

## 空間光変調素子とシュリーレン光学系を用いた 立体投射型ディスプレイの解析

滝沢 國治\*

### Analysis of Stereoscopic Large Screen Display Using Polymer-Dispersed Liquid Crystal Light Valves and a Schlieren Optical System

Kuniharu TAKIZAWA\*

**ABSTRACT** : Fundamental characteristics of a novel three-dimensional (3-D) large-screen display with polarized glasses are analyzed with the Mueller matrix. The display consists of polymer-dispersed liquid crystal light valves (PDLCLV's) that modulate circularly polarized waves by using the light scattering property of the polymer-dispersed liquid crystal, a polarization beam splitter, and a Schlieren projection optics. Analysis shows that the cross talk of the proposed display is very small for most images even if the polarized light-separation characteristic of the polarization beam splitter is incomplete. It became clear that the extinction ratio of the 3-D system was almost the same as that of the PDLCLV.

**Keywords** : stereoscopic image display, spatial light modulator, projector, polymer-dispersed liquid crystal, cross talk

(Received August 10, 2006)

#### 1. まえがき

両眼視差を利用した立体画像投射システムとしては、偏光板<sup>1),2)</sup>、色フィルタ<sup>3)</sup>および光シャッター<sup>4)</sup>などを利用しためがね方式と、レンチキュラー板<sup>5)</sup>やパララックスバリア<sup>6)</sup>などを用いためがね無し方式などが良く知られている。なかでも偏光めがね方式は、①フルカラーの動画像を表示できる、②解像度が高い、③多数の観賞者に同時に画像を提示できる、④TVシステムや映画などの現状のメディアとの整合性が高く、容易に実現できる、など優れた特徴をもつため、最も実用化が進んでいる。一方、短所としては、①観賞者は眼鏡を掛けなければならない、②両眼視差のみを利用しているため、運動視差、輻輳、ピント調節などの立体視効果を得られない、などの本質的な問題をもつ。さらに、③2台のプロジェクタを必要とする、④偏光板で50%以上の投射光が失われる、⑤2台のプロジェクタとスクリーンとの厳密な位置調整が必要であり、簡単に画像を拡大/縮小することが難しい、などの問題も抱えている。

筆者は、③～⑤の問題を解決し、2次元画像表示する従来の画像プロジェクタと同じサイズ、消費電力および使いやすさをもつ2種類の眼鏡式3-D投射型ディスプレイを提案した<sup>7-9)</sup>。1つは、液晶ライトバルブ (LCLV) を用いて画像表示するシステムである<sup>7)</sup>。ここでは、LCLVシステムと呼ぶことにする。本論文で提案する新しい3-D投射型ディスプレイとの比較を容易にするため、図1を用いてこのシステムの動作原理を簡単に説明する。高出力ランプからの無偏波光は、偏光ビームスプリッタ (PBS) でs偏光とp偏光に分離される。2つの光学系は入射光の偏光状態を除けば同じ動作を行うため、ここではs偏光が左目用LCLVに入射する光学系だけを説明する。

s偏光が薄膜トランジスタ (TFT) 駆動の反射型LCLVに入射するとその偏光状態が変化する。TFTの信号電圧がゼロの場合には偏光状態は変わらないため、光はもとの路を辿ってランプに向かう。このときはスクリーンには黒画像が表示される。TFTの信号が十分大きいとき光はp偏光となり、スクリーンには白画像が表示される。すなわち、スクリーン面ではp偏光が左目用画像に相当する。中間レベルの信号がTFTから液晶に与えられると、LCLVから出射した光は楕円偏光となり、一部の光 (s偏

\* 物質生命理工学科教授 (takizawa@st.seikei.ac.jp)

Professor, Department of Materials and Life Science

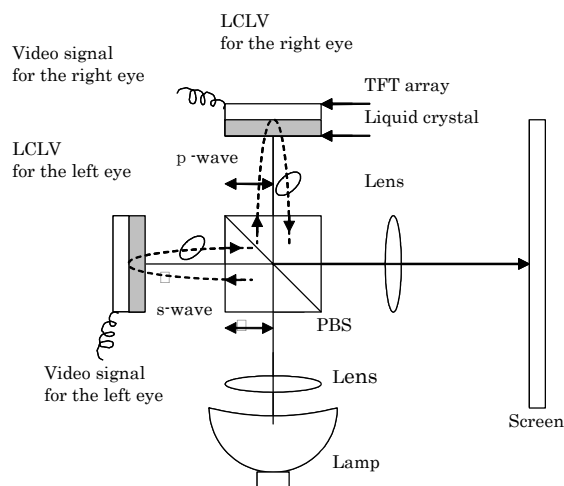


図1 Schematic diagram of a monochrome 3-D projection display using LCLVs. PBS is a polarization beam splitter.

光)はランプに戻り、残り(p偏光)はPBSを直進してスクリーンに向かう。このときは中間調画像が表示される。

この中間調動作が示すように、LCLVから出射する光は2つの偏光状態を有するため、PBSでs偏光とp偏光を十分分離しない限り、s偏光もスクリーンに投影され、クロストーク(左目用信号で変調された光が右目に入る現象あるいはその逆の現象)を生じる。フルカラー画像を表示するためには、PBSにおけるs偏光とp偏光の分離比(ここでは偏光分離比と呼ぶことにする)を十分高く保たなければならないが、可視光全領域にわたって高い偏光分離比を維持できるPBSの作製はきわめて困難である。要約すると、このシステムは、既に実用化されている空間光変調素子を3-Dディスプレイに応用できる、という大きなメリットをもつが、同時に①クロストークが大きい、②消光比が小さい、などの課題を抱えていることになる。

もうひとつの3-D投射型システムは、 $\lambda/4$ 板、高分子分散液晶(PDLC)、TFTトランジスタアレーなどで構成される空間光変調素子(PDLCLV)を用いた3-D投射型ディスプレイである<sup>8),9)</sup>。PDLCは高分子膜内に液晶を閉じ込めた構造を持ち、高分子と液晶の屈折率を整合/不整合させることで光を透過/散乱させて明暗を作り出す比較的新しい液晶デバイスである。この材料の特長は、①偏光板を用いずに光変調可能、②そのため、偏光板を必要とする液晶ディスプレイよりも光利用効率が2倍以上高い、③応答速度が速い、など多くの優れた特徴を有する。PDLCは光を散乱させるため、偏光を利用する立体ディスプレイには適さないと考えられていたが、筆者の行ったPDLCセルの電気光学特性の実験結果から、PDLCを

TFTで駆動するPDLCライトバルブ(PDLCLV)とシュリーレン光学系を組み合わせれば、偏光めがね式3-D投射型ディスプレイを構成できることが示された<sup>10)</sup>。

この論文では、PDLCLVを用いた3-D投射型ディスプレイのクロストークおよび消光比を解析し、PDLCの光散乱特性を利用すると、3-Dシステムのクロストーク低減と高消光比を同時に達成できることを明らかにする。

本論文は7章で構成される。2章には、PDLCLVを用いた3-D投射型ディスプレイの基本構成とその動作を示す。3章には、このシステムを解析するためのいくつかの条件を示す。これらの条件に基づいて、4章および5章では、単色およびフルカラー3-D投射型ディスプレイのクロストークおよび消光比といくつかのパラメータとの関係を定量的に示す。6章では解析結果を分析し、この新しいシステムがこれまでの偏光めがね式3-D投射型ディスプレイの課題を大幅に改善できることを明らかにする。7章は結論である。

## 2. 単色3-D投射型ディスプレイの構成

2個のPDLCLVを用いて3原色光のひとつをスクリーンに投影する単色3-D投射型ディスプレイを図2に示す。光源から放射された無偏波光は、PBSでp波光とs波光に分離され、PDLCLVに入射する。PDLCLVは図3に示すように、 $\lambda/4$ 板、PDLC、電極/ミラー、TFTトランジスタなどで構成される。PDLCLVに入射した直線偏光は $\lambda/4$ 波長板で円偏光に変換されてからPDLCで変調される。 $1/4$ 波長板の役目は、直線偏光した入射光を円偏光に変換するとともに、ミラーで反射した円偏光を入射光と直交する直線偏光に変換することである。勿論、PDLC層を支える基板の役割も果たしている。

PDLCはサイズが $1 \sim 2 \mu\text{m}$ の不定形な高分子膜の中に粒子状のネマティック液晶を閉じ込めた構造を有し、電界の有無により光を透過/散乱させる液晶/高分子複合材料である<sup>11)-19)</sup>。偏光を利用しないで光変調できるため、LCLVに比べて2倍の光利用効率をもつ。光はPDLC層を往復してから $\lambda/4$ 波長板で再び直線偏光に変換され、アパーチャAおよびレンズ $L_1$ ,  $L_2$ からなるシュリーレン光学系を経由してスクリーンに向かう。液晶の粒径は可視光波長の数倍以上であるため、PDLCにおける光散乱は基本的にMie散乱とみて差し支えない。Mie散乱では散乱回数が少ない場合には散乱光の大部分は散乱角10数度以内に集中し、かつ散乱前の偏光状態を維持する。PDLCLVに用いられるPDLCの厚さは $10 \sim 20 \mu\text{m}$ であり、PDLC層内を往復しても散乱回数は十分小さい。すなわち、PDLCLV

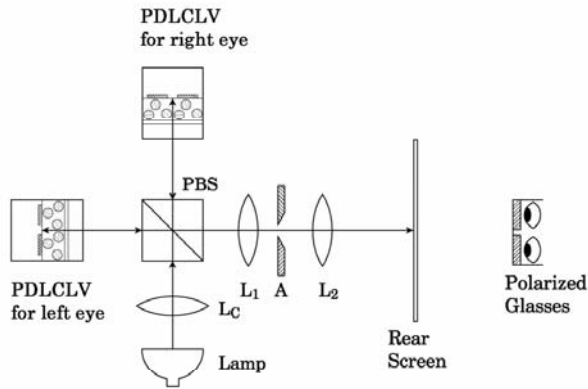


図2 Schematic diagram of a monochrome 3-D projection system. PDLCLV, electrically addressed polymer-dispersed liquid crystal light valve;  $L_1$ ,  $L_2$ , projection lenses;  $L_c$ , condenser lens; A, aperture.

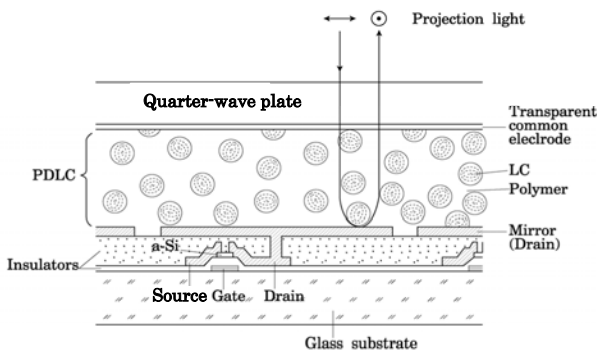


図3 Cross section schematic of the PDLCLV. The TFT consists of three terminals (source, gate and drain), an insulation layer and an amorphous silicon (a-Si) active layer.

から出射した光は、変調度(PDLC層の透過率)に関係なく元の直線状態を維持する<sup>8)-10)</sup>。この点が第1章に述べたLCLVシステムと大きく異なる。ここで注意しておきたいことは、光はPDLC層を往復するため、PDLCLVの透過率はPDLC層を1回通過するときの透過率の2乗になるということである。本文ではPDLC層を往復した光の透過率をPDLCLVの変調度(あるいは透過率)と呼ぶことにする。

スクリーンに到達する光量は、PDLCLVの変調度に依存する。無変調のときは、光はPDLCで散乱されるため、ほとんどの光はアパーチャAで遮断され、黒画像が表示される。変調度が十分大きいときPDLCは透明になるため、大部分の光はアパーチャを通過して、スクリーンに白画像が表示される。中間の変調度では、出力光の一部はアパーチャで遮断され、残りがスクリーンに照射され、中間調画像が表示される。

PBSはこのシステムで最も重要なp波光とs波光の分離・合成を行う。LCLVシステムでは、変調にリタデーションを利用しているため、PBSの偏光分離特性が3-Dシステムのクロストークに重大な影響を及ぼした。LCLVのクロストークを1%以下にするためには、PBSの偏光分離特性は、可視光全領域で1000:1以上という、非現実的な値にしなければならない<sup>7)</sup>。一方、PDLCは変調に散乱を利用しているために、PBSの偏光分離特性の制約を緩められる可能性をもつ。

### 3. 3-D 投射型ディスプレイの解析条件

3-D画像に影響を及ぼす要因には、①PBSの偏光分離特性、②PDLCLVの消光比と偏光保存性、③PBSやPDLCLVのフレネル反射、④スクリーンの偏光保存性、⑤偏光眼鏡の偏波分離特性などがある。④と⑤は、従来のめがね式の3-D投射型ディスプレイとも共通する要因であるから、ここでは理想的なスクリーンと偏光眼鏡を仮定し、このシステム独特の要因である①～③と画質との関係を解析する。

ここでは、図2の単色3-D投射型ディスプレイについて解析する。この光学系からTFTやレンズなど解析に不要な部分を除くと、このシステムは、図4に示す3個のPBS<sub>1</sub>、PBS<sub>2</sub>、PBS<sub>3</sub>と2個の透過型PDLCセルM<sub>L</sub>、M<sub>R</sub>およびPDLCセルの前後に置かれた1/4波長板QP<sub>L1</sub>、QP<sub>L2</sub>、QP<sub>R1</sub>、QP<sub>R2</sub>でモデル化された透過光学系で置き換えられる。ここで、入力側のPBS<sub>1</sub>と出力側のPBS<sub>2</sub>、PBS<sub>3</sub>は、平行ニコルの関係にある。

はじめに、解析の条件を以下に示す。

- (1) PBS<sub>2</sub>とPBS<sub>3</sub>を直進するp波光とs波光の強度比は、いずれも $1-a : a$ である。(0 < a < 1)
- (2) PBS<sub>2</sub>とPBS<sub>3</sub>内で全反射するs波光とp波光の強度比は、いずれも $1-a : a$ である。
- (3) aは波長に依存しない。
- (4) PDLCLVで変調された光は、元の偏光状態を維持する。
- (5) PBSやPDLCLVのフレネル反射を無視する。

条件(1)～(3)は、PBSの偏光分離特性を定めるものである。投射光のリタデーションを制御してステレオ画像を表示する3-D投射型ディスプレイでは、PBSによりクロストークや消光比などの基本的な立体画質が大幅に劣化した<sup>7)</sup>。従って、散乱/非散乱動作をする空間光変調素子を用いた3-Dディスプレイにおいても、PBSの影響を

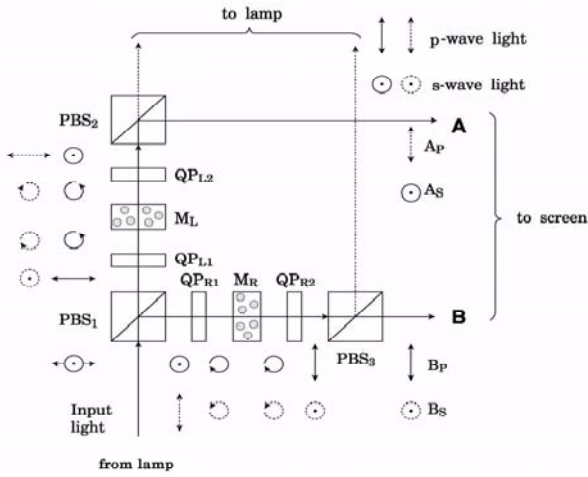


図4 Transmission-type model optics that corresponds to the monochrome PDLCLV projector shown in Fig. 1. PBS<sub>1,2,3</sub>, polarization beam splitters in a parallel Nichol's relation; M<sub>L</sub>, M<sub>R</sub>, transmission-type light modulators that use PDL; QP<sub>L1</sub>, QP<sub>L2</sub>, QP<sub>R1</sub>, QP<sub>R2</sub>, quarter-wave plates that convert linear to circular light and vice versa; **A** and **B**, output light intensity;  $A_p$ , amplitude of the p-wave light that enters the right-eye as the noise light;  $A_s$ , amplitude of the s-wave light that enters the left-eye as the signal light;  $B_p$ , amplitude of the p-wave light that enters the right-eye as the signal light;  $B_s$ , amplitude of the s-wave light that enters the left-eye as the noise light.

知ることは重要である。一般にPBSの偏光分離特性は波長依存性を示すが、素子ごとにその特性は異なる。この論文では、計算を容易にするため、(3)の条件を付加する。

条件(4)は、参考文献8の実験結果に基づくものである。また条件(5)は、PBSとPDLCLVに反射防止膜を設けることで達成される<sup>8),10)</sup>。

#### 4. 単色 3-D 投射型ディスプレイのクロストークと消光比

前章の条件の下に図2の単色3-D投射型ディスプレイのクロストークおよび消光比を解析する。まず、このシステムに波長 $\lambda$ の無偏波光が入射する場合を考える。PBS<sub>1</sub>を透過し、PBS<sub>2</sub>で90度反射する光の強度を**A**、PBS<sub>1</sub>で反射し、PBS<sub>3</sub>を透過する光の強度を**B**とする。ここで、**A**のs波光成分を $A_s$ とし、これが左眼に入力する信号光の強度と約束する。理解を容易にするために、図4では信号光と雑音光は、それぞれ実線および点線で描かれて

いる。例えば、**A**のp波光成分 $A_p$ は点線で描かれているから、右眼に入る雑音光の強度に相当する。これらの変数を用いると、**A**のMueller行列は

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_s^2 + A_p^2 \\ A_s^2 - A_p^2 \\ 2A_s A_p \cos \delta \\ 2A_s A_p \sin \delta \end{pmatrix} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $\delta$ は $A_s$ と $A_p$ の位相差である。**B**のMueller行列は、式(1)の**A**を**B**に置き換えれば得られる。以下では、出力光**A**について計算する。

PBS内を直進する光とPBSで90度反射する光のMueller行列をそれぞれ $\mathbf{P}_T$ および $\mathbf{P}_R$ とすると、(1)、(2)の条件より、両者は

$$\mathbf{P}_T = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2}-a & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}-a & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a(1-a)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{a(1-a)}{2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_R = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & a-\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ a-\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a(1-a)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{a(1-a)}{2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

で表される。ただし、入力光強度は1に規格化されている。

1/4波長板のMueller行列**F**は、波長 $\lambda$ の光が1/4波長板を通過したときのリタレーションを $\theta$ とすると、

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

で与えられる。ここで、1/4波長板のリタレーションが $\pi/2$ となるときの波長を $\lambda_c$ とすると、 $\theta$ は

$$\theta = \frac{\pi \lambda_c}{2\lambda} \quad (5)$$

で与えられる。

左眼用PDLC LVに相当する光変調器 $M_L$ の規格化された信号光強度を $T_L$ とすると、信号光 $\mathbf{A}$ のMueller行列は

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_s^2 + A_p^2 \\ A_s^2 - A_p^2 \\ 2A_s A_p \cos\delta \\ 2A_s A_p \sin\delta \end{pmatrix} = \mathbf{P}_R \mathbf{F} T_L \mathbf{F} \mathbf{P}_T \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{1}{4} - \left(a - \frac{1}{2}\right)^2 \cos 2\theta \\ \left(a - \frac{1}{2}\right) \sin^2 \theta \\ 0 \\ \frac{a}{2} (1-a) \left(\frac{1}{2} - a\right) \sin 2\theta \end{pmatrix} T_L \quad (6)$$

と表される。式(6)より、右眼に入る雑音成分 $A_p^2$ と左眼に入る信号成分 $A_s^2$ は

$$A_p^2 = \frac{a\{1 - a + (2a - 1)\sin^2\theta\}T_L}{2} \quad (7a)$$

$$A_s^2 = \frac{(1 - a)\{a + (1 - 2a)\sin^2\theta\}T_L}{2} \quad (7b)$$

と表される。

図2のシステムに入射する光の波長範囲を $\lambda_i \sim \lambda_j$ とすると、式(7a)、(7b)は下式のように書き改められる。

$$A_p^2(\lambda) = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} A_p^2 d\lambda$$

$$= \frac{a\{1 - a + (2a - 1)\Lambda\}T_L}{2} \quad (8a)$$

$$A_s^2(\lambda) = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} A_s^2 d\lambda$$

$$= \frac{(1 - a)\{a + (1 - 2a)\Lambda\}T_L}{2} \quad (8b)$$

$$\Lambda = \frac{1}{\lambda_i - \lambda_j} \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} \sin^2\left(\frac{\pi\lambda_c}{2\lambda}\right) d\lambda \quad (8c)$$

ただし、式(8c)の導出には、式(5)を用いた。

同様に、右眼用PDLC光変調器 $M_R$ で変調され、右眼に入る信号光の強度 $B_p^2(\lambda)$ および左眼に入る雑音光の強度 $B_s^2(\lambda)$ は、以下の式で与えられる。

$$B_p^2(\lambda) = \frac{(1 - a)\{a + (1 - 2a)\Lambda\}T_R}{2} \quad (9a)$$

$$B_s^2(\lambda) = \frac{a\{1 - a + (2a - 1)\Lambda\}T_R}{2} \quad (9b)$$

ただし、 $T_R$ は、右眼用光変調器 $M_R$ の規格化された出力光強度である。

式(8a)～式(9b)より、左眼系のクロストーク $C_L$ および右眼のクロストーク $C_R$ は、以下の式で与えられる。

$$C_L = \frac{B_s^2(\lambda)}{A_s^2(\lambda)} = \frac{a\{1 - a + (2a - 1)\Lambda\}T_R}{(1 - a)\{a + (1 - 2a)\Lambda\}T_L} \quad (10a)$$

$$C_R = \frac{A_p^2(\lambda)}{B_p^2(\lambda)} = \frac{a\{1 - a + (2a - 1)\Lambda\}T_L}{(1 - a)\{a + (1 - 2a)\Lambda\}T_R} \quad (10b)$$

また、左眼に入射する総光量は $A_s^2(\lambda) + B_s^2(\lambda)$ で与えられるから、左眼系の消光比 $E_L$ は、左眼用光変調器 $M_L$ の出力光強度の最大値を $T_L(\max)$ 、最小値を $T_L(\min)$ とすると、 $E_L$ は以下の式で与えられる。

$$E_L = \frac{(1 - a)\{a + (1 - 2a)\Lambda\}T_L(\max) + a\{1 - a + (2a - 1)\Lambda\}T_R}{(1 - a)\{a + (1 - 2a)\Lambda\}T_L(\min) + a\{1 - a + (2a - 1)\Lambda\}T_R} \quad (11)$$

ここで、PDLC光変調器の消光比を $\eta$ とすると、 $T_L(\max)$ と $T_L(\min)$ の関係は、下式で表される。

$$\eta = \frac{T_L(\max)}{T_L(\min)} \quad (12)$$

## 5. フルカラー3-D 投射型ディスプレイ画像表示特性

フルカラー3-D 投射型ディスプレイの基本的な映像特性

を求めるためには、観測者の視覚の波長依存性を考慮しなければならない。図5は、国際照明委員会CIE(Commission Internationale de l'Éclairage)が定めた標準視感度曲線である<sup>20)</sup>。この曲線は、CIEが多くの実験結果から求めた標準観測者の錐体視の感応を示すものである。グラフの縦軸は比視感度 $V$ である。 $V=1$ に当たる波長は、 $\lambda=555\text{nm}$ である。

この視感度曲線と4章で求めた単色3-D投射型ディスプレイの式を組み合わせれば、フルカラー立体画像の基本的な映像特性を知ることが出来る。例えば、左眼系のクロス

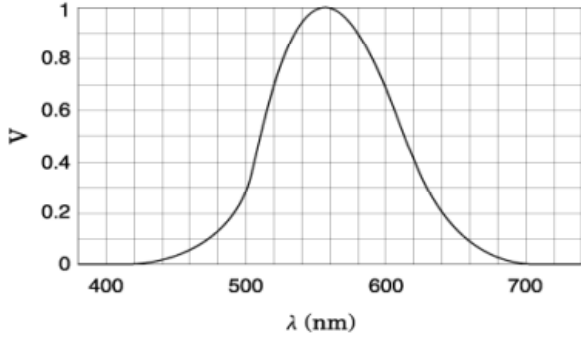


図5 Relationship between the normalized luminosity  $V$  and wavelength  $\lambda$ .

トーク  $C_{LF}$  は、式(8b), (9b)と図5の比視感度  $V$  を用いると、以下の式で与えられる。

$$C_{LF} = \frac{a \sum_{k=1}^3 \left[ (1-a) \int_{\lambda_j(k)}^{\lambda_i(k)} V d\lambda + (2a-1)\Lambda(k) \right] T_R(k)}{(1-a) \sum_{k=1}^3 \left[ a \int_{\lambda_j(k)}^{\lambda_i(k)} V d\lambda + (1-2a)\Lambda(k) \right] T_L(k)} \quad (13)$$

$$E_{LF} = \frac{(1-a) \sum_{k=1}^3 \left\langle \left[ a \int_{\lambda_j(k)}^{\lambda_i(k)} V d\lambda + (1-2a)\Lambda(k) \right] T_{Lmax}(k) \right\rangle + a \sum_{k=1}^3 \left\langle \left[ (1-a) \int_{\lambda_j(k)}^{\lambda_i(k)} V d\lambda + (2a-1)\Lambda(k) \right] T_R(k) \right\rangle}{(1-a) \sum_{k=1}^3 \left\langle \left[ a \int_{\lambda_j(k)}^{\lambda_i(k)} V d\lambda + (1-2a)\Lambda(k) \right] T_{Lmin}(k) \right\rangle + a \sum_{k=1}^3 \left\langle \left[ (1-a) \int_{\lambda_j(k)}^{\lambda_i(k)} V d\lambda + (2a-1)\Lambda(k) \right] T_R(k) \right\rangle} \quad (15)$$

式(15)の  $T_{Lmax}(k)$ ,  $T_{Lmin}(k)$  は、PDLCLVに3原色光を入射したときの規格化された出力光強度の最大値と最小値であり、PDLCLVのR,G,B3原色光に対する消光比を  $\eta(1), \eta(2), \eta(3)$  とすれば、以下の式で与えられる。

$$\eta(k) = \frac{T_{Lmax}(k)}{T_{Lmin}(k)} \quad (k=1,2,3) \quad (16)$$

式(15), (16)の  $T_{Lmax}(k)$  を  $T_{Rmax}(k)$  に、 $T_{Lmin}(k)$  を  $T_{Rmin}(k)$  に、および  $T_R(k)$  を  $T_L(k)$  に置き換えれば、右眼系の消光比を得る。

## 6. 解析結果とディスカッション

式(13)～(16)を用いてフルカラー3-D投射型ディスプレイの基本的な映像特性を解析的に求めることは可能であるが、パラメータが多すぎて見通しが悪い。そこで、ここでは、図2の単色3-D投射型ディスプレイの画像表示特性を計算した。一例として、投射光の波長が520～570 nmの場

$$\Lambda(k) = \int_{\lambda_j(k)}^{\lambda_i(k)} V \sin^2 \left( \frac{\pi \lambda_c(k)}{2\lambda} \right) d\lambda \quad (14)$$

ただし、 $\lambda_i(1) \sim \lambda_j(1)$ ,  $\lambda_i(2) \sim \lambda_j(2)$  および  $\lambda_i(3) \sim \lambda_j(3)$  は、R, G, B3原色光の波長範囲である。その波長範囲は、白色光を3原色に分けるダイクロミックミラーと図3のPDLCLVの波長特性に依存する。 $\lambda_c(1)$ ,  $\lambda_c(2)$ ,  $\lambda_c(3)$  は、R, G, B3原色光の波長域の中心波長である。中心波長を持つ光がR, G, B用1/4波長板を2度通過すると、p波光からs波光あるいはs波光からp波光への変換率が最大になる。 $T_R(1) \sim T_R(3)$ ,  $T_L(1) \sim T_L(3)$  は、フルカラー3-D投射型ディスプレイの右眼系および左眼系のR, G, B3原色光を変調する6個のPDLCLVの規格化された出力光強度である。PDLCLVは可視光領域ではほぼ同一の変調特性を示すため、ここでは定数として扱った<sup>9), 10)</sup>。左眼系にとっては、 $T_R(1) \sim T_R(3)$  は雑音、 $T_L(1) \sim T_L(3)$  は信号になる。式(13)の  $T_R(k)$  と  $T_L(k)$  を交換すれば、右眼系のクロストークを得る。

フルカラー3-D投射型ディスプレイの左眼系の消光比  $E_{LF}$  は、式(11)と図5より、以下の式で与えられる。

合の、左眼系のクロストーク  $C_L$  と左眼系のPDLCLVの規格化された出力光強度  $T_L$  およびPBSのP波光とS波光の分離特性を示すパラメータ  $a$  との関係を図6(a)～(c)に示す。

$a$  をパラメータとして  $C_L$  と  $T_L$  の関係を示す図6(a)は、PBSの偏光分離特性が劣化しても殆どの画像のクロストークが非常に小さいことを示している。例えば、 $a = 0.04$  で、かつ、右眼系のPDLCLVの規格化光強度  $T_R$  が0.3のケースを例にとると、左眼系の規格化光信号強度  $T_L$  が0.05と非常に小さくなくても、左眼系のクロストーク  $C_L$  は、信号光強度の1%以下であることが分かる。これは実用上十分な値であり、この3-D投射型ディスプレイは、クロストークの非常に少ないシステムであるといえる。 $a \approx 0.04$  の偏光分離特性を有するPBSを作製することは容易である。筆者は、 $\lambda = 400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$  にわたり  $a < 0.03$  の特性をもつPBSを製作した。この素子を用いて本論文のディスプレイシステムの基礎実験を計画している。その結果は次の論文で報告する予定である。

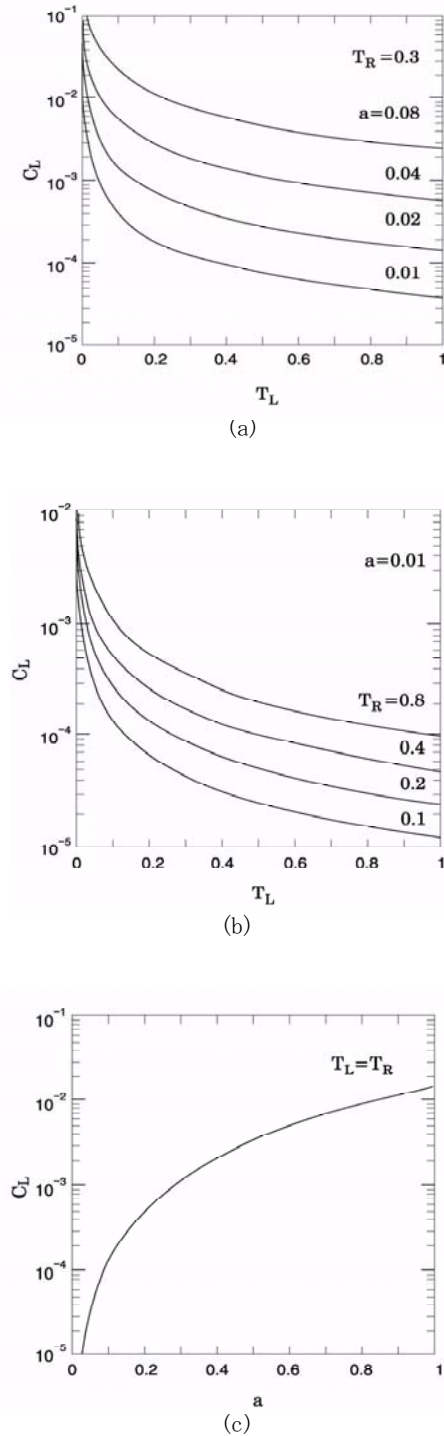


図6 Calculated results of the cross talk  $C_L$  of the left-eye optical system in the monochrome PDLCLV projector: (a)  $C_L$  vs  $T_L$  for various values of  $a$ , (b)  $C_L$  vs  $T_L$  for various values of  $T_R$  and (c)  $C_L$  vs  $a$  for  $T_L = T_R$

1つの投射光学系を用いて互いに直交する直線偏光の間のリタデーションを制御して立体画像を表示するLCLVシステム<sup>7)</sup>と比較すると、本システムのクロストークはLCLVシステムの1/20以下に軽減される。2つの投射光学系を用

いる従来の3-D投射型ディスプレイ<sup>1),3)</sup>のクロストークや消光比は、LCLVシステムと基本的に同一である。従って、この新しい3-D投射型ディスプレイは、従来の3-Dシステム<sup>1),3),7)</sup>のクロストークを大きく改善できる可能性を持つ。

図6(b)は、 $T_R$ をパラメータとしたときの、 $C_L$ と $T_L$ の関係である。右眼に入る光が小さいほど、左眼のクロストークが減少することを示している。これは、従来の3-D投射型ディスプレイ<sup>1),3),7)</sup>の特性（右眼に入る信号光強度が増加するほど、左眼のクロストークが減少する）と逆である。これは、本システムの光散乱変調と従来のシステムのリタデーション変調の違いに因るものである。

$T_L$ と $T_R$ がそれぞれ任意の値をもつことを前提に計算した図6(a),(b)は、画像の輪郭付近など画素によって信号レベルが大きく異なる領域（空間周波数の高い領域）に相当する。一方、空やサッカーコート映像など、どの画素もほぼ一定の映像レベルを有する画像（空間周波数の低い領域）のクロストーク $C_L$ とパラメータ $a$ との関係は、図6(c)で与えられる。PBSの偏光分離パラメータ $a$ を製作容易な値—例えば $0.02 < a < 0.04$ —を仮定すると、図6(c)より、 $C_L = 5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ と非常に小さな値になる。従って空間周波数が低い画像領域では、クロストークを無視しても差し支えない。

次に、式(11)、(12)を用いて、左眼系の消光比 $E_L$ と、PBSの偏光分離特性を示すパラメータ $a$ 、PDLCLVの消光比 $\eta$ および右眼系のPDLCLVの出力光強度 $T_R$ との関係を計算した。左右の系の出力光強度が異なる画像、すなわち、空間周波数の高い画像について、投射光の波長を520~570 nmとして解析した結果を図7(a)~(c)に示す。

図7(a)は、左眼系のPDLCLVの消光比 $\eta$ をパラメータとしたときの、左眼系の消光比 $E_L$ とPBSの偏光分離パラメータ $a$ との関係を示している。この図は、 $\eta$ が大きいほど、 $a$ への依存性が顕著になることを示している。例えば、 $\eta = 400$ のとき、 $a$ が0から0.1に変化する間に、 $E_L$ は、400:1から160:1に低下する。したがって、システム本来の性能を引き出すためには、パラメータ $a$ を0.02以下にすることが重要である。この図は、 $\eta \leq 100$ の場合 $E_L$ は $a$ に殆ど依存しないことも示している。ただし、 $a$ が0.1よりも大きくなれば、100以下の消光比でも $a$ への依存性が顕著になる。

このシステムの消光比は偏光分離パラメータ $a$ に顕著に依存するが、それでも図7(a)と、従来のLCLVシステムとを比べると、PDLCLVを用いたシステムのほうが数倍も勝っていることが分かる。一方、2つの投射光学系を用いる従来の3-D投射型ディスプレイ<sup>1),3)</sup>と比較すると、PDLCLVの消光比がリタデーションを利用したライトバルブよりも

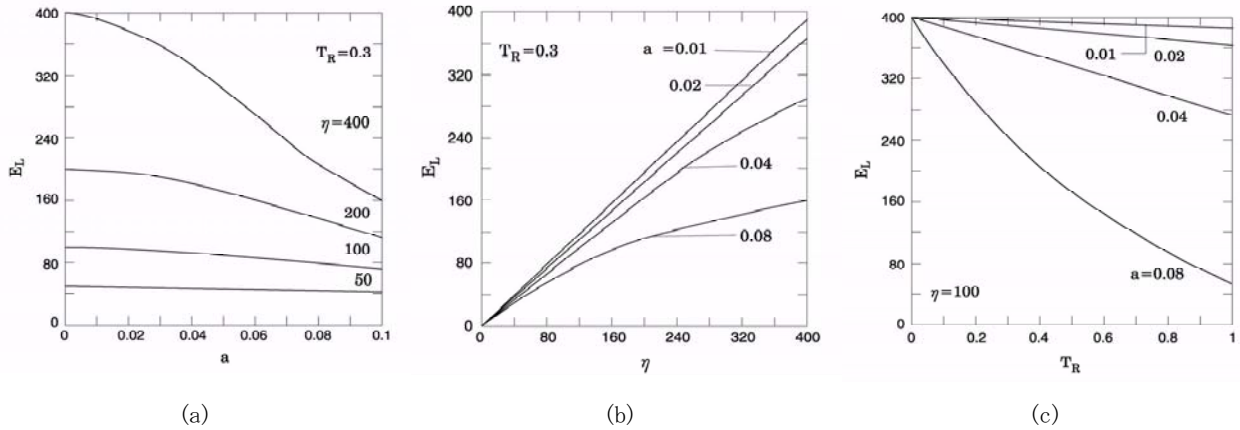


図7 Calculated results of the extinction ratio  $E_L$  of the left-eye optical system in the monochrome PDLCLV projector: (a)  $E_L$  vs  $a$  for various values of  $\eta$ , (b)  $E_L$  vs  $\eta$  for various values of  $a$ , and (c)  $E_L$  vs  $T_R$  for various values of  $a$ .

若干劣るため、このシステムの消光比は従来型よりも優れているとは言い難い。PDLCLVの消光比の改善は、このシステムの1つの課題である。

図7(b)は、左眼系の消光比  $E_L$  と左眼系の PDLCLV の消光比  $\eta$  との関係である。この図は、 $a$  が大きいほど非線形性が強まり、システムの消光比が低いレベルで飽和することを示している。

図7(c)は、左眼系の消光比  $E_L$  と右眼系の PDLCLV の出力光強度  $T_R$  との関係である。この図は、PBSの偏光分離のパラメータ  $a$  が大きくなると、他系の信号光によって、自系の消光比が大きき劣化することを示している。

最後にクロストークと同様に、左右の系の出力光強度が等しい場合（空間周波数の低い画像）を考察する。このケースでは、左系の PDLCLV の出力光強度が最大（あるいは最小）のときは、右系のそれも最大（あるいは最小）になるから、 $T_L(\max) = T_R(\max)$ ,  $T_L(\min) = T_R(\min)$  となり、システムの消光比は、式(19)と同じになる。すなわち、 $E_L = \eta$  となり、システムの消光比と PDLCLV のそれとが一致する。

これまでの議論を要約すると、以下の結論を得る。

- ① PDLCの光散乱効果を利用した3-D投射型ディスプレイは、リタデーション変調によって3-D画像を表示するLCLVシステムに比べて、クロストークおよび消光比とも格段に優れている。
- ② 新しい3-Dディスプレイシステムと2台の投射型ディスプレイを用いた従来の3-Dシステムと比較すると、クロストークは前者が優れているが、消光比はやや劣る。
- ③ 新システムで表示される3-D画像の空間周波数の高い領域では、PBSの偏光分離パラメータ  $a$  が大きいほど、クロストークが顕著になり、消光比も劣化する。

- ④ 新システムで表示される3-D画像の空間周波数の低い領域では、パラメータ  $a$  の影響はない。また、システムの消光比とライトバルブのそれが一致する。

## 7. 結論

PDLCLVとシュリーレン光学系からなる新しい3-D投射型ディスプレイを提案した。PDLCLVを用いた単色3-D投射型ディスプレイのクロストークと消光比をMueller行列を用いて解析し、第6章の①～④の結論を得た。これらの結論は、PDLCLVを用いた3-D投射型ディスプレイがリタデーションを用いたこれまでの3-D投射型ディスプレイよりもクロストーク特性が格段に優れていることを示している。さらに、第1章に述べたように、このシステムは、

- (1) 1台のディスプレイで3-D映像を表示できる。
- (2) ズームレンズを用いることにより、2-D映像と同様に自由に画像を拡大・縮小できる。
- (3) 光源の光をPBSでロスすることなく、すべて投射光に利用できる。

などこれまでの3-D投射型ディスプレイにない特徴を備えているため、偏光眼鏡を用いた3-D投射型ディスプレイの実用性をさらに高めることが期待される。

この研究の次のステップは、解析結果の実証である。筆者は現在、PDLCとホトコンダクティブ結晶を用いた光アドレス型のPDLCLVを用いた単色3-D投射型システムを試作中である。その実験結果については、別の論文で報告したい。



## 参考文献

- 1) K. E. Jachimowicz and R. S. Gold, "Stereoscopic (3D) projection display using polarized color multiplexing," *Opt. Eng.* **29**, 838 (1990).
- 2) J.M.Haggerty, S. Reinsch, W. P. Bleha, and R.D. Stering, "Stereoscopic large screen displays using liquid crystal light valve projectors," in *Large Screen and Projection Displays II*, W. P. Bleha, ed., *Proc. SPIE* **1255**, 114-122 (1990).
- 3) 増田千尋: 3次元ディスプレイ (産業図書, 東京, 1990) P.102.
- 4) 磯野春雄, 「立体TV動画像表示技術」*光学* **26**, 300-307 (1997).
- 5) R.Boerner:*Fernseh-& Kino-Tech.* **48**, **594** (1994).
- 6) G Hamagishi, M. Sakata, A. Yamashita, K. Mashitani, E. Nakayama, S. Kishimoto and K. Kanatani: *Tech. Dig. Asia Display '95*, 1995, p. 791.
- 7) K. Takizawa, T. Fujii, T. Sunaga, and K. Kishi, "Three-dimensional large screen display with reflection-mode spatial light modulators and a single-projection optical system: analysis of a retardation-modulation method," *Appl. Opt.* **37**, 6182 (1998).
- 8) K. Takizawa, "Three-dimensional large screen display using polymer-dispersed liquid-crystal light valves and a Schlieren optical system: proposal and basic experiments," *Opt. Rev.* **13**, 1-7 (2006).
- 9) K. Takizawa, "Analysis of three-dimensional large screen display using polymer-dispersed liquid-crystal light valves and a Schlieren optical system," *Opt. Rev.* **13**, 8-13 (2006).
- 10) 滝沢國治, 成蹊大学理工学研究報告, Vol. 43 No. 1 pp. 39-47 (2006).
- 11) J.L. Ferguson, "Polymer encapsulated nematic liquid crystals for display and light control applications," *Society for Information Display International Symposium Dig.* **16**, Orlando, Florida, **16**, 68-70 (1985).
- 12) J.W. Doane, N.A. Vaz, B.-G. Wu, and S. Zumer, "Field controlled light scattering from nematic microdroplets," *Appl. Phys. Lett.* **48**, 269-271 (1986).
- 13) B.-G. Wu, J.L. West, and J.W. Doane, "Angular discrimination of light transmission through polymer-dispersed liquid-crystal films," *J. Appl. Phys.* **62**, 3295-3931 (1987).
- 14) A. Golemme, S. Zumer, J.W. Doane, and M.E. Neubert, "Deuterium NMR of polymer dispersed liquid crystals," *Phys. Rev.* **37**, 559-569 (1988).
- 15) P.S. Drazaic, "Reorientation dynamics of polymer dispersed nematic liquid crystal films," *Liq. Crst.* **3**, 1543-1559 (1988).
- 16) T. Kajiyama, A. Miyamoto, H. Kikuchi, and Y. Morimura, "Aggregation states and electro-optical properties based on light scattering of polymer/(liquid crystal) composite films," *Chem. Lett.* **1989**, 813-816 (1989).
- 17) T. Fujisawa, H. Ogawa, and K. Maruyama, "Electro-optic properties and multiplexibility for polymer network liquid crystal display (PN-LCD)," in *Digest of the Ninth International Display Research Conference* (Institute of Television Engineers of Japan, Kyoto, Japan, 1989), 690-693.
- 18) A. Fuh and O. Caporaletti, "Polymer dispersed nematic liquid crystal films : the density ratio and polymer's curing rate effects," *J. Appl. Phys.* **66**, 5278-5284 (1989).
- 19) G.P. Montgomery, Jr., "Polymer-dispersed and encapsulated liquid crystal films," in *Large-Area Chromogenics : Materials and Devices for Transmittance Control*, C.G. Granqvist and C.M. Lampert, eds., **IS04**, SPIE Institute Series 577-606 (SPIE Press, Bellingham, Wash., 1990).
- 20) K. S. Gibson, *J. Opt. Soc. Am.* **30**, 51 (1940).