

# レーザ・スペックルを利用する光学系の結像性能評価

(56460057)

昭和57年度科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果報告書

昭和58年3月

研究代表者 小 松 進 一

(早稲田大学理工学部)

## はしがき

オプトエレクトロニクスの発展とともに、光学系が用いられる用途は、従来の写真レンズ等のわくを越えて飛躍的に広がっている。光学系に要求される性能の多様化とともにその評価も重要な問題となってきた。

現在、光学系の性能評価の多くは、解像力チャートや、エッジ像に基いたM T F 測定法によってなされており、オペレータの熟練が要求されたり、高価な装置が必要とされるのが現状である。

本研究では、近年種々の分野で応用が進められているレーザ・スペックルの技術を利用して、操作が簡単で製造工程での検査などにも容易に使用できる評価法を確立するためにその基礎研究を行なった。

また、レーザ・スペックルの基礎的性質を議論し、眼光学への応用、とくにヒトの眼軸長と屈折力の分離測定への応用の可能性についても検討を加えたので以下にその成果について述べる。

本研究を遂行するにあたり文部省科学研究費補助金の援助を受けた。ご支援とご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表する。

## 研究組織

研究代表者： 小松進一 (早稲田大学理工学部助教授)  
研究分担者： 大頭 仁 (早稲田大学理工学部教授)

## 研究経費

昭和56年度	4,700千円
昭和57年度	3,400千円
計	8,100千円

## 研究発表

### (1) 学会誌等

1. S. KOMATSU, K. OSATO and H. OHZU :  
「 Velocity Sensitivity of Laser- Speckle  
Velocimeters」  
Optics Communications Vol. 39 No. 6  
( 1981 年 11 月 15 日 )
2. 小松進一, 大頭 仁 :  
「 スペックルを利用するM T F 測定」  
光学技術コンタクト Vol. 19 No. 8  
( 昭和 56 年 8 月 20 日 )
3. S. KOMATSU, T. MORIOKA and H. OHZU :  
「 Evaluation of Optical Systems Using Dynamic  
Laser Speckles」  
J. Opt. Soc. Am. Vol. 72 No. 12  
( 1982 年 12 月 )
4. 大頭 仁, 小松進一 :  
「 レーザ・スペックルによる眼軸長精密測定の可能性」  
日本眼光学学会誌 Vol. 4 No. 1  
( 昭和 58 年 2 月 )

### (2) 口頭発表

1. 小松進一, 大頭 仁 :  
「 スペックル零交叉による光学系評価と屈折率分布型  
レンズへの応用」  
応用物理学会 ( 昭和 56 年 10 月 9 日 )
2. 盛岡敏夫, 小松進一, 大頭 仁 :  
「 半導体レーザースペックルによる屈折率分布型レンズ  
のM T F 測定」  
応用物理学会 ( 昭和 57 年 4 月 3 日 )

3. 小松進一, 大頭 仁:  
「レーザースペckルによる眼軸長精密測定の可能性」  
日本眼光学学会 (昭和 57 年 10 月 2 日)
4. S. KOMATSU, T. MORIOKA and H. OHZU:  
「Evaluation of Optical System Using Dynamic  
Laser Speckles」  
Optical Society of America  
(1982 年 10 月 19 日)
5. 盛岡敏夫, 小松進一, 大頭 仁:  
「レーザースペckルを用いた M T F 自動測定装置」  
応用物理学会 (昭和 58 年 4 月 発表予定)

## 研究成果

本研究によって得られた知見、成果を以下に取りまとめる。研究内容は、3つに大別できるので以下概要を箇条書きに述べ、別刷を添付する。

1. レーザ・スペックルの挙動の基本的性質に関し、とくに拡散面の面内変位とスペックル信号の相関時間との関係について解析的、実験的に検討を加えた。ここでは結像界のスペックルを含めて、ガウシアンビームを照射した際に、強度ゆらぎの相関時間の最小値を与える光学系の条件について詳しく検討し、理論と実験結果との対応を明らかにした。

この量は変位測定や速度測定における感度を決定し、顕微鏡対物レンズを用いた実験により $10^{-6}$  m 程度の変位量に対して十分応答することが確認された。

詳細は添付の別刷1に述べる。

2. レーザ・スペックルによる光強度ゆらぎの自己相関を用いて光学系の空間周波数特性を示すM T F ( Modulation Transfer Function) を測定できることが開口数 ( N. A. ) の低い光学系を対象とする報告者らの研究によって明らかにされていた。※ 本研究では、この原理に基いて実時間処理が可能でかつ操作の簡便な結像性能測定システムをマイクロコンピュータとコンピュータ制御のパルスモータ駆動ステージを用いて構成し、これを屈折率分布型レンズや光ビデオディスク用ピックアップレンズのような高N. A. レンズを含めた各種の光学系の評価に応用し、実用性を確かめた。

さらに簡便な性能評価法としてスペックル信号の零交叉数に着目し実験的検討を加え、その有効性を確認した。

詳細については、添付の別刷2および3に述べる。

---

※ I. Yamaguchi, S. Komatsu and H. Saito: Japan. J. appl. Phys. Vol. 14 ( 1975 ) Suppl. 1, 301.

以上のように時系列のスペックル信号を扱う他にスペックルパターンの空間的情報を利用することにより画角を変数としたMTF値の分布を空間的にとらえること、およびアレイレンズの並列的評価法についても検討をすすめておりこの点については今後の研究課題としたい。

3. スペックルの流れの速度を利用して、ヒトの眼球光学系の屈折力と眼軸長を分離測定する方法について検討を加えた。その結果、曲率半径の異なる波面の照射によって網膜上に生じたスペックルの流れの速度を測定することにより上記の2つの量を分離できることが明らかになった。しかしながら運動視標とスペックルの流れ速度を一致させる方式では網膜上のスペックル速度は決定できないことが解析の結果示され、解決が必要な問題点である。

詳細については、添付の別刷4に述べる。

**VELOCITY SENSITIVITY OF LASER-SPECKLE VELOCIMETERS**

S. KOMATSU, K. OSATO<sup>‡</sup> and H. OHZU

*Department of Applied Physics, School of Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 160, Japan*

Received 23 June 1981

The method of increasing sensitivity in laser speckle velocimetry is studied theoretically and experimentally. The sensitivity of the velocimeters is shown to have a fairly strong dependence on the optical configurations, such as the diameter of the incident laser beam-waist, or its position relative to the moving diffuse object to be measured. It is pointed out that the minimal sensitivity appears in the configuration where the converging incident light beam produces its beam waist at the position of a detecting pinhole. In some cases when using image speckles to obtain finite spatial resolution in the object plane, an optimum condition exists which gives the maximal sensitivity. The sensitivity of a laser speckle velocimeter using a spatial filter and two point cross-correlation technique is also discussed.

**1. Introduction**

Many studies on the application of dynamic laser speckles to velocity measurements are recently reported. Although new techniques for processing speckle signals and new designs of optical arrangement are proposed, these utilize basically the intensity fluctuations due to the dynamic properties of the laser speckles, i.e., their lateral translation and/or temporal structural change. Concerning the speckles produced in the diffraction field of the moving diffuse object, a rather weak dependence of the intensity fluctuations on the diameter of the illuminated region is reported by Pusey [1], and Takai et al. [2].

In actual velocity measurements, especially in the biological applications, the rate of fluctuations should preferable be rapid, because then more accurate data could be obtained in shorter measuring time. In this paper we discuss the rate of intensity fluctuation more precisely for the speckles produced in both the diffraction and the image field. It is then shown that there can be a fairly strong dependence of the rate on some parameters such as the object distance from the beam waist of the illuminating laser beam and the diameter of the beam waist. Methods for obtaining a high fluctuating rate of speckle signals are proposed and the result is confirmed by experiments.

tuating rate of speckle signals are proposed and the result is confirmed by experiments.

**2. Rate of temporal change in speckle signals**

We analyze the rate of temporal change of the intensity fluctuation  $\Delta I(t)$  caused by speckles in the pinhole plane in fig. 1. A moving diffuse object of velocity  $v$ , which produces speckles, is illuminated by a gaussian laser beam whose amplitude distribution  $U(r)$  in the object plane is expressed as [3]

$$U(r) = A \exp(-\pi r^2/b^2) \exp(j\pi r^2/\lambda R), \quad (1)$$

where  $R$  is the radius of curvature of the wavefront and  $b$  denotes the extent of the illuminated region.

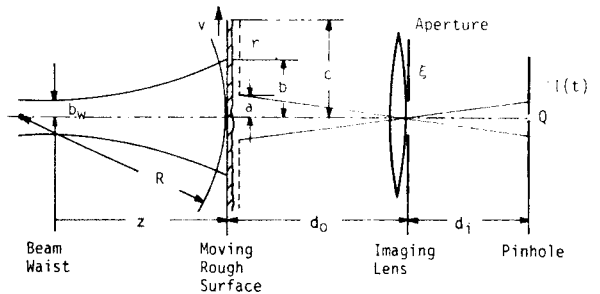


Fig. 1. Schematic diagram of laser speckle velocimeters.

<sup>‡</sup> Present address: Sony Corporation, 6-7-35 Kitashinigawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141, Japan.

Using the radius of the beam waist  $b_w$  and its distance  $z$  to the object,  $b$  and  $R$  are expressed as

$$b = b_w [(z/z_R)^2 + 1]^{1/2}, \tag{2}$$

$$R = z [(z_R/z)^2 + 1],$$

where  $z_R$  denotes the Rayleigh range and is equal to  $b_w^2/\lambda$ . In the general case, an imaging lens is placed in the plane at distance  $d_0$  from the object and is used to limit the contributing object region in order to measure the spatial distribution of the velocity. For simplicity we assume that this limiting function can be expressed as  $\exp(-r^2/a^2)$ . In the limiting case of  $a = \infty$ , the arrangement in fig. 1 reduces to the diffraction system where the detecting pinhole Q would be placed in the aperture plane  $\xi$ . The extent of the diffuse object is also assumed to be a gaussian form as  $\exp(-\pi r^2/c^2)$ .

Assuming that the light disturbance at the detecting pinhole plane is a complex gaussian random process and using the Huygens-Fresnel approximation to the light propagation, the temporal autocorrelation function [4]  $C_{\Delta I}(\tau)$  of the intensity fluctuation is shown to be

$$C_{\Delta I}(\tau) = \exp \left\{ -\pi \left[ \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{(1/R + 1/d_0)^2}{\lambda^2 (1/a^2 + 1/b^2 + 1/c^2)} \right] l^2 \right\}, \tag{3}$$

where  $l = \tau v$  and the object moves by this amount in time period  $\tau$ . For a large object ( $c = \infty$ ), the value of  $l$  which gives  $C_{\Delta I}(\tau) = C_0$  is denoted by

$$l_0 = \left( \frac{\log 1/C_0}{\pi} \right)^{1/2} \left\{ \frac{1}{e^2} + \frac{e^2}{\lambda^2} \left( \frac{1}{d_0} + \frac{1}{R} \right) \right\}^{-1/2} \tag{4}$$

where

$$1/e^2 = 1/a^2 + 1/b^2, \tag{5}$$

and

$$R = z + z_R^2/z. \tag{6}$$

The inverse of  $l_0$  can be used as the measure of the velocity sensitivity of the speckle velocimeter. Using the set of variables  $z$  and  $R$ , eq. (4) can be rewritten as:

$$l_0 = \left( \frac{\log 1/C_0}{\pi} \right)^{1/2} \times \left\{ \frac{a^2(z^2 + z_R^2 + a^2 z_R/\lambda)(z^2 + z_R^2)}{z^2 + z_R^2 + a^2 z_R/\lambda + (a^2/d_0)^2(z^2 + d_0 z + z_R^2)^2} \right\}^{1/2} \tag{7}$$

Especially for the case of speckles in the diffraction field, we set  $a = \infty$  and obtain

$$l_0 = \left( \frac{\log 1/C_0}{\pi} \right)^{1/2} \times \left\{ \frac{z^2 + z_R^2}{z_R/\lambda + (1/\lambda z_R d_0^2)(z^2 + d_0 z + z_R^2)^2} \right\}^{1/2} \tag{8}$$

Differentiating eq. (8) by  $z$  and equating it to zero gives

$$(z + d_0)(z^2 + z_R^2)^2 = 0. \tag{9}$$

Therefore  $l/l_0$  has only one minimum value at  $z = -d_0$ , in other words, when the position of the beam-waist

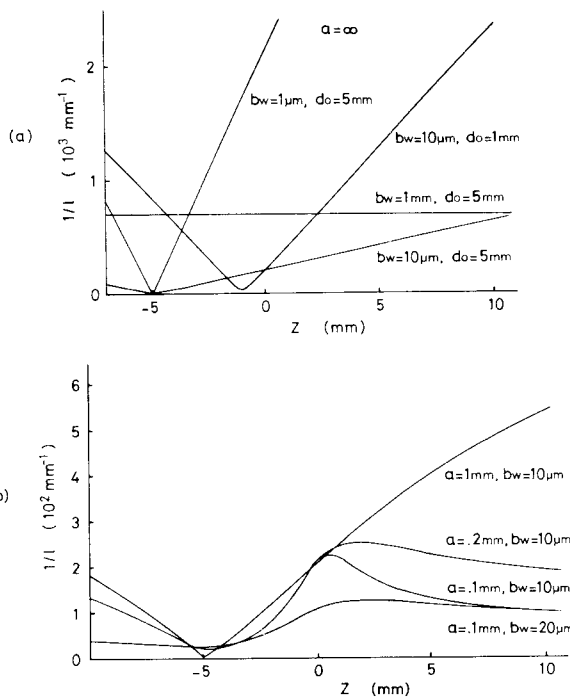


Fig. 2. Sensitivity of laser speckle velocimeters calculated for the speckles produced in the diffraction field (a), and the image field (b).



of the converging laser beam coincides with the pinhole. For  $C_0 = 0.5$  the inverse of eq. (8) is plotted in fig. 2 (a) as a function of  $z$  for some sets of other parameters  $b_w$  and  $d_0$ .

For  $C_0 = 0.5$  and  $d_0 = 5$  mm the inverse of eq. (7) is plotted in fig. 2 (b) as a function of the variable  $z$  and the parameters  $a$  and  $b_w$ . It is seen from fig. 2 (b) that the set of parameters of  $a = 0.1$  mm and  $b_w = 10$   $\mu$ m gives a clear peak of  $l/l_0$  around  $z = 0.5$  mm.

### 3. Experimental verification

Using an experimental set-up similar to fig. 1, we have confirmed the above relations between the sensitivity  $l/l_0$  and the distance  $z$  of the beam waist.

A collimated beam from a He-Ne laser is focused by a microscope objective lens so as to produce a beam waist. Its diameter measured by the conventional method of sliding knife-edge is  $6.5$   $\mu$ m. All experiments have been done in the diffraction field and, instead of

the imaging lens, a pinhole aperture of  $0.1$  mm diameter is placed closely adjacent to the moving diffuse object in order to limit the contributing object area.

The experimental results shown in fig. 3 have a peak around  $z = 0$  and are fairly similar, at least qualitatively, to the theoretical values represented by the corresponding broken line.

Experimental results for the cases without a field aperture also well coincide with the calculated values except the neighborhood of  $z = 0$  and the region where the sensitivity  $l/l_0$  takes values smaller than the predicted ones. The depletion of the sensitivity around  $z = 0$  is studied more precisely using two kinds of diffusing objects, whose r.m.s. roughness are  $0.92$   $\mu$ m and  $7.5$   $\mu$ m, under the condition of  $b_w = 0.5$   $\mu$ m,  $a = \infty$ ,  $d_0 = 7$  mm. The result in fig. 4 shows that the depth of the depletion depends on the r.m.s. roughness of the diffusing surface and takes a large value for the rougher surface.

The saturation of the sensitivity observed in the region of large  $l/l_0$  seems to be mainly to the finite diameter ( $1$   $\mu$ m  $\phi$ ) of the detecting pinhole.

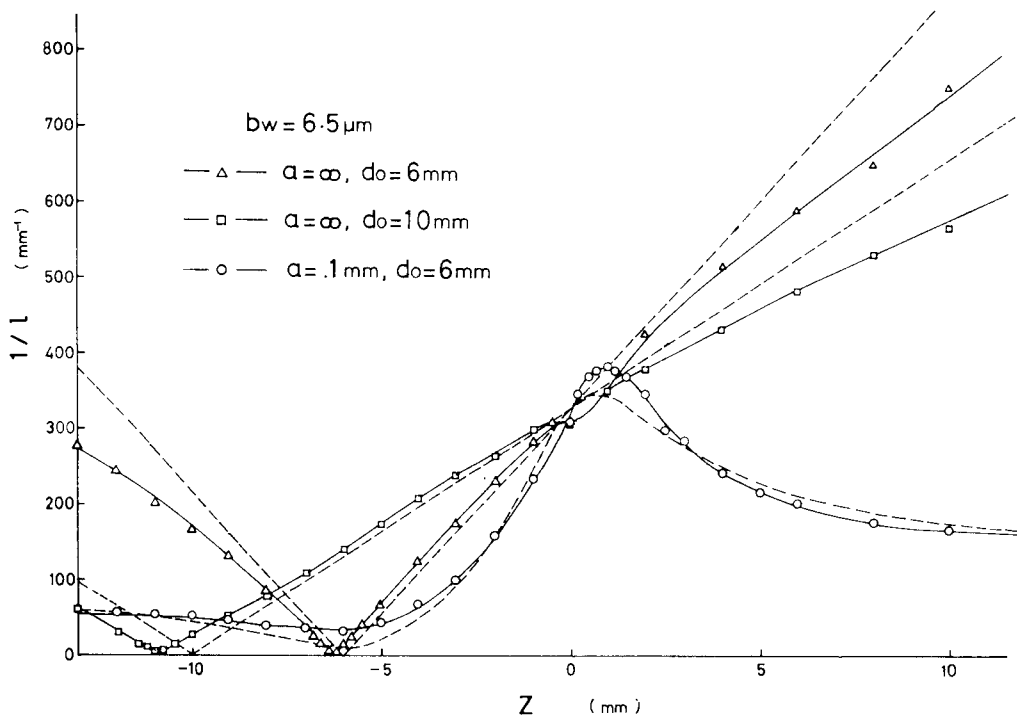


Fig. 3. Velocity sensitivity obtained experimentally for the diffraction speckles produced by the diffuse object without any field aperture ( $\text{---}\triangle\text{---}$   $d_0 = 6$  mm,  $\text{---}\square\text{---}$   $d_0 = 10$  mm) and with a field aperture of  $0.1$  mm  $\phi$  ( $\text{---}\circ\text{---}$   $d_0 = 6$  mm). The radius  $b_w$  of the beam waist is chosen as  $6.5$   $\mu$ m. The broken lines show the theoretical results obtained in fig. 2 (a) and (b).

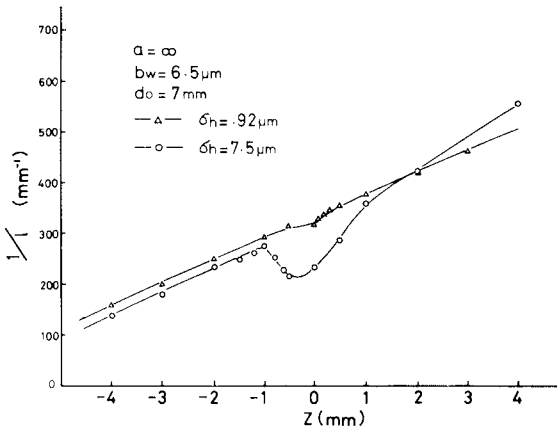


Fig. 4. Depletion of the sensitivity appearing around  $z = 0$  under the condition of  $b_w = 6.5 \mu\text{m}$ ,  $a = \infty$  and  $d_0 = 7 \text{mm}$ . Two kinds of diffuser are used whose r.m.s. roughness are  $0.92 \mu\text{m}$  ( $\text{---} \Delta \text{---}$ ) and  $7.5 \mu\text{m}$  ( $\text{---} \circ \text{---}$ ).

#### 4. Improvement of the velocity sensitivity

Using the equations and figures presented in the last section, we derive some conditions for raising the velocity sensitivity. It may be concluded from eq. (4) and fig. 2 that smaller values of  $d_0$  and  $b_w$  make the sensitivity  $l/l_0$  higher. Further, from eq. (8) and fig. 2, larger value of  $|z - d_0|$  gives higher sensitivity.

Fig. 5 demonstrates the dependence of the sensitivity on  $z$ , which is obtained experimentally for various values of the beam waist radius  $b_w$ . Because the values of  $b_w^0$  shown in fig. 5 are estimated by the diverging angle of the illuminating beam, it must be noticed that the real radii may be larger than the given values of  $b_w^0$  in fig. 5 by the aberrations of the focusing lens, especially for smaller values of  $b_w$ . It can be seen from fig. 5 that the difference of the experimental sensitivity from the calculated values shown by the dotted lines is large for the region that gives high sensitivity.

Especially, under the condition of equal extent of the contributing object area, i.e.,  $e^2 = \text{constant}$ , eq. (4) shows that the shorter  $R$  gives the higher sensitivity. It is also seen from eq. (2) that the value of  $R$  takes the minimum value  $2z_R$  under the condition of  $z = z_R = b_w^2/\lambda$ .

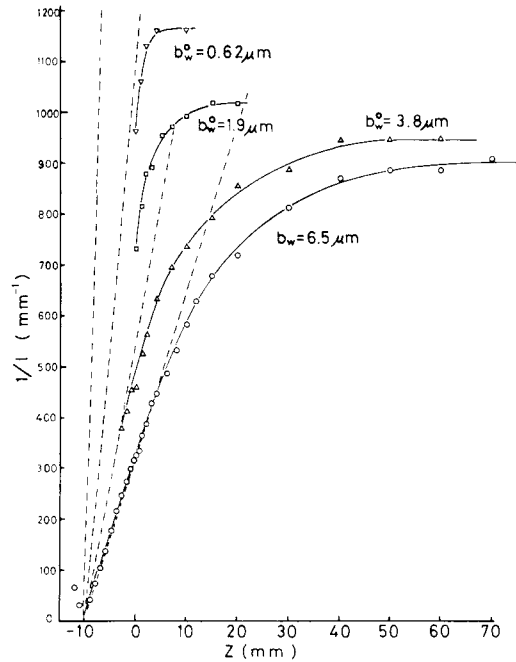


Fig. 5. Velocity sensitivity obtained experimentally for various values of the radius  $b_w^0$  of the beam waist. Calculated values from eq. (8) are shown in dotted lines.

#### 5. The sensitivity of the velocimeters using a spatial filter [5] or cross correlation technique

The sensitivity discussed in the above sections belongs to the velocimeters represented by fig. 1 which utilize both lateral translation and temporal change in the structure of the speckles produced in the detecting plane.

There are other types of speckle velocimeters whose signals are due to the lateral translation only, such as the velocimeters using a spatial filter or two point cross correlation technique.

In those cases, the sensitivity could be defined by the inverse of the object displacement  $l_0$  producing the lateral shift of the speckles, the amounts of which corresponds to the period of the spatial filter or the distance of the two detecting points, which are used to take the cross correlation. Because the velocity of the speckle translation is  $(1 + d_0/R)$  times of object velocity, and the value of  $s$  could be chosen as the average size of speckles  $2\lambda d_0/b$ , the displacement is represented by

$$l_0 = \frac{2\lambda d_0}{(1+d_0/R)b} = \frac{2d_0 [\lambda z_R (z^2 + z_R^2)]^{1/2}}{z^2 + d_0 z + z_R^2} \quad (10)$$

and its inverse gives the sensitivity.

## 6. Conclusions

The sensitivity of the speckles velocimeters shown in fig. 1 is studied and the following conclusions are obtained.

(1) The sensitivity has a fairly strong dependence on some parameters of the optical set-up configuration. In general, the condition of large  $|z - d_0|$ , small values of  $b_w$  and short  $d_0$  gives high sensitivity.

(2) The sensitivity is minimal when  $z = -d_0$ . That is, when the position of the illuminating laser beam waist coincides with the detecting pinhole.

(3) If the contributing area of the object is limited by an imaging lens or a field aperture, there appears a maximal sensitivity for a value of  $z$  in some cases.

(4) Under the condition of equal spatial resolution in the object plane, the sensitivity becomes maximal when  $z = z_R$ .

(5) The depletion of the sensitivity arises around  $z = 0$  and its magnitude depends on the roughness of the object surface.

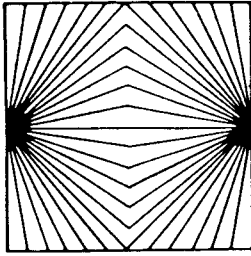
The sensitivity of the velocimeter using a spatial filter or two point cross correlation technique is also discussed.

## Acknowledgement

This study is financially supported by the foundation of Hattori Hokokai and a Scientific Research Grant-In-Aid (No. 56460057) from the Ministry of Education, Science and Culture, Japan.

## References

- [1] P.N. Pusey, *J. Phys. D9* (1976) 1399.
- [2] N. Takai, T. Iwai, T. Ushizaka and T. Asakura, *Optics Comm.* 30 (1979) 287.
- [3] J.D. Gaskill, *Linear systems, Fourier transforms, and optics* (J. Wiley and Sons, Inc., 1978).
- [4] I. Yamaguchi, S. Komatsu and H. Saito, *Japn. J. Appl. Phys. Suppl.* 14-1 (1975) 301.
- [5] G. Stavis, *Instrum. Control Syst.* 39 (1966) 99.



# スペックルを利用する MTF測定

小松進一、大頭仁

## 1. はじめに

光学系の結像性能を表わすのにOTF (Optical Transfer Function) が広く用いられている。これは電気系において周波数特性を表わす伝達関数に相当するもので、ある空間周波数の正弦波格子縞がどれだけのコントラストと位相ずれをもって像面上に結像されるかを示す。とくにそのコントラスト特性に注目したものをMTF (Modulation Transfer function) と呼び、これはOTFの絶対値にあたる。

OTF測定法として、これまでに種々の方法が開発されてきたが、従来の方法を分類すると<sup>1)</sup> おおまかにいって

- 1) 正弦波格子像のコントラストと位相を求める。
- 2) 線像(あるいはエッジ像)をフーリエ変換する。
- 3) 瞳関数の自己相関を横ずらし干渉計で測定する。
- 4) ランダムチャートとその像との相互相関を用いる。

のようになる。これらのほとんどについて電気系とのアナロジーが成り立つが、3)の方法は、点像強度分布のフーリエ変換がちょうど瞳の自己相

関にあたるという光学系に特有な性質の上に立脚している。

近年、レーザ・スペックルの応用が活発になり、光学系の結像性能評価にも利用されだした。そのなかには、上記4)でのランダムチャートとしてスペックル模様を用いる<sup>2)</sup>といった比較的単純な応用もあるが、スペックル独特の性質を使ったものもいくつかみられる。Sawatari<sup>3)</sup>らは、平行なレーザ・ビームを入射させたレンズの焦点近傍にすりガラスを置き、これによって生じたスペックルの粒径が、すりガラス上でのビーム径に反比例することを利用した像面(焦点面)検出法を提案している。焦点面における点像振幅分布はレンズの収差を反映しており、良いレンズほどスペックルが大きくなるので、これはレンズの評価にも応用できると考えられる。また、Tanner<sup>4)</sup>は、焦点がフィルム面に平行な相対運動をするときに起きるスペックルの移動の速さが、焦点とフィルムの間隔に反比例することを利用して、細いビームをレンズ瞳面のいろいろな点に入射させたときの焦点ずれを求め、これから歪曲を除く3次および5次の収差係数を測定している。

最近になってGrover<sup>5)</sup>は、2枚のまったく同  
両筆者は早稲田大学理工学部応用物理学科

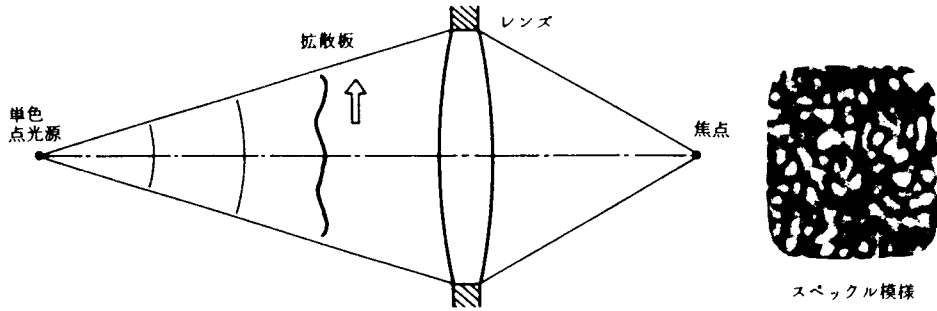


図1 光学系の焦点面付近に生ずるスペックル

じ拡散板（スペックル模様を撮影したフィルム）を少しずらして重ね、これをレンズ瞳面に置いて横ずらし干渉計を構成し、MTF測定を行なっている。2枚の拡散板上の各対応点から散乱される光の振幅は、互いにずれた点での瞳関数の値に比例しており、これらを干渉させることによって瞳の相関が得られる。

本稿でこれから述べようとするMTF測定法<sup>6)</sup>は、拡散板の面内移動によってスペックル模様の形状が時間とともに変化し、しかもその割合が波面収差すなわち瞳関数に依存することを利用するものである。従来の方と比べかなり異質であるが、同時に2枚の拡散板を置く代わりに、1枚の拡散板が時間経過に従って異なった時刻において複数の拡散板の役割を果たしていくと解釈すれば、Groverらの方法と共通するところがあり、しいて分類すれば前記の3)に入れることができる。ただし本方法は他の横ずらし干渉計と本質的に違って強度干渉を利用しており、したがって信号処理法や光学系調整の容易さなど、実際面においても全く異なった特徴をもっている。

以下の各章において、本方法の原理と特徴、マイクロコンピュータを用いた信号処理の自動化<sup>7)</sup>と測定値の安定性ならびにその他の問題点について実験データをまじえて紹介していきたい。

## 2. 原理と特徴

レーザを拡散面に照射すると、散乱光の届くと

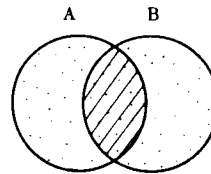


図2 スペックル形成に寄与する拡散面の領域

ころには、回折界と像界とを問わず、スペックル模様と呼ばれる不規則な干渉縞が生じる。図1の光学系に拡散板を挿入した場合も同様で、レンズの後方にも写真で示されるようなスペックル模様があるが、その統計的性質（たとえばスペックルの粒径など）は、拡散板が静止している限りレンズの収差に依存しないことが明らかにされている。<sup>8)</sup>

今、拡散板を矢印の方向に面内移動させて、とくに焦点面上のスペックルがどのように変化するかを考えてみよう。一般に収束球面波で透過物体を照明すると、焦点面上にはその物体のフーリエ変換像が得られるが、<sup>9)</sup> 図1の場合にも焦点面上のスペックル模様は拡散板直後における光の複素振幅分布のフーリエ変換像になることが示される。したがってフーリエ変換の性質から、拡散板が面内移動してもスペックル模様は変化せず、その中の1点における光強度は一定となることが期待される。

ただし、これは理想レンズの場合にのみ成り立つことであり、実際には瞳の大きさが有限なのでレンズにとりこまれる拡散板上の領域がその移動

とともに変化する。この領域は拡散面上への瞳の投影であり、図2で示されるように、ある時刻においては拡散面上のAの部分を含め、さらなる時間の経過後にはBの部分を含める。図からわかるように、斜線で示されるAとBの共通領域はそれぞれの時刻におけるスペックル形成の両方に寄与しており、残りは独立な寄与領域となる。斜線部分の面積が大きいほど2つのスペックル模様は似通ったものとなるが、時間の経過とともにこの

面積は減少し、スペックル模様の類似性は次第に失われてゆく。この結果、焦点面内の1点における光強度はゆらぐようになり、時間とともに図3(a)のように変化する。レンズに収差があると理想的なフーリエ変換からさらにずれ、この傾向は一層助長される。斜線部分に含まれる各点がAに属する場合とBに属する場合には異なった瞳上の位置を含め、受ける位相の変化が違ってスペックル形成に寄与する仕方がもはや同じではなくなるからである。

以上のことから、焦点面上に生ずるスペックル模様の変化の様子は瞳の形と波面収差(すなわち瞳関数)に強く依存し、さらには瞳関数の自己相関と密接な関係があると推測される。実際、Huygens-Fresnelの原理に基づいて焦点面内での波動場をFresnel近似を用いて導き、さらにこれが複素ガウス過程に従う<sup>10)</sup>と仮定すると、強度ゆらぎ*i(t)*の自己相関*C<sub>i</sub>(τ)*が比例係数を除いて次のように表わせる。<sup>6)</sup>

$$C_i(\tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} P(x) P^*(x + \alpha\tau) dx \right|^2 \quad (1)$$

ただし 
$$\alpha = \frac{(a+b)v}{a} \quad (2)$$

で、*P(x)*は瞳関数を表わし、速度*v*の拡散面が光源から*a*で瞳からは*b*の距離にあるとした。(1)式中の積分は瞳関数の自己相関で、これを正規化したものがレンズのOTFに等しく、空間周波数*f*と遅延時間*τ*との換算は、光の波長を*λ*、瞳から

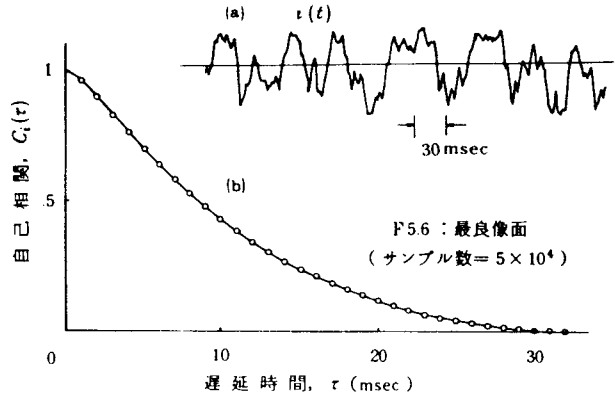


図3 光強度ゆらぎとその自己相関(実験値) 焦点面までの距離を*c*として

$$f = \frac{\alpha}{\lambda c} \tau \quad (3)$$

で与えられる。<sup>11)</sup>

強度ゆらぎの自己相関*C<sub>i</sub>(τ)*は、実際のデータを用いて計算すると図3(b)のようになるが、これを開平して横軸を空間周波数で目盛り直せばOTFの絶対値、すなわちMTFが求まるわけである。

以上が本方法の原理のあらましであるが、これから生まれるOTF測定法としての特徴をまとめると次のようになる。まず長所としては、

- 1) すりガラスなどの拡散板を使うだけで特別なチャートが不要である。
- 2) 1点での光強度ゆらぎを検出すればよいので走査スリットがいらない。
- 3) 零周波数における値が直接求まる。
- 4) 光学系、信号処理系の構成が簡単で安価である。
- 5) 焦点面内のかなり広い範囲にわたって(1)式と同じ結果が得られるので光学系の調整が容易である。
- 6) 実際の使用状態に近い条件で測定が可能である。

ことがあり、短所としては

- 7) このままではOTFの位相が求まらない。
- 8) 5)と裏腹の関係にあるが、光を拡散して使用するので光の有効利用の点で問題がある。
- 9) ランダム信号を扱うので平均操作を必要とす

る。

10) 拡散板を移動するためのスペースがある。

ことなどがある。したがって簡便な測定装置が必要とされる用途やレンズ製造工程でのオンライン検査などに向けた測定法であると考えられる。

### 3. 信号処理

本方法の初期の実験においては、強度ゆらぎの自己相関を求めるのにデジタル相関計を使用していた。<sup>6)</sup> これは比較的

高価なことと、開平や正規化などの処理が実時間でできないなどの点で実用化に対する一つのネックになっていた。近年の半導体技術の進歩によって非常に安価なマイクロプロセッサが簡単に手に入るようになり、この問題の解決に役立っている。<sup>7)</sup>

ただし演算速度が比較的遅い関係で、ソフトウェアにより相関計算を実行することはかなりの時間を要するため、ここではWiener-Khinchineの関係式に基いて、図4(a)のようにフーリエ変換を2回施して相関を得ている。<sup>12)</sup> 実際の手順は図4(b)のフローチャートに示されており、安定な結果を得るためにNA回の加算平均を行なった後、バイアスを差し引き、開平と正規化の一連の処理を施している。フーリエ変換は256点のFFTを用いたが、CPU(R6502)のクロック周波数が1MHzなので、これだけで約2秒を要している。Z80など4MHzのものも出回っているのをこれを使用することにより若干の改善が見込まれるが、測定時間短縮のために何らかの根本的改良が必要である。

### 4. 装置と結果

測定装置の概略を図5に示す。出力5mWのHe-Neレーザーからの光を20倍の顕微鏡対物レンズで絞って点光源とし、直径25cmのすりガラス円板を照射する。円板は直流モータで駆動し0.5 r.p.m.の割合で回転している。焦点面上に生じたスペックル模様

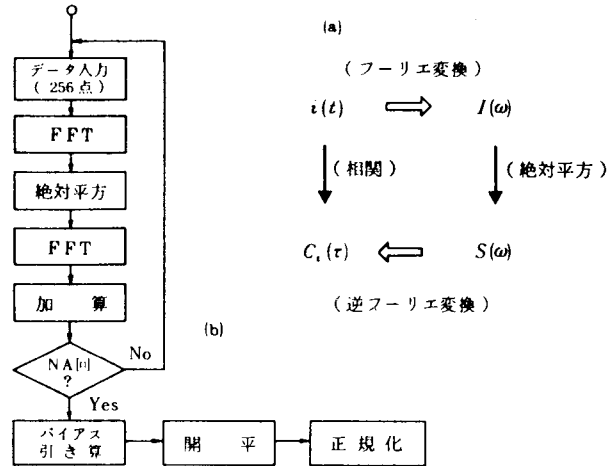


図4 FFTを用いる相関計算とMTF測定の手順

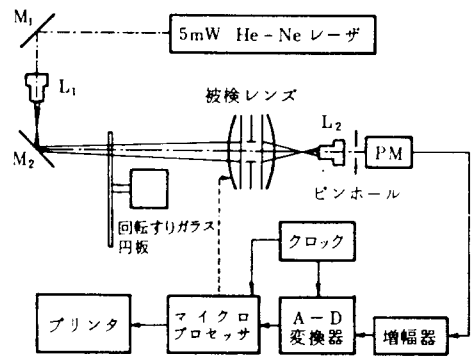


図5 測定装置の概略

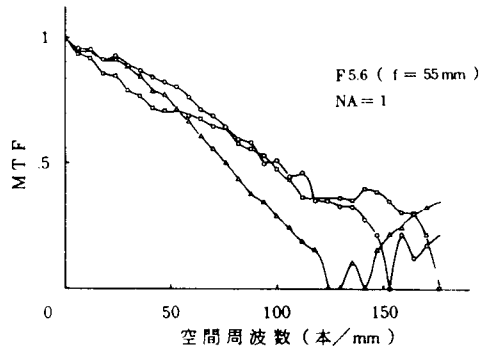


図6 MTFの測定例(加算平均をしない場合)

レンズと5 $\mu\phi$ のピンホールでとり出し、フォトマルで電気信号に変え、AD変換後マイクロプロセッサで処理をする。AD変換データは外部クロックに同期したインタラプト処理によってとりこまれており、サンプリング周期は現在のところ0.1msecまでであるが、DMA転送などの手段に

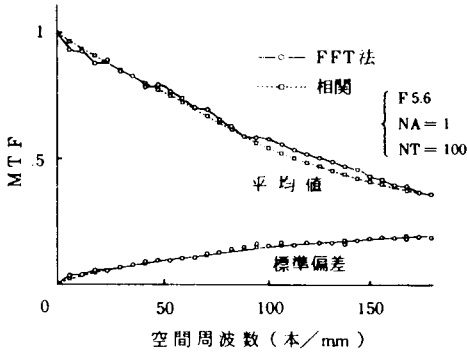


図7 MTF測定値の平均値と標準偏差（加算平均をしない場合）

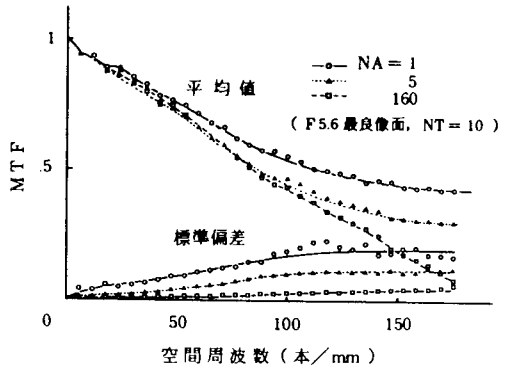


図8 加算平均したMTFの平均値と標準偏差

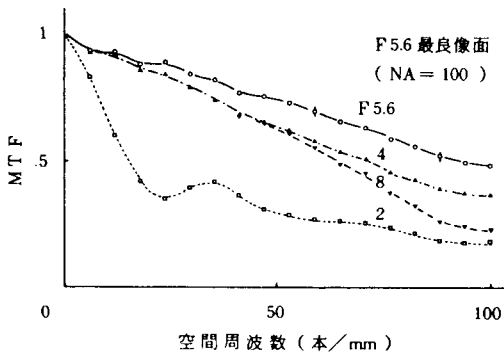


図9 MTFの絞り値に対する依存性（F5.6の最良像面で測定）

よりさらに短くすることが可能である。被検レンズの画角の選択や最良像面の検出などをプロセッサによって制御することは検討中で、今のところ信号処理と入出力についての自動化にとどまっている。

被検レンズとして焦点距離 55mmの写真レンズとして用いたMTFの測定結果例を次に示す。図6に加算平均を施さない場合の結果をいくつか掲げた。特に高周波領域においてばらつきが目立っている。これを $10^2$ 回繰り返して推定した平均値と標準偏差を図7に示す。図中の点線は相関を定義通りに計算したもので、両者の標準偏差はほぼ同程度であるが、平均値に関してはFFT法による結果に若干の凹凸がみられる。これは適当なウィンドー操作によって除くことができると思われ

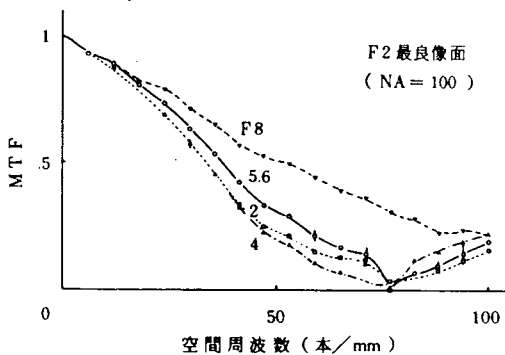


図10 MTFの絞り値に対する依存性（F2の最良像面で測定）

る。加算平均を行なった場合の測定値の安定性が図8に示されている。これからわかるように、5回程程度の平均をとれば、100本/mmまでの低周波数領域で十分安定した結果が得られる。

絞り値を変えた時のMTFの変化が図9および図10で、これらはそれぞれF5.6およびF2（開放）における最良像面での値である。このレンズはF5.6で焦点が合った時に最も良いMTFをもち、また絞り開放でピント合わせをした場合にはF8まで絞りこんだ時のMTFが最も良いということが、図から推測できる。

焦点はずれのMTFを求めるには、その分だけ受光系を光軸方向にずらして測定を行えば良い。図11が結果をまとめた一例で、横軸を受光系の位置にとり、特定の周波数（ここでは12本/mm



と30本/mm)に対するMTF値の変の様子を表わしている。

この他に光軸に垂直な面内で受光点を移動しても測定値にほとんど影響を与えないことや、異なった波長(Ar<sup>+</sup>レーザの488nm)についても良い結果が得られることを実験によって確かめた<sup>13)</sup>が、紙面の都合で省略する。

## 5. ま と め

レーザ・スペックルの時間的変動を利用するMTF測定法の原理と概略およびマイクロプロセッサによる信号処理の自動化について紹介した。

この方法によりきわめて簡便な測定システムが構成できるが、MTF曲線の全体を良い精度で求めようとする、かなりの測定時間を要する。最良像面の自動検出のためには、特定の周波数に対するMTF値や光強度ゆらぎの零交叉数を用いて短時間のうちに結像性能を評価するなどの工夫<sup>13)</sup>が必要であろう。

現在、屈折率分布型レンズや光ビデオディスク用レンズの評価に本方法を用いることを検討している。

## 参 考 文 献

- 1) 写真レンズとレスポンス関数(久保田広監修; 光学工業技術研究組合, 1961) p. 28, 光学技術ハンドブック(久保田広編集; 朝倉書店, 1968) p. 255.
- 2) M. Françon, "Laser Speckle and Applications in Optics" (Academic Press, London, 1979) p. 136.
- 3) T. Sawatari and A. C. Elek, Image plane detection using laser speckle patterns, Appl. Opt. 12 (1973) 881.
- 4) L. H. Tanner, Camera testing by use of speckle patterns, Appl. Opt. 13 (1974) 2026.
- 5) C. P. Grover and H. M. van Driel, Auto-correlation method for measuring the transfer function of optical systems, Appl. Opt. 19 (1980) 900.
- 6) I. Yamaguchi, S. Komatsu and H. Saito, Dynamics of speckles produced by a moving object and its applications, Japan. J. appl. Phys. 14 (1975) Suppl. 1, 301.
- 7) 小松進一, 大頭仁, スペックルを利用するMTF測定自動化, 昭和55年秋応物学会予稿集 p. 46.
- 8) L. H. Enloe, Noise-like structure in the image of diffusely reflecting objects in coherent illumination, Bel. Sys. Tech. J. 46 (1967) 1479.
- 9) J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics" (McGraw-Hill, 1968) p. 75, p. 83~90.
- 10) L. Mandel, "Progress in Optics" ed. E. Wolf. (North-Holland, Amsterdam, 1963) Vol. 2, p. 181.
- 11) たとえば9)のp. 115.
- 12) 日野幹雄, "スペクトル解析"(朝倉書店, 1977)
- 13) 小松進一, 大頭仁, スペックルを利用する光学系結像性能の簡易評価法, 昭和56年春応物学会予稿集 p. 101.

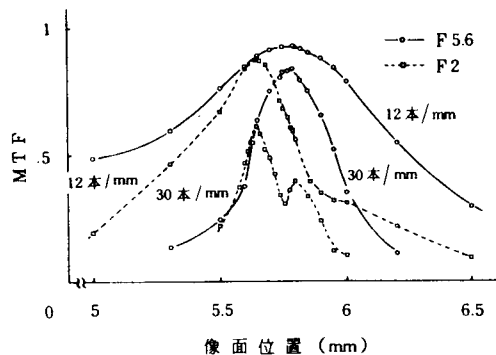


図11 焦点ずれに対するMTF値の変化

J. Opt. Soc. Am. Vol.72, No.12, 1743.

**TuR3. Evaluation of Optical Systems Using Dynamic Laser Speckles.** S. KOMATSU, T. MORIOKA, AND H. OHZU, *Department of Applied Physics, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 160, Japan.*—The lens-evaluation method based on the dynamic properties of laser-produced speckles is investigated and developed to a real-time modulation-transfer-function measuring system controlled by a microprocessor. The principle of the present method depends on the fact that the light-intensity fluctuations that are due to laser speckles contain the information about the aberration of the optical system, and the autocorrelation of the system corresponds to the absolute square of the optical transfer function. One of the most important advantages of this method is the redundancy that permits rough adjustment of the light detecting point within the focal plane. This method is applied to a pick-up lens for an optical video disk and some graded-index-rod lenses with high numerical apertures as well as to an ordinary type of camera lens, and reasonable experimental results are obtained. A fast-Fourier-transform algorithm is adopted to calculate the autocorrelation to shorten the measuring time. Some methods to find the best focal position are also studied experimentally, and the zero-cross distribution along the optical axis is found to be most effective. Infrared speckles produced by a diode laser are also shown to be useful. (13 min.)

〈学会原著〉

## レーザー・スペckルによる 眼軸長精密測定の可能性

大頭 仁・小松 進一\*

### 結 言

屈折異常が軸性かあるいは屈折性を判定するための、簡便かつ精密な測定法の開発が望まれている。また、最近では、白内障患者の視力回復手術として眼内レンズ(人工水晶体)の挿入が行われるようになり注目を集めているが、網膜上に像を正しく結ばせるには、眼軸長を知ることが重要である。

従来から、眼軸長測定には超音波エコーが用いられており、有効な方法であるが、ここでは、患者の負担を軽減し、精度と信頼性を高めるために、レーザー・スペckルを用いる光学的な自覚測定法の可能性を検討したので報告する。

### 原理と方法

レーザーのようなコヒーレントな光で照射された拡散面を眺めると、粒状性の模様が見える。これがスペckルあるいはスペckルパターンと呼ばれるもので、拡散面によって光の波面がランダムに乱されることによって生じる不規則な干渉縞模様であり、人工瞳孔などで瞳の大きさを制限すると、粒が大きくなって、より明瞭に認識できる。

拡散面を視線方向と垂直に移動させると、網膜上のスペckルも細かな構造を変化(ボイリング)させながら並進運動をする。スペckルの移動速度は眼球光学系の調節状態によって変化し、とくに近視状態と遠視状態では移動の向きが逆転することが知られており、この現象を応用した屈折測定も報告されている<sup>1), 2)</sup>。

この現象の解析は、ランダム過程の理論と波動光

学的な手法に基づいて、被験者の網膜上に生ずる光の強度とその相関関数を計算することによって行える<sup>3)</sup>。導出の細かい過程は省略して、結果だけを述べると、図1の光学系において被験者の網膜上に生ずるスペckルの移動速度Vの拡散板の速度vに対する比Mは、

$$M \equiv \frac{V}{v} = \frac{S'}{S} \left[ 1 + \left( \frac{S}{S'} \right)^2 \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{S} + \frac{S'}{S^2} \right) D \right] \quad \dots\dots(1)$$

と表わすことができる<sup>4)</sup>。ここで、Rは照射光波面の曲率半径、Dは焦点はずれ量である。また、S、S'はそれぞれ拡散面とその像の主平面からの距離を媒質の屈折率で除した換算長であり、これらはレンズの公式により、光学系の全屈折力aと、

$$a = \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} \quad \dots\dots(2)$$

の関係で結ばれている。

換算眼軸長、

$$L = S' + D \quad \dots\dots(3)$$

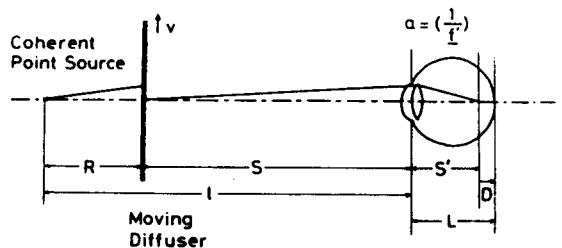


図1 測定原理概念図

S', L, Dは眼内液屈折率で除した換算値を用いる。拡散板は一定速度vで動く。

\*早稲田大学理工学部

を用いて、(1)式を書き直し、S'とDを消去すると、

$$M = \frac{(al - 1)L - l}{R}, \text{ ただし } l = R + S \quad \dots\dots(4)$$

を得る。

横軸をRにとり、Lをパラメータとして、この関係を表わしたものが図2である。LとRの値の違いによってMは大きく変化するので、適当な条件の下でMを測定することにより眼軸長Lを精度良く逆算できる可能性をうかがわせる。

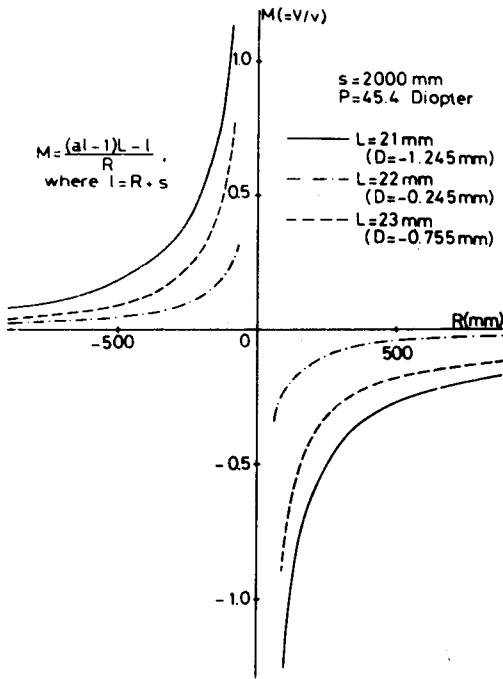


図2 スペックルの移動速度

横軸Rは波面の曲率半径。パラメータLは眼軸長。移動速度Vを拡散板の速度vで除してある。

前述の屈折測定においては、スペックルの移動速度がゼロになり、ホイリングだけを示す状態を検出しているのであるが、このときの条件は、M=0、すなわち

$$\left(a - \frac{1}{L}\right)l - 1 = 0 \quad \dots\dots(5)$$

である。(5)式は、aとLの2つの未知数を含み、測

定できる変数はlだけなので、ホイリングの状態を検出するだけでは眼軸長を分離測定することはできないことがわかる。

したがって、方程式の数を増すために、ホイリングだけでなく、有限の大きさのスペックル移動速度を測定することにより、眼軸長を分離することを試みてみる。レーザー光の波面の曲率半径をたがいに異なる値R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>に選んだときに、スペックルの移動速度がM<sub>1</sub>v、M<sub>2</sub>vとすると

$$\begin{cases} M_1 = \frac{(a l_1 - 1)L - l_1}{R_1} \\ M_2 = \frac{(a l_2 - 1)L - l_2}{R_2} \end{cases} \quad \dots\dots(6)$$

となり、これらを連立させて解くと、

$$\begin{cases} L = \frac{l_1 R_2 M_2 - l_2 R_1 M_1}{l_2 - l_1} \\ a = \frac{R_2 M_2 - R_1 M_1 + l_2 - l_1}{l_1 R_2 M_2 - l_2 R_1 M_1} \end{cases} \quad \dots\dots(7)$$

となり、なんらかの方法でM<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>が求まれば、眼軸長Lが分離して測定できることが示される。

### 問題点

前節では、曲率半径の異なるレーザー波面によって生じたスペックル移動速度の違いから、眼軸長と屈折力を分離測定できることが示された。すなわち、なんらかの方法で網膜上のスペックルの移動速度を測定すれば良いことになる。

通常の光学系の場合、これは容易に行えるが、眼球光学系の場合、直接網膜上で測定できないので難しい問題を含んでいる。移動視標の速度を変化させ、被験者がスペックル移動速度とのマッチングをとる方式では、移動速度が測定できずうまくいかないことを以下に述べる。

図1のスペックル観測系において、眼前にビームスプリッターを置き、移動視標を提示する。移動視標はインコヒーレント照明されており、眼球光学系の調節状態を一定に保つ役割を果たしている。移動指標までの距離をS<sub>T</sub>とすると、レンズの公式により

$$\frac{1}{S_T} + \frac{1}{L} = a \quad \dots\dots(8)$$

の関係がある。移動視標の速度 $v_T$ が網膜上のスペックルの移動速度 $v$ とマッチングがとれた状態では、

$$v_T = \frac{S_T}{L} V \quad \dots\dots(9)$$

が直接測定にかかる量なので、これと拡散面の移動速度 $v$ との比 $m$ を(4)式と(8)式、(9)式を用いて計算すると、

$$\begin{aligned} m &\equiv \frac{v_T}{v} = \frac{S_T}{L} \cdot \frac{(a l - 1) L - l}{R} \\ &= S_T \cdot \frac{(a - \frac{1}{L}) l - 1}{R} \\ &= \frac{l - S_T}{R} \quad \dots\dots(10) \end{aligned}$$

となる。上式は $L$ および $a$ を含まないから、 $m$ の測定から眼球光学系の諸常数を知ることはできないことがわかる。

### 結 語

レーザー・スペックルの移動速度から眼軸長を分離測定することの可能性を検討した。その結果、網膜上のスペックルの移動速度をなんらかの方法で知

ることができれば、眼軸長を屈折力から分離できることが示された。しかしながら、被験者が移動視標速度とスペックルの移動速度をマッチングさせる方式では、測定値に眼軸長の値が反映されないことがわかり、現状では難しい問題点を含んでいることが明らかになった。

本方法に関して、とくに問題点については北里大学医学部眼科教室の鷗飼一彦氏から適切なお助言とご教示いただいたことを付記し、紙面を拝借して感謝いたします。

なお、本研究は昭和57年度文部省科学研究費研究課題(No56460057)の一部として行われた。

### 文 献

- 1) Ingelstam, E. and Ragnarsson, S. : Vision Res. 12, (1972) p.411.
- 2) Ukai, K. and Ohzu, H. : Proc. of ICO Conference, Madrid (1978) p.59, 63.
- 3) Yamaguchi, I. and Komatsu, S. : Opt. Acta. 24, (1977) p. 705.
- 4) Ohzu, H. : Opt. Acta. 26, (1979) p.1089.

### 討 論

所 敬：この方法で他覚検査を行う可能性はありますか。〔答〕大頭 仁：眼底反射光を検出して、特にボイリングの状態の確認を行えば可能と思います。しかし、本方法の特徴は、調節を誘起する指標

がなく、調節とは独立に屈折測定のできるところと思っていますので、自覚測定用に通していると思います。他覚測定には、現在多種開発されているオートレフ方式が有利と考えています。