液晶レンズを用いた高解像度 3D 液晶ディスプレイにおけるクロストークの改善

Improvement of the Crosstalk in Autostereoscopic 3D Display using LC GRIN lens with High Resolution LCD

岡 真一郎[†], 正会員 杉田 辰哉[†], 長沼 智彦[†],
齊藤 輝晃[†], 正会員 小村 真一[†], 宮沢 敏夫[†]

Shincirhio Oka[†], Tatsuya Sugita[†], Tomohiko Naganuma[†], Terunori Saito[†], Shinichi Komura[†] and Toshio Miyazawa[†]

Abstract In this paper, we investigate a 3D display using a Liquid Crystal Gradient Refractive Index (LC GRIN) lens. We optimized the structure of the LC GRIN lens and the parameters of the liquid crystal to obtain ideal refractive index dispersion. The dispersion of the refractive index was examined in detail in both an experiment and a simulation. The crosstalk measurement of the 3D display using a LC GRIN lens corresponded well to simulated results based on the measured dispersion of refractive index. A crosstalk value of 2.5% for two views is achieved in our 3D display using the LC GRIN lens.

キーワード：3D, 裸眼, 液晶レンズ, クロストーク

1. ま え が き

2D/3D 切り替え可能な 3D ディスプレイとして、種々提案されている。その中で最も有望であると考えられる方式が、液晶バリアを用いた方式、もしくは液晶レンズを用いた方式である。液晶バリアを用いた 3D ディスプレイは、すでに量産されている。液晶バリアは比較的容易に生産することが可能であるが 3D 表示時の輝度が 2D 表示時に比べ、半分になる欠点がある。一方、液晶レンズを用いた 3D ディスプレイは 3D 表示時に輝度低下がないことが長所であり、盛んに研究が進められている^{1)~3)}。しかしながら、液晶ギャップが厚いため生産性が困難であること、クロストークが液晶バリア方式に比べて高いことなどが欠点である。

本論文では、液晶レンズの屈折率分布の形状に着目し、液晶レンズ方式 3D ディスプレイの欠点であるクロストーク改善について検討した結果を述べる。

2. 液晶レンズ 3D 方式 LCD の構成

液晶レンズを用いた 3D ディスプレイの構成を図 1 に示した。液晶レンズを用いた 3D ディスプレイは液晶レンズ、表示用 LCD (Liquid Crystal Display) および BL (Backlight)

図 1 液晶レンズの構成
Structure of LC lens for 3D display.

2012 年 2 月 29 日受付, 2012 年 5 月 9 日最終受付, 2012 年 6 月 4 日採録

[†] 株式会社日立ディスプレイズ

(千葉県茂原市早野 3300, TEL: 0475-25-9061)

[†] Hitachi Displays, Ltd.

(3300 Hayano Mobarashi Chiba-ken 297-2622, Japan)

表 1 LCD のスペック
Specification of LCD module.

ディスプレイサイズ	4.5 インチ
解像度	HD(720×1280)
TFT	LTPS
画素ピッチ	77.1 μ m
精細度	329dpi
2D 輝度	400cd/m ²
視点数	2

で構成されている。表示用 LCD では右目用および左目用の画像が交互に表示される。液晶レンズに電圧を印加すると、右目用および左目用の映像は空間的に分離され、それぞれ右目、左目に入射され、観測者は立体感を感じる。本研究で用いた LCD は 4.5 インチの高精細液晶パネルである。詳しいスペックは表 1 に示した。液晶レンズと LCD は透明樹脂を介して接着してある。

液晶レンズの断面図を図 2 に示した。液晶レンズは図 2 に示されているように、下側基板には短冊状の透明電極が配置され、上側基板には平面状の透明電極が配置される。このとき、下側基板に配置される短冊状電極を信号電極、上側基板に配置される平面状の電極を共通電極と呼ぶ。短冊状電極の幅はおおよそ 10 μ m である。液晶の初期配向は、ホモジニアス配向であり、配向方向は信号電極の長手方向に対して垂直方向である。信号電極と共通電極の間に電圧を印加すると、図 2(b) のように、液晶配向に分布ができる。つまり、面内で屈折率の分布が生じ、屈折率分布型のレンズ (GRIN レンズ) の効果を得ることができる。

図 2 液晶レンズの液晶配向
Liquid crystal alignment of LC lens cell.

次に、液晶レンズの設計方法について述べる。液晶レンズの信号電極からとなりの信号電極までの距離を液晶レンズピッチ Q とすると、 Q は以下の式で表すことができる。

$$Q = \frac{2P}{1 + P/B} \quad (1)$$

ここで、 P は表示パネルの画素ピッチであり、 B は眼間距離であり 65mm とした。本研究で用いた表示パネルの画素ピッチは 77.1 μ m であるので、レンズピッチ Q は約 154 μ m となる。

3. 実験方法および結果

3.1 クロストークへ影響するパラメータ

液晶レンズ方式の 3D ディスプレイにおいて、クロストークに最も大きく影響するパラメータは、屈折率分布のプロファイルと屈折率分布の最大値と最小値の差である。ここで、前者を RIP (Refractive Index Profile)、後者を δn と呼ぶ。両者はレンズ特性に影響を及ぼすパラメータである。

RIP はレンズの集光性に影響するパラメータであり、2 次曲線となったときに最も良いレンズ特性を示す。つまり、クロストークを低下させるためには、RIP が 2 次曲線となるように液晶配向を制御する必要がある。液晶レンズの液晶配向は、電極形状、液晶層厚、印加電圧の大きさなどによって決定される。これらのパラメータの最適化を行い、液晶レンズを作製した。最適化された液晶レンズの RIP を測定し、その結果を図 3 に示した。同時に図 3 には、RIP を 2 次曲線にてフィッティングした結果も示した。RIP の測定は二光束干渉計を用いた。測定位置はレンズ中央とし、一対の短冊状電極間とした。縦軸は最大屈折率との屈折率差を表している。横軸は位置を表しているが、液晶レンズの中心位置を 0 とし、短冊状電極の中心位置を ± 1 に規格化している。図 3 からわかるように、得られた RIP は 2 次曲線に良く一致していることがわかる。また測定された RIP はばらつきが小さくこの位置を測定してもほぼ同等の結果が得られている。

図 3 RIP の測定結果
Measured refractive index profile.

次に、 δn について検討する。 δn は RIP の最大値と最小値

の差である。つまり例えば、図3であれば δn はおおよそ0.18となる。液晶レンズの焦点距離は以下の式によって表されることが知られている²⁾。

$$f_L = \frac{n_g \cdot Q^2}{8\delta n \cdot d} \quad (2)$$

ここで、 f_L は液晶レンズの焦点距離、 n_g はガラスの屈折率(1.5)、 d は液晶レンズの液晶層厚である。液晶レンズはガラス基板に挟まれているため、焦点距離は n_g の積を取っている。また、式(2)からわかるように、 δn はレンズの焦点距離に影響を及ぼす。

表示用モジュールの液晶層とレンズの距離を G 、レンズから最適視認位置までの距離を D とすると、レンズの公式から焦点距離 f は

$$\frac{n_g}{G} + \frac{1}{D} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

の関係を満たす。ここで、表示用モジュールの液晶層とレンズの距離 G はガラス基板があるために n_g の積をとっている。一方、レンズから最適視認位置までの距離 D はガラス基板も通過するが、空気層に比べれば無視できる程度の厚であるためガラスの屈折率は無視した。また空気の屈折率は1とした。もしRIPが2次曲線となり、完全に焦点を持つレンズ特性となった場合、式(3)を満たせば左右の目に対応した画像を完全に分離することができる。 D は G に比べ圧倒的に大きくなるために、実際には

$$\frac{n_g}{G} \approx \frac{1}{f} \quad (4)$$

となる。ゆえに、次式を満たす場合にクロストークが最も低くなることがわかる。

$$G = f_L \quad (5)$$

本論文で用いた試作パネルにおいて、液晶レンズの液晶層と表示用LCDモジュールの液晶層との距離 G はおおよそ700 μm である。ゆえに本試作品においては、液晶レンズの

図4 焦点距離と δn の関係
Relationship between focal length and δn .

焦点距離を700 μm としたときに最もクロストークが低下すると言える。図4に液晶レンズの焦点距離と δn の関係を示した。ここで、液晶レンズの液晶層厚 d は30 μm とした。この液晶層厚は上記のRIPによって最適化された値である。図4から、焦点距離が700 μm であればいい、最適な δn はおおよそ0.2であることがわかる。この結果より、本試作で用いた液晶レンズの δn は理想に近いことがわかる。

3.2 クロストーク測定法

上述した方法で最適化した液晶レンズを試作し、クロストークの測定を行った。まず、裸眼3Dディスプレイにおけるクロストークの測定法について述べる。クロストークを求める際は、右目用画像を白、左目用画像を黒にした場合、およびその白黒を反転した場合の輝度の角度依存性を測定する。この結果をそれぞれ $L_{WB}(\theta)$ および $L_{BW}(\theta)$ とする。さらに、全黒表示をした場合の輝度の角度依存性を測定する。この結果を $B(\theta)$ とする。以上の結果からクロストークは以下の式によって求めることができる。

$$\text{クロストーク 1} = \frac{L_{BW}(\theta) - B(\theta)}{L_{WB}(\theta) - B(\theta)} \quad (6)$$

$$\text{クロストーク 2} = \frac{L_{WB}(\theta) - B(\theta)}{L_{BW}(\theta) - B(\theta)} \quad (7)$$

一般にクロストークとは、式(6)、式(7)で求まる最小値を指す。

クロストークを測定した測定系を図5に示した。輝度計にはBM-7(TOPCON)を用いた。クロストークの測定箇所はパネルの中央とした。

3.3 輝度視野角およびクロストーク測定結果

測定された輝度の角度依存性を図6に示した。比較として、液晶バリアの測定結果も同時に示した。液晶バリアの表示モードはTNであり、バリア幅とスリット幅は1対1とした。図6には示していないが、この結果以外にも全黒表示時の輝度の角度依存性も測定した。液晶レンズおよび液晶バリアの2D表示時の輝度は両者とも入射角 0° の際に400 cd/m^2 になるようにバックライトを調整した。

結果を見ると、液晶レンズを用いた場合、3D表示の輝度の最大値は約470 cd/m^2 であった。液晶レンズを用いた3Dディスプレイは、レンズの集光効果のため、最適視認位置での輝度は2D表示時よりも高くなる。また、左右のピーク輝度が異なる理由は、バックライトの分光分布によるものであり、液晶レンズが影響しているわけではない。一方、液晶バリアを用いた場合3D表示時の輝度の最大値は約160 cd/m^2 であった。これは3D表示時には液晶バリアによって光が遮光されるために輝度が低下している。

以上の結果より、液晶レンズと液晶バリアでは2D表示時の輝度を同等とすると、液晶レンズを用いた3Dディスプレイは3D表示時に液晶バリアよりも約2.9倍明るいことがわかった。

図6の結果より、式(6)、(7)を用いてクロストークを計算

した。結果として、液晶レンズのクロストークは約 2.5% であることがわかった。一方、液晶バリアのクロストークは約 1.0% であった。液晶レンズのクロストークが高い理由は、RIP が完全に 2 次曲線になっていないこと、焦点距離の誤差などが考えられる。引き続き、液晶レンズの改善を検討していく予定である。

図 5 クロストークの測定系
Measurement system of crosstalk.

3.4 3D 視域

最後に、3D 視域 (3D Viewing Angle) について説明する。3D に見える範囲として例えば QSV (Qualified Viewing Space) として平面的に 3D に見える範囲を定義している⁴⁾。QSV を用いることで立体に見える範囲を平面的に捉えることが可能である。しかしながら、測定箇所が 3 箇所必要であり、さらにその後のデータ処理が複雑化する。そこで、我々は簡易的に評価できる方法として 3D 視域を提案する。

3D 視域の測定方法は、パネルの中央部においてクロストークの角度依存性を測定する。その測定結果から、クロストークが 5% 以下となる角度範囲を 3D 視域として定義する。5% 以下とした理由は、経験的に 5% 以下であれば一般的な 3D 映像においてクロストークが見えづらいためである。

図 6 の結果から、3D 視域について評価した結果を図 7 に示した。結果を見ると、液晶レンズの 3D 視域は約 5.5° であり、液晶バリアの 3D 視域は約 3.0° であった。よって 3D 視域は液晶レンズを用いた 3D ディスプレイの方が、液晶バリアよりも約 1.8 倍視域が広いことがわかった。以上の結果より、液晶バリアを用いた方が液晶レンズよりも最低クロストークは低い。3D 視域は狭いため、実際に 3D 映像を見たときは液晶レンズを用いた 3D ディスプレイの方が、液晶バリアを用いたときよりもクロストークは低く感じることを示している。

ここで、液晶バリアのバリア幅とスリット幅は 1 対 1 で試

(a) 液晶レンズ

(b) 液晶バリア

図 6 輝度の角度依存性
Luminous versus measured angle.

図 7 液晶レンズおよび液晶バリアの 3D 視域の比較
Comparison with 3D viewing angle using liquid crystal lens and liquid crystal barrier.

作している。液晶バリアを用いた 3D ディスプレイは、このバリア幅を広げるにより 3D 視域を広げることは可能である。しかしながら、バリア幅を広げることは輝度低下を招いてしまう。一方、液晶レンズの場合は 3D 視域は図 6(a) の輝度分布に 3D 視域は依存している。さらに 3D 視域を広げるためにはこの輝度分布を矩形に近づけていけばよい。そのためには RIP をさらに 2 次曲線に近づけていく必要がある。つまりクロストークを低下させていけば、さらに 3D 視域が広がる可能性がある。

図 8 液晶レンズを用いた高精細 3D ディスプレイ
Autostereoscopic 3D display using LC GRIN lens with high resolution LCD.

4. む す び

我々は、図 8 に示した液晶レンズを用いた 4.5 インチ高精細 3D ディスプレイを開発した。液晶レンズを用いた 3D ディスプレイは、従来からある液晶バリアを用いた 3D ディスプレイよりも、3D 輝度が高いことが特徴である。実際に、同様の条件で両者の試作を行い輝度の比較を行ったところ、液晶レンズを用いた方が液晶バリアを用いたときよりも 3D 輝度が 2.9 倍高くなることが確認された。また開発した液晶レンズを用いた 3D ディスプレイはクロストークが 2.5% であり、実使用では問題がないほど低いと考えられる。

さらに、3D ディスプレイの評価を簡便に行う指標として 3D 視域を提案した。3D 視域は人間が立体的に見える範囲を示している。液晶レンズと液晶バリアにおいて 3D 視域を比較したところ、液晶レンズは液晶バリアよりも 1.8 倍広いことが確認された。

以上の結果より、液晶レンズを用いた 3D ディスプレイは裸眼方式の 3D ディスプレイにおいて非常に高い性能を持っていることを示した。

〔文 献〕

- 1) H. Hong, et al., "Autostereoscopic 2-D/3-D Switching Display Using Electric-Field-Driven LC lens(ELC lens)", SID '08 digest 25.3 2008, 348.
- 2) C. H. Chiu, et al., "Switchable 3D/2D Display using LC GRIN Lenticular Lens", IDW '09 Proc. 3D1-3, 2009, 2029.
- 3) A. Takagi, et al., "Autostereoscopic Partial 2-D/3-D Switchable Display Using Liquid Crystal Gradient Index Lens", SID '10 digest 30.3, 436, 2010.

- 4) T. Järvenpää, et al. "Qualified Viewing Spaces for Near-to-Eye and Autostereoscopic Display", SID' 10 digest 23.4, 335, 2010.

おか しんいちろう
岡 真一郎 2004 年、長岡技術科学大学工学研究科博士課程修了。同年、株式会社日立製作所に入社。主として液晶表示方式の研究開発に従事。博士（工学）。

すぎた たつや
杉田 辰哉 1988 年、大阪大学理学研究科博士前期課程修了。同年、株式会社日立製作所に入社。主として光デバイスの研究開発に従事。博士（理工学）。正会員。

ながぬま ともひこ
長沼 智彦 2010 年、山形大学大学院理工学研究科修了。同年、株式会社日立ディスプレイズに入社。主として 3D ディスプレイの研究開発に従事。

さいとう てるのり
斉藤 輝児 1979 年、日本大学理工学部電気工学科課程修了。同年、株式会社日立デバイスに入社。主として液晶表示素子の設計に従事。

こむら しんいち
小村 真一 1987 年、京都大学工学部電子工学科修士課程修了。同年、株式会社日立製作所に入社。主として液晶表示方式の研究開発に従事。博士（理学）。正会員。

みやざわ としお
宮沢 敏夫 1980 年、早稲田大学物理学及び応用物理学研究科修士課程修了。同年、株式会社日立製作所に入社。主として固体撮像素子、Poly-Si デバイス、表示装置の開発に従事。