液晶表示デバイスを用いたキノフォームによる カラー立体動画像表示

正会員 佐藤 甲 癸[†]

Animated Color 3D Image Display using Kinoforms by Liquid Crystal Devices

Koki Sato[†]

Abstract Attention is being paid to computer generated holograms (CGH) that can be formed by liquid crystal devices (LCD) because of their possible applications in electro-holography. In the research reported here the kinoform of an on-axis type CGH was constructed by using a commercially available TN type LCD as phase modulator, and the basic characteristics of its image were examined. Moreover an electro-holography system for color 3D animated image display was developed by using three LCD panels, RGB three lasers and graphics frame memory. A clear color image was reconstructed by taking into account the wavelength dependence of the size and position of the color image, then the characteristics of color gamut and animation of the reconstructed color image were evaluated in order to determine the feasibility of this system for electro-holography.

1. ま え が き

電氣的な信号により書換えが可能な動画ホログラムが立体テレビの方式として注目されている。すでに音響光学変調器 (AOM) と機械的な走査光学系を用いた方式では、かなり良質なホログラムの再生が得られ、また、カラー像も得られている¹⁾。一方、液晶表示デバイス (LCD) による方法は、電子的な走査を行うために高速な書換えが可能であり、また走査光学系などの位置ずれなどがなく安定な動作が行えるなどの特徴が

あるために、LCD の振幅および位相変調特性を用いた表示方式が期待されている。今までにも光学的ホログラムの干渉縞を LCD を用いて表示し、リアルタイムなホログラムの像再生が行われている^{2)~3)}。しかし、光学的ホログラムパターンを記録するためには高精度な LCD が必要とされるために、本格的にディスプレイをめざした研究は現在ではまだ少ない。そこで、キャリア周波数を含まない on-axis 型の計算機合成ホログラム (CGH) の一種であるキノフォームが着目され、ホモニアス型 LCD の位相変調特性を用いた

キーワード：動画ホログラム、計算機合成ホログラム、キノフォーム、液晶表示デバイス、カラー立体動画像

1993 年 7 月 22 日、1993 年テレビジョン学会年次大会で発表

1994 年 3 月 15 日受付、1994 年 6 月 6 日再受付

[†] 湘南工科大学 (〒251 藤沢市辻堂西海岸 1-1-25, TEL 0466-34-4111)

[†] Shonan Institute of Technology (1-1-25 Nishikaigan, Tsujido, Fujisawa-shi, Kanagawa 251, Japan)

キノフォームによる立体動画像表示に関する研究がすでに行われている⁴⁾。一方、入手が比較的容易な TN 型 LCD の位相変調を用いてもキノフォームの作成が可能である⁵⁾。

そこで本論文ではキノフォームの手法を用いて複数の LCD によるカラー立体動画像表示をめざし、市販の液晶プロジェクタ用の TN 型 LCD を用いるとともに、さらに LCD の特性を有効に用いるために、多チャンネルの LCD を用いてキノフォームを合成する。さらに大容量のフレームメモリおよび RGB の 3 色のレーザを用いてカラー立体動画像表示を行うシステムの作成を行い、得られた再生像の波長依存性、色再現性などの特性について検討を行うことにより、本システムの有効性を明らかにする。

2. 液晶 CGH

現在、最も一般に用いられている電氣的にアドレスを行う TFT アクティブマトリックス液晶パネルは、それ自体で光学的な回折格子として働く。そのために液晶 CGH (LCD-CGH) では、通常の CGH と異なり高次の回折光により再生像の領域が制限される。一方、on-axis 型の CGH であるキノフォームは、LCD のように解像度が制限される表示媒体の場合には適している方式と考えられる。

さらに、各色分解した入力パターンにより作成したキノフォームを 3 チャンネル LCD を用いて合成することにより、カラー像が得られる。

液晶キノフォームによる像再生の様子を図 1 に示す。

2.1 視域角

キノフォームの視域角は LCD パネルの大きさに比例する。もし液晶パネルのサイズを D_p 、結像用レンズの焦点距離を f とすると、視域角 θ は

$$\tan(\theta/2) = D_p/2f \quad (1)$$

(1) 式から視域角は液晶のパネルの大きさに比例し、焦点距離に反比例することがわかる。

図 1 LCD を用いたキノフォームの像再生
Image reconstruction of kinoform using LCD.

2.2 再生像の大きさ

図 1 に示すように、再生像の大きさ D はフーリエ変換における再生像の性質より

$$D = f \times \lambda / P \quad (2)$$

となる。ここで P は LCD パネルのピクセルサイズであり、 λ は再生光の波長である。再生像の大きさは焦点距離および再生光の波長に比例し、波長のピクセルの大きさに反比例することがわかる。そのために、入力パターンの大きさをあらかじめ変えることによって各波長による再生像の大きさを補正することが可能である。

2.3 再生領域

再生像面の大きさ D_0 は、液晶のピクセルによる回折角 ϕ で決まる ± 1 次回折光の間の領域で示され

$$P \times \sin \phi = \lambda \quad (3)$$

より求める。再生像の領域は再生光の波長に比例し、液晶のピクセルの大きさに反比例することがわかる。

2.4 再生像の結像位置

再生像の実像は、ほぼ像再生に用いる凸レンズの焦点面の位置の近傍に結像する。しかし、レンズ媒体の屈折率が光の波長に依存するために、レンズの焦点距離も再生光の波長によって変化する。波長の変化による屈折率の変化を Δn とすると、焦点距離の変化 Δf は

$$\Delta f / f = -\Delta n / (n - 1) \quad (4)$$

で与えられ、奥行き方向の結像位置が変化する。屈折率は波長が長いほど低くなるために、波長の最も長い赤色のレーザの時に結像位置は最も遠くなる。そのために、キノフォームに与えるレンズの位相分布に相当するパラメータを変えることにより、各波長による再生像の大きさを補正することが可能である。

3. 方 法

3.1 液晶パネルの仕様

本実験で用いた液晶パネルは 3 板式の液晶カラービデオプロジェクタ用のものであり、偏光フィルタおよびカラーフィルムを除去して用いている。また、各カラー用の液晶パネルを用いてカラー像再生を行っている。その仕様を表 1 に示す。

3.2 キノフォーム作成過程

キノフォームの作成過程は図 2 に示すように、入力パターンとしては 3 D-CG により設計したものにランダム位相分布を掛けたものを用い、各面に対して 2 次元 FFT を用いて波面の伝搬の計算を行った結果を重ねている。波面の振幅分布は一定と仮定し、位相の分布を求めて液晶パネルには濃淡のレベルで出力する。

表 1 LCD の仕様
Specification of LCD.

タイプ	90° TN 型
パネルサイズ	横 25.8×縦 19.8 mm
ピクセル数	横 320×縦 220
ピクセルサイズ	横 80×縦 90 μm
ドライブ方式	アクティブマトリックス方式

図 2 キノフォームの作成過程
Flow chart of making process of kinoform.

3.3 カラー 3D 動画像表示システム

図 3 に示すように、パーソナルコンピュータとフレームメモリを内蔵したイメージプロセッサを用いた動画像処理システムを作成した。最大画面数 192 画面を記憶でき、フレームメモリに記憶されているキノフォームデータは、毎秒 10 フレーム程度までほぼ連続的に読出すことができる。

また、カラー像再生のために用いる 3 チャンネルの各液晶パネルは、図 3 に示すように各ハーフミラーに対して対称な位置に配置されている。各液晶パネルに照射するレーザー光は、He-Ne レーザ $\lambda(R)=633\text{ nm}$ (赤), YAG レーザ $\lambda(G)=532\text{ nm}$ (緑), He-Cd レーザ $\lambda(B)=441\text{ nm}$ (青) であり、各液晶パネルにより再生された再生像の実像は結像用の凸レンズの焦点面の近傍において重なり、カラー 3 次元像が直接観察できる。像再生の実験において He-Ne レーザを用いると、表 1 の LCD の仕様、結像用レンズの焦点距離 $f=1000\text{ mm}$ を用いて (1) 式および (2) 式から得られる視域角は $\theta=\pm 1^\circ$ 、再生像の大きさは約 8 mm^2 となる。

またカラー像再生では、用いるレーザーの波長により

図 3 カラー立体動画像表示システム
SF:空間フィルタ, HM:半透鏡
Color 3D animated image display system.
(SF: Spatial Filter, HM: Half Mirror)

再生像の大きさは異なり、例えば赤の時を 1 とすると、緑では 0.84、青では 0.70 となる。そのために、カラー像再生で各色の像を重ねる場合には、あらかじめ入力パターンの大きさの補正を行う必要がある。また、波長によりキノフォームパターンに掛ける位相項を変化させて再生像の結像位置を調整する。実験システムの一部で液晶の配置の部分写真 1 (96 ページに掲載) に示す。

4. 結果と検討

4.1 液晶パネルの位相変調特性

用いた液晶パネルの位相変調度を測定した結果を図 4 に示している。強度変調は印加電圧による透過光の変化を求め、また、位相変調度は印加電圧による干渉縞の変化によって測定を行った。ただし図 5 において、横軸はコンピュータからの濃淡レベルで示している。図 5 から、本実験で用いた液晶パネルで得られる位相変調度は、最大 π ラジアン程度であることがわかる⁵⁾。

図 4 TN 型 LCD の位相変調特性
Phase modulation of TN type LCD.

(a) 赤-緑

(b) 赤-青

(c) 緑-青

(d) 赤-緑-青

写真 3 カラーテストパターンによる再生像

Reconstructed image of color test pattern. (a) Red-green, (b) red-blue, (c) green-blue, (d) red-green-blue.

写真 1 複数 LCD の配置

Disposition of multi-channel LCD.

(a) 左向き回転

(b) 正面

(c) 右向き回転

写真 4 カラー動画像

Color animated image rotating to (a) left, (b) center, (c) right.

図 5 CIE 色度図
CIE chromaticity diagram.

4.2 キノフォームの特性

六角形の入力パターンとそのキノフォームおよびその再生像を写真 2 に示す．そこでキノフォームは，サンプリング点 128×128 ，濃淡レベル 256 で液晶パネルに表示される．キノフォームは本来 2π の位相変調度が必要であるが，この実験で得られた位相変調度は最大 π ラジアン程度である．この場合，不十分な位相変調度のためシミュレーション結果からも再生像にノイズが加わる様子がわかる．また，写真 2 (d) に示すように，再生像以外に中心のスポットおよび共役像が現れる様子がわかる．

4.3 カラー像再生

カラー画像の特性を求めるために，写真 3 (96 ページに掲載) に示すように RGB 各色の円を重ねて像再生を行った．そこでカラー像再生で各色の像を重ねる場合には，あらかじめ入力パターンの大きさの補正を行った．また，再生像の結像位置に関しては，像を観

(a) 入力パターン

(b) シミュレーション

(c) キノフォーム

(d) 再生像

写真 2 キノフォームによる像再生

Image reconstruction by kinoform.

(a) Input pattern, (b) simulated image, (c) kinoform pattern, (d) reconstructed image.

測しながら像の重なり具合により補正を行った。

色の表示特性に関しては、本実験に用いるレーザの波長より再生可能な色の範囲は、図5の色度図においてスペクトル軌跡の三角形の内部で示され、ほぼ全部の色を表現できるものとなっている。加法混色実験により得られる色合いは、写真3において各色の円が重なっている部分の色合いによって求めた。その結果は、色が重なっている部分はイエロー、シアン、マゼンタなどがそれぞれ明瞭に表示されていることがわかる。また、中心の白は他と比べて不鮮明になっているが、その原因として、この場合にはスペックルノイズなどによる各カラー像の強度の不均一さがすべての色が重なる領域において最も顕著になるためと考えられる。

4.4 カラー立体動画像

また、得られたカラー立体動画像の特性について示す。そこではキノフォームパターンはフレームメモリーから順次読出されるために、読出し速度は毎秒10フレーム程度が可能であり、そのために時間的に滑らかな動きの立体動画像の表示が可能である。写真4(96ページに掲載)にワイヤフレームの各カラー像が回転している様子を示している。(a)は左側に回転しているものであり、(b)は正面、(c)は右側に回転している様子を示している。各図形の色合いは、かなりはっきりと表示されていることがわかる。

5. む す び

TN型のLCDを用いて得られる位相変調度は π 程度であり、その場合には再生像の他に共役像および0次のスポットが生じるなどの問題があるが、再生像の領域を中心からシフトすることにより像再生が可能であり、また、再生像自体としては比較的良好なものが得られた。

大容量のフレームメモリーおよびイメージプロセッサによりキノフォームパターンを連続的に読出すシステムを用い、また3枚の液晶パネルのそれぞれの位相

変調を用いてキノフォームを合成し、それらにRGB3つの波長のレーザを照射することによりカラー立体動画像を観察することができる、動画ホログラフィシステムを構成することができた。

その結果、各色分解されたキノフォームパターンに対して、あらかじめ計算処理の段階でパラメータを変えることにより、再生像の再生位置や像サイズなどは補正を行うことが可能であることを明らかにした。

また本システムで表現できる再生像の色合いについては、加法混色を用いた実験により再生像の特性について明らかにすることができたとと思われる。今後は、さらに細かい特性について検討を行い、特性の改善を図るとともに、さらに液晶パネルの高精細化および大画面化を図り、本格的なホログラフィ立体テレビの実現に向けて研究を進める予定である。

【参 考 文 献】

- 1) P. St-Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, P. M. Hubel: "Color Images with the MIT Holographic Video Display", SPIE Proc. No. 1667-33, pp. 73-83 (1992)
- 2) N. Hashimoto, S. Morokawa, K. Kitamura: "Real-Time Holography using the High-Resolution LCTV-SLM", SPIE Proc. No. 1461-44, pp. 291-300 (1991)
- 3) 佐藤, 樋口, 勝間: "液晶表示デバイスを用いたホログラフィテレビジョンの基礎実験", テレビ誌, 45, 7, pp. 873-875 (1991)
- 4) T. Sonehara, H. Miura and J. Amako: "Moving 3D-CGH Reconstruction Using a Liquid Crystal Spatial Wavefront Modulator", Japan Display '92, S9-6, pp. 315-318 (1992)
- 5) A. Tanone, Z. Zhang, C. M. Uang, F. T. S. Yu, D. A. Gregory: "Phase Modulation Depth for a Real-Time Kinoform using a Liquid Crystal Television", Optical Engineering, 32, 3, pp. 517-521 (1993)

さとう こうき
佐藤 甲太 昭和50年、早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。理工学研究奨励研究生を経て、昭和52年、相模工業大学電気工学科に勤務。現在、湘南工科大学(校名変更)電気工学科教授。動画、ホログラフィ、画像処理研究に従事。工学博士。正会員。