



画像処理機能を有する回折型液晶 アクティブ光学素子

高木 康博・大頭 仁

早稲田大学理工学部応用物理学科 〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1

(1993年4月23日受付, 1993年6月21日受理)

Active Diffraction Device Employing Liquid Crystal for Image Processing

Yasuhiro TAKAKI and Hitoshi OHZU

Department of Applied Physics, School of Science and Engineering, Waseda University,
3-4-1, Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169

(Received April 23, 1993; Accepted June 21, 1993)

We propose a liquid crystal active lens consisting of a conventional lens and a phase modulation liquid crystal panel. Main lens power is produced by the conventional lens, and the liquid crystal panel produces an auxiliary lens power and controls wavefront. The liquid crystal active lens is featured by both large lens power and a large aperture, and its focal length can be varied in wide range. It can also perform convolution-based image processing, since a pupil function which is a phase distribution of the liquid crystal panel is modulated two-dimensionally. In this study, incoherent experiments were also demonstrated. The focal length was varied from 0.22 m to 0.29 m. Image shifts and image reproductions were demonstrated by the convolution capability. The structure of the liquid crystal active lens resembles human eye system, and will be used for various applications, such as camera systems, image processing, and optical computing.

1. はじめに

人間をはじめとする高等生物の視覚系は、焦点距離が可変であるなどの柔軟でアクティブな光学系を有している。われわれの有する光学機械の光学系でアクティブなものとしては、ズーム光学系や焦点合わせ光学系などが有名である。また、最近では、補償鏡と呼ばれる形状可変な反射鏡で構成される結像系などを用いた補償光学^{1,2)}の研究が進められている。しかし、これらの光学系は機械的な可動部があることが問題点である。機械的な可動部のないアクティブな光学素子としては、液晶マイクロレンズ³⁾や電気光学効果を用いたEOレンズ^{4,5)}などがある。これらは、液晶や電気光学結晶の屈折率変化が小さいため、レンズパワーが大きくかつ径の大きいレンズの実現が困難である。

そこで、われわれは、レンズと位相変調液晶パネルを

組み合わせた液晶アクティブレンズを提案する。レンズは、一定で大きなレンズパワーを持ち、主に結像に作用する。位相変調液晶パネルは、マトリックス電極によって変調され任意の二次元的な位相分布が作り出せる。したがって、レンズの位相分布を表示すれば、レンズパワーは小さいが可変なレンズが実現できる。これらを組み合わせることで、従来の方法より、レンズパワーが大きくかつ径の大きいアクティブなレンズが実現できる。

また、液晶アクティブレンズの液晶パネルでの位相分布をレンズの瞳関数とみなせば、レンズの瞳関数が制御できることになる。瞳関数のフーリエ変換と入射画像とのコンボリューションが射出画像になる⁶⁾ことから、コンボリューションによる画像処理が可能であることがわかる。従来から知られているレンズ2枚と空間フィルタとしての液晶パネルとで構成される $4f$ 結像系、いわゆる空間周波数フィルタリング光学系⁷⁻⁹⁾に比べて、

同様の処理をより単純な結像系で実現できる。

このように、液晶アクティブレンズの作用は大きくふたつに分けて考えることができる。ひとつは、レンズパワーすなわち焦点距離の制御を行う作用で、これを縦方向の作用と呼ぶ。もうひとつは、コンポリューションによる画像処理を行う作用で、これを横方向の作用と呼ぶ。

液晶アクティブレンズは従来のレンズにない焦点距離可変性や、画像処理などの機能を有し、その応用範囲は広いものと考えられる。また、その構造は人間の眼球と類似性が高い。すなわち、レンズパワーが大きく一定な角膜と、レンズパワーは小さいが可変な水晶体との組み合わせとよく似た構造を持っている。

2. 液晶アクティブレンズの原理

2.1 構造

本論文で提案する液晶アクティブレンズの構造を Fig. 1 に示す。液晶アクティブレンズは、レンズと位相変調液晶パネルにより構成される。レンズの焦点距離を f_R とする。液晶パネルは位相変調素子として機能し^{10,11)}、 2π ラジアン以上の位相変調量を有する。液晶パネルの画素ピッチを a とし、画素サイズを b として、総画素数を $N \times N$ とする。

つぎに座標系を定める。物体面の座標を x_o, y_o で、液晶アクティブレンズの座標を x_l, y_l で、そして像面の座標を x_i, y_i で表す。物体面から液晶アクティブレンズまでの距離を s_o とし、液晶アクティブレンズから像面までの距離を s_i とする。

2.2 縦方向の作用

レンズパワー、すなわち焦点距離の制御を行う縦方向

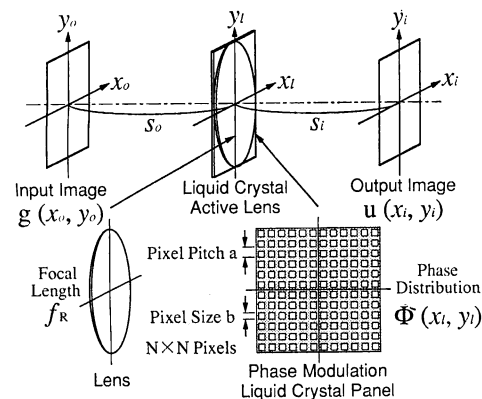


Fig. 1 A liquid crystal active lens consists of a conventional lens and a phase modulation liquid crystal panel.

の作用について考える。位相変調液晶パネルに、回折型レンズの位相分布を表示する。その位相分布を変化させ焦点距離を変えることで、液晶アクティブレンズ全体の合成焦点距離を制御する。焦点距離の変化に伴う結像関係の変化の様子を Fig. 2 に示す。

最初に、液晶パネルに表示する回折型レンズ単体での焦点距離の可変範囲を求める。回折型レンズの焦点距離を f_D とすると、その位相分布 $\Phi(x_l, y_l)$ は、

$$\Phi(x_l, y_l) = -\pi r^2 / \lambda f_D \quad (1)$$

ただし、 λ は光の波長で、 r は回折型レンズの半径方向の距離で $r = (x_l^2 + y_l^2)^{1/2}$ である。 n を整数として、位相が $-n\pi$ ラジアンになる半径 r_n を求めると、

$$r_n = \sqrt{n \lambda f_D} \quad (2)$$

したがって、 π ラジアン位の位相変化に対応する半径方向の間隔 Δr_n は、

$$\Delta r_n = r_{n+1} - r_n \cong \sqrt{\lambda f_D / n} / 2 \quad (3)$$

ここで、位相変化 π ラジアンに対応する間隔 Δr_n が、液晶パネルの画素ピッチ a 以上である必要があることから、

$$n \leq \lambda f_D / 4a^2 \quad (4)$$

n の最大値を N で表して、回折型レンズの最大半径を r_N で表すと、

$$N = \lambda f_D / 4a^2 \quad (5)$$

$$r_N = \lambda f_D / 2a \quad (6)$$

さらに、回折型レンズの位相分布が液晶パネル全体を含む必要があるから、

$$r_N \geq Na / \sqrt{2} \quad (7)$$

$$f_D \geq \sqrt{2} Na^2 / \lambda \quad (8)$$

以上、正のレンズの場合について焦点距離の可変範囲を考えてきたが、負のレンズの場合についても同様に考えて、

$$f_D \leq -\sqrt{2} Na^2 / \lambda \quad (9)$$

以上より、液晶パネル単体での焦点距離 f_D の可変範囲は、

$$f_D \geq f_0, f_D \leq -f_0 \quad (10)$$

と求められる。ただし、

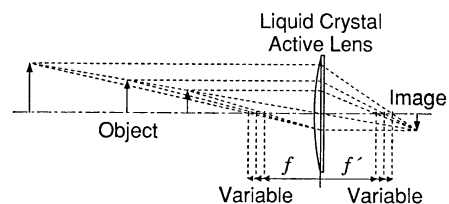


Fig. 2 Longitude effect of the liquid crystal active lens controls its focal length.

$$f_0 = \sqrt{2} Na^2 / \lambda \quad (11)$$

である。

つぎに、液晶アクティブレンズの合成焦点距離 f を求める。合成焦点距離 f は、

$$1/f = 1/f_R + 1/f_D \quad (12)$$

の関係より、

$$(1/f_R + \lambda/\sqrt{2} Na^2)^{-1} \leq f \leq (1/f_R - \lambda/\sqrt{2} Na^2)^{-1} \quad (13)$$

これが、液晶アクティブレンズの焦点距離の可変範囲である。

液晶パネル単体での焦点距離 f_D の可変範囲は、(10)式より臨界焦点距離 f_0 で制限される。臨界焦点距離 f_0 は、(11)式より画素ピッチ a と画素数 N で決まるの

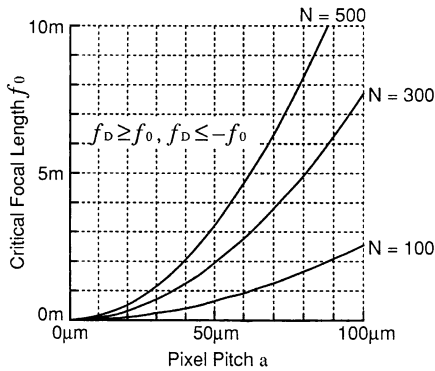


Fig. 3 The focal length f_D of the diffractive lens displayed on the liquid crystal panel is varied within $f_D > f_0$ and $f_D < -f_0$.

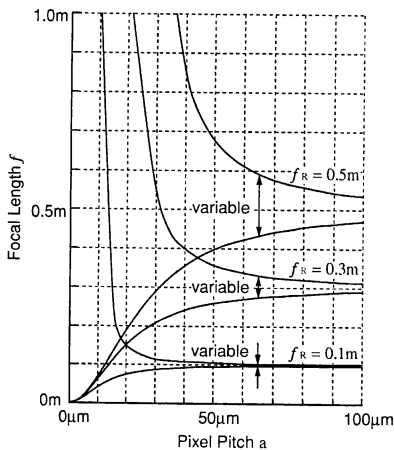


Fig. 4 The variable range of the focal length f of the liquid crystal active lens is calculated in terms of the pixel pitch a of the liquid crystal panel and the focal length f_R of the conventional lens.

で、これらに対して計算した結果を **Fig. 3** に示す。なお、光の波長 λ は 550 nm として計算した。つぎに、液晶アクティブレンズの合成焦点距離 f の可変範囲を、画素ピッチ a とレンズの焦点距離 f_R に対して計算した結果を **Fig. 4** に示す。画素数 N を 300 として計算した。同図より、画素ピッチ a とレンズの焦点距離 f_R を適切に選ぶことで、液晶アクティブレンズに大きなレンズパワーを持たせ、かつ合成焦点距離 f を広い範囲で変化できることがわかる。

2.3 横方向の作用

瞳関数の位相分布を制御して、コンボリューションによる画像処理を行う横方向の作用について考える。

入射画像の複素振幅分布を $g(x_0, y_0)$ で、出射画像の複素振幅分布を $u(x_i, y_i)$ で表す。位相変調液晶パネルでの位相分布 Φ のフーリエ変換を関数 H で表して、

$$\begin{aligned} H(x_i/\lambda s_i, y_i/\lambda s_i) &= F[\exp\{i\phi(x_1, y_1)\}] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{i\phi(x_1, y_1)\} \exp\{-i2\pi(x_1 x_i + y_1 y_i)/\lambda s_i\} dx_1 dy_1 \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、記号 F はフーリエ変換を意味する。コヒーレント光を用いた場合、出射画像は、

$$u(x_i, y_i) = g(x_i, y_i) * H(x_i/\lambda s_i, y_i/\lambda s_i) \quad (15)$$

ただし、記号 $*$ はコンボリューションを表す。インコヒーレント光を用いた場合は、

$$|u(x_i, y_i)|^2 = |g(x_i, y_i)|^2 * |H(x_i/\lambda s_i, y_i/\lambda s_i)|^2 \quad (16)$$

と表せる⁶⁾。以上より、液晶アクティブレンズの位相分布 Φ を制御することで、画像に対してさまざまなコンボリューション処理が行えることがわかる。

液晶アクティブレンズの横方向の作用を計算機で計算した例を、**Fig. 5** に示す。入射画像(a)図に対して、位相分布(b)図を用いる場合を考える。ただし、位相分布を濃淡画像で表した。(c)図は、(b)図の位相分布のフーリエ変換の強度分布である。すなわち、この(c)図と入射画像(a)図とのコンボリューションが出射画像(d)図になる。この例では、画像複製の効果がえられていることがわかる。また、この例ではコヒーレント処理の場合もインコヒーレント処理の場合も同様の結果がえられる。つぎに、入射画像(e)図に対して、位相分布(f)図を用いる場合を考える。(f)図の位相分布のフーリエ変換の強度分布が(g)図である。コヒーレント処理の場合の出射画像を(h)図に、インコヒーレント処理の場合の出射画像を(i)図に示す。これは、文字Aを検出

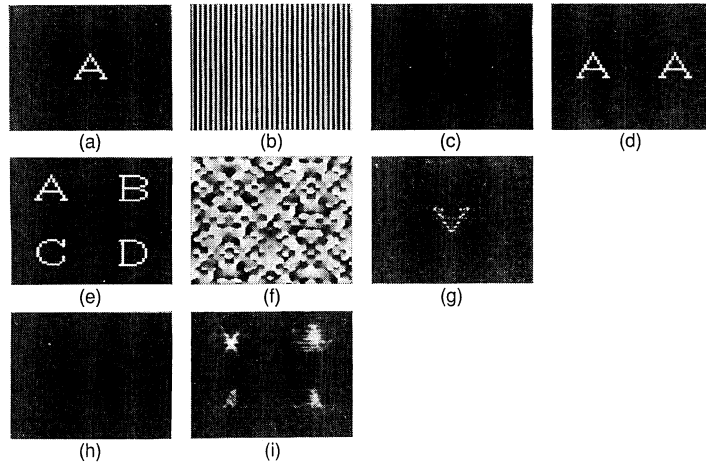


Fig. 5 Transverse effect of the liquid crystal active lens performs convolutions of images.

するマッチドフィルタリングであるが、当然のことながら、インコヒーレント処理に比べてコヒーレント処理の方が鋭い相関ピークがえられている。この場合、マッチドフィルタリングのフィルターは位相型である。なお、画像および位相分布のサンプル点数はともに 128×128 で、階調数はともに 256 階調で計算した。

2.4 液晶パネルのサンプリングの影響

つぎに、液晶パネルのマトリックス電極による位相分布のサンプリングが射出画像に与える影響について考える。いままでは、マトリックス電極による位相分布のサンプリングは無視して扱ってきた。実際には、位相分布がマトリックス電極によってサンプリングされるので、このことを考えに入れて瞳関数を $h_s(x_i, y_i)$ と表すと、

$$h_s(x_i, y_i) = [\exp\{i\phi(x_i, y_i)\} \text{comb}(x_i/a, y_i/a)] \\ * \text{rect}(x_i/b, y_i/b) \text{rect}(x_i/Na, y_i/Na) \quad (17)$$

となる。このフーリエ変換を関数 H_s で表すと、

$$H_s(\nu_x, \nu_y) = F[h_s(x_i, y_i)] \\ = a^4 b^2 N^2 [F[\exp\{i\phi(x_i, y_i)\}] \\ * \text{comb}(a\nu_x, a\nu_y) \text{sinc}(b\nu_x, b\nu_y)] \\ * \text{sinc}(aN\nu_x, aN\nu_y) \quad (18)$$

となる。ただし、

$$\nu_x = x_i/\lambda s_i \quad (19)$$

$$\nu_y = y_i/\lambda s_i \quad (20)$$

である。(18)式の H_s は、結像系の点像応答関数を表し、これをふたつの部分に分けて Fig. 6 に示す。前半のかぎ括弧部分は、位相分布のフーリエ変換が周期 $1/a$ で周期的に存在するものを $\text{sinc}(b\nu_x, b\nu_y)$ で変調した形になる。これと、後半部分の $\text{sinc}(aN\nu_x, aN\nu_y)$ のコン

ボリューションを行った形になる。

同図に示す 0 次成分が最終的に得たい射出画像を与える。サンプリングの影響として、同図に示すように、 ± 1 次などの高次の成分が表れる。この高次の成分が射出画像に影響しない範囲を考えると、

$$D = \lambda s_i/a \quad (21)$$

と表して、 $D \times D$ が扱える画像サイズである。

また、(18)式最後のコンボリューションにより射出画像の解像限界が決まり、射出画像の解像点数は、液晶パネルの画素数と等しく $N \times N$ である。

入射画像の大きさが $D \times D$ 以下の場合には、高次の成分は射出画像に影響を与えない。入射画像の大きさが $D \times D$ より大きい場合は、高次の成分が射出画像に影響をあたえ、これにより射出画像の SN 比が低下する。例えば、入射画像の大きさが制限できない自然画像を扱う場合などである。影響を与える次数は、画像の大きさと画素のモジュレーション b/a によって決まる。画素のモジュレーション b/a が 1 に近づくほど、高次の成分の影響は小さくなる。

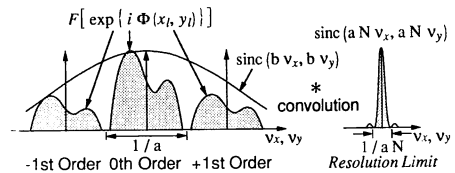


Fig. 6 The sampling of the phase modulator by the matrix electrodes produces higher order components, such as +1st and -1st orders. The 0th order component corresponds to the desired image.

3. 実 験

3.1 試作した液晶アクティブレンズ

試作した液晶アクティブレンズについて説明する。レンズとしては、焦点距離 250 mm で半径 15 mm の平凸レンズを用いた。位相変調液晶としては、ガラス基板に対して平行配向させたネマチック液晶を用いた。今回用いた液晶パネルの画素は正方形ではないので、 x_1 方向を添字 x で y_1 方向を添字 y で表す。画素のピッチ a と大きさ b は、それぞれ $a_x=45.3 \mu\text{m}$, $b_x=35.2 \mu\text{m}$, $a_y=79.9 \mu\text{m}$, $b_y=66.1 \mu\text{m}$ である。また、画素数 N は、それぞれ $N_x=236$, $N_y=105$ である。液晶パネルでの位相分布は、パーソナルコンピュータに接続したフレームメモリで制御した。フレームメモリの階調数は 256 階調である。フレームメモリの階調と位相変調特性の測定値を Fig. 7 に示す。測定には、波長 514 nm の Ar-ion レーザーを用いた。位相変調量 2π ラジアンが達成できていることがわかる。

3.2 実験装置

液晶アクティブレンズの実験系を Fig. 8 に示す。今回は、インコヒーレント処理を行う実験系を用いた。扱う画像のサイズを 6.0 mm×3.4 mm とし、入射画像を液晶プロジェクトタに表示し、縮小光学系によって画像サイズを合わせた。今回の実験に用いた液晶位相変調器では、特定方向に偏光した直線偏光に対してのみ正しく位相変調が行われるので、偏光子によって入射画像の偏光

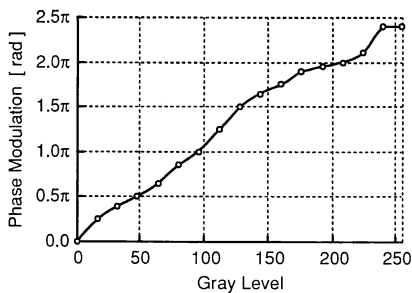


Fig. 7 Measured phase modulation of the liquid crystal panel in terms of gray levels of the frame memory.

方向をこれに一致させた。出射画像は、1/2 インチ CCD カメラによって撮影した。入射面から液晶アクティブレンズまでの物体距離 s_0 を 0.5 m, 液晶アクティブレンズから出射面までの像距離 s_i を 0.5 m とし、等倍の結像系を用いた。入射画像も、パーソナルコンピュータに接続したフレームメモリによって生成した。光源として液晶プロジェクトタの白色光源を用い、波長 550 nm で液晶パネルの位相変調量が 2π ラジアンになるように調整した。

本実験系において、液晶アクティブレンズが扱える画像のサイズは、(21)式より 6.07 mm×3.44 mm である。焦点距離の可変範囲は、(13)式より、 x_1 方向に $0.208 \text{ m} \leq f_x \leq 0.313 \text{ m}$, y_1 方向に $0.218 \text{ m} \leq f_y \leq 0.292 \text{ m}$ である。ただし、波長 $\lambda=550 \text{ nm}$ として計算した。

3.3 縦方向の実験

縦方向の実験として液晶アクティブレンズの焦点距離を、Table 1 に示すように 0.22 m から 0.29 m まで変化させた。それに対応して、像距離 s_i が同表に示す距離になるように CCD カメラを移動した。それぞれの位置を記号 P3 から P1, O, および N1 から N4 で示す。Oは等倍の結像位置である。

液晶アクティブレンズの位相分布は(1)式より計算した。濃淡画像で表示した位相分布を Fig. 9 (a)~(h) に示す。これらの位相分布を用いて実験を行った結果えられた出射画像を同図(i)~(p)に示す。実験結果から、それぞれの位置で出射画像の結像が確認できる。また、焦点距離が大きくなるにつれて、当然のことながら

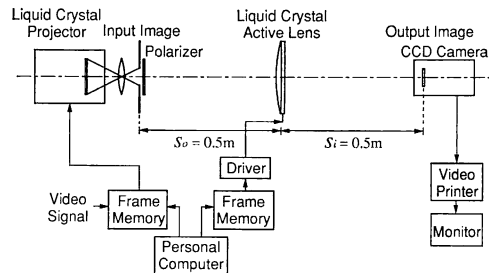


Fig. 8 Experimental setup of the liquid crystal active lens.

Table 1 Experimental parameters of longitude effects of liquid crystal active lens.

Positions	P3	P2	P1	O	N1	N2	N3	N4
Diffractive focal length f_D (m)	1.83	2.88	6.00	∞	-6.50	-3.38	-2.33	-1.81
Combined focal length f (m)	0.220	0.230	0.240	0.250	0.260	0.270	0.280	0.290
Image length s_i (m)	0.393	0.426	0.462	0.500	0.542	0.587	0.636	0.690

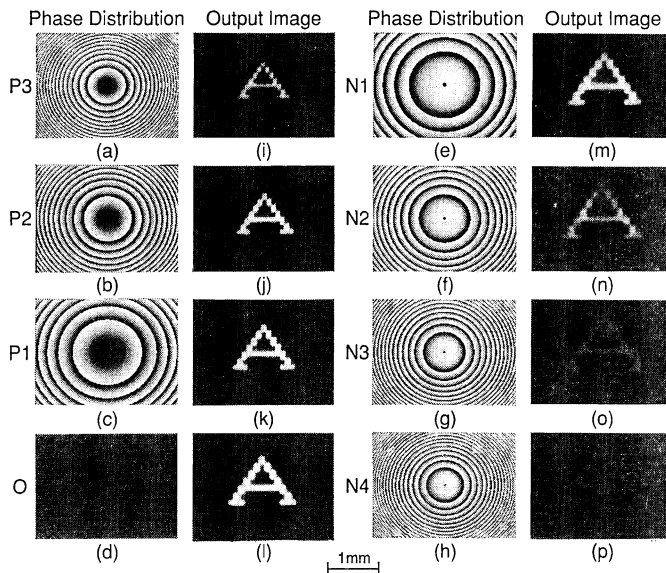


Fig. 9 Experimental results of the longitude effect of the liquid crystal active lens. (a)-(h) are the calculated phase distributions, and (i)-(p) are the experimental results of the images.

像が大きくなっている様子がわかる。なお、実験結果の写真は、紙面の都合で出射画像の中心部についてのみ示した。

3.4 横方向の実験

横方向の実験について説明する。

最初に、液晶アクティブレンズの位相分布として、

$$\phi(x_1, y_1) = -2\pi(d_x x_1 + d_y y_1) / \lambda s_i \quad (22)$$

を用いると、画像を x_1 方向に距離 d_x 、 y_1 方向に距離 d_y だけ移動できる。画像を移動できる範囲は、今回用いた実験系では、 x_1 方向に $-3.04 \text{ mm} < d_x < 3.04 \text{ mm}$ で y_1 方向に $-1.74 \text{ mm} < d_y < 1.74 \text{ mm}$ である。本論文では、 x_1 方向の画像の移動に関して、 $d_x = 0.0 \text{ mm}$, 0.2 mm , 0.4 mm , 0.6 mm , 0.8 mm , 1.0 mm , 1.5 mm とした場合についてのみ実験結果を示す。

実験に用いた位相分布の濃淡画像を **Fig. 10** (a)~(g)に示す。これらの位相分布を用いて実験を行った結果えられた出射画像を同図(h)~(n)に示す。実験結果から、画像が x_1 方向に移動していることが確認できる。なお、実験結果の写真は、紙面の都合で出射画像の上下を取り除いたものになっている。 x_1 の負の方向、および y_1 方向の画像の移動についても同様に実験を行い、動作を確認した。

つぎに、**Fig. 5** の例で示した画像の複製の実験を行った結果を **Fig. 11** に示す。同図(b)が実験に用いた位相分布である。(a)図が入射画像で、(c)図が実験の結果

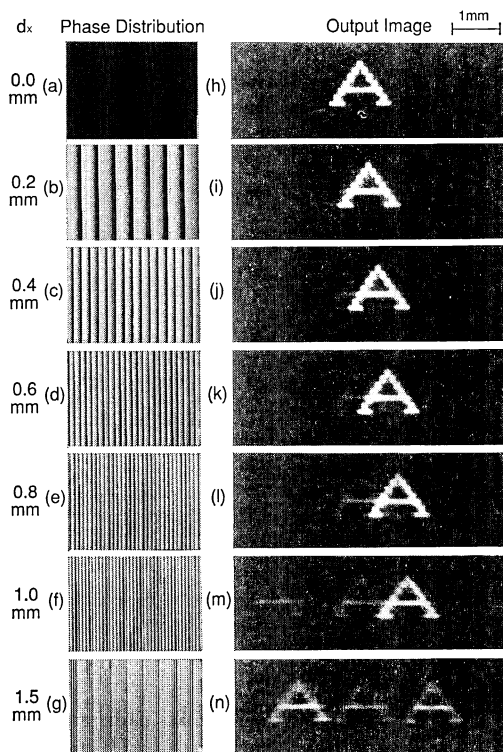


Fig. 10 Experimental results of the transverse effect of the liquid crystal active lens. Input images are shifted in x -direction. (a)-(g) are the calculated phase distributions, and (h)-(n) are the experimental results of the images.

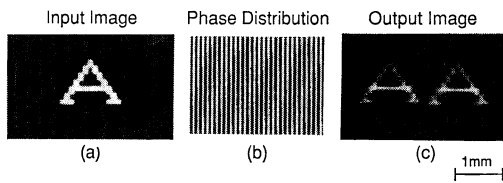


Fig. 11 Experimental results of the transverse effect of the liquid crystal active lens. Image reproductions are performed. (a) the object, (b) the calculated phase distribution, and (c) the experimental result of the image.

えられた出射画像である。実験結果から、画像複製が行われていることが確認できる。

4. 考 察

液晶アクティブレンズは、位相変調液晶パネルが回折型の光学素子として機能するため、回折型光学素子に固有の色収差¹²⁾が生じる。縦方向の実験結果で、焦点距離の変化量が大きくなるほど画像の強度が減少していることがわかる。また、横方向の実験結果で、目的とする画像以外にもとの画像が表れていることがわかる。これらは、今回の実験で白色光源を用いたために生じた色収差である。液晶アクティブレンズの色収差の原因としては、ふたつの原因が考えられる。第一に、波長によって位相の変調量が変わること。第二に、(15)式および(16)式より波長によってコンボリューションを行う画像の大きさが変化することである。さらに、以上のふたつの原因に合わせて、液晶自体の持つ色分散が存在する。

横方向の実験結果では、移動量 1.5 mm が移動の限界であった。これは、計算値と比べると約半分程度の値である。この原因としては、液晶パネルをフレームメモリからのビデオ信号で駆動したが、フレームメモリと液晶パネルのサンプリング間隔が異なるため、液晶パネルを一画素ずつ完全に独立に駆動することができなかったことが考えられる。そのため画素間のクロストークが大きく、位相分布の解像度が画素の解像度の半分程度になっているためであると考えられる。

横方向の作用として、例えばマッチドフィルタリングなどを行う場合を考えると、瞳関数が位相分布のみで、振幅分布が表現できないことが問題点である。そのため、完全に任意の画像とのコンボリューションを行うことができない。これを解決するためには、振幅変調を行う液晶パネルの付加などの方法が考えられる。しかし、そうすると出射画像の強度の低下を招くことになるので、位相分布のみで目的を達成する位相分布の最適化手

法が重要であると考えられる。

本論文では、液晶アクティブレンズの縦方向の作用と横方向の作用を別々に分けて実験を行ったが、当然のことながら、これらを同時に作用させることも可能である。

5. 結 語

本論文において、レンズと位相変調液晶パネルを組み合わせた液晶アクティブレンズを提案した。これは、縦方向の作用として焦点距離の制御、横方向の作用としてコンボリューションによる画像処理を行う機能を有する。これらを、機械的な可動部なしに電氣的に制御できる。提案した液晶アクティブレンズを試作し、その動作を実験によって確認した。

今回の実験では、白色光を用いたインコヒーレントな光学系を用いたため、色収差が観測された。液晶アクティブレンズは回折型光学素子であるため、元来、大きな色収差を有する。この色収差を評価することは重要であるので、今後、検討する予定でいる。

液晶アクティブレンズの応用としては、焦点距離が制御できることから、カメラなどの画像入力装置への応用が考えられる。また、画像のコンボリューション処理が行えるので、画像処理、光コンピューティング、さらには光インターコネクションなどへの応用が考えられる。また、その構造が人間の眼球に類似していることから、人工眼球などへの応用も考えられる。

今後の改良点としては、液晶パネルの画素の正方化、開口率の向上、および偏光依存性の除去などがある。

本実験の遂行にあたり、液晶パネルをご提供いただいたシチズン時計株式会社に感謝の意を表します。

文 献

- 1) J. M. Sasian: "Four-mirror optical system for large telescope," *Opt. Eng.*, **29** (1990) 1181-1185.
- 2) B. Hulburd and D. Sandler: "Segmented mirrors for atmospheric compensation," *Opt. Eng.*, **29** (1990) 1186-1190.
- 3) S. Sato: "Liquid-crystal lens-cells with variable focal length," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18** (1979) 1679-1684.
- 4) T. Tatebayashi, T. Yamamoto and H. Sato: "Electro-optic variable focal-length lens using PLZT ceramic," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 5049-5055.
- 5) T. Shibaguchi and H. Funato: "Lead-lanthanum zirconate-titanate (PLZT) electrooptic variable focal-length lens with stripe electrodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 3196-3200.
- 6) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, New York, 1968) pp. 101-136.

- 7) J. A. Davis, G. M. Heissenberger, R. A. Lilly, D. M. Cottrell and M. F. Brownell: "High efficiency optical reconstruction of binary phase only filters using the Hughes liquid crystal light valve," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 929-935.
- 8) J. L. Horner and P. D. Gianino: "Phase-only matched filtering," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 812-816.
- 9) T. H. Barnes, K. Matsumoto, T. Eiju, K. Matsuda and N. Ooyama: "Phase only liquid crystal light modulator and its application in the Fourier plane of optical correlation systems," *Optical Pattern Recognition II* (SPIE **1134**, Bellingham USA, 1989) pp. 204-208.
- 10) T. H. Barnes, K. Matsuda, T. Eiju, K. Matsumoto and F. Johnson: "Joint transform correlation using a phase only spatial light modulator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L1293-1296.
- 11) D. A. Yocky, T. H. Barnes, K. Matsumoto, N. Ooyama and K. Matsuda: "Simple measurement of the phase modulation capability of liquid crystal phase-only light modulators," *Optik*, **84** (1990) 140-144.
- 12) A. D. Kathman and S. K. Pitalo: "Binary optics in lens design," *International Lens Design Conference* (SPIE **1354**, Bellingham USA, 1990) pp. 297-309.