



トールボット効果を用いた液晶空間変調素子の 回折効率の改善

市川 裕之・ツルネン ヤリ

ヘリオット・ワット大学物理学科

(1992年11月16日受付, 1993年1月11日受理)

Improvement of the Diffraction Efficiency of Liquid Crystal Spatial Light Modulators by the Talbot Effect

Hiroyuki ICHIKAWA and Jari TURUNEN

Department of Physics, Heriot-Watt University, Riccarton,
Edinburgh EH14 4 AS, Scotland, UK

(Received November 16, 1992; Accepted January 11, 1993)

We investigate the practical feasibility of a novel technique to improve the diffraction efficiency of dynamic diffractive optical elements written on a phase-type liquid crystal spatial light modulator. This scheme employs binary phase gratings on both sides of the device, which pass virtually all of the incident light through the transparent portion of the pixels. Numerical analysis and an alignment experiment are described.

1. はじめに

液晶空間変調素子 (LCSLM)^{*1} は連続的な位相あるいは強度変調特性に加え, 低駆動電圧, 低コストで扱いやすいなどの利点を持っており, 光情報処理, 光計測等の分野において重要な役割を果たすようになって来¹⁾。しかも, 市販の液晶テレビ, プロジェクター用液晶パネルの色フィルターを取り外すことで容易に転用できるとあって, その使用は急速に拡がりつつある。ところが一方, 低解像度 (>20 lp/mm), 低応答速度 (~数十 μ s), 電気回路による不透明領域のためピクセルの開口率が低い等の欠点がある。

我々はトールボット効果を用いて, 不透明領域による問題点を解決し, 回折効率を改善する方法を既に提案し

ている²⁾。その後より詳細な検討および簡単な実験を行い, その有用性が確認できたのでここに報告する。

2. 原 理

各種液晶素子の中で薄膜トランジスタ (TFT) を用いたアクティブマトリクス方式の LCSLM は, 解像度, 応答速度等の点で, 空間変調素子 (SLM) として最も優れているが, その反面カバーガラス基板上に電気回路を必要とし, それがピクセルの開口部面積を制限するという欠点を有している。LCSLM への入射光の一部がこの不透明領域で遮られて, 素子の回折効率を低下させる主たる原因となっている。この不透明領域は素子の解像度が高くなるに従い増加する傾向にあり, ピクセルの一辺が 50 μ m 程度のもものでは開口部はピクセルのおよそ 1/4 にすぎない。この問題を解決するには, 入射光の大半がピクセルの開口部を通過するようにしてやればよい。

一方, 自己結像現象³⁾であるトールボット効果はアレイイルミネーターとして利用できることが, Lohmann によって提案されている^{4,5)}。すなわち, 位相差 $\pi/2$ の 2 値矩形位相格子の後方 $Z_T/4$ の距離に出現する, 周期

*1 強誘電性液晶空間変調素子は高速 (~10 μ s), 高解像度で, メモリ性を有し光双安定を示す一方, 2 値素子であるため, 不要な回折次数の出現による問題が生じる。したがって, 通常の液晶素子とは異なった機能, 応用分野を持つものと解釈する方が適当であると筆者らは考えるので, 本論文ではネマチック液晶を用いた素子を念頭に置いて論じることとする。

が位相格子と等しい2値矩形振幅格子(ロンキー格子)像がビームアレイとして使用できるわけである。ここで、 $Z_T=2d^2/\lambda$ はトルボット距離、 d はピクセルの周期、 λ は真空中での波長である。この強度パターンの明るい部分(周期の半分)がLCSLMの開口部を透過するように矩形位相格子を準備してやれば、原理的には全入射光がほとんど不透明領域で遮られることなく変調を受けることが可能となり、回折効率の向上が期待できる。

そこで我々はFig. 1に示すようなトルボット効果を利用した対称型の光学系を提案する。PG₁とPG₂は同一の2値矩形位相格子で、LCSLMの間隔は共に $Z_T/4$ である。ここでPG₁への入射光は z 軸方向の平行光とする。PG₁によるビームアレイがLCSLMの開口部を透過し、そこで変調された波面はPG₂によって、PG₁の影響を相殺される。すなわち、もしLCSLMの電源がOFFの状態では入射光を変調することなく透過させるのなら、PG₂からの出射光はPG₁への入射光と同じく、 z 軸方向の平行光となる。

3. 数値解析

トルボット効果は、近軸理論の範囲内の現象であり、矩形位相格子、LCSLMは共に数学的には平面ホログラムと同じ扱いができる。本論文では、連続的に配置された平面ホログラムの数値解析に便利な、角スペクトル表示⁶⁾を用いたBPM (beam propagation method)の手法⁷⁾を用いることにする。なお、簡単のため、ここでは、 y 軸方向には変化のない1次元の構造を考える。波動場、角スペクトルを U, A とし、また、各面における入射光、出射光をそれぞれ添字、 $-$ 、 $+$ で表し、 j を各面の番号とすると、隣接する二つの格子間の波動場、角スペクトルの関係は次のようになる。

$$U^+(x, z_j) = t(x, z_j)U^-(x, z_j), \quad (1)$$

$$A_m^+(z_j) = \frac{1}{d} \int_0^d U^+(x, z_j) \exp(-i2\pi mx/d) dx, \quad (2)$$

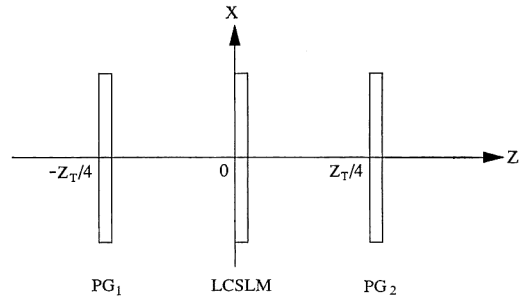


Fig. 1 The proposed optical setting. LCSLM: Liquid crystal spatial light modulator. PG₁, PG₂: Phase-type Ronchi gratings.

$$A_m^-(z_{j+1}) = A_m^+(z_j) \exp[iw(z_{j+1} - z_j)], \quad (3)$$

$$U^-(x, z_{j+1}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^-(z_{j+1}) \exp(i2\pi mx/d), \quad (4)$$

ただし、

$$w = \sqrt{(n/\lambda)^2 - (m/d)^2}, \quad (|m| \leq nd/\lambda), \quad (5)$$

$$\simeq n/\lambda - m^2\lambda/2nd^2. \quad (6)$$

ここで、 $t(x, z_j)$ は z_j 面の振幅透過関数、 n は格子間媒質の屈折率分布、 m は回折次数である。

ここで我々は開口部がピクセル周期の1/2であり、吸収、反射のない理想的な位相変調型1次元LCSLMを仮定し、無変調、鋸刃状格子(8ピクセル/周期)、 1×8 ビームアレイジェネレーター(32ピクセル/周期)の3種類の位相変調をかけた場合を例として取り上げる。それぞれについて、LCSLMのみ、PG₁とLCSLM、PG₁とLCSLMとPG₂の3種類の光学系における回折効率等を計算し、理想的位相格子と比較した結果をTable 1に示す。

無変調の場合、LCSLMはロンキー格子と同じ構造となり、Fig. 1の光学系を用いると、PG₂からの出射光は完全に平行光となることがわかる。鋸刃状格子、ビームアレイジェネレーターでも大幅な回折効率の改善が見ら

Table 1 Performance of several optical settings.

	No modulation η_0	Saw-tooth grating η_1	1×8 Beam array generator	
			η_A	Δ
Ideal	1.00	0.950	0.933	0.00138
LCSLM only	0.250	0.247	0.237	0.0184
PG ₁ +LCSLM	0.500	0.494	0.473	0.0184
PG ₁ +LCSLM+PG ₂	1.00	0.758	0.833	0.113

η_i : Diffraction efficiency of i -th order, η_A : Diffraction efficiency of the beam array, Δ : Uniformity error of the beam array.

れる。

一方、ビームアレイの均一度は大きく低下しているが、これは LCSLM の位相パターンをあらためて最適化してやることにより、著しく改善 ($\eta_A = 0.800, \Delta < 10^{-3}$) することが可能である。実際の実験においては、この再最適化過程は PG₂ からの出力パターンを計算機にフィードバックしながら行う方が望ましい⁸⁾。

一般に、LCSLM のピクセル周期は数十 μm で、

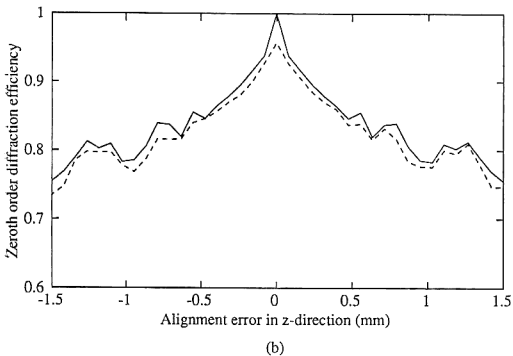
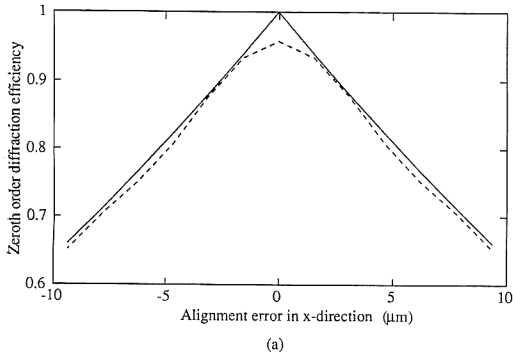


Fig. 2 Effect of alignment error on the zeroth-order diffraction efficiency of an unmodulated LCSLM with the optical setting of Fig. 1. Solid curve: paraxial result. Dashed curves: non-paraxial results. (a) x -direction, (b) z -direction.

Fig. 1 の光学系を実現しようとする、2枚の格子と LCSLM の正確な位置合せが必要であることは容易に想像できる。したがって、ここでは x, z 軸方向の位置ずれ、および PG₁, PG₂ の位相誤差の影響を検討してみる。簡単のため、無変調の LCSLM を取り上げ、PG₂ 出射後の 0 次光の回折効率を調べることにする。LCSLM を固定し、一箇所、一方向の位置ずれのみが存在する場合の結果を **Fig. 2** に示す。 x, z 軸どちらの方向の場合にも、PG₁, PG₂ の位置ずれはほとんど同じ影響を与えるので、図には代表的な結果のみを載せている。これを見ると、 x 軸方向の位置ずれの影響の方がはるかに大きいことがわかる。これはここで用いたモデルにおいて、PG₁ によるビームアレイの大きさが LCSLM の開口部と全く同じであることに起因している。また、本項冒頭でトルボット効果は近軸領域の現象と述べたが、現実の光学系においてはこの前提条件が許されるものかどうか調べておく必要がある。図中の破線は近軸という条件を取り去り、式(6)の代りに式(5)を用いた場合の結果である。これを見ると、最適位置以外では近軸理論の結果と数 % の差しかなく、実用上この光学系は有効に作

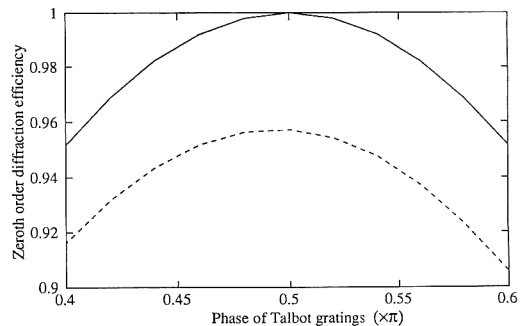


Fig. 3 Effect of phase error of PG₁ and PG₂ on the zeroth-order diffraction efficiency of an unmodulated LCSLM with the optical setting of Fig. 1. Solid curve: paraxial result. Dashed curves: non-paraxial results.

Table 2 Diffraction efficiency[†] of the output wave from optical setting of Fig. 1.

Diffraction order	From AG			From PG ₂ *		
	-1	0	+1	-1	0	+1
Theory ON	0.203	0.500	0.203	0	1.00	0
OFF	0	0	0	0.405	0	0.405
Measured ON	0.17	0.39	0.17	0.01	0.71	0.01
OFF	—	—	—	0.35	0.02	0.31

[†]: Measured values are corrected taking account of reflection and absorption.

*: AG is at the optimal position.

用すると判断できる. 同様に, PG_1 , PG_2 が同じ位相誤差を持つ場合の回折効率への影響を Fig. 3 に示す.

4. 実験結果

前項で述べた理論を確認するために, 周期 $100\ \mu\text{m}$ のロンキー格子 (AG) を仮想 LCSLM として用い, それからリソグラフィ, エッチングによって複製された位相格子を PG_1 , PG_2 として Fig. 1 に示す光学系を組んだ.

回転位置決め誤差は, モアレ縞を消すように三つの格

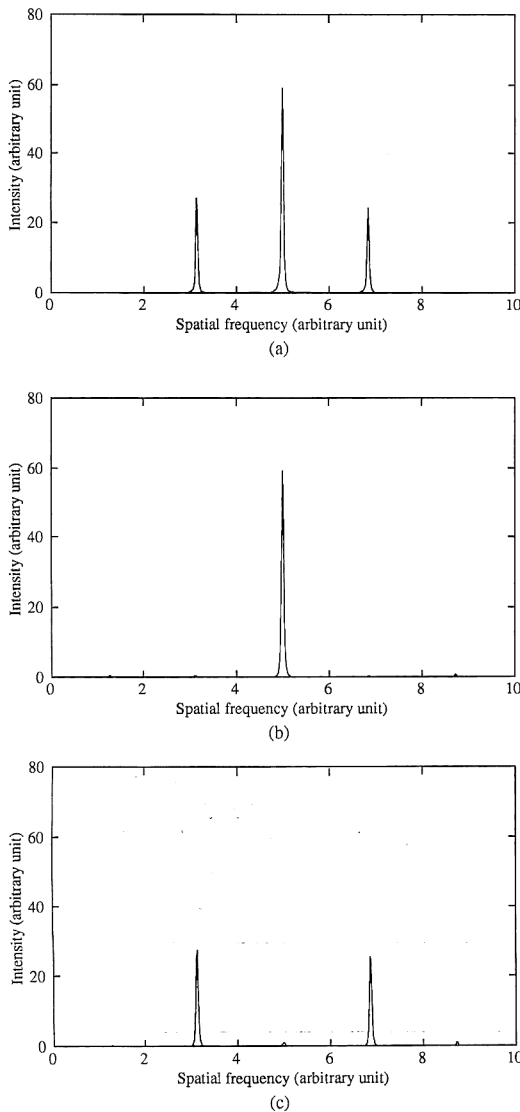


Fig. 4 Power spectrum of output wave from the optical setting of Fig. 1. (a) After ON-AG. (b) After ON-AG and ON-PG₂. (c) After ON-AG and OFF-PG₂.

子を設置してやることによって容易に減少できる. また, x , z 軸方向の位置は 0 次光の強度をモニターすることで最適位置が決定できる. z 軸方向の最適位置のもとで, AG, PG_2 を x 軸方向に動かし, 最適位置 (ON) およびそこからピクセル半周期ずらした位置 (OFF) での, AG, PG_2 からの出射光のパワースペクトル (= |角スペクトル|²) を測定した結果を, Table 2, Fig. 4 に示す.

これによると, AG からの出射光はほぼ理想的なロンキー格子の出力パターンを示している. また, 最適位置合せの場合の PG_2 からの出射光は実質的に 0 次のみとみなせる. 一方, PG_2 を半周期ずらせば, PG_2 からの出射光は位相差 π の 2 値矩形位相格子と同じ回折パターンを示し, 0 次光はほとんど消滅する. 以上のことから, 我々の提案する光学系 (Fig. 1) は実際に有効に作用していることが明らかである.

実験で得られた回折効率は理論値よりかなり低くなっている. この実験で用いた位相格子の位相差の測定値は 0.54π であり, また, x 軸方向の位置合せの精度は $5\ \mu\text{m}$ 程度と見積ると, PG_1 , PG_2 の位置ずれの組合せによっては, z 軸方向の最適位置であっても, 回折効率は 80% 以下に低下することが数値解析により示される.

5. むすび

我々はトルボット効果を用い, LCSLM の回折効率を改善する方法を提案し, その有効性を簡単な確認実験によって証明することができた. ここでは位相格子と仮想的 LCSLM である振幅格子の構造は全く同じであるが, 実際には, 一般に LCSLM の開口部の一辺はピクセル周期の半分以上であるため, 特に x 軸方向の位置合せの制限は, 前項での確認実験の場合よりも緩やかである. また, より精密な微動台を用いることによって, ここで得られた実験結果はさらに改善できると考える.

本論文では 1 次元の LCSLM のみを取り扱ったが, 原理的には 2 次元の場合にも適用できる. ただし, トルボット距離 Z_T は格子周期の関数であるため, もし LCSLM の周期が水平, 垂直方向で異なるならば, 各方向ごとに別々の位相格子が必要となる. 例えば, 2 方向の周期が $40\ \mu\text{m}$ と $50\ \mu\text{m}$ で, 仕様波長が $632.8\ \text{nm}$ ならば, Z_T はそれぞれ 1.264 , $1.975\ \text{mm}$ となり, さらに正確な位置決め精度が要求される.

こう言った点から, x , y 軸方向で等しいピクセル周期を持つ LCSLM を用いると, 2 次元の位相格子が使用でき, しかも出射パターンの縮尺は x , y 軸方向で等し

くなり実用上望ましい。したがって正方形単位ピクセル構造は、高解像度、大開口率、連続的位相変調、ホモジニアス液晶分子配向などと共に、われわれユーザーが LCSLM に望む仕様の重要な項目の一つといえる⁹⁾。

本研究の一部は Science and Engineering Research Council (UK) の援助のもとに行われた。

文 献

- 1) 光学, **21**, 第3号 (1992).
- 2) J. Turunen: "Fractional Talbot imaging setup for high-efficiency real-time diffractive optics," *Pure Appl. Opt.*, **2** (1993) in press.
- 3) K. Patorski: "The self-imaging phenomenon and its applications," *Progr. Opt.*, **XXVII** (1989) 1-108.
- 4) A. W. Lohmann: "An array illuminator based on the Talbot-effect," *Optik*, **79** (1988) 41-45.
- 5) A. W. Lohmann and J. A. Thomas: "Making an array illuminator based on the Talbot effect," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 4337-4340.
- 6) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, San Francisco, 1968).
- 7) H. Ichikawa, J. Turunen and M. R. Taghizadeh: "Analysis of hybrid holographic gratings by thin grating decomposition method," *J. Opt. Soc. Am.*, **A10** (1993) in press.
- 8) 高橋 毅, 石井行広: "液晶 TV 空間光変調器による光波制御型光結線素子", 第9回光波センシング技術研究会 (応用物理学会, 1992) pp. 73-78.
- 9) H. Ichikawa, T. H. Barnes, M. R. Taghizadeh, J. Turunen, T. Eiju and K. Matsuda: "Dynamic space-variant optical interconnections using liquid crystal spatial light modulators," *Opt. Commun.*, **93** (1992) 145-150.