \quad (2)$$

### 2-2. 試料面法線方向誤差測定原理

2-1 節で示したような屈折レンズの性質を利用して、面の法線方向から光を入射するオートコリメーション法を提案する。図2にその概略図を示す。

図2に示すように座標系をとり、位置  $x$  における形状測定を考える。曲面の設計形状から曲面の各点における面の設計法線方向を求め、設計法線角を  $\theta(x)$  とする。曲面の設計形状からのずれ（以下、形状誤差と呼ぶ）を  $g(x)$  と定義する。 $g(x)$  の微分値の  $g'(x)$  は設計法線角からのずれ（以下、法線角誤差と呼ぶ）で、これを測定して次式(3)に示す積分をすることで  $g(x)$  を求める。

$$g(x) = \int g'(x) dx \quad (3)$$

次に、 $g'(x)$  の測定方法について述べる。測定対象面に対してその設計法線方向からビームを当てるように、すなわち、 $\theta(x)$  と  $\alpha(w)$  が次式(4)のように等しくなるような、屈折レンズに入射するビームの位置  $w(x)$  を計算で決める。

$$\theta(x) = \alpha(w) \quad (4)$$

もし測定面に法線角誤差がなければ、反射ビームは入射ビームと同じ光路をたどり戻る。しかし測定面に法線角誤差があれば、反射ビームは入射ビームと異なる光路をたどって戻り、微小角  $\phi(x)$  という角度を持つ。屈折レンズと測定対象面との距離を  $D(x)$  とすると次の関係が求まる。

$$\tan \phi = -\frac{w + D\{\tan(\theta + 2g') - \tan \theta\}}{f(w + D\{\tan(\theta + 2g') - \tan \theta\})} + \tan(\theta + 2g') \quad (5)$$

この式から、 $g'(x)$  を求めるために次の近似を行う。

$$\tan(\theta + 2g') = \tan \theta + (\tan \theta)'(2g') + \frac{1}{2}(\tan \theta)''(2g')^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} f(w + D\{\tan(\theta + 2g') - \tan \theta\}) \\ = f(w) + f'(w)D(\tan \theta)'(2g') \\ + \left\{ f''(w)\tan \theta + \frac{1}{2}f''(w)D(1 + \tan^2 \theta) \right\} D(1 + \tan^2 \theta)(2g')^2 \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)、(7)を式(5)に代入すると、 $g'(x)$  の2次方程式になる。それを解くと、

$$g'(x) = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (8)$$

ここで、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  は以下に示す。

$$\begin{aligned} a = 4(1 + \tan^2 \theta) \left[ \tan \theta - f(w)\tan \theta - f'(w)D(1 + \tan^2 \theta) \right. \\ \left. - D \tan \theta \left\{ f''(w)\tan \theta + \frac{1}{2}f''(w)D(1 + \tan^2 \theta) \right\} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$b = 2(1 + \tan^2 \theta) \left[ \phi f'(w)D - \tan \theta f'(w)D + D - f(w) \right] \quad (10)$$

$$c = \phi f(w) - f(w)\tan \theta + w \quad (11)$$

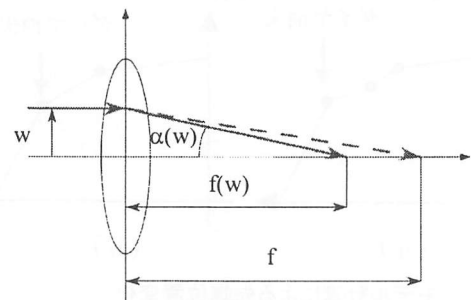


Fig.1 Angle of refraction by a lens

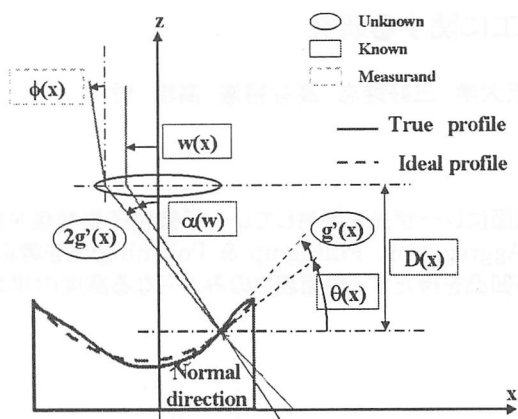


Fig.2 Principle of measurement

また、角度 $\phi(x)$ は、オートコリメーション法を原理とする角度センサで測定する。LD から出た光が微小角 $\phi$ だけ曲げられて受光素子4分割フォトダイオード(Q-PD)に入射するとき、 $\phi$ は式(12)で表わせる。Fはレンズ焦点距離、dはビームスポットの受光素子上の位置である。

$$\phi = \frac{d}{F} \tag{12}$$

3. 測定システム

測定システムを図3に示す。角度センサのLD から出たレーザビームはペンタプリズムによって90° 曲げられ、屈折レンズを通り被測定面に入射する。反射光は屈折レンズ、ペンタプリズムを通り角度センサのQ-PDに入射する。被測定物はXステージで移動させる。測定面に対し法線方向にビームを入射させるとき、ペンタプリズムをXステージで移動させることで屈折レンズ上におけるビームの位置 $w(x)$ を決める。ペンタプリズムはステージのピッチングの影響を受けないという特徴があることから採用した。

4. 実験

今回の測定対象は凹面ミラー（サイズ40mm, 曲率半径300mm）である。測定条件は、測定範囲がミラー有効径の38mm, サンプル間隔は0.475mmとし、サンプル点数は40点である。 $\theta(x)$ は最大で3.63deg.である。屈折レンズの焦点距離 $f(x)$ は $f(0)=60.2\text{mm}$ であり、レンズの設計から求まる収差を考慮して9次の曲線で近似した。また試料測定面と屈折レンズとの距離 $D(x)$ は $D(0)=103.45\text{mm}$ とした。

角度センサは Nikon 製オートコリメータ(分解能0.05arcsec., 精度1.5arcsec.)を用いて校正を行った。角度センサの安定性を図4に示す。1回の測定に相当する8分間の角度の安定性は0.5arcsec.である。

凹面ミラーの形状測定実験結果を図5に示す。図で1st, 2ndがそれぞれ1回目, 2回目の結果を表し, 1st-2ndが2回の測定の差を表す。形状誤差は, PV値で210nmとなり, それらの繰り返し誤差は約20nmである。このときの法線角誤差の測定値は, -20~20arcsec.であった。

5. 結言

曲面形状計測の新しい原理を提案し, 装置を試作した。測定面の最大傾斜角が3.63deg.ある凹面ミラーの形状計測実験を行い, 繰り返し性が20nmであることから本手法の有効性を確認した。ただし, 今回測定対象とした凹面ミラーの実際の形状は不明であるため, 測定された形状誤差の測定精度に関しては確認していない。今後はその測定精度を確認した上で各種の曲面形状測定へ適用を行う。

参考文献

- 1) 鈴木弘, 新野康生, 遠山退三, 平野稔, 難波義治: オンマシン計測による斜入射X線ミラーの超精密研削, 精密工学会誌, 61, 9 (1995) 1285-1289.
- 2) 次世代光テクノロジー集成, オプトロニクス社, 91-98, 284-289.
- 3) 超精密生産技術体系, 第3巻 計測・制御技術, 346-350.
- 4) Shinan Qian, Giovanni Sostero, Peter Z. Takacs: Precision calibration and systematic error reduction in the long trace profiler, Optical Engineering, 39, 1 (2000) 304-310.

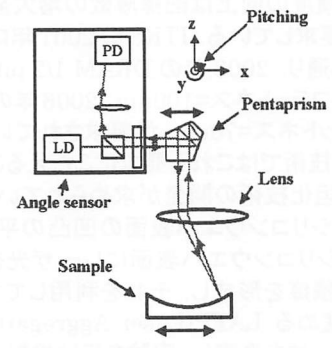


Fig.3 Schematic of the measurement system

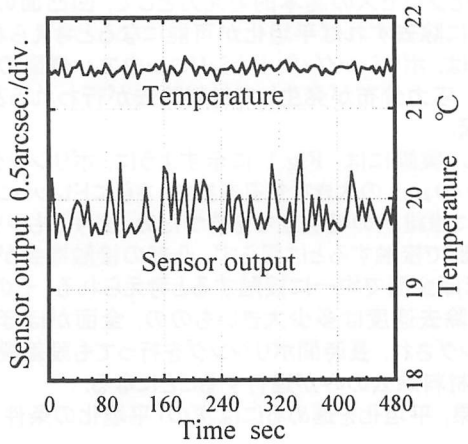


Fig.4 Stability of the angle sensor

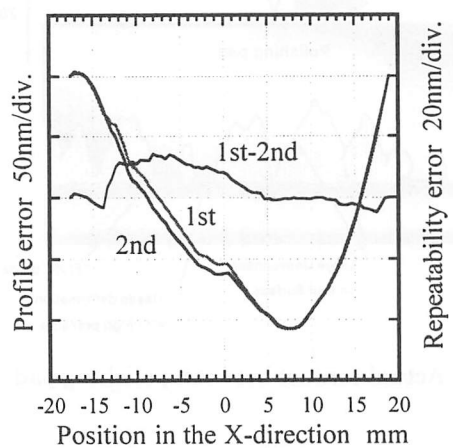


Fig.5 Measurement results