



2枚格子を利用したレンズの焦点距離測定の考察

—Talbot 長ずれの影響—

中野 善明・渡部 智希

北海道薬科大学物理学教室 〒047-02 小樽市桂岡町 7-1

(1993年4月1日受付, 1993年6月28日受理)

Study on Measuring the Focal Length of Lenses Using Two Gratings

—Some Effects of Talbot Length Error—

Yoshiaki NAKANO and Tomoki WATANABE

Department of Physics, Hokkaido Institute of Pharmaceutical Sciences, 7-1,
Katsuraoka, Otaru 047-02

(Received April 1, 1993; Accepted June 28, 1993)

In measuring the focal length of a lens using Talbot effect and moire technique, the influence of alignment error is described. In essence, the grating space should be adjusted to be precisely equated to the Talbot length when the best contrast of the moire fringe is performed, however the effect of misadjustment can be ignored if it is negligible. Results out of the numerical analysis and the alignment experiments are to be presented.

1. はじめに

レンズの焦点距離はレンズの特性を最も良く表すため従来からノーダルスライド法, 像倍率法などの方法で測定されてきた。しかし, これらは光学台の限界などから長焦点を有するレンズについての測定が困難であった。われわれはこれらを解決するために Talbot 効果¹⁾とモアレ技術を用いた測定法を提案し, その原理と実験例を報告してきた²⁾。この方法は Talbot 長の間隔で配置した2枚の格子板とコリメート光で構成される簡単な光学系であり同一の装置で凸レンズおよび凹レンズなど正負いずれの測定にも適用できる利点をもち, さらにこれまでに有効な手段が見つからなかった累進多焦点レンズなどの検査にも適用できる可能性をもっている³⁾。

本方法は, 1枚目の格子の直前に被検レンズを挿入して変化したフーリエ像と2枚目の格子とで生じたモアレ縞の傾角から焦点距離を求めるものである。この測定の精度は, モアレ縞傾角の読み取り, 2格子間隔の設定(Talbot 長), 2格子の相対傾角および格子ピッチなどの測定精度に依存するが, 本稿では2格子間隔の設定誤

差に着目し, これが焦点距離測定精度に与える影響を報告する。

2. 光学系と Talbot 長ずれ

レンズの焦点距離測定のための光学系の概略図を Fig. 1 に示す。ピッチの等しい2枚の格子は格子線に対して相対的に θ だけ傾けそれらの間隔は Talbot 長で配置されている。被検レンズ TL は第1の格子 g_1 の直前に挿入され, モアレ縞観測のためのスクリーンは格子 g_2 の直後に配置されている。 x 軸は第1の格子 g_1 の格子条に垂直な方向であり, Z は光軸である。

コリメートされた波長 λ の単色光で格子ピッチ P の第1の格子 g_1 を照射すると格子 g_1 の後方 $Z_k = kP^2/\lambda$ (k は自然数) の位置に格子 g_1 の直後と全く同じ周期構造をもつ光の強度分布が得られ, これをフーリエ像あるいは Talbot 像と呼ぶ。ただし, k が奇数の場合は強度分布の周期構造は反転する。モアレ計測ではいずれのフーリエ像を用いても結果には影響しない。さて, この位置に第2の格子 g_2 を配置すると, これらの重ね合わせによりモアレ縞が得られる。被検レンズのない場合の

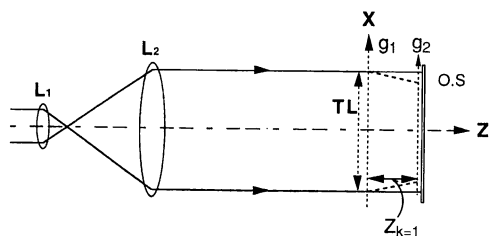


Fig. 1 Optical system of measuring the focal length of a lens. L_1 - L_2 : beam expander, TL: test lens, g_1 , g_2 : first and second gratings, Z_k : Talbot length, OS: observing screen. The x and Z axes are taken in the directions of the periodical amplitude variation of the first grating g_1 and that of the optical axis, respectively.

モアレ縞は、傾角 θ が小さいとき、ほぼ x 軸に平行な直線となり、また被検レンズ TL を挿入した場合には、被検レンズ TL の焦点距離に依存してモアレ縞は傾く。この傾角を α_k とすると (この場合は k 次の Talbot 像の利用を意味している)、被検レンズ TL の焦点距離 f は、

$$f = \{1/(\sin \theta \tan \alpha_k + \cos \theta - 1)\} kP^2/\lambda \quad (1)$$

で与えられる²⁾。ここでモアレ縞傾角 α_k は

$$\tan \alpha_k = \{f/(f - Z_k) - \cos \theta\} / \sin \theta \quad (2)$$

で与えられ、またこのときの Talbot 長 Z_k は

$$Z_k = kP^2 f / (\lambda f + kP^2) \quad (3)$$

である。よって、2枚の格子間隔を Talbot 長 Z_k に等しく配置すれば、良好のコントラストのモアレ縞が得られ、このモアレ縞の傾角 α_k の測定から式(1)を用いてレンズ TL の焦点距離 f が求められる。ここで2格子間隔が ΔZ だけ Talbot 長より微小ずれを生じたとき、その2格子間隔は、 $Z_{12} = Z_k + \Delta Z$ となり、このときのモアレ縞はコントラストの低減と縞傾角の微小変化が生じ、焦点距離測定精度に影響を与えたと考えられる。これについて以下に考察する。

2.1 ずれ ΔZ とモアレ縞コントラスト

以下の計算と実験に用いた各値は次のとおりである。

2枚の格子ピッチ: $P=0.261$ (mm)

照射光の波長: $\lambda=632.8$ (nm)

2格子間の相対傾角: $\theta=2$ (degree)

被検レンズ: 凸レンズ; $f=0.1, 0.25, 0.5, 1,$

4 (m)

凹レンズ; $f=-0.25, -0.5, -1,$

-4 (m)

ずれ量の範囲: $\Delta Z=-5 \sim +5$ (mm)

Fig. 2, 3 はずれ量 ΔZ とモアレ縞コントラストについての実験結果である。Fig. 2 (a)は被検レンズのないときのモアレ縞を示し、このときのモアレ縞は水平で直線となっている。Fig. 2 (b)~(d)は $f=4$ m の被検レンズを用いたときのモアレ縞パターンである。(c)は

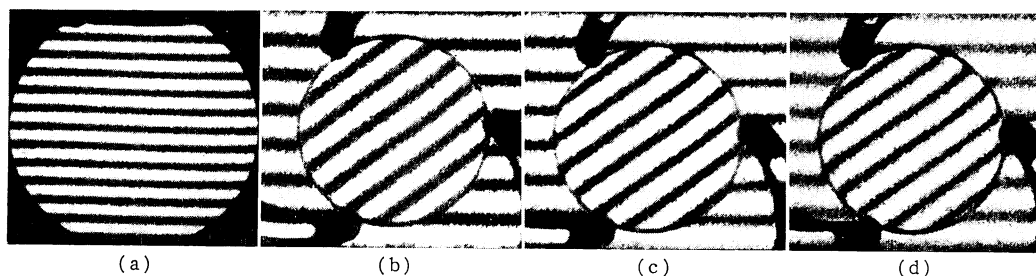


Fig. 2 Moire fringe pattern observed on the screen. (a) without a test lens, (b) $Z_{12}=108$ mm; $\Delta Z=+3$ mm, (c) $Z_{12}=Z_k=105$ mm; $\Delta Z=0$ mm, (d) $Z_{12}=102$ mm; $\Delta Z=-3$ mm.

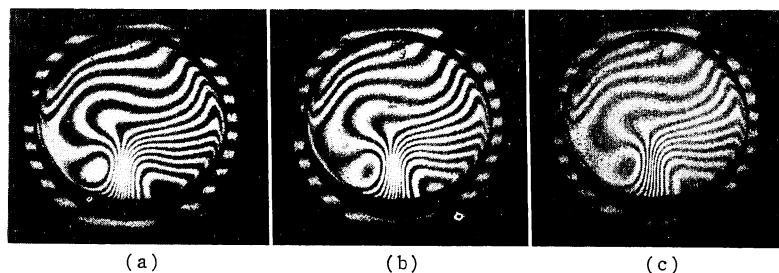


Fig. 3 Moire fringe pattern generated through a progressive power lens. (a) $Z_k=107$ mm, (b) $Z_k=100$ mm, (c) $Z_k=88$ mm.

$\Delta Z=0$, すなわち 2 格子間隔 $Z_{12}=\text{Talbot 長 } Z_k=105$ mm のときで, レンズ面に相当する円内のモアレ縞のコントラストが最も良好となっている. (b), (d) は $Z_{12}=(Z_k \pm 3)$ mm でそれぞれ $\Delta Z=+3$ mm, -3 mm のときのモアレ縞パターンである. このとき円内のモアレ縞は(c)と比べてコントラストの低下が顕著である. このことは実際の焦点距離測定において, 2 格子間隔設定ずれを十分に小さく調整することが可能であることを意味している.

Fig. 3 は 1 枚のレンズ面内で焦点距離が部分的に変化している累進多焦点レンズについて上と同様に行った実験結果で, 2 枚の格子間隔 Z_{12} を (a)107 mm, (b)100 mm, (c)88 mm としたときのモアレ縞パターンである. それぞれのモアレ縞パターンの中でコントラストの良好な部分は, 2 格子間隔がこの部分の焦点距離に対応する Talbot 長となっていることを示している. したがって, このときの 2 格子間隔の値を測定すれば式(3)より良好なコントラストをもつモアレ縞の部分の焦点距離が求められることになる. このように 1 枚のレンズ面

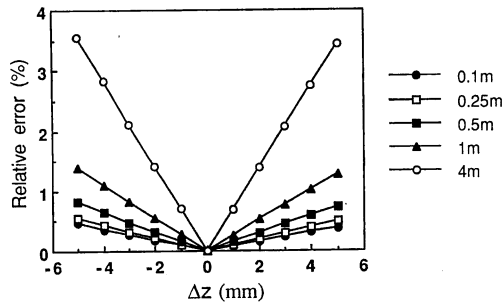


Fig. 4 Relationship between the relative error of inclination angle $\alpha_{k=1}$ of the moire fringes and the alignment error ΔZ (-5 mm to $+5$ mm), with a positive lens.

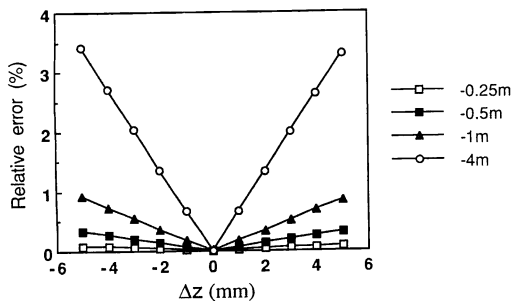


Fig. 5 Relationship between the relative error of inclination angle α_k of the moire fringes and the alignment error ΔZ (-5 mm to $+5$ mm), with negative lens.

内で焦点距離が変化している場合には, 第 1 の格子を固定し第 2 の格子 g_2 の位置を少しずつ変化させて 2 格子間隔 Z_{12} を測定することでこの種のレンズの焦点距離測定も可能となる.

2.2 ずれ ΔZ とモアレ縞傾角

Fig. 4, 5 は, それぞれ凸レンズおよび凹レンズの被検レンズについて, 2 格子間隔 Z_{12} に対する Talbot 長からのずれ $\Delta Z=(Z_{12}-Z_k)$ がモアレ縞傾角の相対誤差におよぼす理論計算結果を示す. Fig. 4 において, 例えば $\Delta Z=+1$ mm のとき $f=0.1$ m レンズではモアレ縞傾角の相対誤差は 0.09%, $f=4$ m レンズで 0.7% である. Fig. 5 は凹レンズについての同様の計算結果である. この場合 $\Delta Z=+1$ mm のとき $f=-0.25$ m レンズではモアレ縞傾角の相対誤差は 0.02% であり, $f=-4$ m レンズのとき 0.67% である. 結果的にずれ ΔZ がモアレ縞傾角に与える影響は相対誤差としてみると被検レンズの焦点距離が長くなるほど大きくなるのがわかる.

2.3 ずれ ΔZ と焦点距離測定

Fig. 6, 7 は, それぞれ凸レンズおよび凹レンズの被検レンズについて, 2 格子間隔 Z_{12} に対する Talbot 長

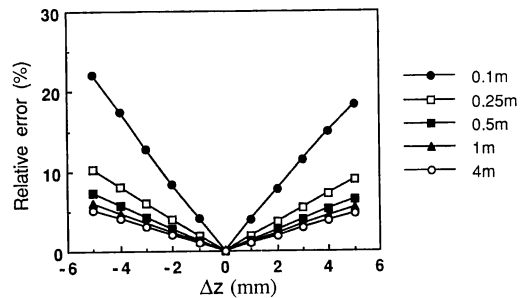


Fig. 6 Relationship between the relative error of the focal length f and the alignment error ΔZ (-5 mm to $+5$ mm), with positive lens.

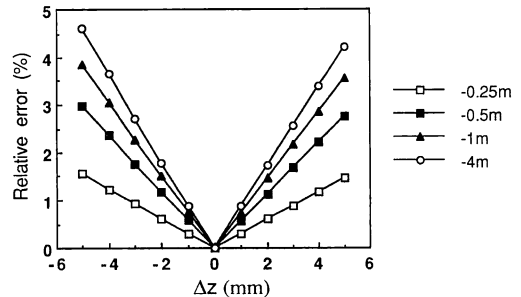


Fig. 7 Relationship between the relative error of the focal length f and the alignment error ΔZ (-5 mm to $+5$ mm), with negative lens.

からのずれ ΔZ が焦点距離測定におよぼす影響を相対誤差の程度によって示したものである。Fig. 6において、例えば $\Delta Z = +1 \text{ mm}$ のとき $f = 0.1 \text{ m}$ レンズでは相対誤差は 4.08% で、 $f = +4 \text{ m}$ レンズのときのそれは 0.99% である。一方凹レンズでは、Fig. 7 より焦点距離測定に対する相対誤差は $\Delta Z = +1 \text{ mm}$ のとき $f = -0.25 \text{ m}$ レンズでは 0.3%、 $f = -4 \text{ m}$ のレンズでは 0.89% である。したがってずれ ΔZ が焦点距離測定精度に与える影響は、凸レンズの場合長焦点を有するものほど誤差は小さく、逆に凹レンズの場合には相対誤差は長い焦点距離を有するレンズほど大きいことがわかる。しかし、いずれのレンズもずれ ΔZ が微小である場合には焦点距離の測定精度に与える影響は小さい。

3. 考察とまとめ

Talbot 効果とモアレ技術を用いたレンズの焦点距離測定の光学系において、2格子間隔精度がおよぼす影響を考察した。結果は

1. Talbot 長からのずれが微小の場合モアレ縞傾角に与える影響は無視できる。

2. Talbot 長からのずれが微小の場合、凹、凸レンズ長短いずれの焦点距離のレンズについても焦点距離測定精度の影響は小さい。このことからこれまで行ってき

た従来のモアレ縞傾角読み取りによるレンズの焦点距離測定に関しては、十分良好なコントラストが得られているモアレ縞を利用する場合、このずれによる影響は無視でき、精度はモアレ縞傾角の読み取り精度に依存するものと考えてよい。この結果は既報と同じ結論である。

また、

3. 累進多焦点レンズのように1枚のレンズ面内で焦点距離が部分的に異なるときは、モアレ縞コントラストが局所的に低下するが、この場合第2の格子を移動させて良好なコントラストが得られるところをみつめて2格子間隔を測定すればこの部分の Talbot 長が求められ焦点距離の測定ができることになり、これは Talbot 長による焦点距離測定の可能性を示す。これについては次回で報告する。

文 献

- 1) Talbot: "Facts relating to optical science. No. IV," *Philos. Mag.*, **9** (1936) 401-407.
- 2) Y. Nakano and K. Murata: "Talbot interferometry for measuring the focal length of a lens," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 3162-3166.
- 3) Y. Nakano, R. Ohmura and K. Murata: "Refractive power mapping of progressive power lenses using Talbot interferometry and digital image processing," *Opt. Laser Technol.*, **22** (1990) 195-198.