

## 写真レンズの光電的ピン出し装置

小瀬 輝 次

最近、レンズのピント位置測定に、光電的方法が採用されるようになってきた。これは多数のレンズの迅速検査と、個人差を無くす目的からである。この装置の試作研究にあたり、設計上の資料を得るために、従来の種々の方式を総合して紹介するかわら、理想レンズの defocus の場合について測定精度を吟味した。

### § 1. ピント位置と像評価

レンズのピント位置というのは、いうまでもなく、最も明瞭な像が出来るレンズの像面位置のことである。しかしながら、レンズによる点物体の像が幾何学的に拡がりのない点であれば、話はすこぶる簡単になるのであるが、実際のレンズでは、その口径が有限であるから、レンズの縁による光の回折現象があり、さらに、レンズの屈折面は通常球面を用いているので、このための結像の誤差も加わってきて、必ず点物体の像はある拡がりをもった円板状のものになる。これを錯乱円といい、その直径は写真レンズで数ミクロンから数十ミクロンの大きさである。このように点物体が拡がりを持つので、一般の物体の像は元の物体と比較して、必ずボケたものになる。したがって明瞭に像が出来るといっても、実際に観測する場合はボケをどの程度ボケとして判断しているかということになる。このボケ方は物体の形によって、ボケの目立つ形もあれば、あまり目立たぬ形もあり、またボケの識別域は人によって異なるから、このような測定では必ず物体による差異と、観測者の個人差が避けられなくなる。さらに、ピント位置を決めるという操作を考えてみると、像面をレンズに近づけたり遠ざけたりして、いろいろのボケた像の中から最もボケの少ないと認められる像を選び出して、その位置をピント位置と決めるのである。これはボケた像について一つの評価を行なっていることになる。すなわちレンズのピント位置を決めるということはレンズの心理物理的な評価の一つの応用問題であるといえる。

近年光学系の結像性能を像のコントラスト低下と空間周波数との関係に注目し、これを通信系のフィルターと対応させる考え方が盛んとなり、レンズの結像性能を空間周波数特性曲線（これをレスポンス函数\*という）で表示するようになってきた。この方法論の特色の一つはレンズ自体のレスポンス函数と受光系のそれを分離することができ、レンズの物理的な評価尺度を設定するのに非常に便利であるという点である。たとえば空間周波数を  $N$  line/mm としてレンズのレスポンス函数を  $R(N)$ 、受光系のそれを  $R'(N)$  とするとき

$$Q_2 = \iint_{-\infty}^{+\infty} R(N)R'(N)dN,$$

$$N_2 = \iint_{-\infty}^{+\infty} |R(N)R'(N)|^2 dN$$

等が用いられている。 $Q_2$  はコントラストの再現率の総和を出す考え方であり、information volume と呼ばれている。 $N_2$  は電気系に白色雑音を通る時の雑音電力に相当するものである。

このような物理尺度と心理量との関係を見つけさえすれば、心理物理的評価の問題もごく合理的な筋道で研究することができるわけである。

多数のレンズのピント位置を迅速に測定でき、かつ個人差を無くす目的で、最近光電的な測定法でピント位置を決定しようという要望があり、わが国でも測定機の試作が進められている。この光電的方法は単にレンズの検査の上で便利であるばかりでなく、上にのべた評価の観点に立つと、純粋に物理的評価で議論が進められるので、物理的評価と心理物理的評価の関連を研究する足がかりともなりうるものである。したがって評価法の研究上でも大きな意義があると考えられる。

光電的方式を大別すると

- (1) フーコーテストを光電化する
- (2) 物体と像の相互相関を測定する
- (3) レスポンス函数を比較測定する

の三つであろう。もちろんこの外にも各種の方式が試みられていると考えられるが、ここでは主として報文のあるものについてのみ考えることにした。

この中で第一のフーコーテストの方式は物理的には幾何光学的焦点位置を決め、感度については E.H. Linfoot の研究もあるので、ここでは簡単な紹介のみにとどめ、今まで余り詳しく論じられていない第2、第3の方式に重点をおいて解説することにしよう。

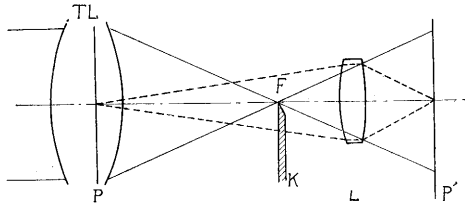
### § 2. フーコーテストの光電化

フーコーテストというのは、よく球面鏡の表面仕上テストに用いられるもので、これは一種のシュリーレン法である。

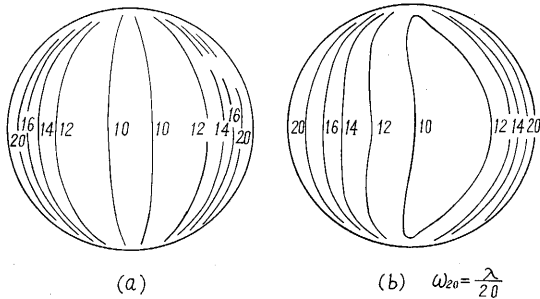
焦点面にナイフエッジを置き、その点像を cut するようにしてナイフエッジの後から球面を見ると、球面の凹

\* レスポンス函数の平易な解説書としては JCRA. Circular 1 (光学工業技術研究組合出版) がある。

凸が明暗となって見えるものである。レンズに応用するときは、第 1 図で  $F$  が焦点位置であるとするとき、こ

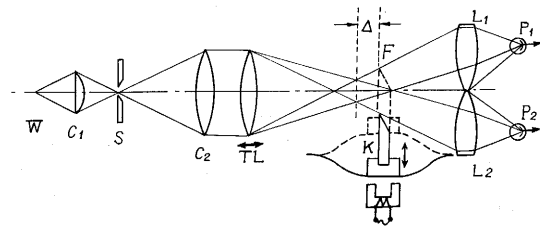


第 1 図 フーコーテスト



第 2 図 フーコーテストの瞳面等強度曲線

にナイフエッジ  $K$  を入れ、後の視野レンズ  $L$  を通してテストレンズ  $TL$  の瞳面を見るようにする。ナイフエッジが正しく焦点にある時は、第 2 図 (a) の等強度曲線のように瞳面は中心対称の強度分布を示すが、これが前後にずれると、(b) のように非対称になる。したがって視野の中の中心対称の 2 カ所を見るようにしておき、その明るさの差を検出するようにすればよい。このフーコーテストは幾何光学的な影で説明されていたが、E.H. Linfoot<sup>1)</sup> が顕微鏡の結像と同じ考え方で詳細に議論し、感度等を求めている。これを光電化したのは F. Hock<sup>2)</sup> でその光学系を第 3 図に示す。図で紙面に直角にスリッ



第 3 図 フーコーテストの光電化 (F. Hock の装置)

ト  $S$  をおき、これからの光はコリメーターレンズ  $C_2$  により平行光線となり、テストレンズ  $TL$  に入る。テストレンズの瞳面は  $L_1, L_2$  のレンズで光電管  $P_1, P_2$  上に結ばれる。ナイフエッジ  $K$  は電磁石でテストレンズの光束を上下に切る。  $TL$  の位置を調節して  $P_1, P_2$  の光量を等しくすれば、その時の  $K$  の位置は  $TL$  の焦点になるわけである。E.H. Linfoot によれば理論的には  $P_1, P_2$  の強度差の 40% を検出できるとすると、

波面収差にして波長の  $1/20$  にひとしい defocus を検出できるといっている。像面で幾何光学的焦点位置から  $(\delta z)$  mm だけ defocus を与えた時の波面収差係数  $\omega_{20}$  は  $\omega_{20} = (\delta z) / 8F^2$  ( $F$  は口径比) で与えられるから  $d\omega_{20} = \lambda/20$  ( $\lambda$  は波長) とおくと、この場合の defocus に対する感度は

$$d(\delta z) = \frac{2}{5} \lambda F^2$$

となる。Rayleigh の焦点深度は  $|\epsilon| \leq 2\lambda F^2$  で与えられるから感度対深度比として  $\sigma = d(\delta z) / |\epsilon|$  を定義すると

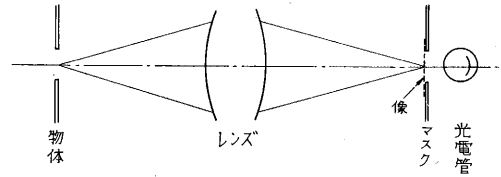
$$\sigma = \frac{1}{5}$$

となる。すなわち深度の 5 倍も感度があることを示している。なお他の方式について  $\sigma$  を検討したが、いずれも  $F$  の函数となる。フーコーテストの  $\sigma$  が口径比  $F$  に無関係なことは、これが幾何光学的な焦点を示すためと考えられる。

### § 3. 物体と像の相互相関を測定する方式

#### (1) 一般論

第 4 図に示すように像面にレンズの倍率を考慮して、



第 4 図 相互相関法

物体と幾何学的に同じ図形のマスクを置く。物体のレンズによる像をこのマスク上に作らせ、マスクを通る光束を背後の光電管で測定するようにする。これはレンズ、あるいはマスクの位置を調節して、物体の像が最も鮮鋭にマスク上に作られたとき、透過光は最大になるから、このような位置をピント位置にしようというものである。

この場合どのような物理量でピント位置を決めることになるかをまず考えてみよう。

マスクの強度分布を  $B(xy)$ 、マスクと同じ図形の物体の像を  $B'(xy)$  とする。この時、像の原点とマスクの原点が互いに  $\tau, \xi$  だけずれているとすると、マスクの透過光量  $I(\tau, \xi)$  は

$$I(\tau, \xi) = \iint_{-\infty}^{+\infty} B(x, y) B'(x-\tau, y-\xi) dx dy \quad (1)$$

である。

これは物体と像の相互相関であるから、このレンズの点像の強度分布を  $r(x', y')$ 、物体の自己相関を  $\phi_{ii}(x', y')$  とすると (1) 式は

$$I(\tau, \xi) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \phi_{ii}(\tau+x', \xi+y') r(x', y') dx' dy' \quad (2)$$

とかける。

(2) 式は点像と自己相関の convolution 積分を示しているから、スペクトル領域で考えれば、それらの積で与えられる。

すなわち空間角周波数を  $s, t$  として  $I(\tau, \xi)$  のスペクトルを  $P_{io}(s, t)$ ,  $\phi_{ii}$  のスペクトルを  $P_{ii}(s, t)$ , レスポンス関数を  $R(s, t)$  とすると

$$P_{io}(s, t) = P_{ii}(s, t) R(s, t) \quad (3)$$

の関係式が成立する。

この式は久保田・大頭\*が、ランダムチャートを用いてレスポンス関数を測定するのに利用した式である。

さて、ここで

$$V = \iint_{-\infty}^{+\infty} P_{io}(s, t) ds dt \quad (4)$$

なる積分を考えると、これは  $\tau = \xi = 0$  の場合の相互相関の値であるから

$$V = I(00) = \iint_{-\infty}^{+\infty} B(x, y) B'(x, y) dx dy$$

である。したがって物体と像の原点が正しく一致した場合のマスクの透過光量は (3), (4) より

$$I(00) = \iint_{-\infty}^{+\infty} R(s, t) P_{ii}(s, t) ds dt \quad (5)$$

で与えられる。

物体の形を決めると  $P_{ii}$  は決まるから、defocus による  $R(s, t)$  の変化を知れば、上式でその時の光量変化を計算することができる。具体的な計算例は後で述べるとして、ここで、もし物体の大きさが線像の拡がりに対して十分に小さいとすると、 $R(s, t)$  に対して  $P_{ii}(s, t) \approx 1$  と見なせるから

$$I(00) = \iint_{-\infty}^{+\infty} R(s, t) ds dt = r(00)$$

となり、これは点像の中心強度にほかならない。すなわちこのような場合は Strehl の definition を測定していることになる。

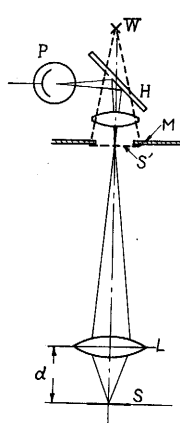
一般には  $R(s, t)$  と  $P_{ii}(s, t)$  との積であるから、 $R(s, t)$  に  $P_{ii}$  なる weight をかけたものである。もし  $P_{ii}$  がフィルムと肉眼のレスポンス関数を組み合わせたものであれば、 $I(00)$  は前にのべた information volume となる。したがって  $I(00)$  は一般には一種の information volume ということができる。

$P_{ii}$  を求める手順を考えてみると、物体関数の自己相関を求め、つぎにこれをフーリエ変換したものである。一方レスポンス関数をもとめる手順を考えてみると、レ

ズンの瞳の振幅分布 (以下これを瞳函数という) の自己相関がレスポンス函数であり、また線像の強度分布のフーリエ変換もレスポンス函数である (したがってレスポンス函数のフーリエ逆変換は線像の強度分布となる)。そこで今の場合、物体函数と瞳函数を対応させると、フーリエ変換と逆変換は数学的に差のないものと考えれば、 $P_{ii}$  は線像の強度分布に対応することがわかる。たとえば、物体がスリットの場合は  $P_{ii}$  はスリットの回折像の強度分布と同じ函数形となることがわかる。

このように物体の形を変えれば  $P_{ii}$  が変わるから、defocus について、最も鋭敏な物体があることも予想される。次に従来試みられている物体について具体的に考察してみよう。

(2) 物体が円孔の場合



第5図 円孔マスクを用いた相互相関法 (L. Baxter)

これは L. Baxter<sup>3)</sup> が顕微鏡の自動焦点調節に利用しているものである。L. Baxter の装置の光学系を第5図に示す。資料  $S$ , 像面  $S'$  とし、ここに円孔のマスク  $M$  をおき、 $M$  を通る光は対物レンズ  $L$  で資料  $S$  上に  $M$  の像を結像する。この光は  $S$  の表面反射 (顕微鏡であるから cover glass がある) によって、もとの  $M$  上に像をつくる。したがって、この場合は物体がとりもなおさずマスクとなっているわけである。 $M$  を通る光は半透明鏡  $H$  で反射され、光電管  $P$  に入る。 $M$  と対物レンズの間隔は固定しておき、物体とレンズの間隔を変えると、 $S$  からの反射像は defocus によってボケるから  $M$  の透過光が変化する。それで、これが最大になるように間隔を調節すれば自動的に焦点を保つことができるわけである。

この装置の解析に前にのべた一般論の結果を利用するには、光が対物レンズを二度通るといふことと、coherency の問題を考えなければならないが、ここでは簡単のため、defocus による取差量は近似的にレンズを二度通るために二倍になると考え、また coherency の問題は incoherent と仮定してしまう。

物体およびマスクが半径  $\rho$  の円孔であるとするとき、さきにものべたように、瞳函数が円孔の場合の回折像が  $P_{ii}$  であるから

$$P_{ii}(s_0) = \frac{2\rho^3 \pi \mathbf{H}_1(2\rho s)}{(\rho s)^2} \quad (6)$$

で与えられる。ここに  $\mathbf{H}_1(2\rho s)$  は Struve 函数で、上式は一次元線像の強度分布である。

さて defocus の時のレスポンス函数  $R(s_0)$  は幾何光

\* 久保田広・大頭仁, J.O.S.A. 47 (1957) 666

学的に考えると錯乱円が半径  $\rho'$  の円板状と考えられるから

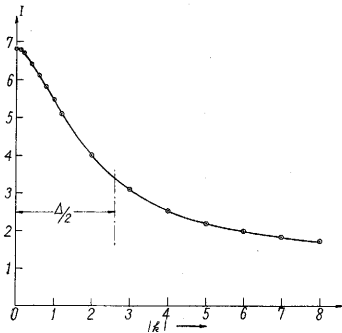
$$R(s_0) = \frac{2J_1(\rho's)}{\rho's} \quad (7)$$

ここに  $J_1(\rho's)$  は第一種 Bessel 函数である。

(6), (7) 式を (5) 式に代入して,

$k = \rho'/\rho$ ,  $\rho s = a$  とおき, また全光量  $\rho^2\pi = 1$  と正規化すれば

$$I(k) = 4 \int \frac{H_1(2a)}{a^2} \cdot \frac{2J_1(ka)}{ka} da \quad (8)$$



第 6 図 円孔マスクの場合の強度変化

れる。

ただし, 今までの理論に用いている座標寸法は実寸法にレンズの開口数をかけ, さらに, これを位相角になおした便宜的な寸法を用いているので, これを実寸法に換算するのはやや面倒である。したがって, これの計算は Appendix にゆずり, 本文では結果のみを示すことにする。

第 6 図を見てわかることは  $|k|=1$  の時  $slop$  は最大であるから感度もよい。したがって, マスクの大きさは点像の拡がりと同程度にするのが有利であることがわかる。

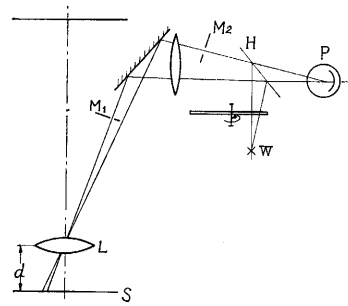
精度の計算は Appendix にゆずり, その結果のみを引用すると, 半径  $0.1\text{mm}$  の円孔の時, 許容される defocus 量は  $d(\delta z) = \pm 52F(\mu)$  となるので Rayleigh の深度との比をとり, 精度対深度比  $\nu$  は (a-7) 式より

$$\nu = 0.52\bar{\rho}/F$$

となる。もし  $\bar{\rho} = 100\mu$  であると  $\nu = \frac{52}{F}$  となり

これは精度の定義にもよるが, 必ずしもよい精度とはいえない。

さて第 7 図は像面の 2 カ所にマスクをおき, レンズと資料間の距離をかえ, それぞれの透過光の差を検出して, 両者が等しくなり, 差がなくなった時をもってピント位置にしようという, いわゆる零点法を用いる場合の光学系である。この場合, 二つのマスク  $M_1, M_2$  の間



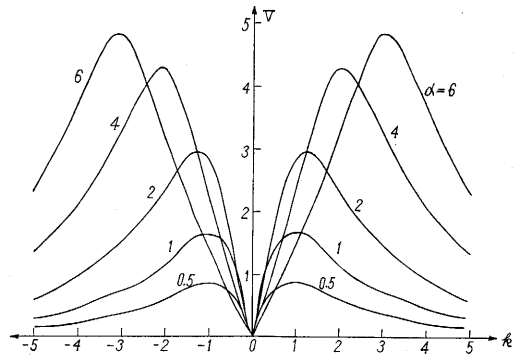
第 7 図 円孔マスクの零点法 (L. Baxter)

隔を  $D$  mm とし理想の像点からそれぞれのマスクまでの距離を  $(\delta z)_1, (\delta z)_2$  とすると  $k_1 = c(\delta z)_1$ ,  $k_2 = c(\delta z)_2$ ,  $c = \pi/2\lambda\rho F^2$ , さらに  $(\delta z)_1 - (\delta z)_2 = D$ ,  $\alpha = cD$  とおき, 任意の  $k$  に

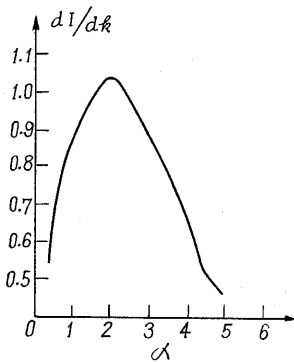
ついて  $k_1 = k - \frac{\alpha}{2}$ ,  $k_2 = k + \frac{\alpha}{2}$  とおくと, 二つのマスクの透過光の差  $V$  は

$$V = I\left(k - \frac{\alpha}{2}\right) - I\left(k + \frac{\alpha}{2}\right) \quad (9)$$

で与えられる。



第 8 図 零点法の場合の感度



第 9 図 円孔マスク零点法の場合の感度

$\alpha$  を parameter として,  $k$  による  $V$  の変化を示すと第 8 図のようになる。defocus をかえると  $k=0$  で谷となり, ここをピント位置とするわけである。この場合の感度は図で  $k=0$  付近の  $slop$  を用いることにすると, 第 9 図で  $\alpha=2$  の時が最大の  $slop$  となり感度は最大となる。

これから感度の高い最適マスク間隔  $D$  とマスク半径の関係が求められる。すなわち

$$D = 4F\bar{\rho}(\text{mm}) \quad (\bar{\rho} \text{ は mm 単位ではかる})$$

精度は図の谷の半値幅の  $\pm 1/20$  と考えると  $\alpha=2$  の時の半値幅から, (a-8) 式より

$$\nu = 0.09\bar{\rho}/F \quad (\bar{\rho} \text{ は } \mu \text{ 単位ではかる})$$

となる。もし  $\bar{\rho} = 100\mu$  とすると  $\nu = \frac{9}{F}$  となり一点法

\*  $k$  は半径の比であるから本来負となることはないが,  $\rho$  を半径とせず像面の radial 方向の座標と考えればこれは負になってもさしつかえない。

よりも6倍程度精度を上げることができる。

(3) 物体が格子の場合

物体が第10図(a)のように幅も間隔も  $p$  なる格子の場合は自己相関関数  $\phi_{ii}$  は同図(b)のように三角波形となりスペクトル  $P_{ii}$  は図(c)に示すように

$$P_{ii} = \delta(0) + \frac{4p}{\pi^2 n^2} \delta(ns)$$

ここに  $\delta(ns)$  はデルタ関数で  $n=1, 3, 5, \dots$

また  $s = \frac{\pi}{d}$

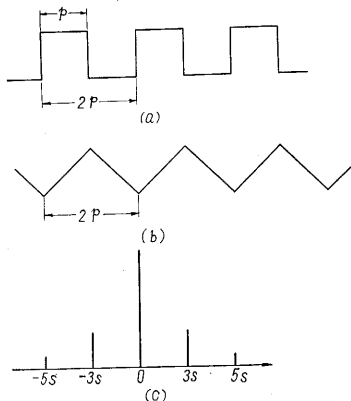
したがって(5)式より光電管への入射光量は

$$I(00) = 1 + \frac{4p}{\pi^2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{n^2} R(ns) \quad (10)$$

となる。

もし  $s$  が大きいと  $R(s, 0)$  内に第1項 ( $n=1$ ) しか入らぬから、この時は

$$I(00) = 1 + \frac{4p}{\pi^2} \{R(s) + R(-s)\} = 1 + \frac{8p}{\pi^2} R(s) \quad (11)$$



第10図 格子物体の場合の相互相関とスペクトル

となり周波数  $s$  のレスポンス関数の値のみになる。

したがって相互相関法も次に述べる特定周波数のレスポンス関数を比較する方法とまったく同じものとなるわけである。

物体とマスクを半周期だけずらす時は  $\phi_{ii}(p, 0)$  のスペクトルは高調波の符号が負になるのみであるから

$$I(00) = 1 - \frac{4p}{\pi^2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{n^2} R(ns) \quad (12)$$

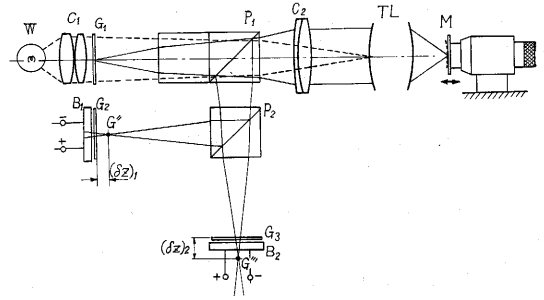
となる。

格子をそのまま用いる時はレンズの倍率の変化によって相互相関が取りにくいので、放射状チャート(ジメンスター)が用いられる。このチャートは周波数が半径の逆数で変化している連続チャートであるから  $I(00)$  を直接(10)式あるいは(12)式で求めることはむずかしいが、原理的にはこれらで考えて差し支えない。

第11図はジメンスターを用いた例で、現在小西六写真工業KKで試作中のものである。

ジメンスター  $G_1$  はコリメーターレンズ  $C_2$  の焦点に置かれ、またコンデンサー  $C_1$  で Köhler 照明されている。

テストレンズ  $TL$  の焦点付近に平面鏡  $M$  を置き、

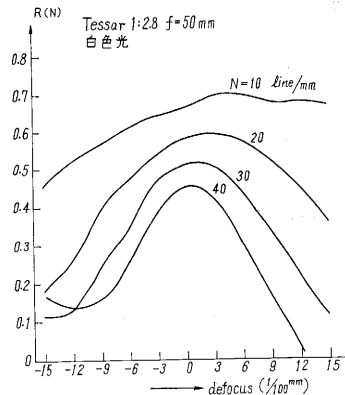


第11図 ジメンスターを用いた相互相関法 (小西六写真工業KK)

この上に  $G_1$  の像を結ばせる。この反射光は半透明鏡  $P_1, P_2$  によって  $G'', G'''$  の位置に像をつくる。ここに  $G_1$  と同じジメンスター  $G_2, G_3$  を置き、これで相互相関を行なわせる。ただし、 $G_1$  と  $G_2, G_3$  は白黒が反対になるよう半周期ずらしておく、また  $G_2, G_3$  の位置は相対的に僅かずらして零点法を行なわせる。これらのジメンスターの透過光は photocoell  $B_1, B_2$  で受けその出力の差を検出するようにする。この装置の特色は比較的機構が簡単であり、また光量が多く取れるので photocoell 等で済むことである。

§ 4. 特定周波数のレスポンス関数を比較する方式

特定周波数のレスポンス関数が最大となる像面位置は第12図に示すように、必ずしも各周波数について同一ではない。これから、特定周波数としてはどのような周波数を選ぶべきかが、まず問題になる。これには二通りの考え方

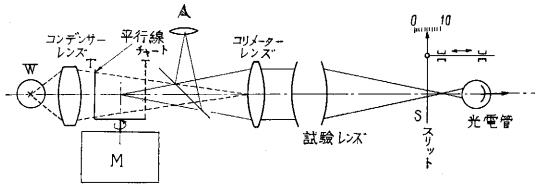


第12図 defocus とレスポンス値

がある。その一つは物理的に意味のある周波数を用いようという考え方で、もう一つは物理的な意味はないけれども、レンズの特徴を鋭敏に判別できるような周波数を用いようという考え方である。第1の目的には Characteristic Frequency\*を用いてはという提案もあるが、これは 35mm スチルカメラでは約 11 line/mm であるから、第12図を見てもわかるように、余りにも低周波すぎて、defocus に対する感度が低すぎる。それで主として第2の考え方が採用されている。すなわち物理的意味のある焦点は別の方法で正しく決めるとして、何れともあれレンズの defocus に対して鋭敏な周波数を選び、測

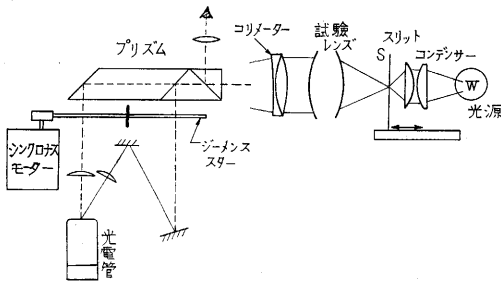
\* 佐柳和男:レスポンス関数による写真レンズ評価(1961.3)

定値だけは精度よく決めようというものである。したがってこれは比較試験用ということが出来る。経験的に20~40 line/mm が最も適当であるとされている。



第 13 図 レスポンス函数比較法  
— 平行線チャート — (R. Sewig)

第 13 図は R. Sewig<sup>4)</sup> の装置で正投影法によるレスポンス函数測定機とまったく同じ機構である。ただ、ちがう点は物体である平行線チャートが円筒の半周に巻き付けられていて、このチャートの像が円筒の回転によって像面上の2カ所に交互に出来るようになっている。したがって像面におかれたスリット S はそのつど defocus された像の強度分布を走査することになる。これによって両者のコントラストを比較するわけである。



第 14 図 レスポンス函数比較法  
— ジーメンスター — (キャノンカメラ KK)

第 14 図はジーメンスターを用いた例でキャノンカメラ KK で試作中のものである。これは逆投影法によるレスポンス函数測定機と同じ機構である。スリット S の像は拡大されてジーメンスター上の同一直径上で、かつ同一輪帯上の2カ所に投影される。その箇所を光軸上の二つの像面位置に対応させておく。ジーメンスターの回転により線像は走査されるが、ここでジーメンスターの白黒線の数を奇数本にしておくと一方が黒線にあたる時は、他方は白線にあたり、よく分光測定法に利用されている交照法の原理でコントラストの差がそのまま、光電管の交流出力となる。

この外、大頭<sup>5)</sup>の試作中の特定周波数によるレスポンス函数測定機、また生産技研で本年試作した周波数分析型のレスポンス測定機も、このようなピント位置測定機として使用することができる。しかし、レスポンス函数測定機では零点法を採用できないので精度上疑問がある。さて、これらの装置の精度を検討してみよう。

第 13, 14 図のチャートは矩形波形の強度分布をしているが、光電出力の基本波のみを取り出す時は正弦波形

チャートを用いていると考えてよい。したがって2カ所のレスポンス函数を  $R_1(s, o)e^{i\phi_1}$ ,  $R_2(s, o)e^{i\phi_2}$  とすると走査結果の光電出力の交流分はその基本周波数  $\omega$  として  $Ve^{i\theta} \cos \omega t$  となり、その尖頭値  $V$  と位相  $\theta$  は下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} V &= \sqrt{R_1^2(s, o) + R_2^2(s, o) - 2R_1(s, o)R_2(s, o)\cos\theta} \\ \theta &= \phi_1 - \phi_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

この  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  は点像の非対称性にもとづく位相と、チャート原点と点像の原点のズレにもとづく位相の和である。

しかし原点ズレにもとづく位相は、 $R_1$ ,  $R_2$  の相対的ずれにのみきくので、ジーメンスターがそう大きくない時は実際の装置についてあたってみると、ほとんど無視できるほど小さく、 $\theta$  は非対称にもとづく位相のみと考えてよい。したがって中心対称の点像の場合は  $\cos\theta=1$  となり

$$V = R_1(s, o) - R_2(s, o) \quad (14)$$

今簡単のため前と同様、理想レンズの defocus を幾何光学的に考えると、レスポンス函数  $R(s, o)$  は (7) 式で与えられる。

$$R_1(s, o) = 2J_1(\rho_1's) / \rho_1's, \quad R_2(s, o) = 2J_1(\rho_2's) / \rho_2's$$

ここで

$$\rho_1's = c'(\delta z)_1 = a_1, \quad \rho_2's = c'(\delta z)_2 = a_2, \quad c' = \pi s / 2\lambda F^2$$

とおき、

$$a_1 = a - \frac{\alpha'}{2}, \quad a_2 = a + \frac{\alpha'}{2}, \quad \alpha' = c'D = c'\{(\delta z)_1 - (\delta z)_2\}$$

とかくと

$$V = \frac{2J_1\left(a - \frac{\alpha'}{2}\right)}{a - \frac{\alpha'}{2}} - \frac{2J_1\left(a + \frac{\alpha'}{2}\right)}{a + \frac{\alpha'}{2}} \quad (15)$$

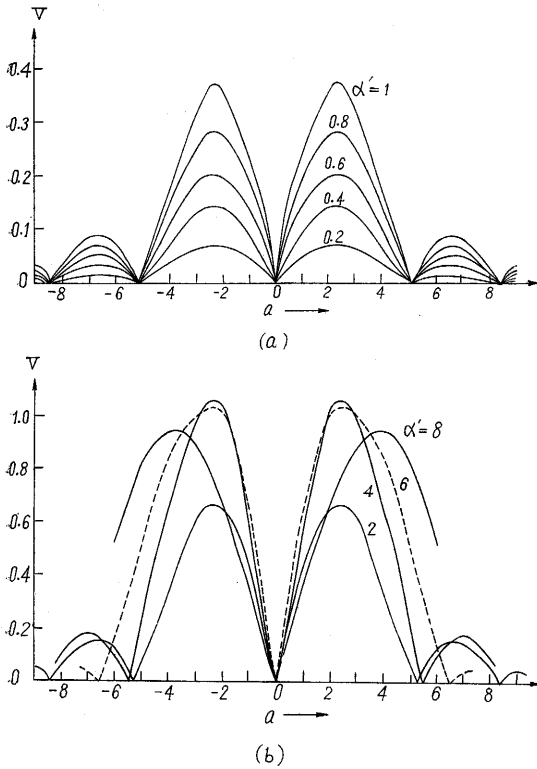
ただし  $D$  は  $R_1$ ,  $R_2$  を与える像面位置の間隔である。

これは (9) 式の  $I(k)$  の代わりに  $2J_1(a)/a$  を用いたのとまったく同じである。

$\alpha'$  を parameter として  $V$  と  $a$  の関係を示すと第 15 図である。第 6 図と比較して異なる点は、 $a$  が大きくなると  $V=0$  になる位置が多数出てくることである。(この  $V=0$  の  $a$  は  $J_2(a)=0$  を与える  $a$  である)  $|a| < 5.14$  では  $V=0$  の位置は一つであるが、もし  $|a|$  がこれ以上になると、3 個出てくる。さらに  $|a|=8.46$  以上になれば、5 個出てくることになる。これでは実際測定にあたってどの零位置を像面にしたらよいか分からなくなるので  $|a| \leq 5.14$  という defocus 量に制限を加えなければならなくなる。

このように  $I(k)$  とちがうのは  $I(k)$  は常に正であったが  $2J_1(a)/a$  は正負いずれの値もとるからである。

感度は前と同様に  $a=0$  における  $\text{slop}$  を考えてみる



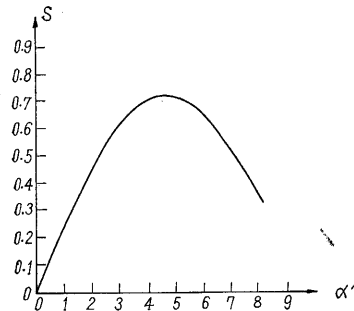
第 15 図 レスポンス函数比較法の defocus と光電出力と

$$S = \lim_{a \rightarrow 0} \left( \frac{dV}{da} \right) = 4J_2 \left( \frac{\alpha'}{2} \right) / \frac{\alpha'}{2}$$

となる。これを図に示したのが第 16 図で  $\alpha' = 4.6$  の時最大感度になる。

精度は、第 14 図の  $\alpha' = 5$  の曲線の谷の半値幅から計算すると

$$\Delta(\delta z) \approx 25F/N \text{ (}\mu\text{)}$$



第 16 図 レスポンス函数比較法の感度

したがって(a-10)式より

$$\nu = 25/NF$$

$N = 25 \text{ line/mm}$  で  $\nu = 1/F$  となる。これは常に Rayleigh の深度より小さくなる。

したがって、 $N = 25 \text{ line/mm}$  以上に周波数を選べば、相互相関法よりはるかに精度がよいことがわかる。

§ 5. 結 語

光電的ピン出し装置について、最近試みられている二三の方式を紹介し、理想レンズの defocus を幾何光学的に考えた場合について精度を比較してみた。しかしこれはあくまでも理論上の話であって実際に精度がここまで上がるかどうかは今後の実験にまつほかない。しかしこの種の解析が従来まったく行なわれていなかったもので、これによって、それぞれの方式にもとづいて装置を設計するときの注意すべきいくつかの点が明らかにされた。

(1) 円孔マスクを用いた相互相関法の場合、一点法の時マスクの径は錯乱円の径に近くするのが感度の点で望ましい。二つのマスクを用いて零点法を行なう時は  $\alpha = 2$  の時、いいかえれば

$$D = 4F\bar{\rho}$$

の関係を満足するマスクの径  $\bar{\rho}$  と、マスク間隔  $D$  の時感度はもっともよくなる。

(2) 格子を用いた相互相関法は原理的にはレスポンス函数比較法と同じになるから、精度は円形マスクを用いるものより、はるかによくなると考えられる。

(3) レスポンス函数を比較する方式では  $\alpha' = 4.6$  といかえれば

$$D = 1.46F/N$$

を満足する空間周波数  $N$  と像面間隔  $D$  の時感度はもっともよい。

しかし defocus はやたらに与えると多数の零位置ができるので  $|a| \leq 5.16$ , すなわち

$$|\delta z| < 1.46F/N(\text{mm}) \text{ (但 } \lambda = 0.5\mu\text{)}$$

内に止めなければならない。

(4) 零点法による円孔マスク相互相関法とレスポンス函数比較法の精度は、精度対深度比で比較すると  $\nu = 0.09\bar{\rho}/F$  と  $\nu = 25/NF$  であり  $\bar{\rho} = 100\mu$  と  $N = 25 \text{ line/mm}$  とすると

$\nu = 9/F$  と  $\nu = 1/F$  でレスポンス函数比較法ははるかに精度がよいことがわかる。

以上いささか議論にのみはしった感があるが、これによって設計上の役に立てば幸いである。なお最後に目下試作中の測定機の資料を快よく提供して下さった Cannon カメラ研究部荒哲哉課長、小西六写真工業研究部笠原正課長に厚く御礼を申し上げる。

(1962 年 9 月 20 日受理)

文 献

- 1) E.H. Linfoot, Proc. Roy. Soc. A 186, 72 (1946), Recent Advances in Optics, Oxford at the Clarendon Press (1955)
- 2) F. Hock, Optik 15, 611 (1958)
- 3) L. Baxter, J.O.S.A. 47, 76 (1957)
- 4) R. Sewig, Z. Instr. 68, 34 (1960)
- 5) 大頭仁, 第 8 回応用物理連合講演会予稿 p. 44 (1961)

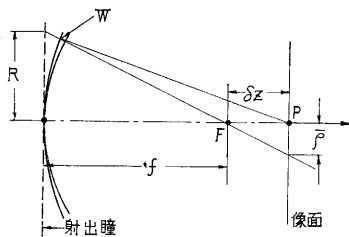
Appendix 精度について

この解説に用いている物体面、ならびに像面の座標系は実寸法に開口数をかけ、さらに  $2\pi/\lambda$  をかけて位相差になおした寸法を用いている。たとえば像面で実寸法  $\bar{\rho}$  (mm) とすると  $\rho = \frac{2\pi}{\lambda} (n \sin \alpha) \bar{\rho}$  と換算した寸法を用いている。ここに  $(n \sin \alpha)$  は開口数で口径比  $F$  とは近似的に次式の関係がある。

$$n \sin \alpha \doteq \frac{R}{f} = \frac{1}{2F} \tag{a-1}$$

ここに  $R$  はレンズの開口の半径、 $f$  は焦点距離である。

ガウス像面から  $(\delta z)$  mm だけ像面をずらした時の像面内の錯乱円半径  $\bar{\rho}$  (mm) とすると、第 17 図からすぐわかるように比例関係から



第 17 図 defocus と錯乱円半径

$$\frac{\bar{\rho}}{(\delta z)} = \frac{R}{f} = \frac{1}{2F} \quad \therefore (\delta z) = 2F\bar{\rho}$$

が成り立つ。さらに (a-1) 式を用いて  $\rho = \frac{\pi\bar{\rho}}{\lambda F}$  を用いると

$$(\delta z) = \frac{2\lambda F^2}{\pi} \rho \tag{a-2}$$

精度は defocus による光量変化曲線が一つの山、あるいは谷をもつとき、その半値幅  $\Delta$  の  $\pm 1/20$  にあたる defocus 量  $d(\delta z)$  が Rayleigh の焦点深度  $\varepsilon$  の何倍であるかをもって示すことにする、すなわち

$$\nu = |d(\delta z)| / |\varepsilon| \tag{a-3}$$

これを精度対深度比と呼ぶことにする。

さて Rayleigh の深度  $\varepsilon$  は

$$|\varepsilon| \leq 2\lambda F^2 (\text{mm})$$

であるから  $\lambda = 0.5\mu$  とすると

$$|\varepsilon'| \leq F^2 (\mu) \tag{a-4}$$

となる。ここではこの  $|\varepsilon'|$  を用いることにする。

(1) 相互相関法の円孔の場合

光量変化は第 6 図で示されるが、ここに用いている  $k$  は

$$k = \rho' / \rho = \pi(\delta z) / 2\lambda F^2 \rho \text{ より} \\ \frac{d(\delta z)}{dk} = \frac{2\lambda F^2 \rho}{\pi} = 2F\bar{\rho} \text{ ただし } \rho = \frac{\pi}{\lambda F} \bar{\rho}$$

すなわち

$$d(\delta z) = 2F\bar{\rho} dk \tag{a-5}$$

したがって

$$\nu = \frac{d(\delta z)}{|\varepsilon'|} = \frac{2F\bar{\rho} dk}{F^2} = \frac{2\bar{\rho} dk}{F} \tag{a-6}$$

第 6 図より半値幅  $\Delta = 5.2$ 、この  $\pm 1/20$  を  $dk$  にとれば

$$dk = 0.26$$

$$\nu = \frac{0.52}{F} \bar{\rho} \quad (\bar{\rho} \text{ の単位は } \mu) \tag{a-7}$$

もし  $\bar{\rho} = 100\mu$  ならば  $\nu = \frac{52}{F}$  となる。

(2) 相互相関法、円孔零点法の場合

第 8 図より  $\alpha = 2$  の時の谷の半値幅

$\Delta = 0.9$ 、この  $\pm 1/20$  を  $dk$  にとれば  $dk = 0.045$

(a-6) 式を用いて

$$\nu = \frac{0.09}{F} \bar{\rho} \quad (\bar{\rho} \text{ の単位は } \mu) \tag{a-8}$$

もし  $\bar{\rho} = 100\mu$  の時  $\nu = \frac{9}{F}$  となる。

(3) レスポンス函数の比較測定法

この場合の  $a$  と  $s$  は次式で与えられる。

$a = \pi s(\delta z) / 2\lambda F^2$ 、 $s = 2\lambda FN$ 、 $N$  は像面の空間周波数 line/mm

この 2 式より

$$a = \frac{\pi N}{F} (\delta z)$$

$$\therefore da = \frac{\pi N}{F} d(\delta z) \tag{a-9}$$

$$\nu = \frac{d(\delta z)}{|\varepsilon'|} = \frac{da}{\pi NF}$$

第 14 図より  $\alpha' = 5$  の時の半値幅  $\Delta = 1.6$  の  $\pm 1/20$  を  $da$  にとれば  $da = 0.08$ 、(a-9) 式より

$$d(\delta z) \doteq \frac{25}{N} F(\mu)$$

$$\therefore \nu \doteq \frac{25}{NF} \tag{a-10}$$

となる。