

単一投写光学系を用いた眼鏡付き立体ディスプレイシステム：位相差変調方式の解析

滝沢 國治*

Three-dimensional large-screen display with reflection-mode spatial light modulators and a single-projection optical system: analysis of a retardation modulation method

Kuniharu TAKIZAWA*

ABSTRACT: A stereoscopic projector with polarized glasses is proposed that consists of spatial light modulators (SLM's) that control the retardation of projected light, a polarization beam splitter (PBS), and single-projection optics. This display's features include a three-dimensional (3-D) image display with a single projector and half the size and the power consumption of a conventional 3-D projector. Analysis shows that the cross talk and the extinction ratio of this system depend on the polarized light-separation characteristics of the PBS, the light output, and the extinction ratio of the SLM's. A double-PBS method that drastically improves 3-D image quality is also discussed.

KEYWORDS: Stereoscopic projector, Spatial light modulator, Liquid crystal, Retardation

(Received November 18, 2002)

1. まえがき

立体ディスプレイは、マルチメディアに続く将来のメディアとして、テレビ放送を初め、医療、教育、産業界から大きな期待が掛けられている。これまでに、左右の画像を同時に表示し、これらを偏光眼鏡やレンチキュラーレンズで分離するシステム^{1, 2}や左右画像を時系列的に表示するシステム³などさまざまな表示方式が提案されている。中でも、左右の画像信号で互いに直交する2つの直線偏光を変調し、これらを大型スクリーンに投射する眼鏡付き投写型ディスプレイは、2次元画像を表示する普通の投写型ディスプレイを用いて、高精細なフルカラーステレオ画像を多数の観客に表示するという特徴を有するため、最も実用化が進んでいる。¹しかし、1つのステレオ画像を表示するには、2つの投写システムを必要とするため、2次元画像表示する通常の投写型ディスプレイに比べ

て消費電力やシステムサイズが2倍になるほか、スクリーンと2つの投写型ディスプレイの配置がステレオ画像表示独特の種々の制約を受けるなどの問題を有する。⁴

この論文では、偏光眼鏡方式のこれらの課題を解決するため、1つの投写光学系を用いて左右画像をスクリーンに表示し、偏光眼鏡を通してステレオ画像を観賞する新しい投写型立体ディスプレイを提案する。まず2章では、従来の偏光眼鏡付き投写型立体ディスプレイの構成と課題を明確にする。次に3章では、新しい投写型立体ディスプレイの主要構成要素が空間光変調素子 (SLM) と偏光ビームスプリッター (PBS) であり、SLMの光変調原理に応じて4種類の投写システムがあることを示す。第4章では、この投写型立体ディスプレイの詳しい構成と動作原理を述べる。さらに、第5章では、PBSの偏光分離特性やSLMの変調率、消光比、反射率などのパラメータが、このシステムのクロストークや消光比などの立体画像表

* 物理情報工学科教授 (Professor, Department of Applied Physics)

示特性及ぼす影響について解析し、このシステムの利点と課題を示す。この章では、CRTを用いた立体投写型ディスプレイのクロストーク特性についても計算し、ここで提案するシステムと比較する。第6章では、このシステムの課題を解決するタンデムPBSを用いた立体投写型ディスプレイの提案とそのクロストークおよび消光比特性を明らかにする。

2. 従来の偏光方式の構成と課題

2台の投写型ディスプレイを用いて左右画像を別々に投写する従来の偏光方式の1つとして、図1に示すようにディスプレイをスクリーンに

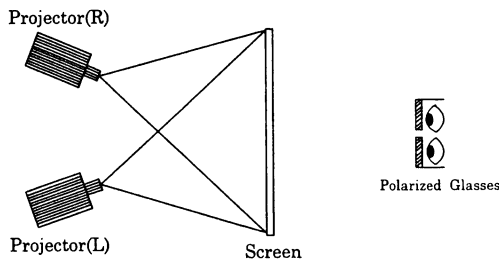


Fig. 1. Basic structure of a conventional 3-D projection-type display with polarized glasses.

対して傾け、偏光方向が互いに直交する2つの直線偏波光の光軸をスクリーンの中央で交差させるシステムがある。^{1,5} このシステムでは、偏光メガネを用いて、例えば左眼にS偏光の画像を、右眼にP偏光の画像だけを導くことにより、ステレオ画像を実現している。図1は、スクリーンの後方から画像を投影して、スクリーン前方から透過光を見るリアプロジェクションシステムであるが、スクリーン前方から画像を投写するフロントプロジェクションシステムも当然可能である。これらのシステムは、2次元画像を表示する従来の投写型ディスプレイをそのまま利用できるという簡易さを有するが、投写レンズとスクリーンが正対していないため、
 ①スクリーンの中心を除くとスクリーン面と投写光学系の焦点面が一致しない
 ②台形歪が発生する
 ③投写画像の倍率に応じて2つの投写光の交差角度を変更しなければならないなどの欠点をもつ。

このため、画像源を投写レンズの光軸に対して左右にずらした2つの投写型ディスプレイをスクリーンに正対させるシステムも実現されている。⁶ このシステムでは、投写画像全面にわたりフォーカスすることができるが、投写画像の倍率に応じて2つの画像源の距離を変更するというやっかいな作業が新たに加わることになる。

上記の2つの方式は、以上に述べた課題に加えて、以下に示すような基本的な問題を抱えている。

- ④1つのステレオ画像を表示するために、2つの投写光学系を必要とする
- ⑤各投写型ディスプレイでは、P波あるいはS波いずれか一方の光だけを投写光として用いるため、少なくとも50%以上の光が失われる
- ⑥投写距離や倍率に応じて左右画像の大きさを精密に調整しなければならない（正常なステレオ画像を觀賞するためには、左右画像の大きさのずれは4.5%以内⁷）
- ⑦2次元画像を表示する通常の投写型ディスプレイのように、投写画像のサイズを自由に変更することができない

これらの課題を解決するため、我々は単一の投写光学系を用いた新しい投写型立体ディスプレイを考案した。

3. 新しい投写型立体ディスプレイの構成と特徴

従来の投写型立体ディスプレイの抱えるさまざまな問題は、P波光とS波光を別々の光学系を通して投写することから生じている。ここで提案する新しい投写型立体ディスプレイは、一つの投写光学系を用いて、P、S両波光を投写することにより、これらの課題の解決を図っている。

このディスプレイの主要構成要素は、液晶を用いたSLMとPBSである。SLMは、液晶層に印加される電界で、投写光を空間的に変調する機能をもつ。その変調原理は、液晶の動作モードにより異なる。例えば、ネマティック液晶分子がホメオトロピック配向したDAP (Deformation of Aligned Phase)モード液晶⁸⁻¹⁰や

45度捻れネマティック(TN)液晶¹¹などを用いれば、互いに直交する直線偏光の間の位相差(リタデーション)を変調して、投写光の偏光状態を制御することが出来る。また、数 μm のサイズの液晶粒をポリマー中に分散させたポリマー分散液晶(PDLC)¹²⁻¹⁴や動的散乱モード液晶¹⁵を用いれば、液晶に印加する電界強度に応じて、投写光を散乱状態から非散乱状態まで自由に制御することができる。

SLMのこれらの光変調動作①リタデーションによる投写光の偏光状態の制御、②散乱による投写光の進行方向の制御に従い、ここで提案する投写型立体ディスプレイは、図2および図3に示すように2種類の構成をもつ。

図2に示す第1タイプの投写型ディスプレイ

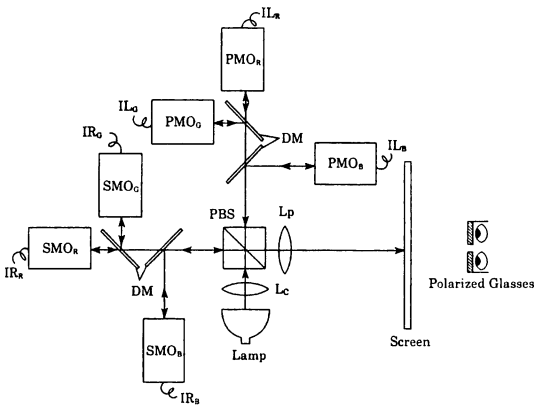


Fig. 2. Schematic diagram of the proposed 3-D projection-type display that is based on retardation modulation. $\text{PMO}_{\text{R,G,B}}$, light-modulation block for converting p -wave light to s -wave light; $\text{SMO}_{\text{R,G,B}}$, light-modulation block for converting s -wave light to p -wave light; DM, dichroic mirror; PBS, polarization beam splitter; L_c , condenser lens; L_p , projection lens; $\text{IL}_{\text{R,G,B}}$, red, green, and blue electrical signals for the left eye; $\text{IR}_{\text{R,G,B}}$, red, green, and blue electrical signals for the right eye.

は、①の変調機能をもつP波およびS波変調光学系($\text{PMO}_{\text{R,G,B}}$, $\text{SMO}_{\text{R,G,B}}$)、PBS、ダイクロミックミラーDM、投写レンズLPおよび光源で構成される。各構成要素の詳細は次章に述べることとして、まずこのシステムの基本機能を述べる。

Xeランプやメタルハライドランプなどの光源から出た無偏波状態の光は、PBSにより互いに直交するP波光とS波光に分離され、ダイクロミックプリズムにより3原色光に分離され

た後、 $\text{PMO}_{\text{R,G,B}}$ および $\text{SMO}_{\text{R,G,B}}$ に分配される。 $\text{PMO}_{\text{R,G,B}}$ に入射したP波光は、左眼用画像信号 $\text{IL}_{\text{R,G,B}}$ で駆動されるSLMでその偏光状態が変化し、その一部あるいは全部がS波光に変換される。一方、 $\text{SMO}_{\text{R,G,B}}$ に入射したS波光は、右眼用信号 $\text{IR}_{\text{R,G,B}}$ に応じてP波光に変換される。 $\text{PMO}_{\text{R,G,B}}$ および $\text{SMO}_{\text{R,G,B}}$ を出射したS波光とP波光は、ダイクロミックプリズムとPBSで合成され、一つの投写レンズLPを通してスクリーンに投写される。 $\text{IL}_{\text{R,G,B}}$ と $\text{IR}_{\text{R,G,B}}$ が白レベル信号の場合、 $\text{P} \rightarrow \text{S}$ 、 $\text{S} \rightarrow \text{P}$ のパワー変換率は最大になり、スクリーンには白レベル画像が表示される。また、 $\text{IL}_{\text{R,G,B}}$ と $\text{IR}_{\text{R,G,B}}$ が黒レベル信号のとき、入射光の偏光状態は変わらず、スクリーンには黒レベル画像が表示される。

②の変調機能をもつ第2タイプは、図3に示

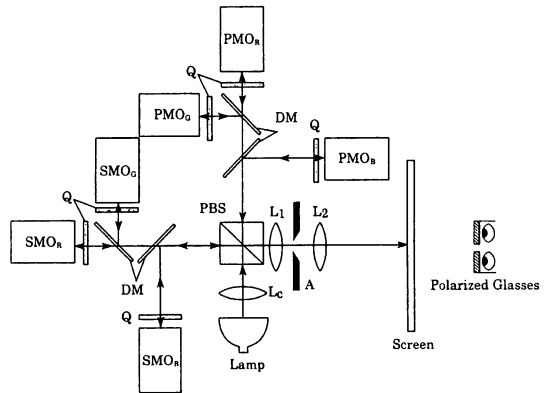


Fig. 3. Schematic diagram of the proposed 3-D projection-type display based on light-scattering modulation. Q, quarter-wave plate; L_1 , projection lens 1; L_2 , projection lens 2; A, aperture.

されるように変調光学系 $\text{PMO}_{\text{R,G,B}}$ $\text{SMO}_{\text{R,G,B}}$ とDMの間に設置された $1/4$ 波長板Qと、第1投写レンズ L_1 の焦点面に置かれたアパーチャAを必要とする。このシステムでは、PBSで分離されたP波光とS波光は、左右の画像信号で駆動されるSLMを経て散乱光あるいは非散乱光として投写光学系に送られる。非散乱光は $1/4$ 波長板を2度通過するため、P波光がS波光に、また、S波光がP波光にそれぞれ変換され、PBSで合成されアパーチャを通過し

てスクリーンに到達する。一方、散乱光の大部分はアパーチャで遮断されるため、スクリーンには殆ど到達しない。SLMに加える画像信号により散乱光と非散乱光の割合が連続的に変えられるため、このシステムでフルカラー画像を容易に表示する事が出来る。

これらのシステムは、1つの投写型ディスプレイを用いて立体画像を同時に表示するため、従来の立体投写型ディスプレイの持っている①～⑦の課題をすべて克服することができる。システムサイズや消費電力も従来の立体投写型システムの約半分になり、従来の投写型ディスプレイと同じ操作で立体画像を自由に投影することができる。

SLMは、信号の書き込み方法により、2つに分類される。1つは、図4(a)に示すように

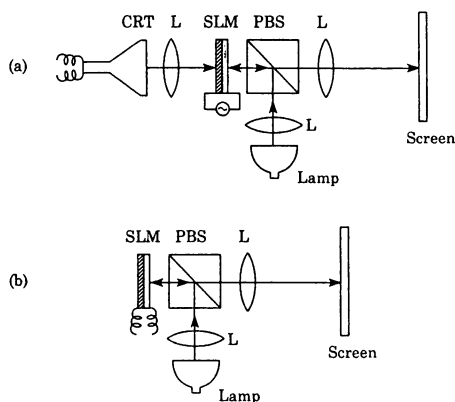


Fig. 4. Schematic diagrams of the reflection-mode SLM's: (a) optical addressing type and (b) electrical addressing type.

CRTや液晶パネル(LCP)などの光画像をSLMの光導電層に書き込み、その情報を電界像として液晶層に伝達し、これを別の光で読み出す光アドレス方式である。もう一つは、図4(b)に示すLCPを用いた電気アドレス方式である。このデバイスでは、光導電層の代わりに薄膜トランジスタ(TFT)アレーにより液晶が駆動される。

以上を纏めると、ここで述べる投写型立体ディスプレイは、SLMの信号書き込み方式や光変調方式により、表1に示すように4種類に分類される。これらの内、光アドレス方式と電気ア

Table 1. Classification of the Proposed 3-D Projection Display

Type 1: Retardation Modulation	Type 2: Scattering Modulation
Optical addressing Electrical addressing	Optical addressing Electrical addressing

ドレス方式を比較すると、その信号の書き込み方法は大きく異なるが、立体画像の表示原理は同じである。従って、ここで提案する立体画像表示システムの画質を解析するには、光アドレス方式で十分である。以下の各章では、リタレーション変調で左右画像を表示する第1タイプのシステムについて、PBSの偏光分離特性、SLMの消光比、PBSやSLMのフレネル反射率などのパラメータと立体画像の表示特性の関係を解析する。散乱光変調で立体画像を表示する第2タイプのシステムについては、別の論文で議論する。

4. リタレーション変調を利用した投写型立体ディスプレイの構成と動作原理

前にも述べたように、投写光のリタレーションを制御するSLMには、DAPモード液晶や45度TNモード液晶などがよく用いられる。中でも、負の誘電率異方性をもつネマティック液晶分子が基板に対してほぼ垂直に配向したDAPモード液晶は、高い消光比を有するため、最近、これを用いたSLMが投写型ディスプレイ⁸⁻¹⁰に使われ始めている。

このデバイスは、図5に示すように、水素化非

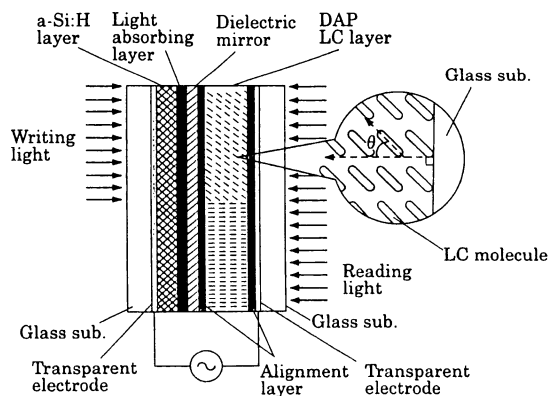


Fig. 5. Cross-sectional view of the reflection-mode SLM that uses a DAP mode LC. a-Si:H, amorphous silicon; sub., substrate.

晶質シリコン (a-Si:H) 光導電膜、光吸収層、誘電体多層膜ミラー、DAP液晶および透明電極から構成されている。

このSLMを用いた投写型立体ディスプレイ(タイプ1)の3原色光学系の中の1系統を図6に示す。左右眼用画像を形成する2つの変調

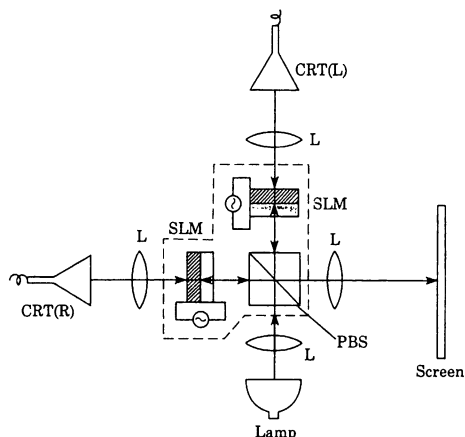


Fig. 6. Schematic diagram of a monochromatic 3-D projection system. CRT(L, R), a Brown tube that generates a left-eye or a right-eye image; L, lens.

光学系は、左右眼用画像信号で駆動されるCRTと、その無偏光状態の光画像を偏光した光に変換するSLMで構成される。2つのSLMの液晶層には、PBSを通過したP波光とS波光が入射する。これらの直線偏波光の振動方向と液晶分子の長軸を含む面とは45度の角度をなしているため、印加電圧の大きさに応じて投写光のリタデーション ϕ が変化する。DAP液晶の常光線屈折率と異常光線屈折率の差を Δn とし、液晶に入射する光の波長を λ とすると、 ϕ は、以下の式で与えられる。

$$\phi = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} \quad (1)$$

図6の立体ディスプレイの動作は、以下の通りである。まず、CRTからの書き込み画像が無い場合、SLMに印加される電界の大半は光導電層に印加され、液晶分子は基板にはほぼ垂直に配向した初期状態のままである。従って、2つのSLMの液晶層に入射したP波光とS波光は、液晶の常光線屈折率だけを感じるため、直線偏

波光のまま誘電体多層膜ミラーで反射され、再びPBSを通過して光源に向かう。これは暗状態であり、スクリーン照度は最小値を示す。

次に、2つのSLMの光導電層に左右画像が書き込まれた場合、書き込み画像の強度に応じて液晶層の液晶分子配列がそれぞれ変化するため、投写光の偏光状態も変化する。即ち、PBSを通過した投写光の一部もしくは全部はSLMに入射する2つの直線偏波光(P波光とS波光)と直交する直線偏波光(S波光とP波光)に変換され、投写光学系を経てスクリーンに投写される。これが明状態である。

DAP液晶は光のリタデーションを制御するため、その変調特性は解析的に求められる。例えば、表2のような屈折率分散を有する厚さ $5\mu\text{m}$ のネマティックのDAP液晶(チソ石

Table 2. Wavelength Dependence of the Ordinary n_o and the Extraordinary n_e Refractive Indices of the DAP-Mode Nematic LC^a

Wavelength (nm)	Refractive Index	
	n_o	n_e
450	1.519	1.752
500	1.518	1.734
550	1.514	1.702
600	1.509	1.708
650	1.505	1.700

^aThe LC was LIXXON EN-2000XX. The temperature during testing was 25 °C.

油化学(株):LIXON-EN-2000XX)の場合、その変調特性は図7のように計算される。

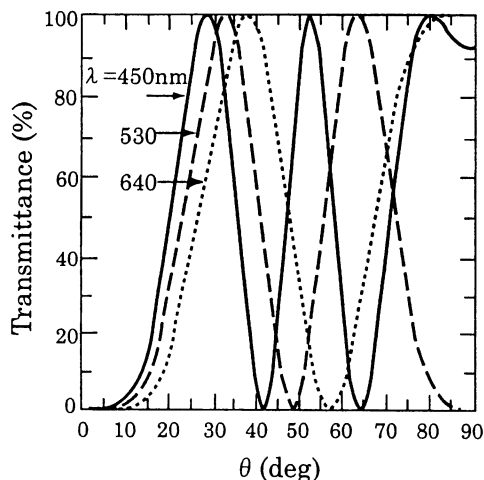


Fig. 7. Relation between the transmittance and θ of the DAP-mode nematic LC (thickness of $5\mu\text{m}$). θ , the angle between the longer axis of LC and the normal line of glass substrate; λ , the wavelength.

ただし、横軸の θ は、図5に示すように液晶分子とガラス基板の法線とのなす角度である。後章で、これらの結果を用いてここで提案する立体投写型ディスプレイのクロストーク特性を求める。

5. 立体画像表示特性の解析

5.1 解析条件

立体投写型ディスプレイの主要部（図6の破線領域内）は、PBSで分離されたP波もしくはS波の投写光が、SLMのDAP液晶層を2度通過する反射型であるが、これは、図8に示

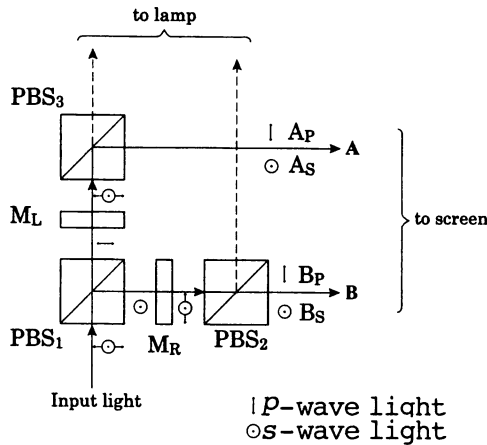


Fig. 8. Transmission-type optical system that corresponds to the area surrounded by a broken line of the reflection-mode projection system shown in Fig. 6. $PBS_{1,2,3}$, polarization beam splitters in a parallel Nicol's relation; $M_{L,R}$, transmission-type light modulator that uses a DAPmode LC; A, B, output light intensity

す3個の $PBS_{1,2,3}$ とDAP液晶セル $M_{L,R}$ からなる透過型構成と同じである。ただし、入力側の PBS_1 と出力側の $PBS_{2,3}$ は、平行ニコルの関係にある。ここでは、図8を用いてこのシステムの立体画像表示特性を解析する。

はじめに、解析の条件を以下に示す。

- ① $PBS_{1,2,3}$ を直進するP波光とS波光の規格化されたパワー強度比は $1-a:a$ である
- ② $PBS_{1,2,3}$ で右折または左折するS波光とP波光の規格化されたパワー強度比は $1-a:a$ である
- ③ a は波長に依存しない定数 ($0 < a < 1$)
- ④ 全ての素子の光入出力面の反射は無視出来る

ほど小さい

①および②の条件は、PBS自身の偏光分離特性を表すものである。即ち、可視光の全領域にわたりP波光とS波光を1つのPBSで完全に分離することは非常に困難であり、PBSを直進する光、右折する光および左折する光には、主たる直線偏波光を1に規格化したとき、光パワー a で表される直交成分が含まれる。一般にPBSの偏光分離特性は波長依存性を示すが、ここでは計算を容易にするため、③の条件を付加する。

5.2 フレネル反射のない立体画像の表示特性

5.1節の解析条件①~④を用いてこのディスプレイで表示される左右画像のクロストークおよび消光比などの基本的な立体画像表示特性を求める。

まず、図8のモデルに波長 λ_c の無偏波光が入射する場合を考える。図8に示すように、反射せずに PBS_1 を通過し、 PBS_3 で右折する光のパワーを A 、 PBS_1 で右折し、 PBS_2 を左折せずに通過する光のパワーを B とする。ここで、 A のS波光成分を A_s^2 （信号光強度）とし、これが左眼に入力すると約束する。従って、 A のP波光成分 A_p^2 は、雑音光強度に相当する。これらの変数を用いると、 A のミューラ行列は

$$A = \begin{bmatrix} A_p^2 + A_s^2 \\ A_p^2 - A_s^2 \\ 2A_p A_s \cos \delta_L \\ 2A_p A_s \sin \delta_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 δ_L は A_p と A_s の位相差である。

PBSを直進する光と右折する光のミューラ行列をそれぞれ P_T および P_R とすると、①、②の条件より、両者は

$$P_T = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2-a & 0 & 0 \\ 1/2-a & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [a(1-a)]^{1/2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [a(1-a)]^{1/2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_R = \begin{bmatrix} 1/2 & a-1/2 & 0 & 0 \\ a-1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [a(1-a)]^{1/2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [a(1-a)]^{1/2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

で表される。(付録A) 上式および以下の議論における光強度は、全て入力光強度を1に規格化した場合の相対的な値である。

また、液晶セル M_L のミューラ行列 \mathbf{F} は、セルによって与えられるリタデーションを ϕ_L とすると、

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_L & 0 & -\sin \phi_L \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \phi_L & 0 & \cos \phi_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

で与えられる。(付録B) ただし、 $0 \leq \phi_L \leq \pi$ である。

式(2) ~ (5) を用いれば、出力光パワー \mathbf{A} は

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_p^2 + A_s^2 \\ A_p^2 - A_s^2 \\ 2A_p A_s \cos \delta_L \\ 2A_p A_s \sin \delta_L \end{bmatrix} = \mathbf{P}_R \mathbf{F} \mathbf{P}_T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 1/4 - (1/2-a)^2 \cos \phi_L \\ (a/2 - 1/4)(1 - \cos \phi_L) \\ 0 \\ [a(1-a)]_L (1/2-a) \sin \phi_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

と表される。

式(6)より、 A_p^2 、 A_s^2 はそれぞれ

$$A_p^2 = \frac{a|1 + (1-2a)\cos \phi_L|}{4} \quad (7a)$$

$$A_s^2 = \frac{(1-a)|1 - (1-2a)\cos \phi_L|}{4} \quad (7b)$$

となる。

同様にして、 \mathbf{B} のP波光成分(前記の約束に従い右眼用画像信号光強度に相当する)とS波光成分(雑音光強度)を B_p^2 、 B_s^2 とすると、 \mathbf{B} は

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_p^2 + B_s^2 \\ B_p^2 - B_s^2 \\ 2B_p B_s \cos \delta_R \\ 2B_p B_s \sin \delta_R \end{bmatrix} = \mathbf{P}_R \mathbf{F} \mathbf{P}_T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1/4 - (a-1/2)^2 \cos \phi_R \\ (1/4 - a/2)(1 - \cos \phi_R) \\ 0 \\ [a(1-a)]^{1/2} (a-1/2) \sin \phi_R \end{bmatrix} \quad (8)$$

と表される。ただし、 δ_R は B_p と B_s の位相差、 ϕ_R は液晶セル M_R で与えられるリタデーションである。式(8)より、 B_p^2 、 B_s^2 は、以下の式で表される。

$$B_p^2 = \frac{(1-a)|1 - (1-2a)\cos \phi_R|}{4} \quad (9a)$$

$$B_s^2 = \frac{a|1 + (1-2a)\cos \phi_R|}{4} \quad (9b)$$

ここで、左眼用画像を変調する液晶セル M_L の規格化された透過率(SLMの変調率)を T_L とすると、図6の配置より ϕ_L と T_L の間には、

$$T_L = \frac{(1 - \cos \phi_L)}{2} \quad (10)$$

の関係が成立する。¹⁶

式(10)を式(7a)および式(7b)に代入すると、

$$A_p^2 = \frac{a(1-a)/2 + a(a-1/2)T_L}{2} \quad (11a)$$

$$A_s^2 = \frac{a(1-a)/2 + (1-a)(1-2a)T_L}{2} \quad (11b)$$

を得る。同様にして B_p^2 、 B_s^2 は、

$$B_p^2 = \frac{a(1-a)/2 + (1-a)(1-2a)T_R}{2} \quad (12a)$$

$$B_s^2 = \frac{a(1-a)/2 + a(a-1/2)T_R}{2} \quad (12b)$$

と表される。

前述の約束より、 A_s^2 、 B_p^2 が信号で、 A_p^2 、 B_s^2 が雑音であるから、左眼に入る信号(T_L)に右眼に入る信号(T_R)が混入する割合を示すクロスト

ーク C_L は式(11b)、(12b)より

$$C_L = B_s^2/A_s^2 = \frac{[a(1-a) - a(1-2a)T_R]}{[a(1-a) + (1-a)(1-2a)T_L]} \quad (13)$$

で与えられる。

式(13)は、単一の波長 λ_c をもつ光がシステムに入射した場合の特性を表している。

入射光がある波長範囲 $\lambda_i \sim \lambda_j$ をもつ場合には、SLMの信号成分の最大変調率を T_{max} 、最小変調率を T_{min} とすると、 T_L と T_R は、以下の範囲内に制限される。

$$T_{min} \leq T_{L,R} \leq T_{max}, \quad (14)$$

ただし、

$$T_{max} = \frac{[1 - (\lambda_i - \lambda_j)^{-1} \int_{\lambda_j}^{\lambda_i} \cos(\pi \lambda_c / \lambda) d\lambda]}{2} \quad (15)$$

$$T_{min} = T_{max} / \eta, \quad (16)$$

である。ここで、 η は液晶セルの消光比である。

また、左眼に入る光の総量は、 $A_s^2 + B_s^2$ であるから、左眼の消光比 E_L は、上記波長範囲のとき

$$E_L = \frac{[2a(1-a) + (1-a)(1-2a)T_{max} - a(1-2a)T_R]}{[2a(1-a) + (1-a)(1-2a)T_{min} - a(1-2a)T_R]} \quad (17)$$

$$E_{LR} = \frac{[R_3\{a(1-a) + (1-a)(1/2-a)T_{max} - a(1/2-a)T_R\} + a(1-a)R_1(1-R_1)^2 + a(1-a)(1-R_1)^4R_2]}{[R_3\{a(1-a) + (1-a)(1/2-a)T_{min} - a(1/2-a)T_R\} + a(1-a)R_1(1-R_1)^2 + a(1-a)(1-R_1)^4R_2]} \quad (20)$$

となる。上式および式(13)のLとRを入れ替えれば、右眼の消光比およびクロストークを得る。

5.3 フレネル反射のある立体画像の表示特性

前節では、PBSやSLM表面でのフレネル反射の影響を無視した理想的な条件のもとで立体画像の表示特性を解析した。ここでは、前述の条件④を取り除いた現実的な場合について検討する。ただし、解析を容易にするため、PBSとSLMのパワー反射率をそれぞれ R_1 、 R_2 と

して、PBSとSLMの間の多重反射の影響を無視する。ここで R_2 は、ガラス表面の反射、および透明電極の反射を合わせた反射率である。

このとき、前述の A_p^2 、 A_s^2 、 B_p^2 、 B_s^2 は、式(11)、(12)で表される反射のない場合の値に $R_3 = (1-R_1)^4(1-R_2)^2$ を掛けた値になる。従って、クロストークの値は、PBSやSLMの反射率に依存しないことは明らかである。

一方、P波光およびS波光が、PBS表面で反射して左眼あるいは右眼に入る光の強度 PBS_R は、いずれも

$$PBS_R = a(1-a)R_1(1-R_1)^2 \quad (18)$$

で与えられる。また、P波光およびS波光が、SLM表面で反射して左眼あるいは右眼に入る光の強度 SLM_R は、

$$SLM_R = a(1-a)(1-R_1)^4R_2 \quad (19)$$

で与えられる。光 \mathbf{B} についても、まったく同様である。

従って、左眼に入射する総光量は、前述の反射のない場合の値 A_s^2 、 B_s^2 に $R_3 = (1-R_1)^4(1-R_2)^2$ を掛けた値と、式(18)、(19)の和で与えられるから、入射光がある波長範囲 $\lambda_i \sim \lambda_j$ をもち、反射がある場合の消光比 E_{LR} は、

で与えられる。

5.4 フルカラー立体画像の表示特性

前2節で求めた単原色の投写光学システムで表示される立体画像の特性を用いれば、3原色の投写光学システムで表示されるフルカラーの立体画像の基本特性を容易に求めることが出来る。例えば、フルカラー立体画像のクロストーク $C_L(F)$ は

$$C_L(F) = \frac{[3a(1-a) - a(1-2a)\{T_R(R) + T_R(G) + T_R(B)\}]}{[3a(1-a) + (1-a)(1-2a)\{T_L(R) + T_L(G) + T_L(B)\}]} \quad (21)$$

で与えられる。ただし、 $T_R(R)$ 、 $T_R(G)$ 、 $T_R(B)$ 、 $T_L(R)$ 、 $T_L(G)$ 、 $T_L(B)$ は、フルカラー立体投写

である。ここで、 $\lambda_i(R) \sim \lambda_j(R)$ 、 $\lambda_i(G) \sim \lambda_j(G)$ 、 $\lambda_i(B) \sim \lambda_j(B)$ は、ダイクロイックミラーとSLMの誘電体ミラーで定められるR, G, B 3原色光の波長範囲である。 $\lambda_c(R)$ 、 $\lambda_c(G)$ 、 $\lambda_c(B)$ は、R, G, B 3原色光の中心波長であり、これらの波長を持つ光がSLMに入射したとき、変調率が最大になる。 $\eta(R)$ 、 $\eta(G)$ 、 $\eta(B)$ は、R, G, B用SLMの消光比である。

$$E_{LR}(F) = \frac{[R_3\{3a(1-a) + (1-a)(1/2-a)\{T_{\max}(R) + T_{\max}(G) + T_{\max}(B)\} - a(1/2-a)\{T_R(R) + T_R(G) + T_R(B)\}\} + 3a(1-a)R_1(1-R_1)^2 + 3a(1-a)(1-R_1)^4R_2]}{[R_3\{3a(1-a) + (1-a)(1/2-a)\{T_{\min}(R) + T_{\min}(G) + T_{\min}(B)\} - a(1/2-a)\{T_R(R) + T_R(G) + T_R(B)\}\} + 3a(1-a)R_1(1-R_1) + 3a(1-a)(1-R_1)^4R_2]} \quad (25)$$

光学システムの右眼および左眼に入るR, G, B 3原色光を制御するSLMの変調率であり、それぞれ以下の範囲内に制限される。

$$\begin{aligned} T_{\min}(R) &\leq T_{L,R}(R) \leq T_{\max}(R), \\ T_{\min}(G) &\leq T_{L,R}(G) \leq T_{\max}(G), \\ T_{\min}(B) &\leq T_{L,R}(B) \leq T_{\max}(B), \end{aligned} \quad (22)$$

ただし、

$$\begin{aligned} T_{\max}(R) &= \frac{[1 - (\lambda_i(R) - \lambda_j(R))^{-1} \int_{\lambda_j(R)}^{\lambda_i(R)} \cos(\pi \lambda_c(R)/\lambda) d\lambda]}{2}, \\ T_{\max}(G) &= \frac{[1 - (\lambda_i(G) - \lambda_j(G))^{-1} \int_{\lambda_j(G)}^{\lambda_i(G)} \cos(\pi \lambda_c(G)/\lambda) d\lambda]}{2}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$T_{\max}(R) = \frac{[1 - (\lambda_i(B) - \lambda_j(B))^{-1} \int_{\lambda_j(B)}^{\lambda_i(B)} \cos(\pi \lambda_c(B)/\lambda) d\lambda]}{2}$$

$$\begin{aligned} T_{\min}(R) &= \frac{T_{\max}(R)}{\eta(R)}, \\ T_{\min}(G) &= \frac{T_{\max}(R)}{\eta(G)}, \\ T_{\min}(B) &= \frac{T_{\max}(R)}{\eta(B)}, \end{aligned} \quad (24)$$

反射のある場合のフルカラー立体投写型ディスプレイの消光比 $E_{LR}(F)$ は、式(20)、(23)、(24)を用いると式(25)で与えられる。

5.5 解析結果と考察

式(21)、(25)を用いてフルカラー立体投写型ディスプレイの表示画像の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、式(13)～(16)を用いて、単原色画像のクロストークを計算した。一例として、投写光の波長が500～590 nmの場合の、左眼のクロストーク C_L とSLMの変調率 T_L の関係を図9(a)～(c)に示す。ここで、PBSの偏光分離特性を表すパラメータは、 $a = 0.005, 0.01, 0.02, 0.04$ とした。また、右眼用SLMの変調率を、 $T_R = 0.1, 0.5, 0.7, 0.9$ とした。これらの図より、以下のことが分かる。

- ①クロストークはPBSの a に強く依存し、 a が大きいほど増大する。
- ②クロストークは、信号光が小さいとき増大する
- ③左眼（あるいは右眼）のクロストークは、右眼（あるいは左眼）に入る信号光が小さいほど増大する。
- ④左眼と右眼用SLMの変調率が等しい場合($T_L = T_R$)、変調が浅いほど大きなクロストークが発生する。

①は、このシステムが高性能のPBSを必要とすることを意味している。通常のPBSでは可視光の全域にわたり a を小さくすることは非常に困難であり、その対策については次章で議

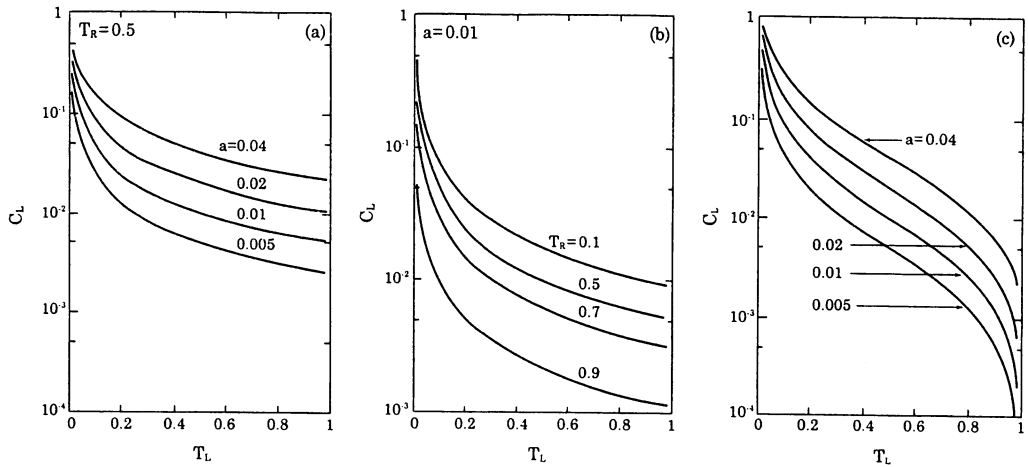


Fig. 9. Relations between the left-eye cross talk C_L and the light output T_L of the left-eye SLM in the system shown in Fig. 8 for (a) various values of a and a light output of the right-eye SLM of $T_R = 0.5$, (b) various values of T_R where $a = 0.01$, and (c) various values of a where $T_L = T_R$.

論する。③は、一見矛盾するように思えるが、そうではない。例えば、右眼に入る信号光 (T_R に相当する) が小さい場合、変調を受けない残りの光は左眼用信号光 (T_L に相当する) と同じ偏光状態と、大きな光量 $1 - T_R$ を持つ。この光の大部分は P B S で阻止されるが、P B S の偏光分離特性パラメータ a に相当する光は P B S を抜けて左眼に入射して、雑音光となる。画像が暗いときクロストークが増大するのは、リタデーション変調方式の原理に基づくものであり、今回提案するシステムのほか、90度 T N 液晶を用いた立体投写型ディスプレイなどにも共通する課題である。

これに対し、C R T を用いた立体投写型ディスプレイ (図 1 0) は、リタデーション変調方式

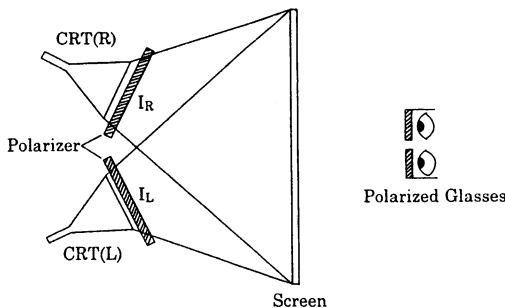


Fig. 10. Schematic diagram of a 3-D projection-type display that uses Brown tubes with polarized glasses. CRT(L, R), Brown tubes for the left and the right eyes; $I_{L,R}$, intensities of the light radiated from the Brown tubes for the left and the right eyes.

と異なるクロストーク特性を示す。即ち、C R T の前に設置された偏光板の信号光と雑音光の分離特性を $1 - a : a$ とし、左眼と右眼の信号光の強度を I_L, I_R とすれば、そのクロストーク C_C は、

$$C_C = \frac{a I_R}{(1-a) I_L} \quad (26)$$

で表される。図 1 1 に、C R T と $a = 0.005$ の P

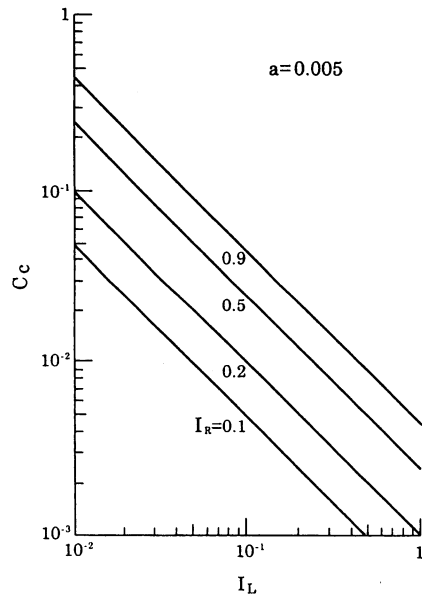


Fig. 11. Relation between the cross talk C_C and the left-eye signal intensity I_L for the 3-D projection-type display that uses Brown tubes and polarizers with $a = 0.005$.

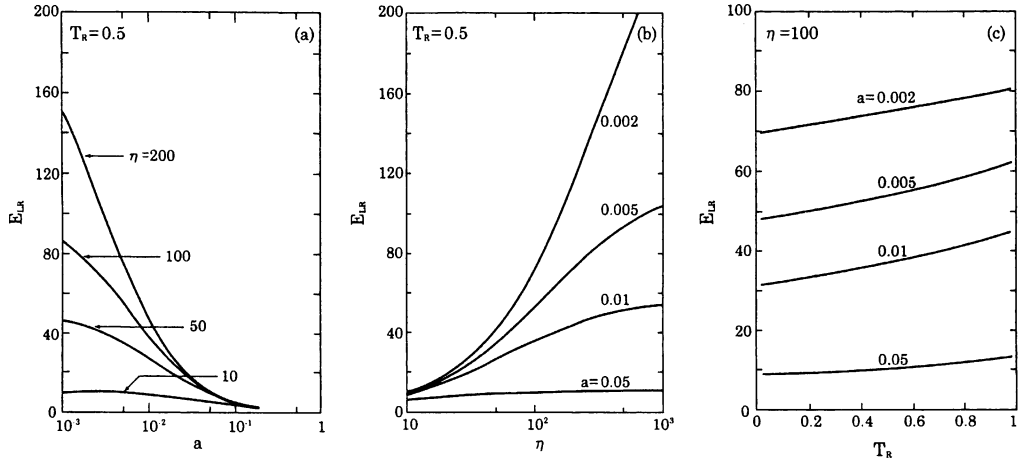


Fig. 12. Dependence of the extinction ratio E_{LR} of the monochromatic 3-D projection system when $R_1 = R_2 = 0.04$ for various parameters: (a) Relation between E_{LR} and the polarized light-separation characteristic a of the PBS for several values of the extinction ratio η of the left-eye SLM and a light output of $T_R = 0.5$ of the right-eye SLM. (b) Relation between E_{LR} and η for various values of a when $T_R = 0.5$. (c) Relation between E_{LR} and T_R for various values of a when $\eta = 100$.

B Sを用いた立体投写型ディスプレイのクロストーク C_C と信号光強度 I_L との関係を示す。C R T方式では I_L よりも I_R が極端に大きい場合を除き、クロストークが大きくなること分る。

このほか、式(13)～(16)を用いた計算から、リタデーション変調方式のクロストークは、S L Mの消光比 η には殆ど依存しないことが容易に分かる。

次に、式(20)を用いてフレネル反射がある場合のシステムの消光比 E_{LR} と、 a 、 η および T_R との関係を計算した。投写光の波長が500～590 nmで、 $R_1 = R_2 = 0.04$ とした場合の計算結果を図12(a)～(c)に示す。これらの図は、システムの消光比が a と η に強く依存し、 T_R にはあまり依存しないことを示している。また、 E_{LR} の R_1 および R_2 依存性も小さいことが分かった。

6. リタデーション変調方式の特性改善

前章の結果から、P B Sの偏光分離特性がこのシステムの特性を大きく左右していることが明らかになった。そこで筆者は、4つの三角柱を張り合わせた立方体構造を持つ、タンデムP B Sを提案する。この新しいP B Sは、各三角柱の接面でP波光とS波光を分離するため、図13に示すように、P波光とS波光は、光源からスクリーンに到達するまでにそれぞれ4回の

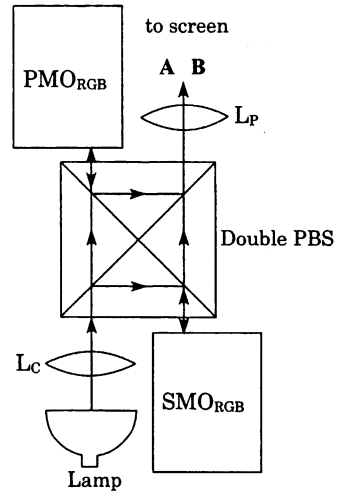


Fig. 13. Construction of a monochromatic 3-D projection system with a double PBS.

偏光分離作用を受ける。このとき $PMO_{R,G,B}$ に入射する光をAとすると、Aのミューラ行列は

$$A = \begin{bmatrix} A_p^2 + A_s^2 \\ A_p^2 - A_s^2 \\ 2A_p A_s \cos \delta_L \\ 2A_p A_s \sin \delta_L \end{bmatrix} = P_R P_R F P_T P_T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

で表される。上式を解くと、

$$A_p^2 = \frac{a^2(1-a)^2}{2} - \frac{a^2(1-2a)T_L}{2} \quad (28a)$$

$$A_s^2 = \frac{a^2(1-a)^2}{2} + \frac{(1-a)^2(1-2a)T_L}{2} \quad (28b)$$

を得る。ただし、式(3)~(5)および式(10)を用いた。同様にしてSMO_{R.G.B}に入射する光BのP波光パワー成分 B_p^2 とS波光パワー成分 B_s^2 は、以下の式で与えられる。

$$B_p^2 = \frac{a^2(1-a)^2}{2} + \frac{(1-a)^2(1-2a)T_R}{2} \quad (29a)$$

$$B_s^2 = \frac{a^2(1-a)^2}{2} - \frac{a^2(1-2a)T_R}{2} \quad (29b)$$

式(28), (29)より、単原色の投写光学システムのクロストーク C_L は

$$C_L = \frac{a^2(1-a)^2 - a^2(1-2a)T_R}{a^2(1-a)^2 + (1-a)^2(1-2a)T_L} \quad (30)$$

となる。また反射のある場合のこのシステムの消光比 T_{LR} は、

$$E_{LR} = \frac{[R_3\{a^2(1-a)^2 + (1-a)^2(1/2-a)T_{\max} - a^2(1/2-a)T_R\} + a^2(1-a)^2R_1(1-R_1)^2 + a^2(1-a)^2(1-R_1)^4R_2]}{[R_3\{a^2(1-a)^2 + (1-a)^2(1/2-a)T_{\min} - a^2(1/2-a)T_R\} + a^2(1-a)^2R_1(1-R_1)^2 + a^2(1-a)^2(1-R_1)^4R_2]} \quad (31)$$

である。

このシステムのクロストーク C_L と T_L の関係を図14に示す。投写光の波長範囲は、図9と同じである(500~590 nm)。これより、 $a \leq 0.01$

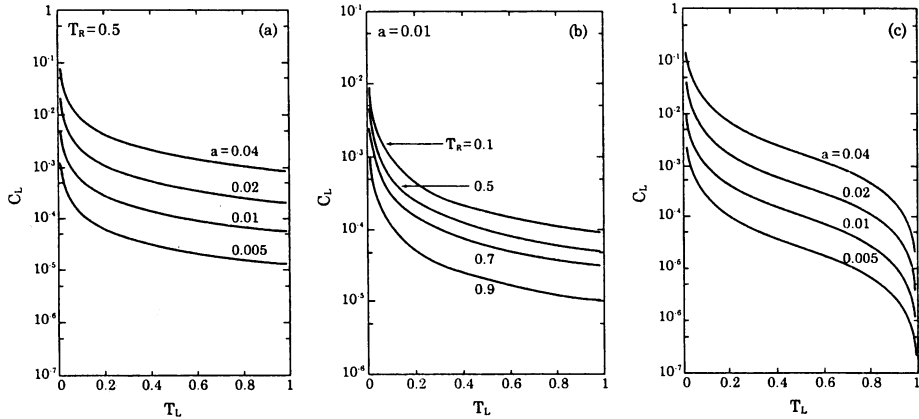


Fig. 14. Relations between the cross talk C_L of the monochromatic 3-D projection system with a double PBS and light output T_L of the left-eye SLM for (a) various values of a and a light output of the right-eye STM of $T_R = 0.5$, (b) various values of T_R when $a = 0.01$, and (c) various values of a when $T_L = T_R$.

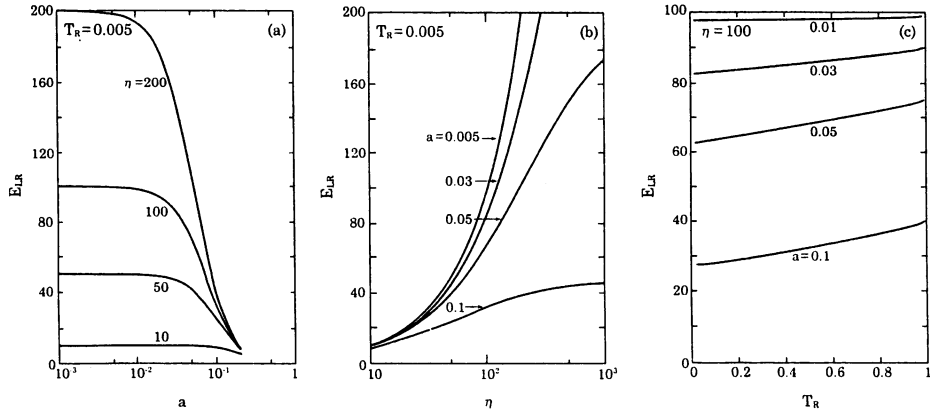


Fig. 15. Dependence of the extinction ratio E_{LR} on various parameters for the monochromatic 3-D projection system, where $R_1 = R_2 = 0.04$ with a double PBS: (a) Relation between E_{LR} and the polarized light-separation characteristics a of the PBS for various values of the extinction ratio η of the left-eye SLM and a light output of $T_R = 0.005$ of the right-eye SLM. (b) Relation between E_{LR} and η for various values of a when $T_R = 0.005$. (c) Relation between E_{LR} and T_R for various values of a when $\eta = 100$.

の場合、 T_L および T_R の値に関わらず、 C_L は許容値¹⁷(2%)以下を示すことが分かる。また、 $a \leq 0.04$ の場合でも、 $T_L \leq 0.03$ という非常に暗い場合を除き、クロストーク特性は良好であることが分かる。

システムの消光比 E_{LR} とP B Sの偏光分離比 a およびS L Mの消光比 η との関係を図15(a)~(c)に示す。これらの結果と単純なP B Sを用いたシステムの計算結果(図12)に比べると、システムの消光比が大幅に改善されてタンデムP B Sの効果が顕著であることが分かる。

7. まとめ

1つの投写光学系を用いて立体映像を投写する新しいディスプレイを提案した。このシステムは、

- ①1つの投写光学系で時分割せずに立体画像を表示できる
 - ②ディスプレイとスクリーンの関係を自由に設定できる(表示画像を自由に拡大縮小できる)
 - ③光損失が非常に少ない
- など、2つの投写光学系を用いる従来の立体投写型ディスプレイにない優れた特徴を有している。

ここでは、光アドレス型空間光変調素子を用いたシステムのクロストークおよび消光比特性をミューラ行列により解析した。これらの立体画像の基本的特性と、P B Sの偏光分離特性、空間光変調素子の消光比、左右画像信号強度等との関係を定量的に明らかにした。

その結果、

- ①P B Sの偏光分離特性が劣化すると、クロストークが増大する
 - ②暗い画像では、明るい画像よりクロストークが目立つ
 - ③空間光変調素子の消光比が劣化するとシステムの消光比が大幅に劣化する
- などの課題が明らかになった。

また、C R Tを用いた立体投写型ディスプレイとの比較より、上記の結果がT F Tを用いた電気アドレス型空間光変調素子を組み込んだ立体投写型ディスプレイなどリタレーション変調方式に基づく全てのシステムに共通して発生す

ることを示した。

これらの課題を解決するため、タンデムP B Sを用いた立体投写型ディスプレイを提案し、上記課題が大幅に改善されることを計算により明らかにした。このシステムは、高輝度化や高解像度化にも適しており、明るさと解像度の両立が要求される大画面の立体画像の表示に好適である。

附録A

P B Sのミューラ行列は次の式で表される。

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_p^2 + q_s^2 & q_p^2 - q_s^2 & 0 & 0 \\ q_p^2 - q_s^2 & q_p^2 + q_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2q_p q_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2q_p q_s \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

ここで q_p^2 と q_s^2 はP波光とS波光の透過率である。P波光およびS波光がP B S中を直進する場合、 q_p^2 と q_s^2 は、5.1節の条件①より、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} q_p^2 &= 1 - a, \\ q_s^2 &= a, \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

P波光とS波光はP B Sで 90° 反射する場合は、5.1節の条件②に従って、 q_p^2 と q_s^2 は

$$\begin{aligned} q_p^2 &= a, \\ q_s^2 &= 1 - a, \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

となる。

式(A2)、(A3)を式(A1)に代入すると、式(3)、(4)を得る。

附録B

液晶変調器 M_L のミューラ行列は、文献(18)より、以下の式で与えられる。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \phi_L) \sin^2 2\theta & (1 - \cos \phi_L) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \phi_L \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \phi_L) \sin 2\theta \cos 2\theta & 1 - (1 - \cos \phi_L) \cos^2 2\theta & \sin \phi_L \cos 2\theta \\ 0 & \sin \phi_L \sin 2\theta & -\sin \phi_L \cos 2\theta & \cos \phi_L \end{bmatrix} \quad (\text{B1})$$

ここで、 θ は光の電界の振動方向と液晶の高速軸とのなす角度である。4章で定めたように、 $\theta = 45^\circ$ を式(B1)に代入すると、式(5)を得る。

参考文献

1. J.M.Haggerty, S.Reinsch, W.P.Bleha, and R.D. Sterling, "Stereoscopic large screen displays using liquid crystal light valve projectors", in *Large Screen and Projection DisplaysII*, W. P. Bleha, ed., Proc.SPIE Vol.1255, pp.114-122 (1990).
2. H.Isono, M.Yasuda, D.Takemori, H.Kanayama, C.Yamada, and K.Chiba,"50-inch autostereoscopic full-color 3-D TV display system", Proc. SPIE Vol.1669, pp.176-185 (1992).
3. H.Isono and M.Yasuda, "Flicker-free field sequential stereoscopic TV system and measurement of human depth perception", SMPTE J. Vol.99, pp.138-141 (1990).
4. K.Takizawa and T.Fujii,"Stereoscopic projector", Japanese patent application laid-open No.8-331606.
5. K.E.Jachimowicz and R.S.Gold,"Stereoscopic (3-D) projection display using polarized color multiplexing", Opt. Eng. Vol. 29, pp.838-842 (1990).
6. M.Hatori and I.Yuyama,"Progress towards three-dimensional television", Proc.TAO first international symposium, pp.S413-S419 (1993).
7. H.Yamanoue, M.Nagayama, T.Motoki, T.Mitsuhashi, and M.Hatori,"A study of tolerance for geometrical distortions between L/R images on chooting 3D-HDTV", ITEJ Tech. Rep. Vol. HIR-96-71, pp.105-110 1996.
8. R.D.Sterling, R.D.Te Kolste, J.M.Haggerty, T. C. Borah, and W. P. Bleha, "Video-rate liquid-crystal light-valve using an amorphous Silicon photoconductor", Proc. SID 90, pp.327-329 (1990).
9. W.P.Bleha,"Development of ILA projectors for large screen display", Proc.Asia Displays'95, pp91-94 (1995).
10. J.Hagerman, M.Yoshimura, Y.Oikawa, and H.Ohmae,"Single lens color ILA projector", Proc. Asia Display'95, pp.923-924 (1995).
11. A.G.Ledebuhr,"Full-color single-projection-lens liquid-crystal light-valve projector", Proc.SID86, pp.379-382 (1986).
12. K.Takizawa, H.Kikuchi, H.Fujikake, Y.Namikawa, and K.Tada,"Polymer-dispersed liquid crystal light valves for projection display", Opt. Eng. Vol.32, pp.1781-1791 (1993).
13. K.Takizawa, H.Kikuchi, H.Fujikake, Y.Namikawa, and K.Tada,"Reflection mode polymer-dispersed liquid crystal light valve", Jpn.J.App l. P hys. Vol.33, pp.1346-1351 (1994).
14. K.Takizawa, H.Kikuchi, H.Fujikake, T.Fujii, M.Kawakita, and M.Yokozawa, "Spatial light modulators using polymer-dispersed liquid crystal and $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ photoconductive layers for projection display", Proc. SPIE Vol.2407, pp.136-148 (1995).
15. S.Yoshikawa, M.Horie, H.Takahashi, and T.Shimura,"A construction of liquid crystal light valve in a reflection mode", IEICE Vol.J59-C, pp.305-312 (1976).
16. I.P.Kaminow, *An Introduction to Electrooptic Devices* (Academic, New York, 1974), Chap.1.
17. A.Hanazato, M.Okui, H.Hoshino, and T.Mitsuhashi, "Subjective quality of stereoscopic TV pictures impaired by cross talk images," in *Technical Digest of the Winter Meeting of the Institute of Television Engineers* (Institute of Television Engineers of Japan, Tokyo, 1996, p.2-1.
18. E.L.O'Neill, *Introduction to Statistical Optics* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1963), Chap.9.