



非球面レンズの偏心測定

多田 武・森田 展弘・坂木 泰三

(株)リコー生産技術研究所 〒243-02 厚木市下荻野 1005

(1994年3月10日受付, 1994年9月1日受理)

Decenter Measurement for Aspherical Lenses

Takeshi TADA, Nobuhiro MORITA and Taizo SAKAKI

Manufacturing Technology R & D Center, Ricoh Co., Ltd.,
1005, Shimoogino, Atsugi 243-02

(Received March 10, 1994; Accepted September 1, 1994)

A decenter angle measurement system for the aspherical lens is described. An aspherical lens with an aspherical surface on one side and aspherical surface on the other side is attached to a rotational spindle. The optical axis of lens can be coaxially aligned with the rotational axis by using an autocollimator and an adjustment fixture. The decenter angle is defined as a tilted angle to the optical axis. This is calculated from displacement caused by rotation of lens on a point of aspherical lens surface. Mechanical errors by deflection of the spindle and optical errors by adjustment of the optical axis result in measurement errors. We investigated the correction method of these errors. Using this method, measurement accuracy of 2 seconds was obtained.

1. はじめに

近年、光学機器の高性能化やコンパクト化の要求により、光学系に非球面レンズが採用されることが多くなっている。カメラなどの光学系では非球面レンズを採用することで大幅にレンズ枚数を減らすことができ、明るい光学系を設計することが可能となる。

非球面レンズの実用化に対しては設計技術、加工技術、測定技術が不可欠であり、特にガラスモールドなどの加工技術¹⁻³⁾とそれを評価する測定技術が重要な役割をはたしている。

非球面レンズの代表的な測定としては形状^{2,4)}と偏心の二つがある。球面レンズの偏心測定には古くから反射像を測定する方法や回転法⁵⁾など、多くの測定法が知られている。しかし、非球面レンズに関しては参照球面が構成する軸と非球面が構成する軸とが必ずしも一致しないため、基準軸と非球面軸とのずれを測定する必要があり、従来の測定法が適用できないという問題がある。そのため、非球面レンズの偏心測定法として、断面走査

式²⁾と回転測定式⁶⁾の例が提案されている。

断面走査式は非球面の断面方向を接触式のスタイラスで走査し、基準面からの非球面軸の傾きを偏心として測定する方法である。しかし、この方法は測定時間が長いという問題がある。回転測定式として提案されているものはレンズを回転させながらレンズ面の法線方向変位を非接触変位計で測定し、その変位から非球面軸の傾き(偏心)を計算する方法である。この方式は変位計を位置決めする際に測定するレンズ面の法線方向、すなわちレンズ面の曲率中心を求める必要があり、位置決めが複雑になるという欠点がある。このため、本報告ではレンズ面の法線方向を意識する必要のない光軸方向変位を測定し、その変位から偏心を測定する方式を採用した。そして、機械的、光学的原因によって生じる誤差を補正する方法を検討し、精度の高い機器を使用しなくても短時間で高精度の偏心測定を行う方法を開発したので報告する。

2. 測定原理

2.1 偏心の考え方

非球面レンズの偏心としては両面の平均的な光軸を基準として非球面軸（非球面の頂点と参照球面の曲率中心を結んだ軸）の傾きを偏心と定義する考え方が以前から報告されている。そこでわれわれは片面非球面レンズの偏心を Fig. 1 のように考えた。光軸は非球面の参照球面曲率中心 P_2 と球面の曲率中心 P_1 とを結ぶ軸 $\overline{P_1P_2}$ となる。偏心が存在すると光軸 $\overline{P_1P_2}$ と非球面軸 $\overline{P_2R}$ とには角度 θ_R が生じる。この角度 θ_R を非球面の偏心として考えた。

2.2 測定原理

非球面レンズの球面側を回転軸に装着すると球面の曲率中心は必ず回転軸上に一致する。この状態でレンズの位置を調整し、非球面の参照球面曲率中心を回転軸に一致させる。これによって回転軸と光軸は一致する。

この時、Fig. 2 のような座標系において、非球面形状は

$$x = f(y) = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + \sum_{i=1}^N E_i y^{2i} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 c は参照球面の曲率であり、 k は円錐定数、 E_i は高次の係数である。

偏心が存在しない状態で非球面上のある点 y_0 の位置

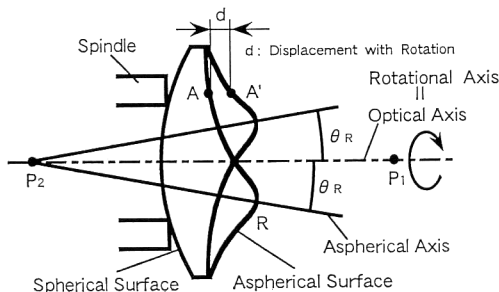


Fig. 1 Definition of aspherical lens.

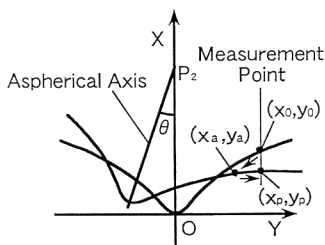


Fig. 2 Displacement caused by rotation of aspherical surface.

を測定点とする。一方、偏心が存在する状態は参照球面の曲率中心 P_2 を中心として非球面軸が θ 傾いた状態と考えられるので、傾いたときの座標 (x_a, y_a) は

$$\begin{bmatrix} x_a - R \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - R \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。ただし、 R は参照球面の曲率半径である。非球面が傾くことによって生じる光軸方向変位 (X 軸方向変位) は測定点が y_0 の位置での変位に相当する。すなわち、 x_p の座標を求める必要がある。ところが形状が非球面であるために解析的にこの値を求めることは難しい。そこで、初期値を $x = x_0, y = y_0$ として、 x, y の値を微小に変化させていきながら (2) 式によって、 $y_a = y_0$ となるような、 x の値を求めていく。

このようにして求められた座標が (x_p, y_p) となり、非球面軸が $+\theta$ 傾いていた時に観測される変位量 $\delta(\theta)$ は $|x_0 - x_p|$ となる。したがって、レンズを回転軸を中心に 1 回転させたときに生じる光軸方向変位 d は

$$d = \delta(\theta) + \delta(-\theta) \quad (3)$$

となる。光軸方向変位は測定位置によって変わるのでレンズ径に対して一定の割合の位置に測定位置を設定する。この時、偏心量が小さい領域では光軸方向変位と偏心量の関係は直線的な変化を示す。実際に二つのレンズにおいて偏心量に対する光軸方向変位をシミュレーションした結果を Fig. 3 に示す。この直線は非球面の形状によって固有の値を持ち、その傾きは偏心量に対して測定される光軸方向変位を示す。この直線の傾きを光軸方向変位から偏心量を換算する換算係数 β とする。この値が大きい方が偏心の測定感度が高いことを示す。この係数を用いると変位置と偏心量の関係は

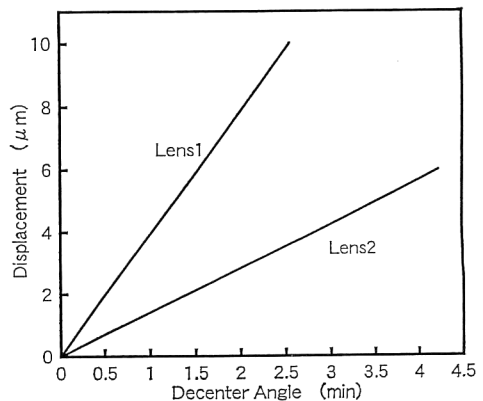


Fig. 3 Decenter angle versus displacement at the fixed measurement point for diameter of lens.

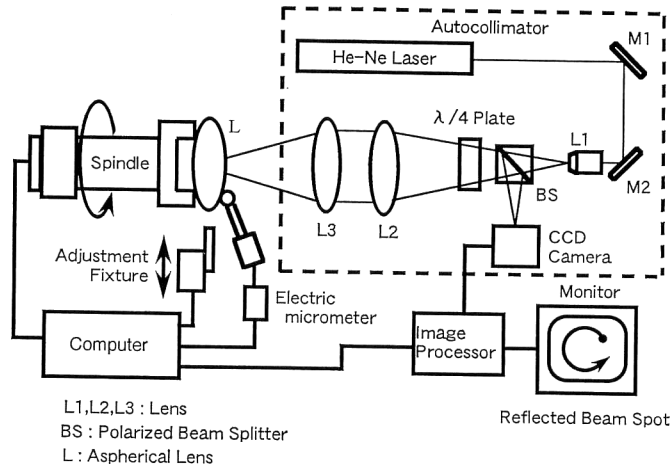


Fig. 4 Schematic of measurement system.

$$\theta_R = d/\beta \quad (4)$$

と表すことができる。

3. 偏心の測定方法

今回開発した実験装置の概略図を Fig. 4 に示す。実験装置は被検レンズの保持部、回転用スピンドルと変位計、レンズ位置調整用の調心機構、レンズの光軸傾測用オートコリメーターおよび画像処理装置とそれらを制御する演算処理装置とから構成されている。

スピンドルとしてはレンズの心取り機用スピンドルを用いており、この先端にレンズ吸着部がついている。レンズ吸着部はスピンドルに吸着部をセットした状態で回転加工し、吸着部とスピンドルの同心精度を上げていく。被検レンズは球面側をスピンドルに吸着され、レンズの変位測定には電気マイクロメーターを使用している。被検レンズの非球面側にはオートコリメーターを配置している。

光源の He-Ne レーザーから出射した光束はミラー 1、ミラー 2 を反射してレンズ L1 にて拡大されて、レンズ L2 を通過することで平行光となる。レンズ L3 を通過した光束は収束光となって、被検レンズ L の非球面側に照射される。非球面の参照球面曲率半径に等しい光束が入射すると元と同じ光路を通して偏光ビームスプリッターに戻り、反射されて CCD カメラ上に結像する。結像された反射スポットはモニターに表示されると共に画像処理装置によって座標位置が検出される。

被検レンズを単に装着した状態ではスピンドルの回転軸と被検レンズの光軸はずれている。そこで、反射スポットの方向を検出して、その情報を演算処理装置に送

り調心機構でレンズの外周面を押すことによって、レンズの位置調整（光学調心）が行われる。反射スポットが回転しない状態となればスピンドルの回転軸と光軸が一致した状態となり、測定可能となる。この状態でレンズを回転させ、変位計でレンズの光軸方向変位を測定する。

得られた i 番目の変位データを $D(i)$ 、レンズの回転角を m_i 、サンプリング数を n とすると、調和解析手法により、サイン成分 S とコサイン成分 C は

$$S = 2/n \sum_{i=1}^n D(i) \sin m_i \quad (5)$$

$$C = 2/n \sum_{i=1}^n D(i) \cos m_i \quad (6)$$

となり、最大変位量 d および位相 ϕ は

$$d = 2\sqrt{S^2 + C^2} \quad (7)$$

$$\phi = \tan^{-1}(S/C) \quad (8)$$

として求められる。この方法を用いることで最大変位量 d を求めることができる。この d から偏心量 θ_R は (4) 式を用いて計算される。また (8) 式より、その位相が計算される。この位相 ϕ はレンズの測定開始位置を基準としたときの偏心方向を示している。

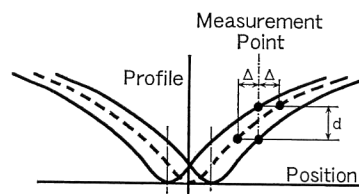


Fig. 5 Relations of displacement d and shift Δ .

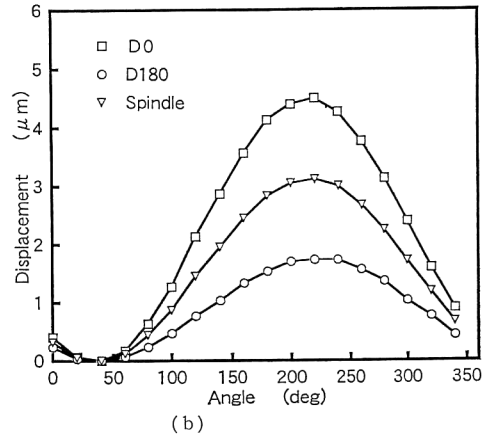
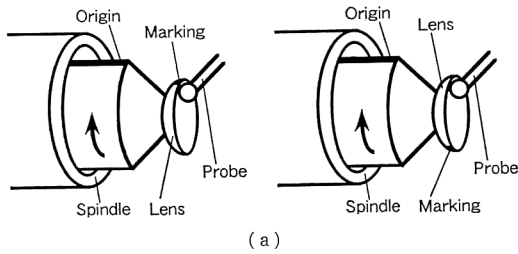


Fig. 6 (a) Measurement of deflection of spindle. (b) Displacement caused by deflection of spindle.

今, Fig. 5 のように中心軸に対して対称な偏心のない非球面(波線)を考える。偏心が数分のオーダーであればシフトと傾きはほとんど差はないので偏心をシフトが生じていると考え(実線)それによって生じる最大変位量は d となる。この時, 最大変位量 d は偏心のない非球面上で測定位置が $\pm d$ 移動する変位に等しい。偏心量が微小な場合, 測定位置が $2d$ だけ移動するときの形状変化はほぼ直線的に変化し, レンズ1回転に対し1周期の波形を持つ。このことから, レンズの回転によって測定される光軸方向変位はレンズ1回転を周期とする \sin 波に近似できる。本方式ではレンズ1回転を周期とする成分を偏心成分として抽出する。したがって, 2π を周期とするコマ, デフォーカス, 球面収差の成分は形状誤差として残るが, π を周期とするアスの成分は取り除くことができる。従来よりレンズの評価として偏心, アス, 曲率半径の三つが重要とされており, このような手法でアスのような非対称成分の形状誤差を除去できることは有益である。

4. 測定誤差要因と補正

実際の測定においては測定される変位データには偏心成分のほかに機械的, 光学的原因による誤差が加算されて測定誤差を生じる。測定誤差の大きな要因としては, 1)スピンドルの軸ふれの影響, 2)光学調心誤差の影響が挙げられる。そこで測定精度を向上させるためにこれらの誤差要因を補正することが必要となる。以下にその具体的な方法を述べる。

4.1 スピンドル軸ふれ成分の補正

回転スピンドルの機械的な軸ふれは測定すべき偏心成分に加算されて測定され, 測定誤差の要因となる。ところが, スピンドルの軸ふれには回転位置による再現性が

あり⁷⁾, そのことが実験的にも確認された。そこで, スピンドルの成分を予め測定し, これを補正データとして演算処理装置内にメモリーし, 測定ごとにこのデータを差し引くことで軸ふれの補正が可能となる。

Fig. 6(a)にスピンドルの軸ふれを測定する方法を示す。レンズの外周にマークを入れ, 光学調心後, スピンドルの原点とレンズのマーク位置を一致させた状態(D0°)とレンズのみを180°回転した状態(D180°)の2通りについて, それぞれ1回転分のデータをとると,

$$D0^\circ(i) = h_i \sin \zeta_i + S_i \sin \psi_i \quad (9)$$

$$D180^\circ(i) = -h_i \sin \zeta_i + S_i \sin \psi_i \quad (10)$$

となる。ここで, h_i は偏心成分の振幅, ζ_i はその回転角, S_i はスピンドル成分の振幅, ψ_i はその回転角である。

スピンドルの軸ふれ成分は(9), (10)式より

$$S_p(i) = (D0^\circ(i) + D180^\circ(i))/2 \quad (11)$$

と表される。これらの成分を Fig. 6(b)に示す。

4.2 光学調心誤差の補正

レンズをセットした後オートコリメーターの反射スポットを観測して光学調心を行う。この調整が精密に行われないとスピンドルの回転軸とレンズの光軸にずれが生じ, Fig. 7(a)に示されるように変位成分が大きく観測される。しかし, 反射スポットを完全に静止させるためには微妙な調整が必要となり, 調整にも時間がかかる。そこで, 反射スポットのずれを測定し, それに相当する光軸方向変位 D_A を計算して補正量を求める。さらに光軸方向変位からこの補正量を差し引くことで光学調心誤差を補正する。Fig. 7(b)に示されるように光学調心誤差が存在する状態ではレンズは球面側の曲率中心を中心として回転した状態となり光軸と回転軸の間に角度 ε を持つ。この状態でレンズを回転させると変位計には

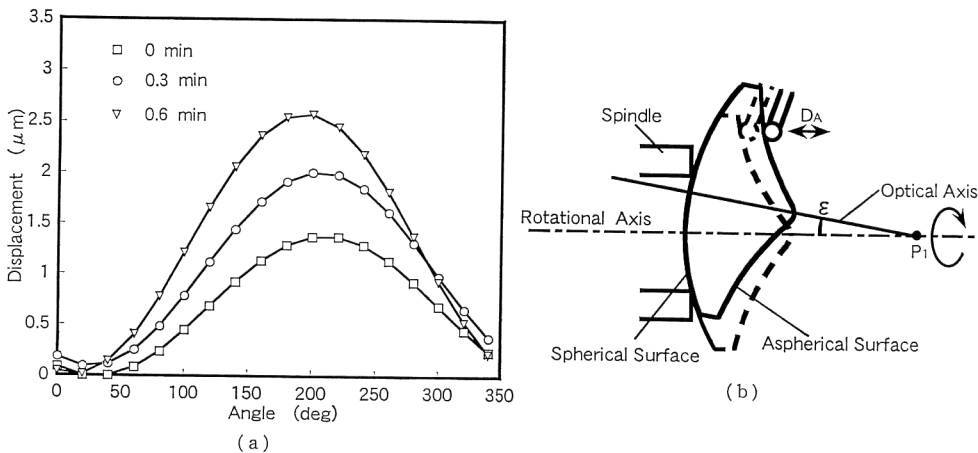


Fig. 7 (a) Relations of displacement and error by adjustment of optical axis. (b) Displacement D_A and angle ϵ caused by adjustment of the optical axis.

角度 ϵ に対応した光軸方向変位 D_A が観測される。そこで、角度 ϵ から光軸方向変位 D_A を推定する方法を試みた。角度 ϵ が数分の微小な範囲では D_A と ϵ の間にはほぼ直線的な関係がある。この角度 ϵ から変位 D_A を換算する係数を α と定義する。この α はレンズの形状、変位の測定位置から幾何学的に計算することができる。一方、角度 ϵ は実際には Fig. 4 の CCD カメラ上で観測される反射スポットの回転半径から計算される。そこで、反射スポットの回転半径から角度 ϵ を推定する係数を求める。これも角度 ϵ が微小な範囲では反射スポットの回転半径と角度 ϵ の間には直線的な関係があり、反射スポットの回転半径 s から角度 ϵ を換算する係数を考えることができる。これを B とする。以上のような α および B を用いると反射スポットの回転半径 s からそのときに生じる光軸方向変位を計算することができる。

$$D_A(i) = \alpha B s \cos(m_i + \eta) \quad (12)$$

ここで、 s は反射スポットの回転半径、 η は反射スポットずれ方向、 m_i はレンズの回転角である。このような補正量を計算することで光軸合わせを精密に行うことなく光学調心誤差を補正することが可能となる。

4.3 測定データの補正

スピンドルの軸ふれ成分の補正、光学調心誤差の補正を取り入れることにより、測定データの補正は

$$D(i) = D_m(i) - S_f(i) - D_A(i) \quad (13)$$

となる。ここで、 $D(i)$ は最終的に得られる補正後のデータであり、 $D_m(i)$ は実測データ、 $S_f(i)$ はスピンドル軸ふれ補正データ、 $D_A(i)$ は光学調心誤差の補正データである。

5. 測定結果

直径 12 mm、非球面量 0.12 mm のレンズを用いて、偏心測定を行った。光学調心を精密に行い、10 回の繰り返し測定を行った平均値を基準値としたとき、光学調心誤差と計算された偏心量との関係を Fig. 8 に示す。スピンドルの軸ふれは補正されているので、この図は光学調心誤差の補正効果のみを示している。実測値（補正のない場合）の変化から光学調心の精度は結果に非常に大きな影響を与えることがわかる。一方、補正を行った場合は光学調心誤差が 1 分以内の範囲では基準値に非常に近い値が得られる。しかしながら、光学調心誤差が 1 分を越えると補正効果が十分に得られない。これは使用している光学部品の収差による影響や Fig. 4 における非球面レンズからの反射光の方向がレンズの非球面部の影

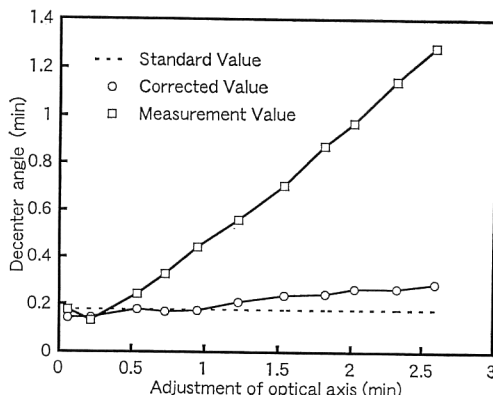


Fig. 8 Effect of correction method for adjustment of the optical axis.

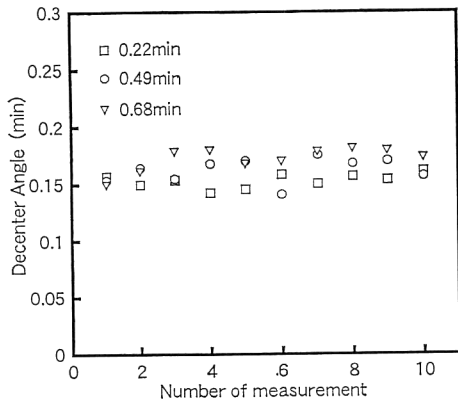


Fig. 9 Result of measurement accuracy using correction method of errors.

響を受けることなどが原因として考えられる。光学調心に要する時間と補正効果から考えて、光学調心誤差は1分以内まで合わせる必要がある。

光学調心誤差を3水準で10回の繰り返し測定を行った結果をFig. 9に示す。光学調心誤差が1分以下の場合には測定値は安定しており、測定精度として標準偏差(3 σ)で2秒に抑えられることが確認された。

6. ま と め

非球面レンズにおいて光軸に対する非球面軸の傾きを偏心と考え、レンズを回転させて光軸方向変位から偏心を求める実験システムを開発した。

測定精度向上、測定時間の短縮のため、補正法として以下の二つの方法を取り入れた。

- 1) スピンドルの軸ふれ補正を行い、機械的な誤差成分を除去した。
- 2) 光学調心誤差補正を行い、光学的原因によって生じる誤差を除去した。

これらの方法により測定時間の短縮を図り、精度の高い測定を可能にした。

本報告のシステムおよび補正法は簡単な構成で実現でき、特にレンズ検査等のタクト短縮に効果があると思われる。今後はどの範囲の非球面までこの方法が適用できるかを明らかにしていきたい。

最後に、本システムの開発にあたり、ご協力をいただいた(株)リコー光学事業部榎本恵治氏、画像研菊地修一氏ならびにリコー光学(株)技術部中野博光氏、飛内邦幸氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 小島 忠：“光ディスク用非球面レンズの設計とその応用”，機械設計，**30** (1986) 30-35。
- 2) 泉谷徹朗，石灰勲夫：“光ディスク・カメラ用非球面ガラスレンズの設計とその応用”，機械設計，**30** (1986) 42-50。
- 3) 内田 泰：“光学機器軽量化の切札 非球面モードレンズ”，日経ニューマテリアル，**99** (1991) 10-29。
- 4) 関口修利，加藤正彦：“全面走査型非球面形状測定機”，光学，**16** (1987) 67-74。
- 5) 浅野俊雄：レンズ工学の理論と実際 (光学工業技術協会，1984)。
- 6) 小川治男，大川金保，野沢龍介，小林正敏：“非球面レンズの偏心測定と評価の現状”，第16回光学シンポジウム講演予稿 (1991) pp. 23-24。
- 7) 藤井賢一：“密度標準物体の形状の精密測定”，ナノメートル計測制御研究部会第24回定例会資料 (1992) p. 6。