

UDC 535.317.6
621.397.31

レンズ・ビームガイドによる画像の直接伝送

Direct Image Transmission by Lens-Beamguide

藤井 陽一*・大林 周逸*・清水 賢治*

Yoichi FUJII・Shuitsu OBAYASHI and Kenji SHIMIZU

周期的にレンズを配列して構成するレンズ列画像伝送路は、画像を直接伝送する簡単な受動的装置で、ファイバーに比べて接続が容易であること、カラー画像の伝送が可能なことなど幾つかの利点がある。また、伝送路の曲げについても、レンズ配置を工夫することで可能になる。

本文では、周期的にレンズを配列したレンズ・ビームガイドでの種々の画像伝送特性について解析・検討を行い、実験を行ったので、それらの結果を報告する。

はじめに

画像の直接伝送については、従来から、いろいろな方面からのneedsのもとに研究・開発が進められてきている。特に光ファイバーについては医学的な要請で体内を覗く内視鏡として、収差を除くために数万本から20万本程度束にしたものを実用化し、治療に役立てている。現在では胃をはじめ、食道、腎臓、さらには心臓に至るまで、その内部を医師が直接目で観察しながら治療し、たいへん効果をあげている¹⁾。

ところが長距離間にこれを使おうとすると、明るさの減衰が大きく、またファイバーが束になっているので接続が難しい。1本のファイバーで画像を直接伝送する研究も電気磁気学的な立場から行われているが、その開口面積が小さいために伝送する独立な姿態の数は限定される²⁾。もう少し詳しく言えば、この伝送姿態の数は、ファイバーの断面の半径の4乗に比例するのである。その結果、著しい歪みが生じ像は劣化する。ファイバーに損失があれば、さらに分解能は低下する。そして、歪みを取り除くために、コヒーレントな光源を使って物体を照明し、ホログラフィーの手法を用いて像を補正する研究が行われている³⁾。この方法を用いると像の復元はできるが単色光のためにカラー画像の伝送はできない。また、接続の際の問題点はとり残されたままである。

そこで筆者らは、従来、レーザー・ビームの伝送用に研究されていたレンズ・ビームガイドに注目し、これを使って画像を伝送させる検討を行った^{4), 5)}。

レンズ・ビームガイドをパイプ状の容器の中に装着しておけば、パイプとパイプを接続することによって接続の問題は解消され、開口断面積も大きくとれて像の劣化も小さくなる。

ただし、ファイバーのような可撓性は無いが、あらかじめ、いろいろな角度の「曲り部」を作っておけば

水道管の敷設の要領で工事を行うことができ、道路に沿ってとか、建物内では通路に沿わずとかすれば、たいへん簡単な装置で、固定した事務室間などで画像や書類の直接伝送ができる。もちろん、部屋の中を覗くことも可能である。また、筆者らは事情をよく知らないが、潜望鏡に応用すれば、視野は明るくなり、望遠・広角などの操作も簡単にできるであろう。

ここでは、筆者らが行ってきたレンズ列画像伝送路についての研究を紹介する。

1. レンズ・ビームガイド

レンズを何枚かならべて構成し、その中に光ビームを伝送させる目的で工夫された装置をレンズ・ビームガイドという。

レンズ・ビームガイドは、曲がりの自由度が少ないという欠点を持っているが、伝送損失が少なく、レーザー・ビームでは0.5dB/kmくらいの値を得られる。しかし、実際にはレンズ材料の分散や表面での反射があり、また、レンズの位置が横方向にずれるとビームはレンズによって曲げられるために軸からずれ、屈曲しながら伝搬するという問題などがあって、それらによる多少の損失はまぬがれない。後者についてもう少し詳しく言えば、ビームのずれはレンズの枚数の平方根に比例して増大し、ついには管壁に衝突して光が伝搬しなくなるのである⁶⁾。

また、「曲がり」についてはミラーやプリズムで曲げるのはもちろん、焦点距離の短いレンズで次第に曲げていく方法も数多くの先人達によって研究がなされている。

しかし、いずれにしても、画像を伝送する目的でレンズ・ビームガイドを使うため、歪みについては細心の注意をもって臨まなければならない。

2. レンズ・ビームガイドの結像理論

まず、レンズ・ビームガイドが実像を作る条件を求

*東京大学生産技術研究所 第3部

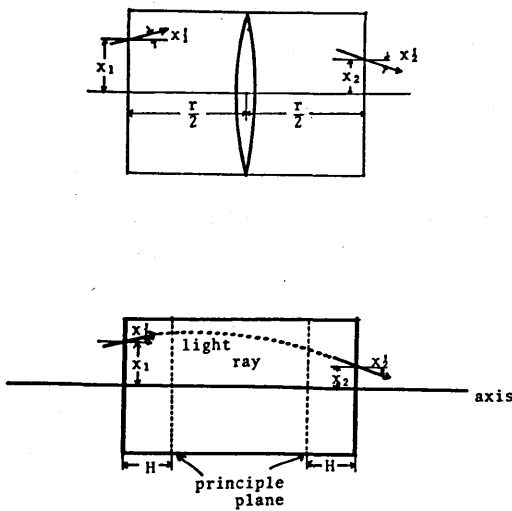


図 1-1 光線行列の定義

める。

レンズ間隔 r で焦点距離 f の凸レンズを周期的に配列して構成したレンズ・ビームガイドのひとつのレンズの区間を考え、(図 1-1) のように x_1, x_1', x_2, x_2' を定めればそれらの間には次の関係が成立する。¹⁾

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & jZ_0 \sin \theta \\ j\frac{1}{Z_0} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} \quad (2 \cdot 1)$$

ただし、

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{r}{2f} \right)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r^2}{4} - rf}$$

である。

また、このような区間が n 個集ったビームガイドでは (2・1) 式の n 個の積として次のように表わされる。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & jZ_0 \sin \theta \\ j\frac{1}{Z_0} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}^n \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos n\theta & jZ_0 \sin n\theta \\ j\frac{1}{Z_0} \sin n\theta & \cos n\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} \quad (2 \cdot 2)$$

(2・1), (2・2) 式は光線行列と呼ばれるものである。

(2・2) 式からレンズ・ビームガイドの合成焦点距離 f_0 を求めれば

$$f_0 = \frac{\sqrt{rf - \frac{r^2}{4}}}{\sin \{n \cos^{-1} (1 - \frac{r}{2f})\}} \quad (2 \cdot 3)$$

となる。しかし、ここで気をつけなければならないことがひとつある。それは、レンズ・ビームガイド全体を 1 枚の単レンズと等価だとして考えるときには、合成焦点距離 f_0 のレンズが入力面、出力面より、それぞれ主面距離 H だけ離れたところに置かれていると考え

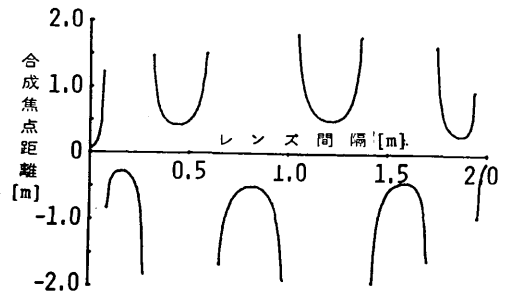


図 1-2 レンズ間隔に対する合成焦点距離の変化 ($f=0.507\text{m}$, $n=8$)

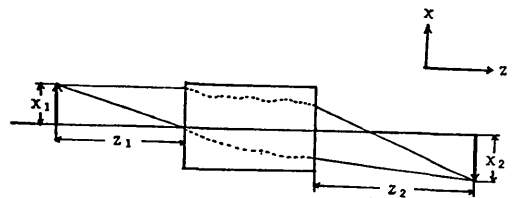


図 1-3 結像位置 (倍率)

なければならないのである。詳しい議論は後ですとして、レンズ間隔 r を変化させたときの f_0 の変化のようすを (図 1-2) に示した。

このレンズ・ビームガイドが実像を結ぶ条件は、ビームガイド全体が 1 枚の凸レンズと等価になればよい。すなわち、(図 1-2) で合成焦点距離 f_0 が正になる範囲でレンズ間隔 r を選べば、レンズ・ビームガイドは実像を作る。

次に結像位置と倍率を調べる。

レンズ・ビームガイドの入力面に物体から光軸と平行に入射する光線と、物体から出て入力面と光軸の交点を通して入射する 2 本の光線を光線行列を使って追跡し、(図 1-3) に示すように結像点 Z_2 と像の大きさ x_2 を求めた。座標の原点は出力面と光軸の交点においた。すると、

$$Z_2 = \frac{Z_0 \tan^{-1} \frac{x_1}{Z_1} - x_1 \cos n\theta}{\tan(\frac{1}{Z_0} \sin n\theta \cdot x_1) - \tan(-\tan \frac{x_1}{Z_1} \cdot \cos n\theta)} \quad (2 \cdot 4)$$

$$x_2 = \frac{-Z_0 \sin n\theta \cdot (-\tan^{-1} \frac{x_1}{Z_1}) \cdot \tan(\frac{1}{Z_0} \sin n\theta \cdot x_1)}{\tan(\frac{1}{Z_0} \sin n\theta \cdot x_1) - \tan(-\tan^{-1} \frac{x_1}{Z_1} \cdot \cos n\theta)} \\ = \frac{\cos n\theta \cdot x_1 \cdot \tan(\cos n\theta) - \tan^{-1} \frac{x_1}{Z_1}}{\tan(\frac{1}{Z_0} \sin n\theta \cdot x_1) - \tan(-\tan^{-1} \frac{x_1}{Z_1} \cdot \cos n\theta)} \quad (2 \cdot 5)$$

また、像の倍率 m は x_2 が求まれば、

$$m = \frac{x_2}{x_1}$$

と簡単に表わされる。

レンズ間隔の変化にともなう結像位置と像の倍率の変化のようすを、それぞれ、(図1-4)、(図1-5)に示した。グラフ中にプロットした点は実験して得た値で理論値とよく一致している。

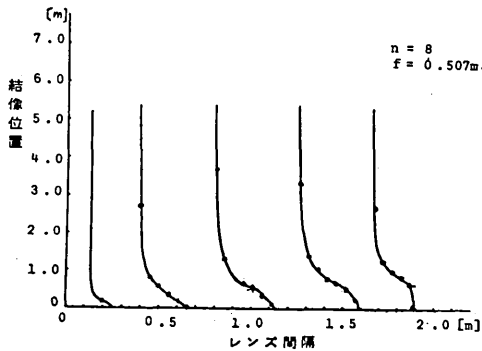


図1-4

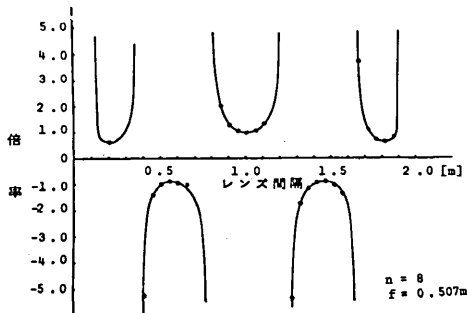


図1-5

3. 伝送効率 (明るさの減衰) の理論

3-1) 伝送効率

まず、点光源を光軸上に置いた場合を考える。

レンズ・ビームガイドの伝送効率は第1レンズに入射する光量 P_i と最終レンズに入射する光量 P_o を比較することで定義される。すなわち、レンズ・ビームガイドの明るさの減衰の度合である。

レンズ L の中心が光軸と一致しており、レンズから d だけ離れた光軸上に点光源 O があり、光線がレンズ L に入射しているようすを (図2-1) に示す。

いま、点光源からレンズを見込む微小な立体角を $d\omega$ (図で黒点の部分)、点光源の微小面積を ds 、輝度を B とすればレンズに入射するすべての光束 F は、

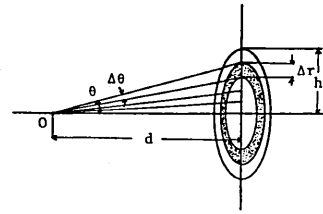
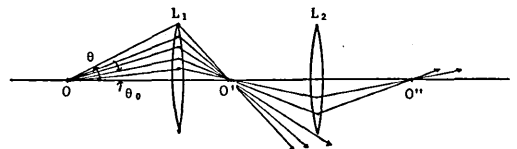


図2-1



伝送効率

図2-2

$$F = B ds \int_0^u \cos \theta d\omega$$

$$= 2\pi B ds \int_0^u \cos \theta \sin \theta d\theta$$

$$= \pi B ds \sin^2 U \quad (3 \cdot 1)$$

となる。ここに U は点光源 O からレンズ L に入射する光束が円錐形であるとして、その頂角である。

次に、伝送効率を光路追跡法によって求める方法を、レンズが2枚の場合について説明する。

(図2-2) で、レンズ L_1 、 L_2 は中心が光軸と一致しており、点光源 O からの光線は L_1 、 L_2 を通って O' に像を結び、また光線は、光軸上においた点光源 O より等角度 $\Delta\theta$ おきに発しているとする。

L_1 に入射する光線の全てが L_2 を通過しないことは明らかである。このとき、 L_2 を切る光線が、レンズ2枚で構成されているレンズ・ビームガイドの伝送損失となる。レンズが n 枚になったときも、これと同じ操作をくり返せばよい。

よって、光線行列を使って、計算機で光線を追跡し、最終レンズに入射する光線で点光源からレンズへの入射角の最大のがわかれば、この角度より小さい角度をもつ光線はすべて最終レンズに入射し、それより大きい角度のものは途中でめれる。この角度を U' とすれば、このときの全光束 F' は、

$$F' = \pi B ds \sin^2 U' \quad (3 \cdot 2)$$

したがって、伝送効率 η は $h \ll d$ として

$$\eta = \frac{F'}{F} = \frac{\sin^2 U'}{\sin^2 U} = \frac{A'}{A} \quad (3 \cdot 3)$$

となる。ここに、 A' は有効光束の断面積であり、 A はレンズの面積である。

レンズ間隔 r を変化させたときの伝送効率 η が変化するようすを (図2-3) に示した。

$Z_i=f$ の場合は第1レンズ L_1 を通過した光線はすべてレンズの中心を通過した光線に平行に進む。

点光源の位置を円柱座標で表示すると、 $P_0(y_i, \frac{\pi}{2}, -f)$ 、レンズ L_1 の位置は $P_{L1}(\rho_i, \varphi_i, 0)$ となる。

空間における直線の方程式を用いるには、直交座標表示の方が使い易いので直交座標表示にして、 $P_0(0, y_i, -f)$ 、 $P_{L1}(x_i, y_i, 0)$ となる。ただし、 $x_i = \rho_i \cos \varphi_i$ 、 $y_i = \rho_i \sin \varphi_i$ である。

次に、 P_{L1} を通った光線は第2レンズ面で $P_{L2}(x_i, y_i - \frac{d}{f} y_i, d)$ を通過するから P_{L2} を円柱座標に変換して ρ_i は、

$$\rho_i = \sqrt{x_i^2 + (y_i - \frac{r}{f} y_i)^2} \quad (3 \cdot 10)$$

となる。 r はレンズ間隔である。そして、レンズの半径を h とするとき $h < \rho_i$ となれば、この光線は第2レンズの外側を通り、光軸に光源を置いたときと同様、レンズ・ビームガイドの損失となる。

レンズが n 枚の場合には、 n 枚目のレンズまでこの計算をくり返すのである。ただし途中でレンズから光線がもれていることが解った場合にはそこで計算を中止する。第1レンズでの ρ_i, φ_i をそれぞれ $0 \leq \rho_i \leq r$ 、 $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_i \leq \frac{\pi}{2}$ まで変化させて同様の計算を行ない第1レンズに入射した光線数と最終レンズに入射する光線数を求めて比較すれば伝送効率を求める。

$Z_i=f, r=f$ 、すなわち等焦点配列の場合の光路を(図2-6)に示したが、これをみてわかるように光源が光軸から外れている場合に第1レンズに入射した光線の一部が第2レンズから外れ、点光源が光軸からずれるにつれてその有効光束の断面積は次第に小さくなる。このような現象を口径蝕(vignetting)と呼んでいる。

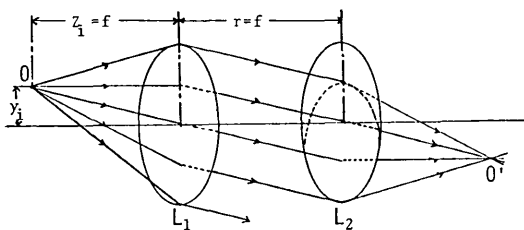


図2-6 軸ずれしたときの光路

点光源が光軸上にあるときの有効光束の第1レンズ面での断面積を A 、ずれたときの第1レンズ面での断面積を A' とするとき

$$\eta = \frac{A'}{A}$$

が光源が光軸からずれたときのレンズ・ビームガイドの伝送効率である。

レンズ・ビームガイド中をレンズ2枚が1組として

入出力が対称に伝送される場合の伝送効率は、 n 枚の場合について、幾何光学の範囲で次のように表わされる。

(1) $Z_i=f, r=f$ のとき

$$\eta = (1 - \frac{2\theta}{\pi}) + \frac{y_i}{2\pi h^2} \sqrt{4h^2 - y_i^2} \quad (3 \cdot 11)$$

ただし、 $n \geq 3$ のとき、 $y_i > h$ ならば $\eta = 0$

(2) $Z_i=f, r=2f$ のとき

$$\eta = (1 - \frac{2\theta}{\pi}) + \frac{2y_i}{\pi h^2} \sqrt{h^2 - y_i^2} \quad (3 \cdot 12)$$

(3) $Z_i=2f, r=2f$ のとき

$$\eta = 1 \quad (3 \cdot 13)$$

ただし、 $y_i > h$ ならば $\eta = 0$

(4) $Z_i=2f, r=4f$ のとき

$$\eta = (1 - \frac{2\theta}{\pi}) + \frac{2(n-1)y_i}{\pi h^2} \sqrt{h^2 - (n-1)^2 y_i^2} \quad (3 \cdot 14)$$

ここで、 y_i は点光源の軸ずれ量、 $\theta = \sin^{-1}(y_i/h)$ 、 h はレンズの半径である。

以上の結果を(図2-7)に示した。プロットしてあるのは実験して得た値である。

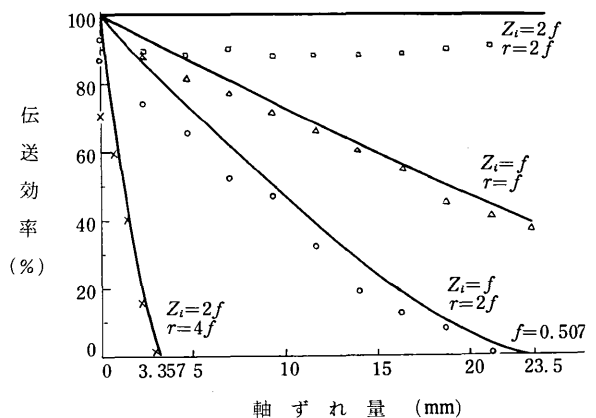


図2-7 点光源の軸ずれと伝送効率の変化

3-3 口径比と下数

3-1では明るさを示す尺度として伝送効率を定義し、百分率で求めた。ここでは通常の写真レンズを示す尺度として使われているF数で表現することにする。

一定のエネルギー密度の光源からの光をある光学系で受けたとき、像面のエネルギー密度が大であればあるほど、その光学系は明るいという。像面のエネルギー密度は光学系が正弦条件を満たしていれば $(n' \sin U)^2$ に比例する。ただし、 n' は像界の屈折率、 U は光束が円錐形であるとして、これが光軸となす最大角である。したがって、 $(n' \sin U)^2$ はレンズの明るさを決める量と考えられ aperture ratio と呼ばれる。

実験に用いたレンズ・ビームガイドの場合、有効口径が最大のときでも47mm、レンズの中心から物点ま

での距離が507mmであるので、物体とレンズは十分遠くに離れていると考えられ、正弦条件が満たされていると仮定すれば、

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} (n' \sin U') = \frac{h}{f}$$

ただし、 h は有効半径、 f は焦点距離である。したがって、レンズの明るさは $(h/f)^2$ に比例する。レンズ・ビームガイドの明るさを表わすには、口径の焦点距離に対する比をとり（口径比）、これの前項を1とした形で示す。すなわち、この比は $2h=f$ だから口径比を $1 = \frac{f}{2h}$ と表わし、 $f/2h$ をレンズ・ビームガイドのF数とする。

合成焦点距離 f_0 がレンズ間隔 r によって変化することは先に(2・2)式で示した。それに加えて、有効口径 $2h$ もレンズ間隔を変えれば変化する。点光源が光軸上にあるとき、 $\Delta\theta = 1 \times 10^{-3} \text{ deg.}$ として、計算機を使って光路追跡法で計算したレンズ間隔の変化に伴う有効口径の変化のようすを(図2-8)に示す。

以上のことからF数を求めた結果を(図2-9)に示した。やはり、 $r=f$ 、 $r=2f$ のところでF数は最

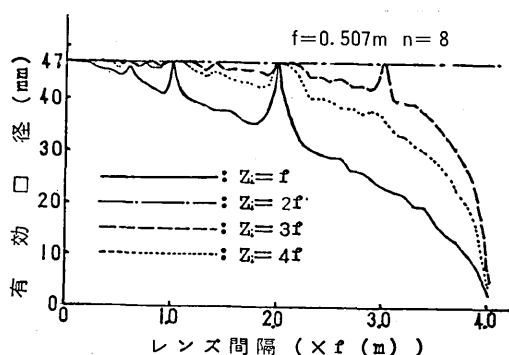


図2-8 レンズ間隔に対する有効口径の変化

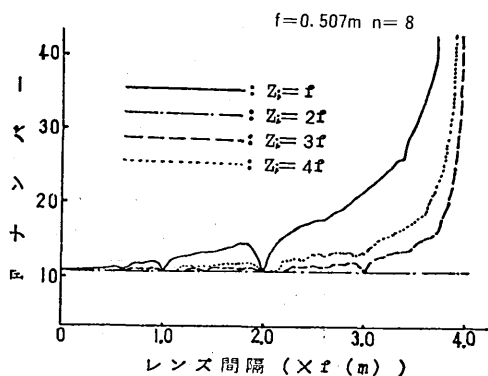


図2-9 レンズ間隔に対するFナンバーの変化

小となり、 $f=0.507\text{m}$ 、 $n=8$ のとき、 $F=10.8$ になって最もレンズ・ビームガイドは明るくなる。この値は通常の写真レンズとあまり差はない。

4. 分解能

レンズ・ビームガイド全体を1枚の単レンズと等価であるとして考える。このとき、2.でも述べたように合成焦点距離 f_0 の等価レンズはレンズ・ビームガイドの入力面、出力面よりそれぞれ主面距離 H だけ入ったところに置かれていると考えなければならない。(図1-1)はその様子を説明している。主面(principle plane)についてももう少し詳しく説明する。主面には二つの特徴がある。

(i) 物点より光軸に平行に出た光が入力側の主面で交ったとすれば、その像は倍率が1であるから、同じ高さで出力側の主面を出て後方焦点を通るように進む。

(ii) 物点より出て、前方焦点を通った光が入力側の主面で交ったとすれば、その像は同じ高さを保って出力側の主面を出、光軸と平行に進む。

よって単レンズの場合と同じように、(i)、(ii)の2本の光線を追跡すればその交点が像点となる。

また、いま取り扱っているレンズ・ビームガイドはすべてのレンズの焦点距離が等しく、またレンズ間隔も等しいから入力側と出力側の主面距離は等しい。その大きさを H とすると、

$$H = \frac{\sqrt{rf - \frac{r^2}{4} \left\{ 1 - \cos \left[n \cos^{-1} \left(1 - \frac{r}{2f} \right) \right] \right\}}}{\sin \left[n \cos^{-1} \left(1 - \frac{r}{2f} \right) \right]} \quad (4 \cdot 1)$$

となる。

次に(図3-1)で、 L をレンズ・ビームガイドの等価レンズとし、 Z は主面距離 H を考慮した値とする。また二つの接近した点 P_1 、 P_2 は P_1' 、 P_2' に像を結ぶものとし、問題を簡単にするために P_1 、 P_2 からの光は互いに無関係で独立であり干渉し合わないものとする。

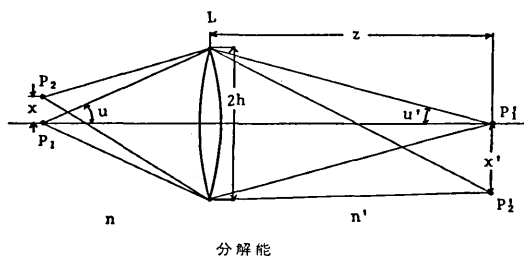


図3-1 レンズ・ビームガイドの分解能

L の口径が有限であるので、この場合、回折現象が生じるが、おおむねFraunhofer回折で近似できるものとすれば、 P_1' の近くにはAiryの回折パターンが生じ、その最初の暗輪の半径 S は、

$$S = 0.61 \frac{\lambda_0 Z}{n' h} \quad (4 \cdot 2)$$

となる。ただし、 Z は主面距離 H を考慮した L と P'_1 の距離、 $2h$ はレンズ・ビームガイドの有効口径である。また屈折率が P'_1 では n' だから、そこで波長は λ_0/n' である。(図3-1)のように P_1 , P'_1 より L の端に引いた直線が光軸となす角度をそれぞれ u , u' とすと $\sin u' = h/Z$ だから、

$$S = 0.61 \frac{\lambda_0}{n' \sin u'} \quad (4 \cdot 3)$$

となる。 $P'_1 P'_2 = x'$ が (4・3) 式の S に等しくなったとき、二つの独立した光源を分解する極限である。一方、この等価レンズが正弦条件を満たしていると考えれば、

$$n x \sin u = n' x' \sin u' \quad (4 \cdot 4)$$

となる。

(4・4) 式の x' に (4・3) 式の S を代入するとそのときの x の値が二つの光源を分解できる最小の距離である。よって、

$$x = 0.61 \frac{\lambda_0}{n \sin u} \quad (4 \cdot 5)$$

$\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$ とし、空気中であるから $n = n' = 1$ 、そして、レンズ間隔 r を変化させたときの様子を (図3-2) に示した。

やはり、 $r = f$, $r = 2f$ のところで分解能は最小となり、その値は $7.24 \mu\text{m}$ となった。

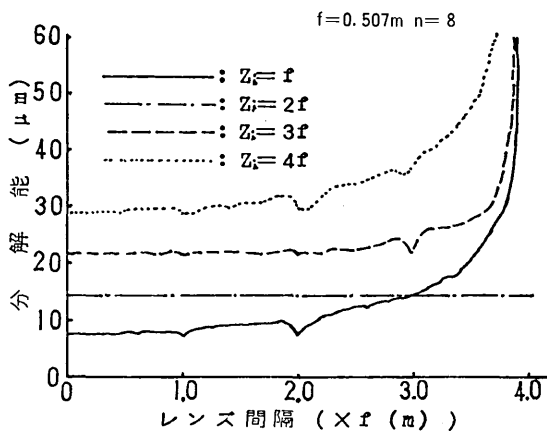


図3-2 レンズ間隔に対する分解能の変化

5. レンズ列画像伝送路の「曲り部」についての考察

レンズ間隔 $r = 2f$ (共焦点配列) とし、レンズ2枚で構成したレンズ・ビームガイドを作り、前方の焦点上に点光源をおけば、2枚のレンズを通過した光線は後方の焦点上に像を結ぶ。このレンズ・ビームガイドがパイプ状になっており、可撓性があるものと想定すれば、そのパイプの両端をもって少しずつ曲げることは可能である。曲げる直前、光軸上にあり、かつ焦点

上にあった点光源は出力側の焦点上に結像していたのであるが、わずかに曲げたときには出力側のレンズの中心に垂直な光軸上には像を結ばない。すなわち光軸よりわずかに外れる。

今度は入力側で光軸より x_1 だけずらしたとき出力側での像点はやはり光軸より x_2 ずれると頭の中で考えれば、 x_1 をひじょうに少しずつ変化させていくとき、 $x_1 = x_2$, $Z_1 = Z_2$ となる点が必ず見つかる。

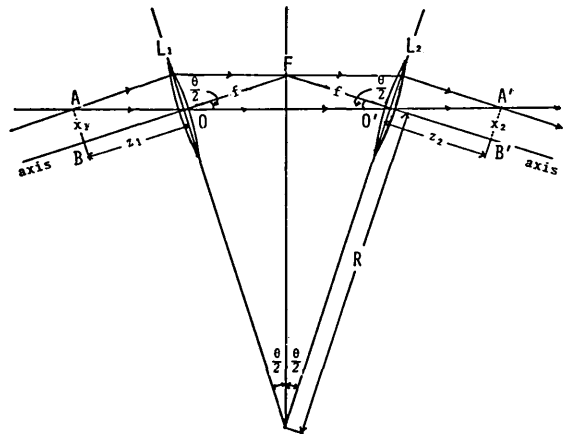


図4-1 レンズ・ビームガイド画像伝送路の曲り部

(図4-1) のようなレンズ・ビームガイドを構成すれば、今まで述べてきた条件が満足できることは一目瞭然であろう。すなわち、共焦点配列のレンズ・ビームガイドを F を中心に、レンズ1枚について $\theta/2$ ずつ曲げれば一つの区間で θ の曲げ角が得られる。このとき図より明らかに、

$$\triangle ABO \cong \triangle A'B'O'$$

$$x_1 = x_2 \quad (4 \cdot 6)$$

$$Z_1 = Z_2$$

で、これは前述した条件を満たしている。

(図4-2) に (図4-1) 中の x_1 の値が変化したとき、 A 点の上下の点が出力側の A' 点を通して、光軸に垂直な直線からどの位ずれるかを計算して示した。これによれば、 $\theta = 5^\circ$ で A から 8 mm 離れた点の出力でのずれ (結像位置のずれ) は 0.25 mm 程度である。しかし、この対称区間を接続していくと、それにつれて歪は増大するので、一つの区間では 5° 程度までしか曲げられない。 $\theta = 5^\circ$ として得られた画像と伝送前との比較を (図4-3) に示した。また、厳密にいうと、このような区間をくり返し接続していても点光源は完全なくり返しでは伝送されない。それは、 n 番目の出力と $(n+1)$ 番目の入力折れ曲がる部分で完全に一致しないからである。

そして、光量の減衰は直線部分に比べて当然増加する。

筆者らは、この光量の減衰、像の歪みについて早急に十分な検討を行い、これらの問題を解決したいと考えている。

また、急激にレンズ列画像伝送路を曲げる場合は、ミラーやプリズムを使用するのが簡単で有効な手段となろう。

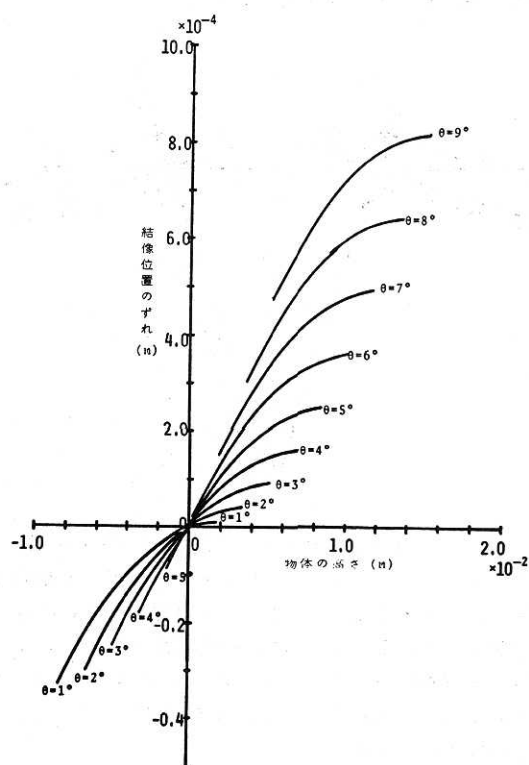
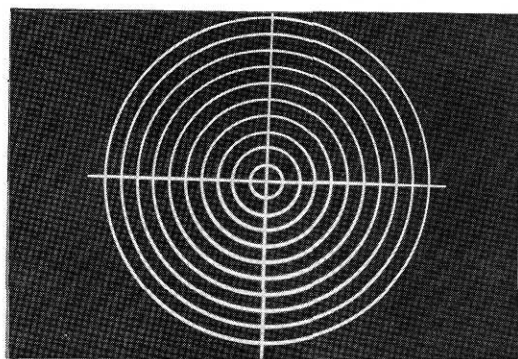
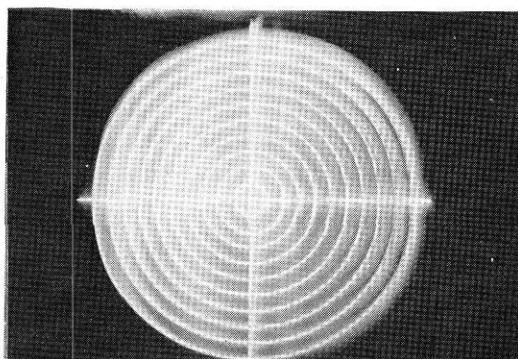


図 4-2 レンズ列画像伝送路の曲げによる結像位置のずれ



〔伝送前の画像〕

図 4-3 レンズ列画像伝送路の曲げ $\theta = 5^\circ$



〔伝送後の画像〕

図 4-3 レンズ列画像伝送路の曲げ $\theta = 5^\circ$

6. 実験装置、結果

実験装置は白色光源（スライド・プロジェクタ）とレンズ・ビームガイド、そしてスクリーンで構成され、そのようすを（図 5-1）、（図 5-2）に示した。

スライド・プロジェクタのスライド面の中心とレンズ・ビームガイド中のすべてのレンズの中心は、完全に光軸に一致し、しかも、それらの面は厳密に光軸と垂直になるように調整されていなければならない。

レンズは最初、プラスチック製の単レンズを使用したが、色収差が激しくカラー画像の伝送に適さないため、結局、アクロマート・レンズを用いた。アクロマート・

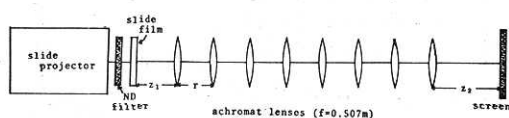


図 5-1 実験装置

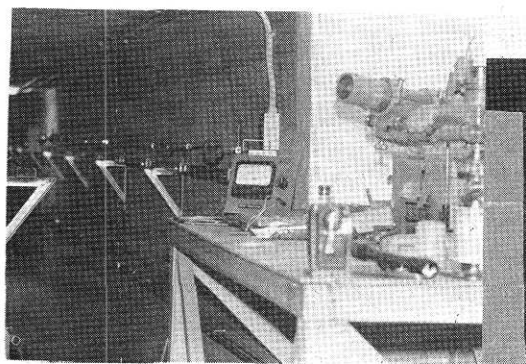


図 5-2 実験装置

レンズというのは、焦点距離が正および負の符号を有するものを密着させて色収差のない1枚のレンズにしたものである。また、ふつうアクロマート・レンズというときには近軸光線の色収差のほかに、同じ色の光について、いろいろな入射高の光でも色収差が除去されているものをいう。

また、反射損失を低減するため、表面に MgF_2 による反射防止の単層コーティングが施してある。その結果、レンズ1枚あたり4.2%の損失であった。

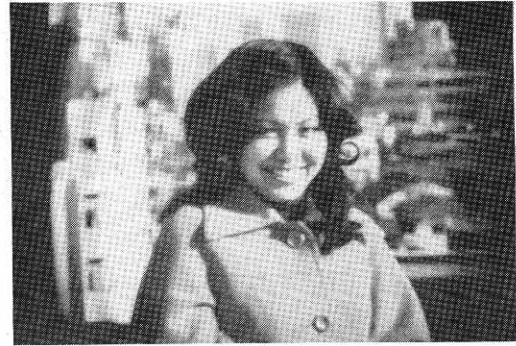
また、レンズの焦点距離はすべてのレンズが等しくなければならず、その測定法に関してはいろいろな方法があるので参考文献の項にあげた。⁹⁾ 実験に使用したレンズは直線部で焦点距離 $f=0.507\text{m}$ 、口径 $\phi=0.047\text{m}$ 、そして曲り部では $f=0.198\text{m}$ 、 $\phi=0.047\text{m}$ である。



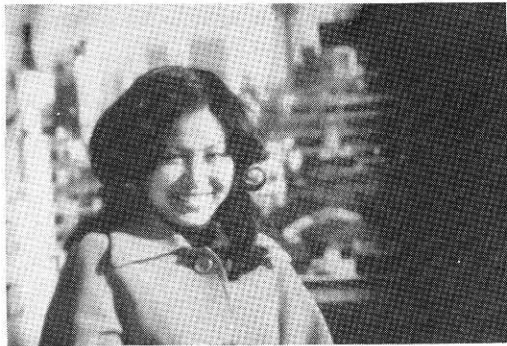
〔レンズ枚数4枚〕



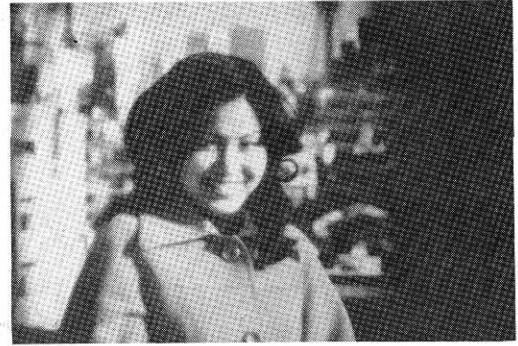
〔原 画〕



〔レンズ枚数6枚〕



〔レンズ枚数2枚〕



〔レンズ枚数8枚〕

図5-3 カラースライドの伝送における画質の変化

共焦点レンズ配列で人物像を伝送したところ(図5-3)のようであった。レンズの枚数 n を2~8枚まで変化させたがこの範囲で画質はあまり低下していない。レンズ8枚のときの伝送距離は8.112mであった。

周辺の黒い陰の部分やボケは実験の技術的なものによるところが大と考えられる。すなわち、レンズ・

ビームガイドの軸心調整を厳密にすれば画質は改善される。

また、伝送効率の理論値と実験値のずれについては、レンズの半径に比べて、レンズから物点までの距離が十分に大きいとして近軸仮定に基づいたための誤差だと考えられる。

次にレンズ配列について考察すると、入力レンズから Z_i だけ離れた光軸上の物点の伝送効率、 $Z_i=f$ の時 $r=f$, $Z_i=2f$ のとき $r=2f$, $r=4f$ で100%となる。当初、伝送距離がレンズ枚数に比べて長くとれる $Z_i=2f$, $r=4f$ の共中心配列が最も優れていると判断したが、実験した結果、共中心配列では物体の光軸から外れた部分の伝送効率が極端に悪いことがわかった。すなわちこれは、レンズ枚数 n とレンズ半径 h に依存し、軸ずれした物体の伝送可能な軸ずれ領域は $\pm h/(n-1)$ 以下である。

また (3・13) 式より $Z_i=2f$, $r=2f$ のとき伝送効率が常に100%であることも興味深い。これは、この配列のとき入力レンズに入った光線がすべて出力レンズまで対称に伝送されるからである。

結像位置、倍率は $n=8$ のとき、 $Z_i=f$, $r=2f$ で最終レンズから像までの距離 $Z_o=f$, $m=1$, また $Z_i=2f$, $r=2f$ で $Z_o=0$, $m=1$ となり両方の配列で構成されたレンズ・ビームガイドは実用可能である。また、この両者のうちどちらが優れているかということになると、光源の光量を一定にした場合、 $Z_i=2f$ より $Z_i=f$ の方が入力レンズに入る光量は多いが、 $Z_i=f$ は $Z_i=2f$ に比べて開口効率の変化が著しいので決めがたい。

7. おわりに

伝送した画像の写真で明らかなようにアクロマート・レンズを使用した場合についてレンズ・ビームガイドによる画像伝送の実用の可能性は十分にあることが分った。ビームガイドを長距離に使用する場合は、レンズの枚数を増すと軸心調整が困難になるため、パイプ状の容器中にレンズをあらかじめ装着しておき、必要な長さに応じてジョイントでパイプを接続する方法

が考えられる。また、 $f=0.507\text{m}$ のレンズを使ったがもう少し長い焦点距離のものを使う方が有利である。

曲げについては前述したように、種々の角度のビームガイドを作っておき水道管の配管工事の要領で画像伝送路を敷設していけばよい。しかし、曲り部には問題が多くとり残されており現在検討中である。

いずれにしても、以上の方法でレンズ・ビームガイドによる画像伝送を固定された事務室間などで実用化すれば簡単な装置で多くの情報を直接伝送できることになり、新しい画像伝送路として有望である。

最後に、日頃ご指導いただく本所斎藤教授、浜崎教授、榊助教授、ならびに関係研究室の各位に深く感謝する。

(1976年4月8日受理)

参考文献

- 1) N. S. Kapany, "Fiber Optics - Principles and Applications", Academic Press, '72
- 2) 前田・浜崎 "無損失レンズ様媒体の情報伝送容量" 昭48, 信全大, 他
- 3) 前田・浜崎 "レンズ様媒体を通過した像のホログラフィによる補正" O. Q. E. 研資 73-30
- 4) 藤井・大林・清水 "レンズ・ビームガイドによる画像伝送" 昭50, 電全大, No. 492
- 5) 藤井・大林・清水 "レンズ・ビームガイドによる画像の直接伝送" 第6回画像工学コンファレンス '75
- 6) 藤井・大林・清水 "低損失レンズ・ビームガイドによる画像の直接伝送" 昭51, 信全大 972
- 7) D. Marcuse, "Light Transmission Optics" Van Nostrand Reinhold, '72
- 8) 藤井・白石・伊藤・三好 "くり返しレンズによるレーザ・ビーム伝送" 生産研究, vol.20, No.11, '68
- 9) 岡部・稲垣・西村・池田・早水 "レンズの焦点距離高精度測定法" 応用物理, Dec. '74 ほか

