

## 最近の技術から

# 液晶空間光変調器によるキノフォームの記録と再生

尼子 淳・曾根原富雄

セイコーエプソン(株)研究開発本部 〒392 諏訪市大和 3-3-5

## 1. ま え が き

計測, 加工, 情報処理をはじめ光応用分野のさまざまな場面で, 光の波面すなわち位相を制御する技術が期待されている. この期待に応えるには, プログラム自在性のある高精度な位相マスクの技術が鍵になる.

筆者らは, 電気アドレス方式の液晶空間光変調器(以下, LCSLM と称する)に着目し, キノフォーム<sup>1)</sup>の製作を試みた. LCSLM は, 1) 低電圧, 低消費電力で駆動できる, 2) 液晶の配向と偏光の組み合わせを工夫することにより変調モード(振幅, 位相)を選択できる, 3) マトリクス構造により光の変調点(画素)を高精度に配置できる, という優れた特徴を備えている. LCSLM をキノフォームの記録媒体として用いることにより, 1) 露光現像処理が不要になり目的に合わせた性能が安定に得られる, 2) 信号を更新するだけで所望の光波面を自由に再生できる, 等の効果が生まれる.

本稿では, LCSLM の観点から, プログラム可能なキノフォームについて紹介する. キノフォームの原理, 一般的な技術課題については, 文献 2) を参照していただきたい.

## 2. L C S L M

キノフォームを記録するには, LCSLM に対してつぎのことが要求される: 1)  $2\pi$  以上の連続的な位相変化が得られること, 2) 位相変化と印加電圧の関係が線形であること, 3) 位相変化にともなう振幅(透過光量の平方根)の変動が小さいこと, 4) 表示領域内の電気光学特性が均一であること. これらの要求からのずれは, キノフォームからの再生波面に不要な収差を与える. たとえば画像再生へ応用した時には, 原画像に対する強度の誤差を発生させる.

以上の要求をふまえ, 筆者らは液晶の配向に ECB (電界制御複屈折) モードを選択し, TFT (薄膜トランジスタ) で駆動することにした<sup>3,4)</sup>. 光が感じる屈折率変化を大きくとるために, 液晶分子の初期配向を保持基

板とほぼ平行にして, 分子軸方向に合わせた直線偏光を使用した. また素子応答を速くするために, 複屈折  $\Delta n$  が大きい液晶材料を用いて, 液晶層の厚み  $d$  を薄くした. 使用波長  $0.633\ \mu\text{m}$  に対して  $\Delta n=0.209$ ,  $d=6.0\ \mu\text{m}$  である. LCSLM の有効画素数は  $320\times 220$ , 画素間隔は水平方向  $80\ \mu\text{m}$ , 垂直方向  $90\ \mu\text{m}$ , 画素開口部の面積は  $56\times 64\ \mu\text{m}^2$  である.

試作した LCSLM の光変調特性を図 1 に示す.  $1.7\ \text{V}$  から  $4.5\ \text{V}$  の範囲で, ゼロから  $2\pi$  のほぼ線形な位相変化が得られた. 振幅変動の要因は, 液晶分子の配向の変化とともに光線の進行方向が傾き, 画素開口部を透過する光量が変動することによると思われる. この振幅変動を抑えるには,  $\Delta nd$  を大きめにかつプレチルトを高めめに設定することが効果がある. なお表示領域には, 主にセル厚むらに起因する収差が発生する. この収差はまえて計測しておいて, キノフォームの位相データから差し引いて補正する.

## 3. キノフォームの記録と再生

LCSLM へ記録したキノフォームレンズの性能と, このレンズの変焦点機能に応用した, 画像の拡大・縮小再生および 3 次元再生について述べる<sup>5)</sup>.

図 2 は円形レンズにおけるスポット径 ( $1/e^2$  幅) と F 数の関係である. 計算値 (回折限界) を実線で, 実測値をプロットで示した. 集光スポットの鳥瞰図は F 数が

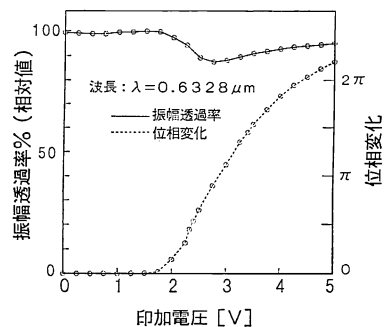


図 1 LCSLM の光変調特性

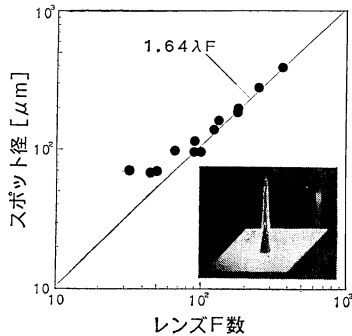


図2 キノフォームレンズの性能

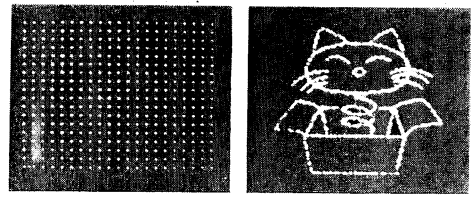
125のレンズのものである。輪帯の最小幅を画素間隔の1倍以上すなわちF数を95以上にとると、ほぼ回折限界の集光スポットが得られた。このレンズの集光効率はい射光量に対して9%である。

画像再生のためのキノフォームの位相データは、ふつうはランダム位相法<sup>1)</sup>により計算する。しかし、この方法では振幅成分を無視したことによる誤差が大きく、再生像の質は著しく低下する。そこで、振幅成分が一定であるという条件と位相成分の量子化のレベル数を拘束条件として加え、反復計算によりキノフォームの位相データを最適化した。この反復計算には、フーリエ変換反復法<sup>4)</sup>やシミュレーテッドアニーリング法<sup>6)</sup>が用いられる。こうして求めた位相データにレンズ位相関数を重ね、全体を量子化した後にLCSLMへ表示した。レンズ位相関数をかえれば、大きさの異なる再生像が得られる。図3に、13×13のスポットアレイの再生像と、線画の再生像を示す。さらに、物体の断面像からキノフォームを計算し、それぞれに焦点距離の異なるレンズを重ねた後にキノフォームとして合成すれば、3次元再生ができる。図4は、奥行き方向に9枚の画像を重ねて再生した像である。図3と図4で、キノフォームを表示するために使用した画素数は256×220、量子化のレベル数は16である。

再生像にみられる強度の誤差の要因として、1) 位相変調特性に非線形性が残っている、2) 位相データの量子化レベル数が不足している、3) 画素間の光学特性にばらつきがある、ことがあげられる。

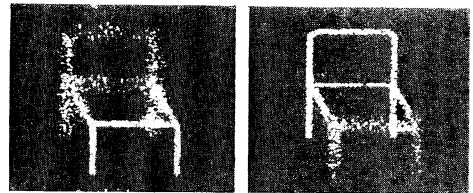
#### 4. 応用

LCSLMへ記録したキノフォームの波面変換作用により、ビームを集光、偏向したり、曲面へ文字や絵を結像することができる。光接続や光刻印のような使い方が思い浮かぶ。キノフォーム特有のスペckルノイズを除く



(a) スポットアレイ (b) 線画

図3 キノフォームからの2次元再生像



(a) 手前 (b) 奥

図4 キノフォームからの3次元再生像

には、SLMの特徴をいかして時間平均をとるやり方が実用的だろう。アクティブな素子としての使い方のほかにも、干渉計測における所要の参照波面を発生させる手段として<sup>7)</sup>、あるいは光を用いた画像処理のための位相フィルタとして、幅広く応用が期待できよう。

#### 5. あとがき

画像再生を例にあげながら、LCSLMを用いたキノフォームの製法について述べてきた。LCSLMの画素数と空間解像度の向上が今後の課題である。

最後に、実験に協力いただいた三浦弘綱氏に謝意を表します。

#### 文 献

- 1) L. B. Lesem, P. Hirsch and J. A. Jordan, Jr.: "The kinoform: new wave front reconstruction device," *IBM J. Res. Dev.*, **13** (1969) 150-155.
- 2) 一岡芳樹: "キノフォームとその応用", *光学*, **2** (1973) 133-152.
- 3) 尼子 淳, 曾根原富雄: "液晶空間光変調器を用いたキノフォーム", 第51回応物秋季講演会, 26 a-H-10 (1990) p. 754.
- 4) J. Amako and T. Sonehara: "Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 4622-4628.
- 5) 尼子 淳, 三浦弘綱, 曾根原富雄: "液晶空間光変調器を用いたキノフォーム(II)", 第38回応物関連講演会, 29 a-SF-13 (1991) p. 975.
- 6) 吉川宣一, 谷田貝豊彦: "シミュレーテッドアニーリングによる計算機ホログラムの位相分布の最適化", 第51回応物秋季講演会, 28 a-K-7 (1990) p. 812.
- 7) T. H. Barnes, M. Muramatsu and K. Matsuda: "Interferometer using a flexible flexible kinoform implemented with a liquid crystal panel," *Optics in Complex Systems*, SPIE Proc., **1319** (1990) pp. 218-219.

(1991年11月5日受理)