

逆視防止と解像度改善を同時に実現した3Dディスプレイ

吉儀 正之, 阪本 邦夫

島根大学総合理工学部 数理・情報システム学科

Pseudoscopic-free 3D Display using Orthogonal-polarized Images

Masayuki YOSHIGI and Kunio SAKAMOTO

*Department of Mathematics and Computer Science,
Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University*

Abstract

The rear projection 3D display system using projector has superior characteristics, such as having a large screen with wide field of view. Conventional 2-views lenticular and parallax-barrier display systems have disadvantages such that horizontal resolution is reduced by half because each eye only sees half the pixels. Moreover the pseudoscopic problem occurs when the observer perceives left and right images by the right and left eye, respectively. We proposed 3D displays using polarizer slit to solve each problem. However, this simple polarizer slit cannot solve these problems simultaneously. The purpose of this paper is to solve this simultaneity. The newly developed projection 3D display has two vertically striped polarizer slit in order to reconstruct left and right stereoscopic viewing full images without the pseudoscopic. The double polarizer slits can solve the problems of conventional 3D display system because this display shows twice the 3D image resolution and the double polarizer slits prevent the observer viewing pseudoscopic images.

1. ま え が き

近年、バーチャルリアリティ（仮想現実感）の研究が盛んになり、医療、教育、設計・デザインなど様々な分野へ、3次元画像技術が応用されるようになってきた^{1)~3)}。立体ディスプレイは、2次元ディスプレイに擬似的に表示されていた3次元映像情報を、奥行き方向も含めて表現できるディスプレイであり、ヒトが見ている3次元の実空間と同じような高臨場感の映像空間を再現することができる。立体映像の表示方法には、両眼視差を利用した2眼式メガネ方式をはじめ様々な方式が研究されており、筆者らも3次元空間上に情報オブジェクトを提示し、様々な操作を行うシステムを構築するため、立体映像表示装置と映像とのインタラクションについて研究を行っている。先に筆者らは、パララックスバリア方式の2眼式立体表示による映像と実空間の映像との重畳表示を実現するため、従来の遮光スリットに代わり、偏光フィルタ（偏光子）で構成したスリット（偏光子スリット）を用いて左右映像を分離する表示方法⁴⁾、さらに、液晶セルを利用して偏光状態の制御を行い立体映像表示を行う手法⁵⁾について提案した。ランダムな偏光状態を有する実空間の映像に対しては、遮光スリットと異なり偏光子に

は遮蔽効果が無いため、実空間映像の観察を妨げる遮光スリットがなくなり、シースルー表示での実空間映像の視認性を向上させることができた。この偏光子スリットによる左右映像分離の技術は、拡張現実感のためのシースルー立体映像表示だけでなく、立体ディスプレイ装置の特性改善にも適用可能である。筆者らは、この基礎技術を基に、偏光方向の異なる2画面分の視差映像を、偏光子スリットを利用して左右眼に対応する視差映像に分離することで、従来の2眼式立体表示で生じる水平方向画素の解像度が1/2になる問題を解決⁶⁾し、また、偏光状態により光の透過・不透過の選択性を偏光子が有する特性を利用して、パララックスバリアによる2眼式立体表示で生じる逆視問題の改善⁷⁾や、多視点化の際に生じる水平方向表示画素数の減少を、水平・垂直両方向に振り分けることにより水平解像度の減少を改善する手法⁸⁾も提案した。この左右に分離された視差光束を偏光子を用いて制御する技術は、パララックスバリア方式だけでなく、レンチキュラレンズ方式にも適用可能な技術であり、レンチキュラレンズ板を利用した立体映像表示の特性を改善した⁹⁾。

一般にパララックスバリア方式やレンチキュラ方式では、左右の眼に対応する映像を短冊状に分割し、画素

列ごとに左右交互に並べた縦ストライプ状の左右混成画像を映像スクリーンに表示し、この映像を遮光スリットやレンズにより左右映像に分離する。このため、メガネなしで立体表示を実現できるが、2眼立体視のシステムでは、水平方向画素の解像度が1/2になる問題があった。また、偏光メガネ方式と異なり、メガネなし方式では遮光バリアやレンズの機能により、観察領域を左眼観察用・右眼観察用の領域に区分することで両眼立体視を実現しているため、観察者の眼の位置によっては、左眼映像を右眼で、右眼映像を左眼で観察するために、奥行き感が逆転する逆視の問題も生じる。筆者らは文献(6), (7)で、これらの問題を解決する方法を提案したが、解像度問題の改善と逆視防止を同時に実現することはできなかった。これらの改善法では、目的に応じて設計したストライプ状偏光子を、パララックスバリアやレンチキュラレンズに貼付していたが、偏光子により実現できる制御は透過・不透過の二者択一であるため、複数機能の同時実現は不可能である。そこで本論文では、解像度問題の改善と逆視防止の複数機能を同時に実現するため、偏光子スリットを2重に配置し、前面と後面の偏光子特性の組合せにより、4通りの光束制御を実現することで、解像度問題の改善と逆視防止を同時に実現することのできる立体表示法を提案する。本論文では、パララックスバリア方式に比べ、左眼・右眼像のクロストークを改善した特性を有するレンチキュラ方式を、2眼立体視の立体表示を行うシステムを試作したので報告する。従来のレンチキュラ方式では、水平方向画素の約半数の半円筒形レンズで構成されたレンズ板を使用していたが、本試作システムでは、倍密度表示を行うため、レンズピッチを従来方式の半分の幅とし、水平方向画素とほぼ同数の半円筒形レンズで構成されたレンズ板を使用する。本論文で提案するシステムは、偏光特性を有する2画面分の映像を投影し、半円筒形レンズ群と縦ストライプ状の偏光フィルタを組合せて、これら映像を左右の眼に分離・提示することで、解像度劣化の生じない2眼式立体表示を行い、さらに偏光スリットを二重に配置するダブルスリット構造を採用することで、逆視防止の機能も付加することが可能な立体映像システムである。

2. レンチキュラ方式の原理

図1はレンチキュラレンズ板により視差映像が分離される原理を示したもので、ストライプ状の左右混成視差画像の前に配置したレンズ群を通して、これらの画像を分離して観察する方法である。一般にレンズは樹脂製で大型化が容易なため、リア投写型の大画面立体ディスプレイに用いられている。また、パララックスバリアのように光を遮光してしまうことがないため、画面が明るいという特徴がある。レンチキュラレンズ板により2眼式

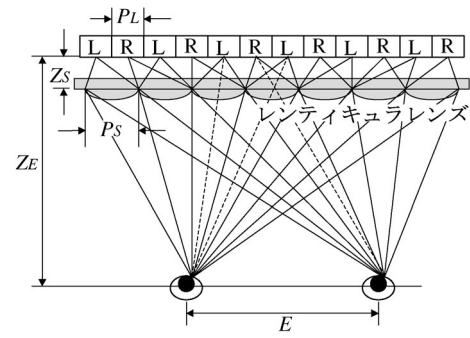


図1 レンチキュラ3Dディスプレイの原理

の立体表示を行う場合、投写映像の水平画素ピッチを P_L 、観察者の眼間距離を E 、観察距離を Z_E とすると、半円筒形レンズの幅 P_S は $P_S = 2P_L E / (E + P_L)$ 、設置位置 Z_S は $Z_S = P_L Z_E / (E + P_L)$ と求められる。また、半円筒形レンズの焦点距離 f は、 $1/f = 1/Z_S + 1/(Z_E - Z_S)$ を満たすものが用いられる。

3. レンチキュラ方式での倍密度表示の原理

一般に、2眼式の立体表示では、投影スクリーンに表示された映像を、左右の眼で異なる映像を観察するように分離して両眼立体視を実現している。このため、図1に示したレンチキュラ方式の立体表示では、ステレオ画像の画素配置がストライプ状になるため、横方向の解像度の劣化を生じ、左右それぞれの視差映像の解像度は半分となる。そこで、偏光メガネ方式と同様に、左右の眼で観察する視差映像を2台のプロジェクタにより投影することで、投影スクリーン上に2倍の映像情報の提示を行う倍密度表示を実現する。1台のプロジェクタで映像投影を行う場合には、解像度は半分となるが、倍密度の2眼式表示では、解像度の劣化を生じることなく、映像面全域の表示が可能となる。

図1に示した2眼式の立体表示では、横方向の解像度は半分となるため、レンチキュラレンズ板を構成する半円筒形レンズの数は、水平方向画素数の約半分となっている。視差分離された映像の各画素は1つのレンズを通して観察されるため、倍密度表示を行う場合には通常の2倍の個数の半円筒形レンズが必要となる。そこで、図2に示すように、半円筒形レンズの幅を1/2とし、レンズの個数を2倍にしたレンチキュラレンズ板を使用して左右視差映像の分離を行う。したがって、倍密度の2眼式立体表示を行う場合、設置位置 Z_S 、半円筒形レンズの焦点距離 f は、図1の場合と同じく、 $Z_S = P_L Z_E / (E + P_L)$ 、 $1/f = 1/Z_S + 1/(Z_E - Z_S)$ であるが、半円筒形レンズの幅 P_S は $P_S = P_L E / (E + P_L)$ となる。

本方式では、倍密度の立体表示を実現するため、偏光メガネ方式のように2台のプロジェクタを利用し、投写

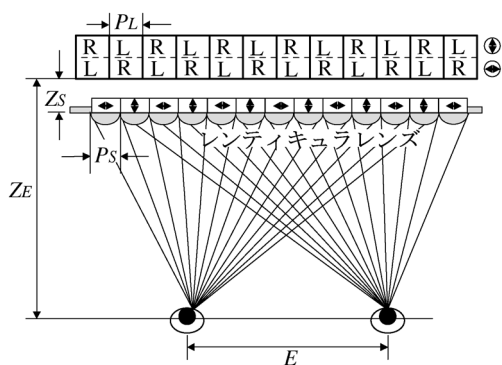


図 2 倍密度表示レンティキュラ 3D ディスプレイ

光の偏光方向を直交させて、2倍の視差情報を提示する。倍密度表示を行う場合でも、レンティキュラレンズ板により視差分離を行うため、投影スクリーン上にはストライプ状の左右混成画像が必要となる。2台のプロジェクタにより投影される映像の偏光方向は互いに直交しているため、各プロジェクタで図3に示すような偏光方向の異なる左右ストライプ画像を投影すればよい。また、図4に示すように偏光方向を90°回転させることができる1/2波長板を利用すると、投影画素と同じ幅で投影スクリーン上に1/2波長板をストライプ状に貼付することにより、偏光方向が直交する左眼、右眼用映像を投影すると、ストライプ状の1/2波長板により偏光方向が90°回転する。その結果、図3に示すように、1/2波長板と同じストライプ幅で、左右ステレオ混成画像が生成される。偏光方向の異なる2台のプロジェクタの映像は同時にスクリーン上へ投影されているため、図3に示す水平方向に偏光したストライプ混成画像と、垂直方向に偏光した混成画像が2重に投影されることになる。

このような2種類の偏光状態を持つ2重に投影された視差情報を分離するために、図5に示すような偏光方向により光の透過、不透過の選択性を有する偏光フィルタを利用する。図2に示すように、偏光方向の異なる偏光フィルタをレンティキュラレンズ板にストライプ状に貼り付ける。水平方向の偏光を有する左右混成画像に対しては、図6(a)に示すように、レンティキュラレンズ板の水平方向の偏光フィルタが開口部、垂直方向の偏光フィルタが遮光部となるため、開口部のレンズにより左右映像の分離が行われる。垂直方向の偏光を有する左右混成画像に対しても同様に、図6(b)に示すように、垂直方向の偏光フィルタが開口部、水平方向の偏光フィルタが遮光部となるため、左右映像の分離が行われる。水平・垂直両方向の偏光を持つ混成画像は、同時に視差分離が行われるため、倍密度の立体表示が実現でき、2眼式の立体表示の場合には、図7に示すように解像度劣化の生じない立体表示が可能となる。

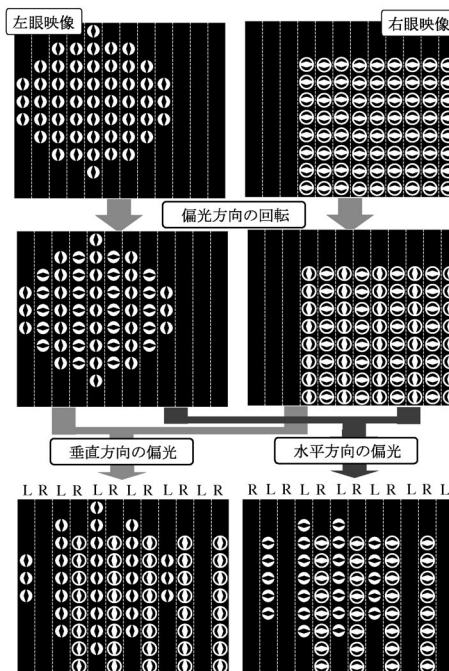


図 3 左右ストライプ混成画像の生成

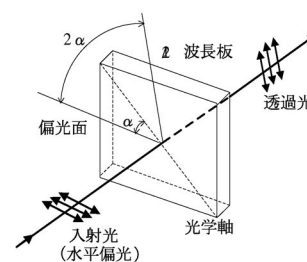


図 4 1/2 波長板

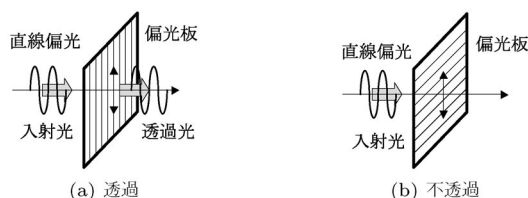


図 5 偏光板を用いた遮光バリア

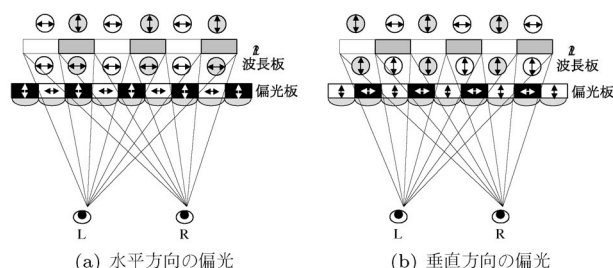


図 6 レンティキュラレンズ板による左右映像の分離

4. メガネなし立体表示方式での逆視問題

メガネなしで立体映像を観察可能な2眼式のレンティキュラ方式やパララックスバリア方式では、眼間距離 E

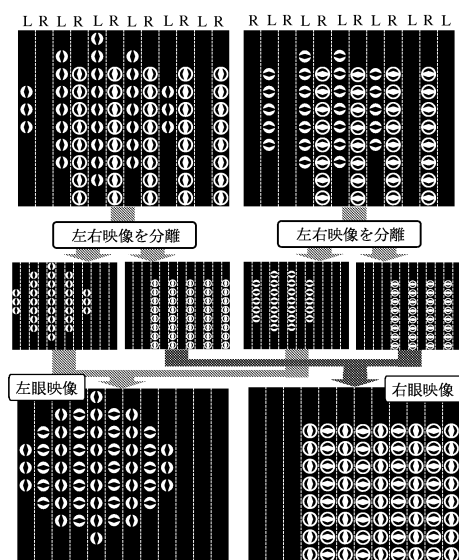


図7 解像度劣化のない視差映像表示

ごとに左眼用、右眼用画像の観察位置が交互に現れる。そのため、観察者の視点位置によっては、左(右)眼用画像を右(左)眼で観察する場合があるため、左眼と右眼の映像が入れ替わる「逆視」の問題が発生する。メガネ方式では、常に左眼用の映像は左眼で右眼用映像は右眼で観察するため逆視は生じない。メガネなし方式でも頭の位置を検出するヘッドトラッキング機能を利用して、観察者の両眼位置を考慮し、逆視領域では左右の映像を逆に表示することで、逆視を防止する方法が提案されている。しかし、ヘッドトラッキング機能により左右画素の入れ替えを行う方式では、動きに追従できるのは観察者1名に限られるため、一般に多人数での観察に対しては適用できない。多人数鑑賞が可能な逆視の生じない立体表示方法としては、3眼式の立体表示を行い、このうち1つの観察位置で何も映像が観察されないように、左眼・右眼の画素対の間に黒画素を設けることで、正立体視領域のみ構成する方法が提案されている。図8はレンチキュラレンズ方式において黒画素挿入により逆視防止を実現する原理を示したものである。正立体視領域の両サイド(左眼用映像観察領域 L_1 の左側 R_0 、右眼用映像観察領域 R_1 の右側 L_2)に、黒画素の観察領域を設けることで、本来逆視となる領域ではどちらか一方の眼で黒画素映像を観察するようになるため、両眼で映像を観察できるのは正立体視領域のみとなり、逆視状態での映像観察を防ぐことができる。しかし、黒画素挿入方式では2眼式立体表示であるにも関わらず、逆視防止のために映像表示に利用しない黒画素を挿入するため、3眼式立体表示と同等の解像度になるため、水平方向の解像度が2眼式表示の場合に比べ劣化するという問題が生じる。このようにメガネなし方式で生じる逆視問題を解決する方法が提案されているが、観察者の人数に限られる、解像度劣化の問題があるなど、いずれの方式にも一長一短

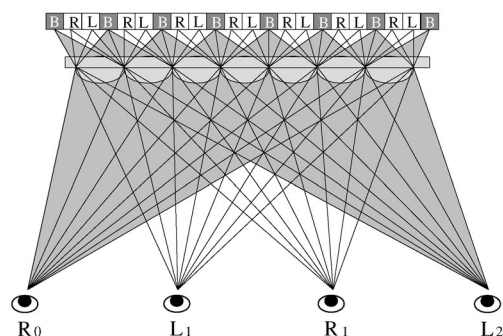


図8 黒画素挿入方式による逆視防止

があり、メガネ方式のように多人数鑑賞可能かつ解像度劣化なく逆視の生じない立体映像の観察ができることが望ましい。

このような条件を満たす逆視状態の防止方法として、先に筆者らはレンチキュラ方式やパララックスバリア方式において、レンズや遮光バリア部分に偏光スリットを貼付することにより、レンズやバリア開口部を通過する視差光束を選択的に制御し、逆視を防止する手法を提案した⁷⁾。しかし、倍密度表示を実現する本提案システムでは、既に偏光スリットがレンチキュラレンズ板に貼付されており、逆視防止を実現する偏光スリットとは設計が異なるため、レンズ板に貼付する偏光スリットにより両機能を両立させることは不可能である。そこで、レンズ板に貼付する偏光スリットに加え、投影スクリーンとレンズ板との間に偏光スリットを新たに配置する偏光ダブルスリットの構造を採用することで、倍密度表示と逆視防止の両機能を実現する方法を提案するが、その原理については次章で述べる。

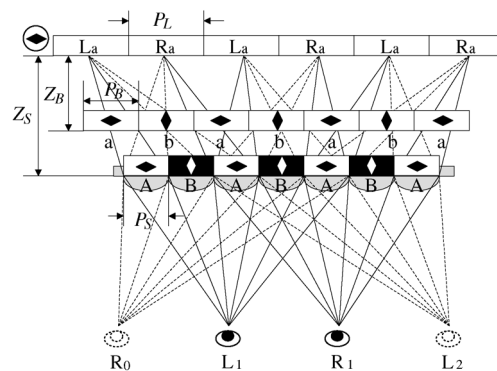
5. 偏光ダブルスリットによる逆視防止

2眼式立体表示において、左(右)眼の映像観察位置が1つおきに可視領域と不可視領域が入れ替わるように、 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ を不可視領域に設定すれば、左(右)眼用画像を右(左)眼で観察する場合が生じないため、逆視を防止することができる。本章では、倍密度表示を実現したレンチキュラ方式において、投影スクリーンとレンチキュラレンズ板の間に、新たに偏光スリットを追加することにより、偏光を利用することで半円筒形レンズ部を選択的に通過させる視差映像光束の制御が可能になり、不可視領域を設けることで逆視の発生を防止する原理について述べる。

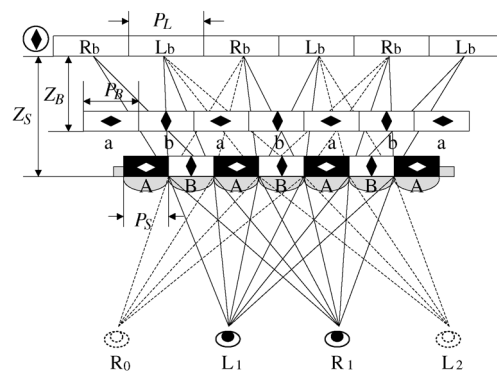
2眼式のレンチキュラ方式倍密度立体表示において、 $L(R)_{2k+1}$ の左(右)側に位置する観察領域 $R_{2k}(L_{2k+2})$ を不可視領域として逆視の発生を防止するため、倍密度の立体表示を実現するために投影された水平・垂直両方向の偏光方向を持つ視差映像に対し、左右視差映像の分離を行うためにレンチキュラレンズ板の半円筒形レンズ部分に貼付した偏光フィルタに加え、図9に

示すように、偏光方向が交互に直交するスリット幅 P_B の偏光フィルタを、投影スクリーンとの距離が Z_B の位置に新たに配置する。投写映像の水平画素ピッチを P_L 、半円筒形レンズの幅を P_S 、レンズ板の設置位置を Z_S とすると、 P_B 、 Z_B は幾何学的に決定され、それぞれ $P_B = 2P_L P_S / (P_L + P_S)$ 、 $Z_B = P_L Z_S / (P_L + P_S)$ と求められる。また、水平方向の偏光特性を有する左右混成画像に対しては、図9(a)に示すように、レンチキュラレンズ板に貼付された垂直方向の偏光フィルタ B が遮光部となり、水平方向の偏光フィルタ A が開口部となるため、レンズにより視差分離が行われ、垂直方向の偏光特性を有する左右混成画像に対しては、図9(b)に示すように、偏光フィルタ A が遮光部、フィルタ B が開口部となり、投影映像の偏光方向に対応するレンズにより視差分離が行われるため、倍密度表示が実現されている。

このようにして、レンチキュラレンズ板により左右眼に分離される視差映像光束のうち、不可視領域に設定された観察視点位置に到達する光束を、設置位置 Z_B に配置された偏光スリットにより遮光することで、逆視の発生を防止する。水平方向の偏光特性を有する左右混成画像の視差分離の原理を示した図9(a)において、画素 $L(R)_a$ はスリット部 a および半円筒形レンズ部 A を通過して観察位置 $L(R)_1$ に到達する光束を生成する。この画素 $L(R)_a$ は、通常の2眼式立体表示においてはスリット部 b も通過するため、観察位置 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ などにおいても映像の観察が可能になる。スリット部 b を通過する光束を遮光することにより、 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ などを不可視領域とすることができるが、同時にスリット部 b を通過する垂直方向の偏光特性を有する図9(b)に示す画素 $L(R)_b$ の光束を遮光することになるため、偏光方向により光の透過、不透過の選択性を有する偏光フィルタを利用してスリット部を通過する視差光束を制御する。したがって、画素 L_a 、 R_a 、半円筒形レンズ部 A とスリット部 a で、同じ偏光方向となるように図9(a)に示すような偏光スリットを構成すると、レンズ部 A を通過する画素 L_a 、 R_a はスリット部 a のみを通過して、観察位置 $L(R)_1$ に到達する光束のみ生成され、 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ などに到達する光束は生成されないため、 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ などを不可視領域とすることができる。また、図9(b)に示した垂直方向の偏光特性を有する左右混成画像の視差分離についても同様に考えると、画素 L_b 、 R_b もスリット部 b、レンズ部 B のみを通過して、観察位置 $L(R)_1$ に到達する光束のみ生成され、 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ などに到達する光束は生成されないため、 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ などを不可視領域とすることができる。このように、倍密度立体表示においても偏光ダブルスリットを用いることで、黒画素を挿入することなく逆視防止が実現できるため、逆視防止の機能を付加しても、3章で述べた倍密度立体表示の場合と同等の解像度を維持することができ、多人数



(a) 水平方向の偏光を有する混成視差画像の分離



(b) 垂直方向の偏光を有する混成視差画像の分離

図9 偏光ダブルスリットによる逆視防止

鑑賞可能な逆視領域のない立体表示をメガネなし立体表示の方式でも実現することができる。

6. 立体表示装置の試作

まず、投影光束の偏光方向を調整した投影光学系を使用して、偏光方向が直交する左眼、右眼用映像を提示する映像投影装置を作製した。また、 $1/2$ 波長板をストライプ状に貼付した投影スクリーンを使用する構造としたため、左眼・右眼用の映像を投影することにより、図3に示した原理でスクリーン上に、水平・垂直両方向に偏光したストライプ混成画像が2重に投影される映像表示部を構成した。さらに、この映像表示部に偏光フィルタを貼付した市販のレンチキュラレンズ板(3線/インチ)を組合せることで、メガネなしの高解像度立体表示装置を構築できる。今回試作した表示システムでは、眼間距離 E を 65mm と仮定し、画像表示部のストライプ幅を $P_L = 8.04(\text{mm})$ 、半円筒形レンズの幅(貼付する偏光フィルタのストライプ幅)を $P_S = 7.58(\text{mm})$ と設定した。また、レンズ径 7.58mm の半円筒形レンズの焦点距離は 10.4mm であり、画像表示部とレンチキュラレンズ板との間隔 Z_S を 11.0mm としたため、観察距離 Z_E は 191mm となっている。さらに、逆視防止の機能を付加するために用いる偏光スリットのスリット幅 P_B は 7.80mm であり、設置位置 $Z_B = 5.7(\text{mm})$ に配置した。

2眼式表示において倍密度表示を行う場合、 $1/2$ 波長

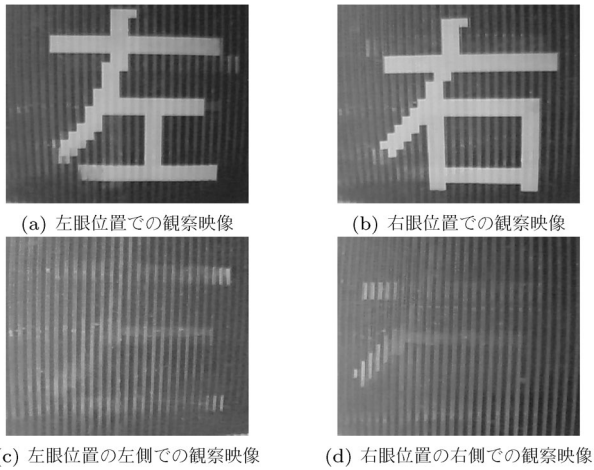


図 10 レンティキュラレンズ板を通して分離された映像

板を使用して縦ストライプ状の左右混成画像を生成すると、2台の映像投影装置は、それぞれ左右の視差映像を個別に全域投影表示することになるため、投影光学系の投写精度に関わらず、左右映像は正確に分離されることになる。図 10 に観察される視差映像を示す。2画面表示により左眼、右眼用映像の全域表示が実現されているため、水平方向の解像度が劣化することなく、視差映像を表示できている。また、2重に配置した偏光子により視差光束が適切に制御され、両眼立体視領域の両サイド（左眼映像観察領域の左側および右眼映像観察領域の右側）に不可視領域が形成されているため、逆視も防止できることが確認できた。本方式は、解像度改善のため水平方向画素の解像度を2倍にして映像投影を行う方式と異なり、水平方向画素サイズを縮小させるための投影光学系や液晶パネルの仕様を変更することなく、2台のプロジェクタにより2偏光の左右映像を投影するだけで、解像度改善が実現できる。

7. む す び

2台の投影装置によりリア投写された互いに直交する左右映像を、縦ストライプ状の偏光フィルタを貼付したレンティキュラレンズ板を用いて、左右映像の分離を行うことにより、倍密度の立体映像表示が実現できるレンティキュラ方式の立体表示装置について述べた。2偏光の左右映像を投影し、偏光子により2重に投影された左右映像を分離するため、既存の液晶プロジェクタの投影光学系に改良を加えることなく、倍密度表示が実現できる。また、偏光子スリットを2重に配置したダブルスリット構造の採用により、逆視防止も同時に実現することができる。レンティキュラ方式はリア投写型の大画面表示装置として利用されているため、2眼式立体表示においては、水平方向の解像度劣化が生じない大画面立体映像表示を実現できる。今後は映像スクリーンで提示された仮想空間内のオブジェクトへの操作の実現などの3Dワー

クスペースシステムの機能拡張、スクリーンの大型化、多面設置による仮想空間の構築などについて検討を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号 17700115）、独立行政法人科学技術振興機構「平成17年度シーズ育成試験」の補助を受けて行われたものであり、ここに関係各位に謝意を表する。

〔参 考 文 献〕

- 1) 大越孝敬：“三次元画像工学”，朝倉書店（1991）
- 2) 泉武博監修：“3次元映像の基礎”，オーム社（1995）
- 3) 谷千束編著：“高臨場感ディスプレイ”，共立出版（2001）
- 4) 阪本邦夫，木村理恵子：“3Dワークスペース構築のためのシースルー立体表示ビューア”，映情学誌，**58**，7，pp.999 - 1001（2004）
- 5) 阪本邦夫，木村理恵子：“偏光パララックスバリア方式透過型立体ディスプレイ”，映情学誌，**59**，2，pp.296 - 301（2005）
- 6) 阪本邦夫，木村理恵子：“解像度劣化のないパララックスバリア方式立体表示の一手法”，映情学誌，**59**，1，pp.155 - 157（2005）
- 7) 阪本邦夫，木村理恵子：“逆視領域のないパララックスバリア方式立体ディスプレイの一方式”，映情学誌，**58**，11，pp.1669-1671（2004）
- 8) 阪本邦夫，木美和：“偏光パララックスバリア方式多視点立体ディスプレイの試作”，映情学誌，**58**，9，pp.1288 - 1290（2004）
- 9) 阪本邦夫，木美和：“偏光スリットを用いた多眼式立体ディスプレイの試作”，映情学誌，**59**，5，pp.791 - 793（2005）