

光学系の限界とその改善

Limitations of Faculty of Image Forming Optical System and their Improvements

小 瀬 輝 次*

Teruji OSE

光学系を用途別に見ると二次元画像の形成、伝送のための結像光学系と一次元的光線の伝送のためのリレー光学系である。ここでは結像光学系の性能の限界を光学系の空間周波数特性の観点から考えて見た。さらにこれらの限界を超越するためのフィルタリング、ホログラフィ、超解像、合成開口などの技術について最近の研究を概観した。

1. ま え が き

光学系を用途別に見ると二次元画像の結像と二次元画像あるいは光線の伝送を目的としたリレー系の二つに別けられる。光線の伝送のためのリレー系は主に光のエネルギーのみの伝送と見てよいから光の回折、散乱、反射、吸収による損失をできるだけ少なくすることが設計の眼目となる。ガスレンズなどもこの目的で研究されている。また空気の擾乱の研究もこの場合は大切である。二次元画像の伝送についてはレンズ系のみで行なうときは潜望鏡などで昔から種々に工夫が行なわれているが画角を拡げることが困難であってこれを大きくすると距離も20m ならずである。テレビやファイバーの出現はこのリレー系の新しい型式と見ることができ、テレビでは二次元画像を走査法により一次元の電気信号に変換するので画角は結像レンズのそれに依存するが鮮明な画像が得られるか否かは伝送通信系の周波数帯域幅に依存する。ファイバーはテレビと比較すると光学的な多重伝送路による伝送といえよう。一本のファイバーの太さと光の指向性が系のポイントスプレッドを決定し、ファイバーの本数は画素の大きさを決めてしまう。

結像光学系によって鮮明な画像が得られるか否かはやはりその光学系のポイントスプレッドでできるが、現在のところレンズ系に優るものはない。最近のホログラフィの発展は三次元像のディスプレイを可能にし将来はレンズ系に代ってこれが用いられるであろうが、すべての結像系がホログラフィに代わるというほどの実用性は今のところは考えられない。

以下結像光学系に中心を絞ってこの限界を述べ、またこれを改良しようとする二・三の最近の研究を紹介しよう。

2. 光学結像の限界

i) ポイントスプレッドと O.T.F.

光学系による結像は物体が点光源の集合と考えたとその一点の結像系による像ポイントスプレッドが重ね合わさって像が形式される。すなわち二次元物体の強度分布 B 、結像系のポイントスプレッドを h 、像の強度分

布を B' とすると

$$B' = B * h \quad (1)$$

ここに* はコンボリューションを示す。

また B 、 B' 、 h のフーリエ変換を b 、 b' 、 H とすると

$$b' = b \cdot H \quad (2)$$

となる。これは空間周波数で考える時の結像式で H を Optical Transfer Function (以下 O.T.F. と略記する) といい、結像系の空間周波数特性を示す。

(1) と (2) 式から結像系の性質はポイントスプレッド h で考えてもよければ O.T.F. の H で考えてもよい。

受光器に細いビームの光が入射したとき、なんらかの原因でそれが拡がるときはその拡がり系のポイントスプレッドと見なせるので肉眼や、写真感光材料にもそれぞれ O.T.F. が考えられる。図 1 (a) は写真レンズの O.T.F.¹⁾、(b) は肉眼の O.T.F.²⁾、(c) は感光材料の O.T.F.¹⁾、(d) は感光材料の粒状のパワースペクトル¹⁾、(e) はファイバー光学系の O.T.F.³⁾ の一例を示す。

レンズのポイントスプレッド h はレンズの開口による光の回折、レンズ表面反射などによって生じる迷光のためのフレア、レンズの収差でできる。

収差は通常幾何光学で考えられ電子計算機を用いれば十分詳細にこれを計算できるので実用上問題にならぬ程度に補正することができる。顕微鏡対物レンズ、超マイクロ写真レンズなどの中には、ガラスの分散による色収

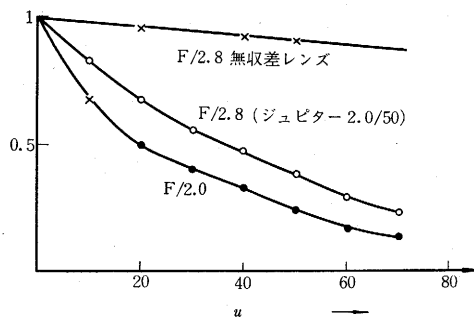


図 1 (a) 写真レンズの O.T.F.

* 東京大学生産技術研究所 第1部

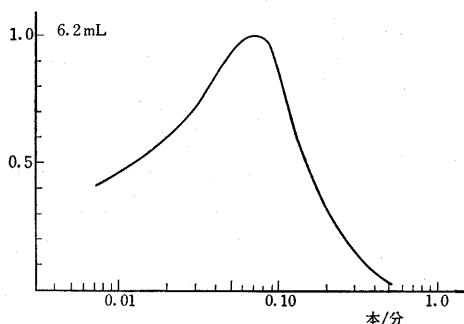


図 1 (b) 眼の O. T. F.

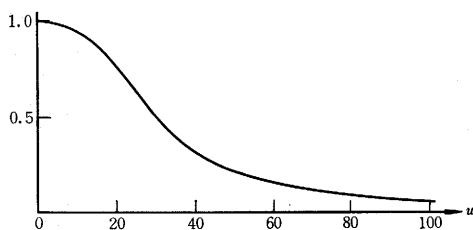


図 1 (c) フィルムの O. T. F.

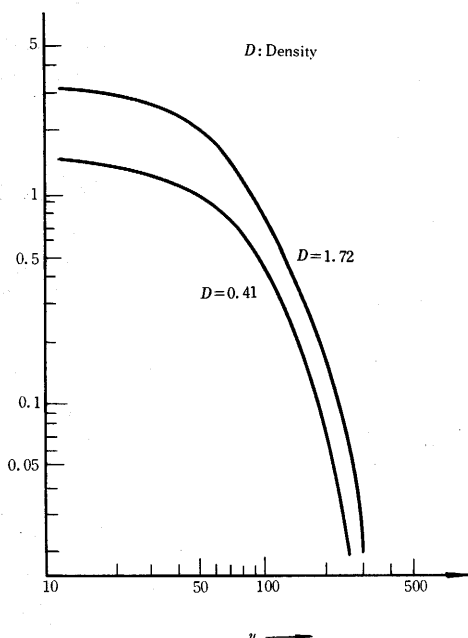


図 1 (d) フィルム粒状のパワースペクトル

差以外の収差はほぼ完全に補正されたものも多数ある。しかし写真レンズなどの収差補正は経済的な理由から実用に害のない程度の補正で止められている。したがって O.T.F. でも図 1 (a) のように無収差レンズとは大きな差があるのが普通である。

ii) 画像の引伸し倍率

眼の解像力は視角でいって通常 1 分、また O.T.F. の遮断周波数は明るさや、視角でことなるが明順応の眼では図 1 (b) のように約 0.5~0.7 本/min である。これ

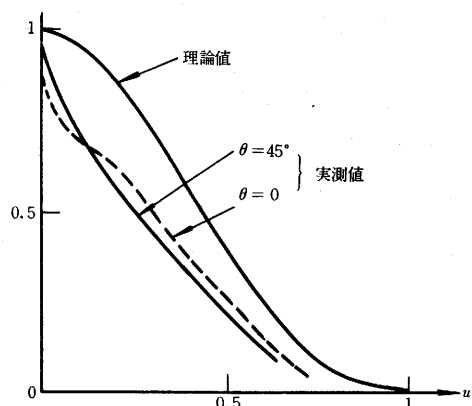


図 1 (e) ファイバー束の O. T. F. (矩形ファイバー)

から明視の距離 (250 mm) では解像限界を示す二点間の距離は 80 μ 程度である。一方 O.T.F. の遮断周波数から正弦波チャートのコントラストが消える空間周波数は 6~8 本/mm であるのでこのときのチャートのピッチは 120~160 μ である。この差は二点を二点と判断できるか否かと、正弦波チャートのコントラストが認められるか否かは問題が別であるためである。

通常の市販フィルム (例えば SSS 級) の粒子サイズは数ミクロンであり、また混濁度は十数ミクロンの拡がりである。これは空間周波数でいうと、粒状のパワースペクトルの遮断周波数は図 1 (d) のように 300 本/mm、混濁度による O.T.F. の遮断周波数は図 1 (c) のように 70 本/mm 程度である。

眼の O.T.F. の遮断周波数を u_e 、フィルムの O.T.F. のそれを u_f とすると、フィルムに記録された画像を M 倍に引伸して観測するとき、 $u_e \geq N_f/M$ のとき画像を認めることができるから

$$M \leq u_f/u_e \quad (3)$$

となり、SSS 級のフィルムでは $M \approx 15$ 程度である。この程度の拡大でも数ミクロンの銀粒子は百ミクロン程度になるから眼には十分認められる。これがフィルムの種類を決めた時の画像の引伸し限界となる。同様にフィルムが決まると結像系の遮断周波数もフィルムのそれ以上あっても意味なくなる。

iii) 結像レンズ系のポイントスプレッド

結像系のポイントスプレッドを半径 ρ (mm) の円板状とするとこれをフーリエ変換して得られる一次元の O.T.F. は u を空間周波数 本/mm として

$$H = 2J_1(2\pi u \rho) / 2\pi u \rho \quad (4)$$

で与えられる。ここに J_1 はベッセル関数で第 1 のゼロを与える u_L をもって遮断周波数とすると

$$2\pi u_L \rho = 1.22\pi \quad \text{より} \\ u_L = 0.61/\rho \quad (5)$$

となる。

たとえば $\rho = 10 \mu$ の時は $u_L \approx 61$ 本/mm となる。これ

はフィルムの遮断周波数 u_f に近い。通常 12μ 以下のポイントスプレッドを sharp definition⁴⁾, $12\sim 50\mu$ を good definition, $50\sim 250\mu$ を soft definition といひ写真レンズの設計基準にしている。

回折によるポイントスプレッドの拡がり円形開口であれば図3(a)のようになるがこの中心円板の半径(エアーリーの円板) ρ_0 はレンズの口径比 F として

$$\rho_0 = 1.22\lambda F \quad (\lambda \text{ は波長}) \quad (6)$$

で与えられるから、たとえば $\lambda = 0.5\mu$, $F = 20$ として $\rho_0 = 12.2\mu$ すなわち前記の sharp definition になる。これは通常の写真レンズでは口径比は小さく回折の影響よりも幾何光学的な収差による拡がり支的であることを示している。図1(a)のレンズの O.T.F. で絞りを2から2.8にかえるとかえって O.T.F. が改善されているのもこれをものがたっている。

口径比 F を小さくすると回折の影響がないばかりでなく光量も増加するが、斜めにレンズに入射する光束の光軸となす角が大きくなり、レンズ周辺を通る光線の収差が増加し次第に収差補正が困難になる。それと今一つの問題は焦点深度が浅くなることである。

iv) 結像系の焦点深度

回折のみで深度を考えると、光軸上 (z 軸) の強度分布は

$$I = (\sin \alpha / \alpha)^2 : \alpha = \pi z / 8\lambda F^2$$

で与えられ I は $\alpha = 0.8$ で $\alpha = 0$ の時の80%となるのでこの範囲の Δz を許容値とすると

$$\Delta z = \pm 2\lambda F^2 \quad (7)$$

となる。たとえば $\lambda = 0.5\mu$ とすると、 $\Delta z = F^2\mu$ で F が小さいとフィルムの感光膜 (通常 10μ 程度) 内でこの許容値をこえることになる。

幾何光学的にはポイントスプレッドを円板と考えその半径できめられている。図2より半径 $\rho = \Delta z \cdot a / f$ である。この ρ として $f/1000$ の値が経験的に用いられている⁵⁾。したがって深度は

$$\pm \Delta z = F \cdot f \cdot / 1000 \quad (8)$$

となる。

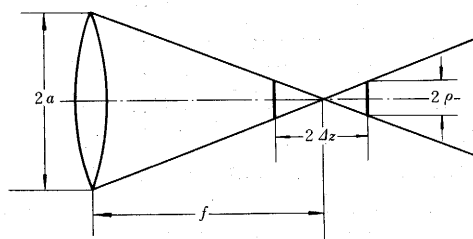


図2 幾何光学的焦点深度

前にも記したようにポイントスプレッドが円板の時フィルムの遮断周波数に一致する半径 ρ は (5) 式で与えられた。円板の半径が N 倍となり $N\rho$ となると遮断周波数は u_f/N になる。したがって、 $u_f = 70$ 本/mm のと

き $\rho = 9N/1000$ であるから、スポットサイズ $f/1000$ ということは $f = 9N$ に相当する。これは 50 mm の焦点距離のレンズのとき $N = 5.5$, すなわち 12.7 本/mm が遮断周波数になるスポットで、スポットサイズは約 55μ であり good definition の範囲である。このことから上記の慣用値は結像性能の definition と無縁ではないことがわかる。

v) 結像レンズ系のフレア

幾何光学的に収差を無くするためには、レンズ各面での光線の入射角をできるだけ小さくするようにすればよいから、レンズの面数は収差をよく補正しようとすれば次第に増加する。こうなるとレンズの表面反射による光量の損失、およびそれによる迷光が増加してくる。表面反射は屈折率1.5のガラスと空気の世界界面では約4%である。単層の反射防止膜を着けてもガラスの屈折率 n_g として $\sqrt{n_g}$ を満足する屈折率をもつ膜は得にくいので2%程度にしか下げられない。したがって面数は現在でもそう多く増加せしめることはできない。

フレアは画面全部にわたって一様に分布するから、コントラスト100%の正弦波格子の像はレンズ系の O.T.F. を H としてフレアがない時、像のコントラストは H だけ低下する。さらに光量で Δ だけのフレアがあるとこのコントラストは

$$H^* = H / (1 + \Delta)$$

となる。

10%の低コントラスト格子に対して10%程度のコントラスト低下を許すと、全光量に対して Δ は3%⁶⁾程度以下でなければならない。テレビ用カメラはこのことから3%におさえられている。

3. フィルターリング

レンズのポイントスプレッドは物理光学的には開口の回折で与えられるから開口の振幅分布を変えることによりこれを変えることができる。

フィルターリングの主な目的はポイントスプレッドの中心円板をできるだけ小さくして解像力を増すもの、高次の回折像を弱めハローを減少せしめ例えば非常に明るい星のごく近くにある弱い光の星を観測できるようにするもの、物体のもつ周波数をできるだけ忠実に伝送するための3つである。

このポイントスプレッドを O.T.F. から見ると解像力を増すためには高周波の利得を増せばよく、ハローを減少させるには低周波の利得を増せばよい。忠実性を増すには O.T.F. をできるだけ平坦にすればよい。

開口の振幅分布 f と O.T.F. との関係は

$$H \approx f * f^* \quad (9)$$

と f の自己相関関数に比例する。

i) 解像力、ハロー改善用フィルター

開口の中心部に吸収を与え周辺の方の透過率をよくし

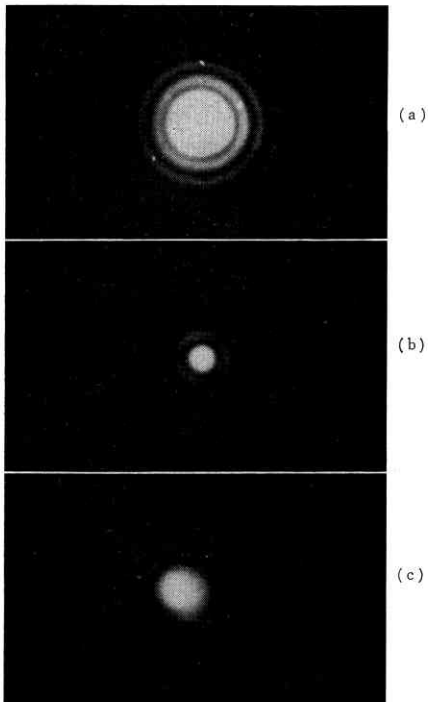


図3 フィルターリングの効果

ておけば上式から2つの開口を大きくずらすとかえって H が増加することがわかる。逆に開口の中心部を周辺より透過率をよくしておくとかえって2つの開口をわずかにずらしても H は大してかわらず大きくずらせば急激に H は減少することがわかる。これから一般に前者は解像力増加用、後者はハロー改善用フィルターであるといえる。実際には最も効果的にするためにはどのような形で吸収曲線を与えればよいということになり古くより種々の工夫が行なわれている。図3はその一例で円形開口の動径 r として開口の振幅透過率 $f(r) = ar^2 + (1-a/2)$ の形になるように吸収を与えたものである⁷⁾。図3 (a) は吸収を与えぬ場合でいわゆるエアリーの回折像である。図 (b) は $a=1$ とした場合で開口の周辺にゆくほど透過率が増すもので回折像の中心円板がかなり小さくなっている。図 (c) は $a=-1$ とし開口の周辺にゆくほど吸収が増加してゆくもので回折像の中心は大きくなっている。これはハロー減少を目的としたものであるがこの写真では明瞭にはわからない。

ここで注意することはこのようなフィルターが有効であるのはポイントスプレッドが開口の回折で与えられる場合であって前記のポイントスプレッドが幾何光学的収差のみで支配されているような光学系には適用できないということである。このことは開口にフィルターをかけ、所望の画質の像が容易に得られればよいという写真レンズでの大きな夢は実際には非常な難事であるということを意味している。

ii) 忠実性の改善

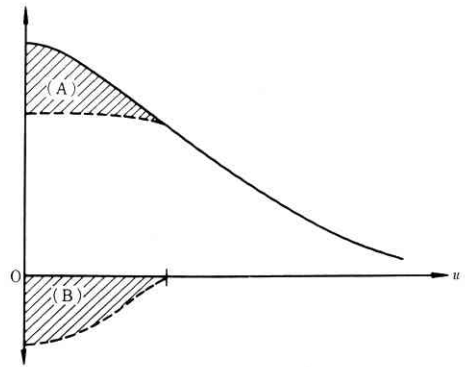


図4

(9) 式で示したように O.T.F. は f の自己相関関数に比例するから開口に吸収を与えたりしてもゼロ周波数は常に最大の O.T.F. 値をもつので上記のようなフィルターでは忠実性をよくすることはできない。

このためには図4のように低周波の利得に(図の斜線部(A))適当な引算を行なう必要がある。しかし負の強度はないから特別の方法でこれに相当するものを作ることができない。

従来から写真技術の中で行なわれている一つの方法にマスキングの方法がある。ネガからポジを作る時にネガをわずかにピンボケせしめたポジをつくりこれをネガに重ねて両者の合成像でポジ像をつくるというもので、このボケたポジは図4の O.T.F. でいえば低周波の利得に負符号を与えたもの(図の斜線部(B))になるからレンズの O.T.F. よりAの部分の引いたことになり相対的に周波数特性を平坦にできるわけである。

同様に負の強度を作る手段として赤外消滅⁸⁾を用いるものもある。螢光体の発光は紫外線に対して励起され、赤外線に対してはよく制されるのでネガを紫外線で、ピンボケのネガを赤外線と同時に照射するとマスキングと同様の効果が得られる。写真感光材のハーシェル効果⁹⁾を用いるものもある。図5はカラーコーデットシステムといわれフライングスポットのポイントスプレッドの中心部と周辺部を青と赤に色分けする。このためには開口部に同心円状の色フィルターをおく。像は青、赤フィルターを通して2つの光電管上に結像される。これらの像の一つはシャープであり一つはボケている。それで2つの光電管の出力の差を取ってブラウン管上に写しだせばマスキングされた像が得られる。その他、このようなテレビ方式を利用する像修正法¹⁰⁾は最近宇宙開発の研究に付随して盛んに行なわれるようになった。上記の方式はアナログ的な修正であるが電子計算機を用いるものも盛んである。これは二次元の高速フーリエ変換(F.F.T)法の開発により非常に短時間内に二次元フーリエ変換が可能になったので画像の二次元的スペクトルが容易に計算でき、しかもこれに補正を加えて再びフーリエ変換で修正した二次元画像が得られるようになったものである。

実験的なものでは 64×64 の絵素でかなり良好な修正画像が得られている¹¹⁾。これは米国で非常に発展している新しい画像修正方法である。

以上のべた画像修正は一つのポイントスプレッドに対してのみ有効である。実際のレンズ像でいえばアイソプラナティズムが成り立つ範囲ということで厳密に言えば画角の非常に狭い範囲内に限られるということである。したがって通常のレンズの全画面をこれで修正するのは今後なお多くの問題が残っている。

フィルターリングの方法として今一つは二重回折法¹²⁾を用いるものがあるがここでは結像光学系を対象にしたのでこれについての説明は省略した。

4. ホログラフィ¹³⁾

レンズ像は焦点深度を物体側に換算した被写体深度内のものを平面上に写像するものである。二枚の写真を用いる立体写真の場合は双眼による視角がそれぞれの画面内の座標に変換されて記録されているので焦点深度外のものもピンボケのまま立体視することができる。しかし一枚の写真像には双眼による視角は記録されないのでパースペクティブのある像は作ることはいできない。

光の波面の複素振幅分布を時間項は省略して $r \exp(i\varphi)$ とかくがこの位相 φ とは光の進む方向を示すものである。したがって写真にこの位相が記録されれば写真撮影時に何処からフィルム面に到達した光かその方向を記録したことになり通常の写真のように強度のみの記録とは異なってくる。

基準光源からの波面 $r_r \exp(i\varphi_r)$ (これを参照波面という) と物体の一点から来る波面 $r_o \exp(i\varphi_o)$ とを干渉せしめるとその強度分布 I は

$$I = |r_r + r_o|^2 = |r_r|^2 + |r_o|^2 + 2r_r r_o \cos(\varphi_r - \varphi_o) \quad (10)$$

となりいわゆる干渉縞を作る。この干渉縞の平均強度は、2つの光の強度和であるが変動分はもし r_r が一様な振幅分布であれば物体光 r_o の振幅である。干渉縞のピッチは基準光からの相対的な位相 $\varphi_r - \varphi_o$ でこれは基準光源の方向に対して、物体光の方向を決めるものである。

すなわちこの干渉縞の振幅は物体光の振幅、ピッチは物体の方向で決まるといえることができる。

この干渉縞をフィルムに記録するときフィルムの露光量対振幅透過率の特性の直線部分を用いるようにすると(10)式の I に比例した振幅透過率をもつネガができる。このネガは回折格子としての作用をもつ。例えばこのネガを通して蛍光灯などを見れば7色にわかれた回折像が見られこれはホログラムができたかどうかの簡単な試験法として用いられている。

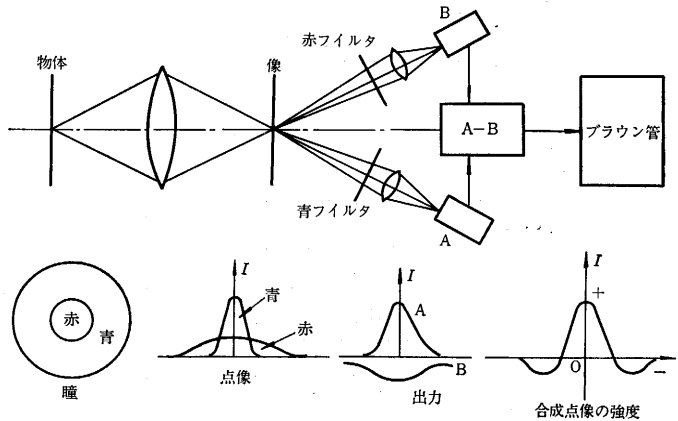


図5 カラーコーデットシステム

このフィルムに再生光として $r_c \exp(i\varphi_c)$ の波面の光を照射するとフィルム面での振幅分布は

$$r_c T \approx r_c I = r_c \{ |r_r|^2 + |r_o|^2 + r_r r_o^* + r_r^* r_o \} \quad (11)$$

この第1項、第2項 $r_c (|r_r|^2 + |r_o|^2) \exp\{i\varphi_c\}$ は r_c の方向にそのまま進む。第3項、第4項は

$$r_c r_r r_o^* = r_c r_r r_o \exp\{i\varphi_o\} \exp\{i(\varphi_c - \varphi_r)\}$$

$$r_c r_r^* r_o = r_c r_r r_o \exp\{-i\varphi_o\} \exp\{i(\varphi_c - \varphi_r)\}$$

となり r_c 、 r_r の和および差の方向に進む、これらの方向の光には物体光の波面 $r_o \exp\{i\varphi_o\}$ およびこれと共役な波面が乗っている。

$r_o \exp\{i\varphi_o\}$ はフィルムに記録した撮影時の波面であるからフィルムの後から見ると物体がそこにあるように見える。これを直接像という。また $r_o \exp\{-i\varphi_o\}$ は共役波面でこれは物体の前後の関係が逆になっており双眼鏡で眼幅を負にした場合(右からの光を左の眼、左からの光を右の眼に入れる)と同じでプソイドスコピックな像といわれるものになる。これを共役像という。

以上は物体の一点からの光を考えたが物体の各点からくる光も再生によってその明るさと方向ならびに位置が参照光と、再生光できまる方向を基準にして決定されるので(観測の眼は関係しない)フィルムを通して見るかぎりパースペクティブをもつ正しい三次元像が見えるわけである。このフィルムをホログラムという。

このホログラムにも欠点はある。その一つは収差である。倍率1倍の時(参照波面と同一の再生波面を用いる)のみ無収差であって拡大像を作ろうとするとレンズ像と同じ収差が生じる。今一つはホログラムに用いるフィルムの粒状や分解能が像の性質に密接に関連していることである。

点物体から、ホログラムに到達する光の波面を球面波(曲率半径 R とする)とし、参照光の波面は平面波とするとホログラム面に記録される干渉縞はホログラム面の座標 x 、 y として近似的に

$$\cos\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{x^2+y^2}{R} + \alpha(x+y)\right)$$

となり、 x, y が大きくなるほど干渉縞のピッチは狭くなる。

この干渉模様はフレネル輪帯板を正弦波形成したものである。フィルムの解像限界を考えるとフレネル輪帯はある有限の輪帯数で止どまりそれ以上の細かい輪帯は記録されない。このことはフィルムの O.T.F. が高周波まで伸びているほど開口の大きいフレネル輪帯となり再生像は明るくなる。ただしフレネル輪帯板の回折により得られるポイントスプレッドの半値幅は輪帯数 6 以上であればほぼ一定値になってしまうから¹⁴⁾再生画像の鮮明度はある程度の解像限界のフィルムを用いれば一定であるといえる。ところで従来の光学系のように 2 点の分解能がホログラムの画像の良さを示すかというホログラムはコヒーレントな光での結像であるから 2 点の回折像は今の場合上記のポイントスプレッドの合成ではなく、ヤングの干渉縞となり 2 点が近づくほど縞のピッチは粗くなりフィルムの解像限界は問題ではなく、むしろフィルムの大きさが再生像のボケに関係してくる。このことはホログラフィで得られる画像の良さの判定には 2 点の解像力は用いられないということになる。

フィルムの混濁度 h_f とすると記録される強度分布は

$$I * h_f$$

である。したがって空間周波数領域で考えると I, h_f のスペクトルを i, H_f とすると、両者の積である。このことはホログラムの周波数領域はフィルムの O.T.F. で限られていることを示す。

参照光を点光源からの平面波としてフレネル回折で得られるホログラムの周波数特性は図 6 のようになり通信

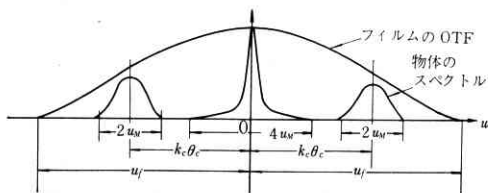


図 6 ホログラフィの空間周波数スペクトル

の振幅変調波のスペクトルと同様に 2 つの側帯波をもっている。これは干渉縞が基本的には正弦波状であってしかも搬送波の役をしていることを物語っている。物体スペクトルの分離は参照波面の傾 θ_c を大きくすればよいがこのためにはフィルムの O.T.F. は高周波まで伸びていることが望ましい。フィルムの遮断周波数 u_f 、物体の最高周波数 u_m とすると $4u_m = u_f$ 、また傾き角 θ_c は $\theta_c = 3u_m/k_c$; $k_c = 2\pi/\lambda_c$ に選ぶのがよい。

以上のべたことからホログラムができるかできないかということとできたホログラムの再生画像の良さは別のものであるということがわかる。ホログラムの画質に

ついては未だ十分つきつめた研究がなく、今後の研究課題の一つである。

最近ジャイアントパルスレーザのよいものができてかなりの大きい画角の三次元ディスプレイが可能になったのでこの目的には十分実用性ができてきた。今後の問題としてはカラー像であるが基礎研究の段階はすでにおわったけれどもこれが実用になるか否かは高出力多色光レーザの出現にかかっている。同様に三次元ディスプレイの応用としての高速度ホログラフィもレーザがいかににかかっている。

画像形成という面でのホログラフィの応用はこの他顕微鏡への応用がある。しかし前述のように倍率をかければ収差が生じるという大きな隘路がある。この打解策としてレンズとホログラフィの合成系が考えられ、倍率はレンズ系で行ない収差はホログラフィで取るというもので実時間の観測はできないけれども作動距離が大きく取れるという特色があり新しい応用面が考えられる。

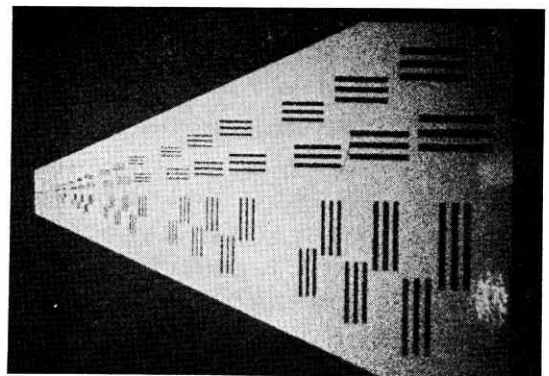
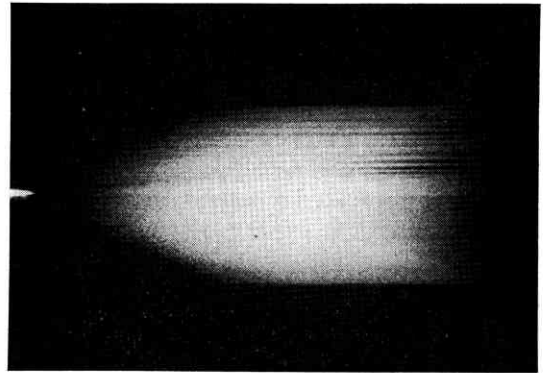


図 7 ホログラフィによるレンズ収差補正の効果

図 7 はフーリエ変換ホログラムを用いたレンズ像収差補正の一例である。¹⁴⁾

ホログラフィはコヒーレントな光ではじめて実現するもので三次元ディスプレイが可能になったといってもあくまでも実験室内のものである。自然光でも可能になるための工夫はインコヒーレントホログラフィといわれ種々行なわれているが未だに良いものがない。ただ蠅の目

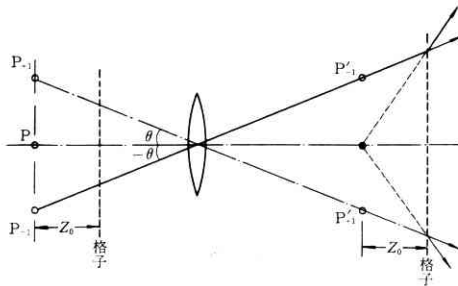


図 8 瞳 合 成 法

レンズの像を一度ホログラムに記録し、再生するとよりよい像が得られることがわかりこれがインコヒーレントホログラフィの一つの有力な手段と考えられている。

5. 超 解 像¹⁵⁾

レンズの O.T.F. の遮断周波数は開口の大きさで決まる。これを超越しようというのが超解像の研究で歴史はすでに十年になろうとしているけれども未だに実験の域をでていない。しかし実用化が今後期待される技術である。

これにはモアレ法と瞳合成法がある。

二つの格子を重ねると格子常数の差を常数とする格子縞が見られる。これがモアレ縞である。

光学系の遮断周波数 u_L 以上の高周波の格子 u_0 でも適当な格子常数 u_M を重ねてモアレ縞をつくとその周波数は $u_0 - u_M$ でこれは u_L 以下になるので光学系を通り結像される。この像面で再び格子 u_M を重ねると $(u_0 - u_M) + u_M = u_0$, $(u_0 - u_M) - u_M = u_0 - 2u_M$ の周波数のモアレ縞をつくり一つはもとの格子 u_0 を再生する。今一つのモアレ縞は適当な方法で遮蔽すればよい。これがモアレ法である。

瞳合成法はコヒーレント光学系のみで用いられるものである。コヒーレント光学系で開口に斜めに光が入射すると系の O.T.F. はその角だけ原点がずれる。いいかえれば光軸上の光に対してはローパスフィルターであるが光学系を斜め入射して用いるとバンドパスフィルターにできる。そこで図 8 のように開口の前に格子をおいてその回折光を利用したりウォーラストンプリズムで 2 方向の互に直交する偏光にわけ開口に斜めに入るようにすると瞳を見かけ上広げることができポイントスプレッドをそれだけ狭めることができる。

図 9 は矩形開口の例で格子の間隔と格子幅の比を適当に選ぶと回折像の中心が狭くなるばかりでなく高次の回折光も弱められ良好なポイントスプレッドが得られることを示している¹⁶⁾。図 10 は周波数が場所的に順次変化してゆくチャート像に対する超解像の効果を示したもので図 (a) は通常の光学系、(b) は超解像光学系による像である。

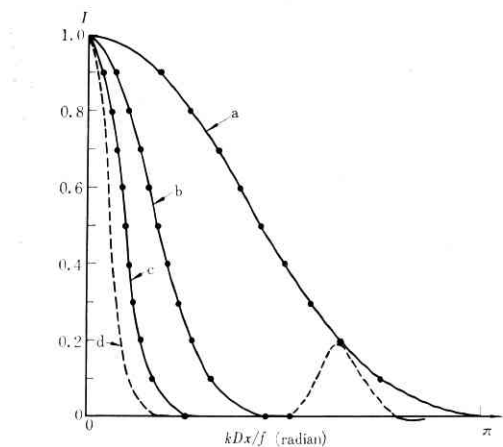
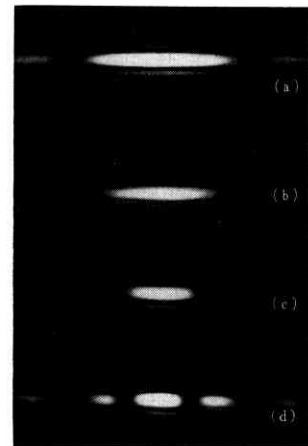


図 9 (a)スリット開口(幅 $2D$) のポイントスプレッド, (b)(c)(d)格子を用いた超解像光学系のポイントスプレッド, 格子間隔対格子幅 $4:1$, 格子の 0 次, ± 1 次の回折光を利用して 3 コの開口を作る。(b) 3 コの開口が D づつ重なる場合、(c) 互に接する場合、(d) D づつ隔れる場合

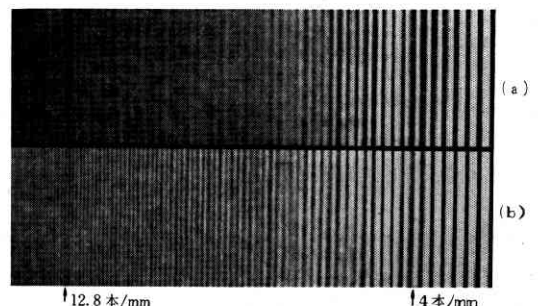


図 10 超解像の効果

6. 合成開口光学系¹⁷⁾ (Synthetic Aperture Optical System)

光学系の機械的制限に対する新しい試みである。光学系の解像力を増し、また光量も大きくするには口径を大きくする必要がある。大口径天体望遠鏡が屈折系ではなく反射系を用いるのも大口径レンズが材料強度の面で製作が困難なためである。もし宇宙空間に大口径望遠鏡を

設置しようとすればこれを打上げるロケットは容易なものではない。

米国では望遠鏡系のミラーの軽量化の研究を行なったがその後ここへのべる組立て方式の研究に移った。すなわち小口径のミラーを宇宙空間で組立て大口径のミラーにしようというものである。

もちろん光学系の使用目的によっては高解像力を得るのに必ずしも大型ミラーの必要はなくスリット状のミラーを多数ならべたものでもよく、あるいは小さな開口で走査して時間的な合成を行なってもよい。

図11は rotating strip telescope といわれるもので、スリット状の開口のミラーを回転しながら観測し、大口径のミラーと同等のものにしようというものである。開口がスリット状であるからその O.T.F. は開口の長辺方向は高周波まで伸びているが短辺方向はごく低周波で止まってしまう。そこで一次的な像のみを得るように像面にファイバーを一系列にならべさらに20コの光電管で一次元像を検出するようにしミラーの回転による像の強度分布を次々に検出し後に計算機で補正し二次元像を得ようというものである。

図12はフィードバックコントロール光学系といわれるもので前にのべた組立て方式の例である。小さな部分に分割されたミラーは3点支持台上にそれぞれおかれ面の向き、他のミラーとの組合せ精度は常時図の F-センサーで検出され誤差が生ずれば支持台にフィードバックして修正される。この F-センサーはレーザを用いた干渉計であり組合せミラーの波面収差を干渉法で検出している。収差は $\lambda/100$ の誤差を検出できると称している。干渉は $\lambda/2$ の整数倍の誤差は検出できないので鏡面に今一つ A-センサーをおき白色フリンジによる干渉で互のミラー誤差を $\lambda/2$ 内におさえている。

結 語

以上光学系による結像性能の限界を主として述べ、これを改良する 2・3 の最近の方法を紹介した。いずれも今だ実験室的な試みであるが光学系を画像情報伝送系の一つと見るとき、これらの今後の発展が期待されるものである。

(1969年4月10日受理)

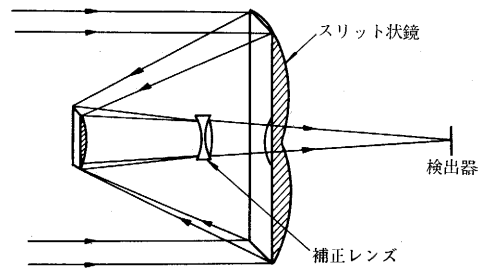


図11 Rotating strip telescope

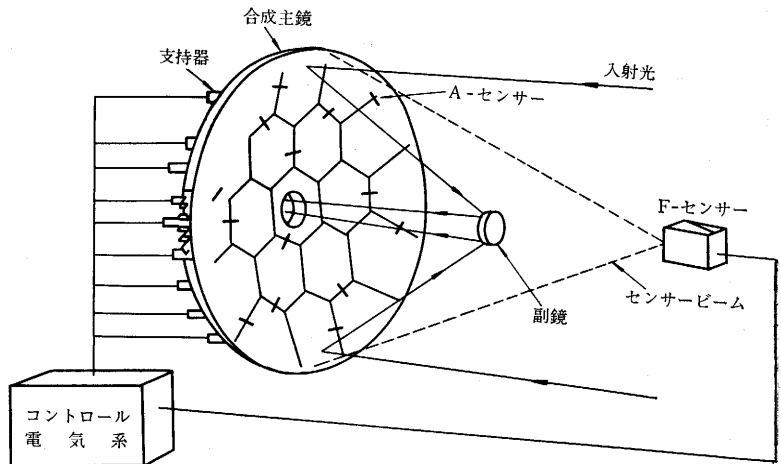


図12 フィードバックコントロール光学系

文 献

- 1) 久保田広監修: 写真レンズとレスポンス関数, カメラ工業技術研究組合サーキュラー1 (1961)
- 2) たとえば江森康文: 網膜像の解析, Thesis (1968)
- 3) 大頭仁: Japan. J. App. Phys. Vol. 4 Supplement 1, p. 323 (1965)
- 4) B. K. Johnson: Optical Design and Lens Computation (Hatton Press. 1948)
- 5) たとえば E. B. Brown: Modern Optics (Reinhold Pub. Co. 1965)
- 6) 竜岡静夫: NHK 技術研究 20, No. 5 (1968)
- 7) 朝倉利光: 東大生研報告 17, No. 2 (1966)
- 8) A. Lohmann: Optica Acta 6 (1959) 319
- 9) D. H. Kelly: J. Opt. Soc. Am 51 (1961) 1095
- 10) T. P. Cheatham & A. Kohlenberg: Boston Uni. Opti. Res. Lab. Tech. Note 84 (1952)
- 11) 辻内順平: コンボリューションによる処理, 第7回サマーマセミナーテキスト; 応用物理学会光学懇話会
- 12) 市岡芳樹: 昭和44年春季応用物理学会予稿
- 13) 辻内順平: Progress in Optics II (1961) 133
- 14) たとえば小瀬輝次: 応用物理 35 (1966) 661
- 15) 野口勝, 小瀬輝次: 生産研究 20 (1968) 464
- 16) たとえば小瀬輝次: 応用物理 37 (1968) 853
- 17) 久保田敏弘, 小瀬輝次: 昭和44年春季応用物理学会予稿
- 18) Synthetic Apertine Optics に関する Wood Hoole Summer Study の報告書 (1967) 私信