

レーザービーム走査法による光学研磨面の 曲率半径の測定

Measurement of Radius of Curvature of Optieal Surface using Laser Beam Scanning

劉 中 本*・黒 田 和 男**・小 倉 馨 夫**

Zhong Ben LIU, Kazuo KURODA and Iwao OGURA

1. ま え が き

球面レンズや反射鏡の曲率半径の測定は古くから多くの方法が行われている。機械的 spherometer¹⁾ (たとえば Ascania 式と呼ばれるもの) や顕微鏡とベンチ^{2,3)} によるものなどは広く用いられている。また曲率半径の大きい場合にはナイフエッジを用いる Foucault Test,⁴⁾ オートコリメーション法⁵⁾ および干渉法⁶⁾ などが用いられる。

曲率半径の測定上の問題点は凹面の場合についても、大別して開口数の小さな場合の回折の影響と開口数の大きな場合の球面収差の影響の2つとなる。このほか凸面の場合には反射による実像が生じないため多くの光学的測定法が用いられない。

新しく回折の影響も球面収差の影響も受けない光学的曲率半径測定法を提案しその測定結果と精度について述べる。この方法は凸面にもそのまま適用できる。

2. 原 理

この方法は測定される球面の各点における接平面の傾斜角の変化によって反射光の方向が変化することを利用する。各点の反射光の方向を測定すれば、その点における傾きがわかり、傾きの変化から表面の曲率半径が求まる。

測定は図1に示すとおり、入射レーザービームに垂直な面 CE を観測面とし、被測定球面からの反射光が観測面と交わる位置から反射角を求める。

被測定球面上の一点 A を基準点とし、このときの反射光の位置を B とし、入射光と反射光のなす角を θ_0 とする。被測定面を x 方向に移動させたのちの反射光の位置を D とし、入射光となす角を θ とする。反射光の位置の移動量 $BD = \epsilon$ は反射角の変化 $\Delta\theta$ に対応する。BC, AC, AB の長さをそれぞれ a, b, c とすると、 $\Delta\theta$ と ϵ の関係

はつぎのように決まる。

$$\tan \theta_0 = \frac{a}{b} \tag{1}$$

$$\tan \theta = \frac{a+\epsilon}{b} \tag{2}$$

ゆえに

$$\begin{aligned} \tan \Delta\theta &= \tan(\theta - \theta_0) \\ &= \frac{\tan \theta - \tan \theta_0}{1 + \tan \theta \cdot \tan \theta_0} \\ &= \frac{b \cdot \epsilon}{b^2 + a(a + \epsilon)} \end{aligned} \tag{3}$$

を得る。

一方接平面の傾角は反射角の変化 $\Delta\theta$ の半分であるので

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \tan \frac{\Delta\theta}{2} \\ &= \frac{\tan \Delta\theta}{1 + \sqrt{1 + \tan^2 \Delta\theta}} \end{aligned} \tag{4}$$

となる。(3)と(4)式から各点の dy/dx が決まる。

曲率半径の計算は二つの方法で行った。

(1) 曲線の二階微分から曲率半径 R を求める公式

$$R = \frac{1}{y''(1+y'^2)^{3/2}} \tag{5}$$

を使う方法、 y'' は y' のデータを数値微分して求める。

(2) 最小二乗法により測定値に最もよく合う球面を

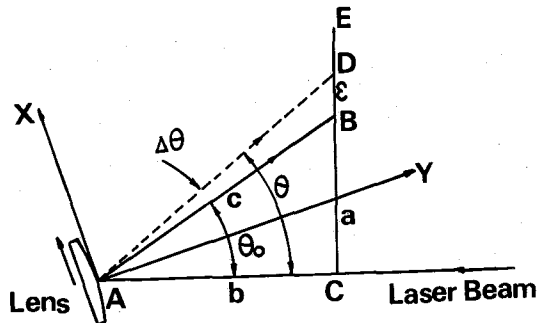


図1 測定原理図

* 西安応用光学研究所 (中国・西安)

** 東京大学生産技術研究所 第1部

研究速報
 求める方法。最適円の中心の座標を (x_0, R) とすると円周上の各点の y 座標は

$$y = R \pm \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2} \quad (6)$$

となる。ただし、複号は凸面に対して上の符号、凹面に対して下の符号を取るものと約束する。(6)式を微分してつぎの式になる。

$$\frac{dy}{dx} = \mp \frac{x - x_0}{\sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}} \quad (7)$$

最小二乗法によって

$$\sum_i \left(\mp \frac{x_i - x_0}{\sqrt{R^2 - (x_i - x_0)^2}} - \left(\frac{dy}{dx} \right)_i \right)^2 = \text{minimum} \quad (8)$$

となる。ここで $(dy/dx)_i$ は測定値である。

(8)式の解 (x_0, R) を求めるために(8)式を R と x_0 に対して微分してそれぞれをゼロとおいてつぎの方程式が得られる。

$$\sum_i \left(\frac{(x_i - x_0)^2}{(R^2 - (x_i - x_0)^2)^2} \pm \frac{(x_i - x_0)y'_i}{(R^2 - (x_i - x_0)^2)^{3/2}} \right) = 0 \quad (9)$$

$$\sum_i \left(\frac{x_i - x_0}{(R^2 - (x_i - x_0)^2)^2} \pm \frac{y'_i}{(R^2 - (x_i - x_0)^2)^{3/2}} \right) = 0 \quad (10)$$

この根 (x_0, R) を Newton-Raphson 法で数値的に求めた。

3. 測定装置

測定系の配置は図2のとおりである。1mWのHe-Neレーザー(1)からのレーザー光で被測定面(2)を照射する。被測定面からの反射光の位置を位置検出装置で測定する。位置検出装置は位置検出素子(4)、ステージ(5)とインジケーターからなる。被測定物をステージ(3)にのせ、被測定面および反射光点の移動量はステージ(3)と(5)のmicrometerで読む。

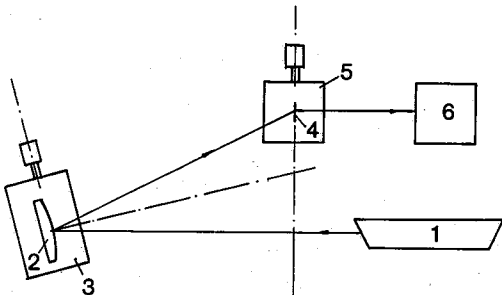


図2 測定装置の概略

4. 精度検討と測定例

曲率半径の測定精度は初期値 b と a の長さの測定精度、反射光点の移動量 ϵ の測定精度、被測定レンズの移動量 x の測定精度などによって決まる。 R が長い(たとえば $R \geq 1$ m) と $b \geq 10a$ の場合に y' の測定精度は(4)式を微分し、近似的に次の式で決まる。

$$\frac{\Delta y'}{y'} \approx \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} + \frac{2a^2}{b^2} \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} \quad (11)$$

したがって a の誤差の影響は少ない。 b の測定精度の要求はきびしい。一番きびしく要求されるのは ϵ である。 y' のデータから曲率半径を求めるときに x の測定精度がきいてくる。

たとえば曲率半径 $R=1$ m の場合に R の測定の相対誤差を0.5%以下にするためには、 a の測定誤差は1 mm, c の測定誤差は0.5 mm, ϵ と x の測定誤差は0.005 mm 以下でなければならない。そのためにステージは、移動精度が0.001 mm のものを用いた。

ϵ の誤差はステージの移動誤差とレーザーパターンの中心位置の決定誤差によって決まる。レーザー光は理想的な光線ではなく、また反射されたビームパターンがすこし変形するので中心位置の決定誤差がいまの段階でステージの移動誤差より大きい。この誤差が本測定装置の精度を決める最も重要な因子となっている。

なお、図3のように入射Beamの方向と y 軸は平行しないので入射点はAからBにずれて x の誤差 Δx を生成する。しかしたとえば $\theta_0 \leq 4^\circ$, R は ≥ 1 m とすれば移動量 x が10 mm 以下であると、 $\Delta x < 0.002$ mm となりこの誤差は無視できる。

凹凸球面に対する測定例を以下に示す。測定の再現性は $\pm 0.25\%$ であった。

凹面の例に対し

$$(5) \text{式を利用して} \quad R = (1007.1 \pm 3) \text{mm.}$$

$$\text{最小二乗法で} \quad R = (1006.4 \pm 3) \text{mm.}$$

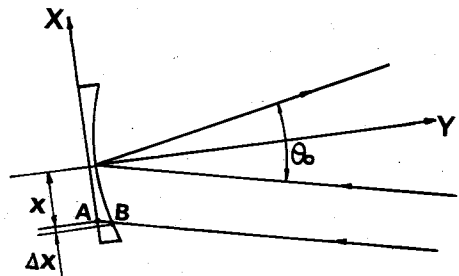


図3 入射ビームの方向と y 軸が平行でないことによって生じる x の誤差

凸面の例に対し

$$(5) \text{式を利用して} \quad R = -(1553.8 \pm 5) \text{mm.}$$

$$\text{最小二乗法で} \quad R = -(1554.2 \pm 5) \text{mm.}$$

5. 結 論

この新しい測定法によって実験の結果

$$\text{凹面の例に対し} \quad R = (1006.4 \pm 3) \text{mm.}$$

$$\text{凸面の例に対し} \quad R = -(1554.2 \pm 5) \text{mm.}$$

を得た。

本方法は一見煩雑な数値計算を必要とするものごとくであるが測定を自動化し簡単なマイコンと連動するとき効率の良い測定法となるであろう。またこの方法は容易に非球面の計測法としても拡張可能である。

またさきに述べたように原理的に回折の影響、球面収差の影響を受けないのでレンズの横送り機構、レーザービームの振れ角の測定法の精度を向上すれば、さらに曲率半径の測定精度は向上することが予想される。現段階

ではパターンを中心位置の決定誤差が最大である。しかし、CCDなどを用いるとこの誤差を 1μ 以下にまでおさえることが可能である。⁷⁾したがって最終的には被測定物を横に送る機構、特にそのベッドの精度に依存するところが少なくないであろう。(1984年1月12日受理)

参 考 文 献

- 1) R. H. Noble: in *Optical Shop Testing*, ed. D. Malacara (Wiley, New York, 1978) p. 460
- 2) R. H. Noble: *ibid.* p. 462
- 3) A. S. De Vany: *Master Optical Techniques* (Wiley, New York, 1981) p. 352
- 4) A. S. De Vany: *ibid.* p. 360
- 5) コールラウシュ: 実験物理学 第3巻 光学(商工出版, 東京, 1956) p. 26
- 6) J. H. Bruning: in *Optical Shop Testing*, ed. D. Malacara (Wiley, New York, 1978) p. 428
- 7) K. Suzuki, I. Ogura, T. Ose: *Appl. Opt.* 18 (1979) 3866

