

Talbot 長を利用したレンズの焦点距離の測定

渡部 智希*・中野 善明*・村田 和美**

*北海道薬科大学物理学教室 〒047-02 小樽市桂岡町 7-1

**北海道工業大学応用電子工学科 〒060 札幌市手稲区前田 7 条 15-4-1

Measurement of the Focal Length of Lenses Using Talbot Length

Tomoki WATANABE,* Yoshiaki NAKANO* and Kazumi MURATA**

*Department of Physics, Hokkaido College of Pharmacy, 7-1, Katsuraoka-cho, Otaru 047-02

**Department of Applied Electronics, Hokkaido Institute of Technology, 7-15, Maeda, Teine, Sapporo 006

Based on the Talbot interferometry, a method of measuring the focal length of lenses using Talbot length is proposed. And a comparison of the measuring accuracy of the method using Talbot length and the formal method using the inclination angle of the moire fringe is described. As a result, it was possible measuring the focal length of lenses using Talbot length and this method has advantage for a short focal length.

1. はじめに

レンズの焦点距離はレンズの特性を表すのに重要であり、これまでいくつかの測定方法が提案されている。その中で筆者らは長焦点を有するレンズの焦点距離測定に特に有効な方法として Talbot 効果とモアレ技術を用いた焦点距離測定法を提案している¹⁾。これは Talbot 長の間隔に配置した 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、生成するモアレ縞の傾角により焦点距離を求める方法である。前報²⁾でこの光学系において 2 格子間隔が Talbot 長よりずれたときのモアレ縞コントラストおよびモアレ縞傾角に与える影響を考察したが、Talbot 長からのずれによりモアレ縞コントラストは著しく低下するため、2 格子間隔の設定ずれを十分に小さくできることが明らかとなった。また、このずれが微小であるときモアレ縞傾角へ与える変化は小さく、結果的に焦点距離測定精度への影響は十分小さいことがわかった。一方累進多焦点レンズの測定では同一レンズ面内で焦点距離が局所的に変化しているため 2 格子間隔を変えるとモアレ縞コントラストの良好な部分が変化した。これは 2 格子間隔がこの部分で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。

そこで本稿では直接この Talbot 長を測定することで被検レンズの焦点距離を求めることを提案する。また 2

格子間隔が Talbot 長より微少ずれたときの焦点距離測定への影響を従来のモアレ縞傾角測定と比較検討したので報告する。

2. 測定原理

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。2 枚のピッチの等しい格子はそれぞれの格子条に対して相対的に θ 傾け、被検レンズ TL は第 1 の格子 g_1 の直前に挿入し、モアレ縞観測の目的で格子 g_2 の直後にスクリーン OS を配置する。X 軸は第 1 の格子 g_1 の格子条に垂直な方向であり、Z 軸は光軸を示す。コリメートされた波長 λ の単色光で第 1 の格子 g_1 を照射すると、第 1 の格子 g_1 の後方 $Z_k = kp^2/\lambda$ (k は自然数) の位置に第 1 の格子 g_1 の直後と全く同じ周期構造をもつ光の強度分布であるフーリエ像が得られる (k が奇数の場合周期構造は反転する)。この位置に第 2 の格子 g_2 を θ を十分小さくして配置すると、これらの重ね合わせにより X 軸にほぼ平行な直線のモアレ縞が得られる。被検レンズ TL を挿入すると被検レンズ TL の焦点距離に依存して第 1 の格子 g_1 のフーリエ像が変化する。このとき Talbot 長およびモアレ縞傾角も変化する。従来の方法では第 1 の格子 g_1 を固定し第 2 の格子 g_2 を光軸上に移動させてモアレ縞コントラストが最も

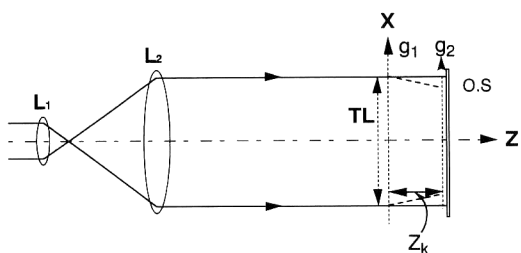


Fig. 1. Optical system of measuring the focal length of a lens. L₁-L₂: beam expander, TL: test lens, g₁, g₂: first and second gratings, Z_k: Talbot length, OS: observing screen. The X and Z axes are taken in the direction of the periodical amplitude variation of the first grating g₁ and that of the optical axis, respectively.

良好となる位置に配置し、このときに得られたモアレ縞傾角 α_k (この場合 k 次の Talbot 像を利用している) より被検レンズ TL の焦点距離 f を求めてきた。モアレ縞傾角 α_k と焦点距離 f の関係は

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

で与えられる。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、このときの Talbot 長 Z_k は式 (3) で与えられる。

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

このとき 2 格子間隔を Talbot 長 Z_k と等しく配置するとコントラストの良好なモアレ縞が得られる。式 (3) を焦点距離 f について書き改めると

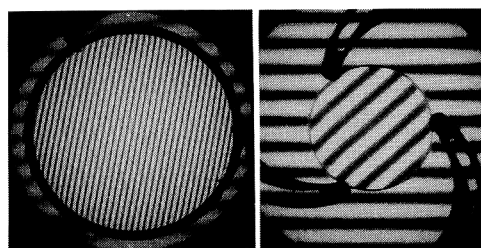
$$f = 1 / (1 / Z_k - \lambda / k p^2) \quad (4)$$

となる。したがって λ , k , p をあらかじめ固定しておくと、Talbot 長 Z_k の測定より被検レンズの焦点距離 f が求められる。

3. Talbot 長測定による焦点距離測定

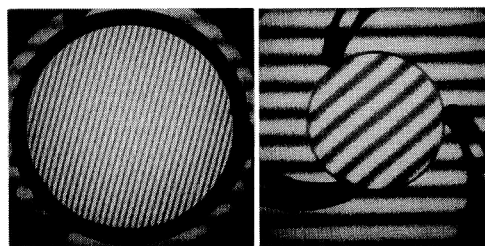
実験には一対のピッチの等しい格子 $p=0.131$ mm および $p=0.264$ mm の 2 種類の格子を用いた。また、両格子の生成するモアレ縞間隔がなるべく等しくなるように θ をそれぞれ 1° および 2° に設定した。照射光は He-Ne レーザー (632.8 nm) を使い、4 種類の被検レンズの焦点距離測定を行った。Fig. 2 の A はピッチ $p=0.131$ mm の格子で $k=2$, $\theta=1^\circ$, B は $p=0.264$ mm の格子で $k=1$, $\theta=2^\circ$ の条件で被検レンズ a, b を用いてコントラストの最も良好な位置に第 2 の格子 g_2 を配置したときのモアレ縞パターンである。他の被検レンズについても同様に第 2 の格子 g_2 を配置し、2 格子間隔

A. $p=0.131$ mm, $k=2$, $\theta=1^\circ$



(a) (b)

B. $p=0.264$ mm, $k=1$, $\theta=2^\circ$



(a) (b)

Fig. 2. Moire fringe pattern observed on the screen.

Table 1. Measurement of the focal length of lenses using Talbot length.

Lens	$p=0.131$ mm	$p=0.264$ mm	Lens meter (dpt)
	$k=2, \theta=1^\circ$ (mm)	$k=1, \theta=2^\circ$ (mm)	
a.	801.36 ± 0.79	797.23 ± 0.41	1.25
b.	4041.22 ± 3.78	4045.51 ± 1.89	0.25
c.	500.99 ± 0.51	501.61 ± 0.28	2.00
d.	-4020.56 ± 3.66	-4022.06 ± 1.77	-0.25

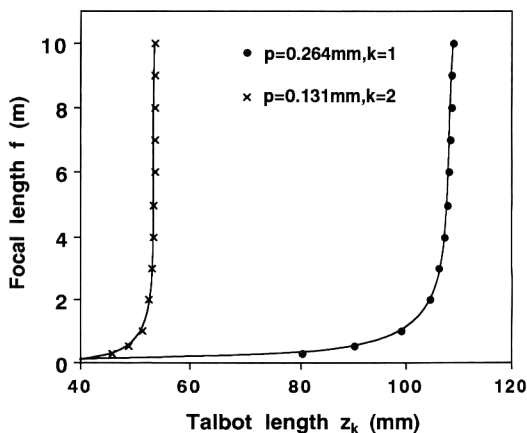


Fig. 3. Relationship between the focal length f and Talbot length Z_k .

の測定を行い、測定5回の平均により焦点距離を求めた。その結果を Table 1 に示す。比較のためレンズメーカーでの屈折力の測定値も表示している。また、本測定において、 k 、 p および λ をあらかじめ正確に設定したとき、測定器の精度を ΔZ_k とすると相対誤差は、 $|df/f| = |\Delta Z_k/Z_k|$ で表され、Talbot 長 Z_k に依存する。なお Talbot 長 Z_k と焦点距離 f の関係を Fig. 3 に示しておく。本測定は長焦点を有する被検レンズほど測定精度はよく、 k を高次に設定することで測定精度を高めることができる。今回用いた4種類の被検レンズでの焦点距離に対する相対誤差は $k=2$ 、 $p=0.131$ mm の格子で 0.1%、 $k=1$ 、 $p=0.264$ mm の格子で 0.05% であった。

4. Talbot 長測定とモアレ縞傾角測定との比較

本測定では直接 Talbot 長を測定することで焦点距離を求めるため、2 格子間隔が Talbot 長から微少のずれをおこしたとき焦点距離測定に誤差を生じる。そこで 2 格子間隔が Talbot 長から微少のずれをおこしたとき、焦点距離測定に与える影響を 2 格子間隔測定およびモアレ縞傾角測定による両測定について計算により比較検討した。計算には式(2)、(4)を用い、Talbot 長からのずれが ΔZ のときの 2 格子間隔を $Z_{12} = Z_k + \Delta Z$ として検討した。条件は格子ピッチ $p=0.264$ mm、 $k=1$ 、 $\theta=2^\circ$ 、ずれ量は $\Delta Z = \pm 0.5$ mm として焦点距離 $f=0.5$ m、1 m、4 m の 3 種類の被検レンズで比較した。

Fig. 4 は 2 格子間隔測定により求めた結果で、微少のずれ ΔZ の大きさに依存して焦点距離に対する相対誤差は大きくなる。また、被検レンズの焦点距離の大きさ

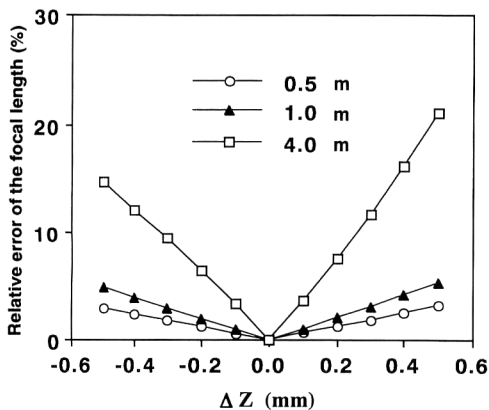


Fig. 4. Relationship between the relative error of the focal length f and the alignment error ΔZ (-0.5 mm to $+0.5$ mm) for measurement of the focal length of lenses using Talbot length.

にも依存してこの相対誤差は大きくなる。これは Fig. 3 に示したように Talbot 長の一定の変化量に対して焦点距離が長くなるほどこの変化量は著しく大きくなる。このため 2 格子間隔測定では長焦点を有するレンズほど大きな測定誤差を生じる。

また、逆に Fig. 5 に示すようにモアレ縞傾角測定では、焦点距離が短いほどこれに対する相対誤差は大きくなる。また Fig. 4, 5 よりモアレ縞傾角測定における微少のずれ ΔZ により生ずる焦点距離に対する相対誤差は、2 格子間隔測定に比べてかなり小さくなっている。モアレ縞傾角測定では Talbot 長からのずれ ΔZ により

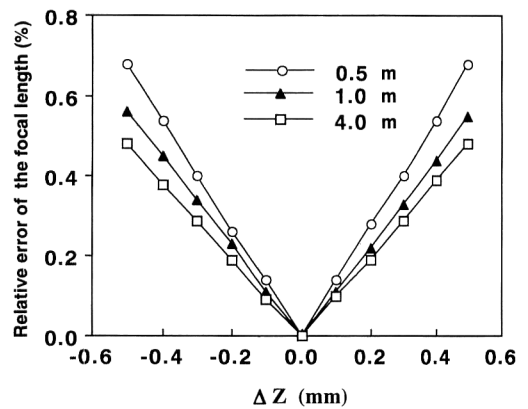


Fig. 5. Relationship between the relative error of the focal length f and the alignment error ΔZ (-0.5 mm to $+0.5$ mm) for measurement of the focal length of lenses using the inclination angle α_k of the moire fringe.

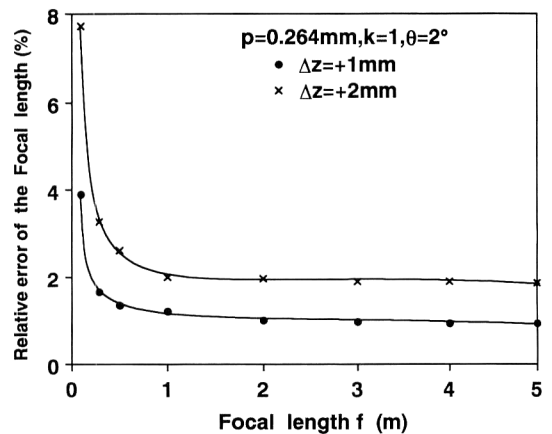


Fig. 6. Relationship between the relative error of the focal length f and the focal length f for measurement of the focal length of lenses using the inclination angle α_k of the moire fringe in case of the alignment error ΔZ ($+1$ mm or $+2$ mm).

モアレ縞傾角 α_k が変化し、その結果焦点距離測定に誤差を与えるが、式(2)より Talbot 長ずれ ΔZ による $\tan \alpha_k$ の変化量は小さく、長焦点を有するレンズほどその変化量は小さくなる。このためモアレ縞傾角測定では 2 格子間隔測定に比べて Talbot 長からのずれ ΔZ による焦点距離測定への影響は小さくなる。

Fig. 6 はモアレ縞傾角測定において、Talbot 長からのずれ ΔZ を $\Delta Z = +1 \text{ mm}$ および $+2 \text{ mm}$ としたとき、各焦点距離に与える焦点距離に対する相対誤差を示したものである。これにより $+1 \text{ mm}$ 程度のずれ ΔZ では焦点距離測定に与える影響は小さいことがわかる。

5. 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において、従来はモアレ縞傾角を測定することで焦点距離を求めてきたが、ここでは 2 格子間隔の測定から焦点距離を求める一方法を提案した。また、Talbot 長測定とモアレ縞傾角測定との比較を行い以下のように考察した。

1. Talbot 長測定での相対誤差は Talbot 長の大きさにより決められるが、 $k=2$, $\theta=1^\circ$, $p=0.131 \text{ mm}$ で

0.1% , $k=1$, $\theta=2^\circ$, $p=0.264 \text{ mm}$ 格子で 0.05% であった。

2. Talbot 長測定による焦点距離測定ではモアレ縞傾角測定と比較して Talbot 長からのずれ ΔZ の影響が大きくなった。Talbot 長測定では被検レンズの焦点距離 f の大きさに比例して焦点距離に対する相対誤差は大きくなるが、モアレ縞傾角測定では大きくなり、結果的に長焦点レンズの場合相対誤差は小さくなり、長焦点レンズの測定ではモアレ縞傾角測定の方が精度がよいと考察された。

3. モアレ縞傾角による焦点距離測定の場合、被検レンズの焦点距離が短くなるに従い、生成するモアレ縞の間隔が狭まり傾角も大きくなり、この精度に問題点が生じ、この場合には Talbot 長測定が有効となる。

文 献

- 1) Y. Nakano and K. Murata: "Talbot interferometry for measuring the focal length of a lens," Appl. Opt., **24** (1985) 3162-3166.
- 2) 中野善明, 渡部智希: "2 格子を利用したレンズの焦点距離測定の考察", 光学, **22** (1993) 558-561.