

偏光スリットを用いた多眼式立体映像表示装置

西田 司, 阪本 邦夫

島根大学総合理工学部 数理・情報システム学科

Multi-view Barrier and Lenticular 3D Displays Using Polarizer Slit

Tsukasa NISHIDA and Kunio SAKAMOTO

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

Abstract

A display system requiring no special glasses is a useful technology for 3D images. The parallax barrier display system has superior characteristics, such as having a planar screen and a thin panel. However conventional multi-view parallax barrier display system has such demerit that horizontal resolution is decreased because each image is composed of vertical strips separated by the barrier. This paper describes, a newly developed, 4-views display with a parallax polarizer slit and cylindrical lenses. This 3D display can avoid the problem of conventional system because the four stereoscopic images are multiplexed horizontally and vertically. Moreover, we have tried to develop the high-density multiview display. This display provides 2-views images with narrow interval of views for each left and right eye, then two parallax images pass through a pupil of each eye. We confirmed the trial display provides high-density multiview using point light sources and cylindrical lenses.

1. ま え が き

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、両眼立体視を利用した2眼式メガネ方式をはじめ、空間に切断面を再現する奥行き標準化方式、物体からの光線を高密度で再現する超多眼式、ホログラフィによる光波面再生など、様々な方式が研究されている^{1)~3)}。この中で、パララックスバリア方式の立体表示方法は、左右の視差画像の分離を行うバリアをガラス基板へストライプ状の吸収膜を形成することにより作製でき、薄型かつ表示面が平らな表示装置を実現できるため、メガネなし立体ディスプレイとして優れた特性を有しており、現在では、立体テレビモニタをはじめ、ノートパソコンや携帯電話などにも立体表示可能な液晶パネルが搭載されている。

筆者らは立体映像を用いた3Dワークスペースシステムを構築するため、立体映像表示装置⁴⁾⁵⁾や映像とのインタラクション⁶⁾について研究を行っている。パララックスバリア方式の立体表示では2眼立体視が一般的では

あるが、今回、LEDディスプレイを用いて多眼ディスプレイの構築を行ったので報告する。本論文で述べる偏光を利用して視差混成画像の画素分割を奇数・偶数ラインに振り分ける方法は、パララックスバリア方式やレンチキュラ方式のいずれにも適用でき、多視点化に伴う解像度劣化を改善することができる。また、4眼立体視ディスプレイを応用して超多眼表示を行うディスプレイの構築についても述べる。

2. 両眼視差立体映像表示の原理

本章では、両眼視差を利用した立体表示方式であるパララックスバリア方式と、レンチキュラ方式を取り上げ、両方式による立体ディスプレイの設計について簡単に述べる。

2.1 パララックスバリア方式の原理

図1はパララックスバリアにより視差映像が分離される原理を示したものである。パララックスバリア方式は図1に示すように、ストライプ状の左右の眼に対応する画像の前に配置したスリット状の遮光マスクを通して、この画像を分離して観察する方法である。この遮光マスクの位置、スリット幅、バリアのピッチはストライプ状の画像の幅によって変わるが、このバリアのために一般に明るさが減少し、また、ピッチ幅が大きいと

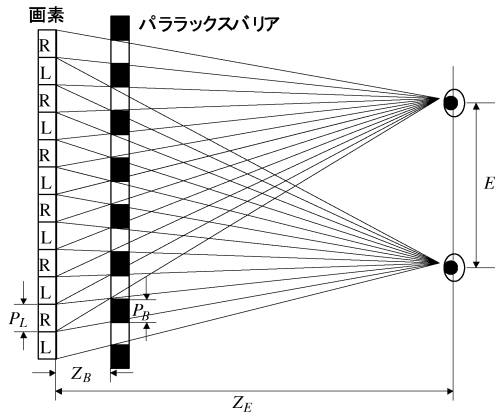


図 1 パララックスバリア 3D ディスプレイの原理

スリットの存在が目障りとなる。現在では、視差画像の表示部として液晶ディスプレイを用いるものが一般的となっており、パララックスバリアにより2眼式の立体表示を行う場合、液晶ディスプレイ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、パララックスバリアのスリット幅 P_B と設置位置 Z_B は幾何学的に決定され、それぞれ $P_B = P_L E / (E + P_L)$ 、 $Z_B = P_L Z_E / (E + P_L)$ と求められる。

2.2 レンティキュラ方式の原理

パララックスバリアの代わりに多数の半円筒形レンズをディスプレイの前面に配置し、視差映像分離を行う方式がレンティキュラ方式である。図2はレンティ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。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。一般にレンズが樹脂製で大型化しやすいため、リア投写型の画面立体ディスプレイによく用いられていたが、近年では、液晶ディスプレイとの組合せにより、テレビモニタ型の立体表示装置も開発されている。レンティキュラレンズ板により2眼式の立体表示を行う場合、表示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 $P_S = 2P_L E / (E + P_L)$ とバリア開口幅 P_B の2倍の大きさであり、設置位置 Z_B はパララックスバリア方式と同じく $Z_B = P_L Z_E / (E + P_L)$ と求められる。また、半円筒形レンズの焦点距離 f は、 $1/f = 1/Z_B + 1/(Z_E - Z_B)$ を満たすものが用いられる。

3. 偏光スリットを用いた多眼表示

3.1 パララックスバリア方式での多眼表示

一般に、パララックスバリア方式での多視点化は、多視点視差画像を縦1画素列ごとに交互に表示し、ピッチと開口部幅を変更したバリアを用いて行う。ただし、この場合には多眼化に伴い水平画素方向の解像度が劣化す

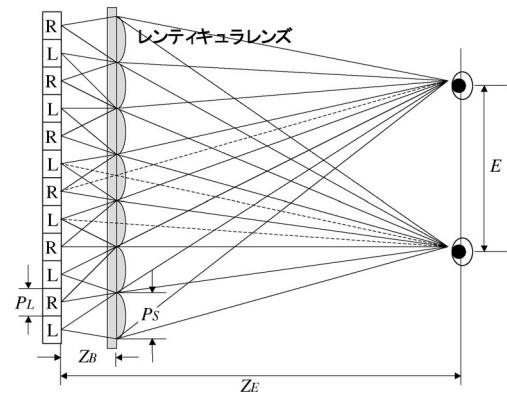


図 2 レンティキュラ 3D ディスプレイの原理

る。このため、開口が縦ストライプではなく斜めになっているバリアを利用して、横ライン毎に縦画素の見える範囲を少しずつシフトさせることにより、縦画素列を補完し解像度劣化を軽減する方法なども提案されている。しかし、いずれの場合も多視点視差画像を縦1画素列ごとに配置するため、実質的に観察される映像は水平画素方向の解像度が表示視差数に応じて減少している。

4 視差表示の場合には、画素分割を水平方向のみに対して行うと、水平画素方向の解像度が $1/4$ となる。そこで、水平・垂直両方向に振り分けることにより、水平・垂直画素方向の解像度が共に $1/2$ となるため、水平画素方向への解像度劣化を改善し、視差画像画面サイズの縦横比と1画面あたりの画素数縦横比が均一となるように設計することにした。図3に示すように、横1ラインの画素を2眼に振り分け、さらに画素分割を奇数・偶数ラインにも振り分けることにより、4眼式の立体表示装置を構成することができる。ストライプ状左右視差混成画像の分離はパララックスバリアにより実現することができるが、4眼式を実現するためには奇数・偶数ラインで、2眼分離映像をそれぞれ異なる位置で観察できなければならない。この奇数・偶数ラインの分割には偏光を利用するが、これについては次節で述べる。

3.2 偏光スリットによる不可視領域の形成

図4(a)は、パララックスバリアを用いた2眼式立体表示において、視点位置と観察される画面輝度値の関係を示したもので、左右眼の映像観察位置が交互に現れる。4眼式立体表示を実現するためには、例えば奇数ラインの左右映像観察位置、偶数ラインの左右映像観察位置が順に現れるようにする必要がある。そこでまず、奇数ラインについては、図4(b)に示すように、 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ 、 $L(R)_4$ を不可視領域に設定し、偶数ラインについては、図4(c)に示すように、 $L(R)_1$ 、 $L(R)_3$ を不可視領域に設定すれば、奇数・偶数ラインごとに左(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なるため、形成された不可視領域に他方の可視領域が配置できるようになり、奇数・偶数ラインの振り分

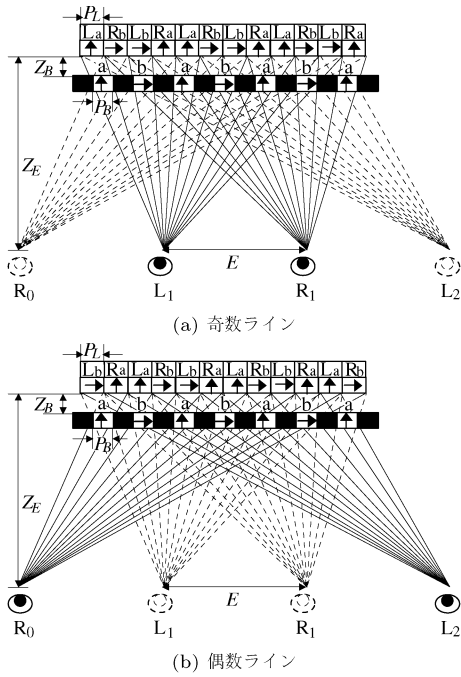


図 3 偏光スリットを用いた多視点立体ディスプレイ

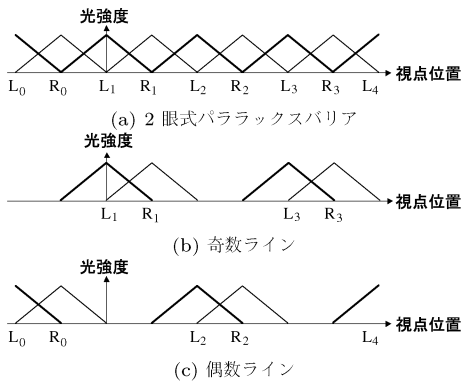


図 4 遮光バリアによる光強度変化

けにより、4眼式の立体表示を実現することができる。

奇数ラインの視差映像分離において、図4(b)に示す観察領域とするためには、偏光を利用してパララックスバリアを構成する⁵⁾。図3(a)において、画素 $L(R)_a$ は開口部 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開口部 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。開口部 b を塞ぐことにより、 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ などを不可視領域とすることができるが、同時に開口部 b を通過する画素 $L(R)_b$ の光束も遮光することになるため、この画素は $L(R)_1$ で見ることができなくなる。そこで、偏光の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パララックスバリアを構成する。一定方向のみに振動する光(直線偏光)が偏光板に入射すると、偏光軸が平行な場合は、光は透過し、偏光軸が直交している場合は、光は透過できない。したがって、画素 $L_a(b)$ 、 $R_a(b)$ と開

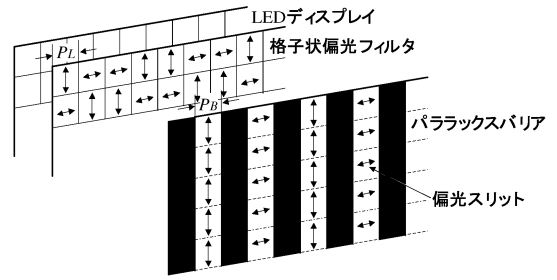


図 5 パララックスバリア 3D ディスプレイの構造

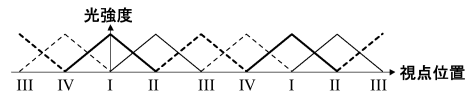


図 6 4眼式ディスプレイの光強度変化

口部 $a(b)$ で、画素部分と開口部にそれぞれ同じ偏光方向となるように偏光フィルタを貼付し、図3(a)に示すような遮光バリアを構成すると、画素 $L_a(b)$ 、 $R_a(b)$ は開口部 $a(b)$ 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。

偶数ラインの視差映像分離においても、同様の原理で図4(c)に示す観察領域とすることができる。パララックスバリアの開口部の偏光スリットの特徴を、縦ストライプで同一とする場合には、奇数ラインと異なる(直交する)特性の偏光フィルタを図3(b)に示すように画素部分に貼付すればよい。したがって、画素部分の偏光フィルタは図5に示すような市松格子状となる。このようにして、偶数ラインの観察位置は $L(R)_1$ 、 $L(R)_3$ などが不可視領域となるため、観察位置 $L(R)_1$ 、 $L(R)_3$ などでは奇数ライン、 $L(R)_0$ 、 $L(R)_2$ などでは偶数ラインを観察することになり、奇数・偶数ラインの振り分けを行うことができる。

4眼式の立体ディスプレイ装置の構成を図5に示す。図5に示した4眼式装置では、従来のパララックスバリア方式の構造に、偏光を利用することにより奇数・偶数ラインを振り分け、水平画素方向の解像度劣化を改善する構造となっている。奇数ラインの左右眼映像の観察位置をそれぞれI、II、偶数ラインの観察位置をそれぞれIII、IVとすることで、図6に示すように4眼式の立体表示を実現できる。

3.3 レンティキュラ方式での多眼表示

3.1節のパララックスバリア方式の多眼化と同様に、レンティキュラ方式に対しても、3.2節で述べた不可視領域を形成する手法を適用することにより、偏光を利用した奇数・偶数ライン振り分けによる解像度劣化を改善した立体表示を行うことができる。図7は、ストライプ状の偏光板を貼付して奇数・偶数ライン振り分けを行い、

4眼式の立体表示を行うレンチキュラ方式の表示装置を示したものである。2章で述べたように、表示映像の水平画素ピッチがパララックスバリア方式と同じ P_L であれば、図 8(a) に示すように半円筒形レンズ板の各レンズの口径は、パララックスバリアの開口部幅 P_B の2倍となる。したがって、偏光方向が互いに直交する偏光板を幅 P_L でストライプ状に貼付した映像提示面に対し、幅 $2P_B$ の偏光板が同じく交互に貼付されたレンチキュラレンズ板を用いれば、偏光を利用して奇数・偶数ラインの振り分けができる。

レンチキュラ方式では、レンズ作用により左右映像の分離を行っているため、パララックスバリア方式のように表示映像に対して遮光スリットを設ける必要がないことが1つの特徴となっている。そのため、一般にレンチキュラ方式では、パララックスバリア方式で観察される映像のように、遮光スリットにより生じる黒色の縦ストライプ（不可視部分）が存在しない。しかし、レンズの口径はバリア開口部幅 P_B の2倍となっているため、各レンズに対して開口幅が P_B となるように図 8(b) に示すような遮光スリットを敢えて設けると、パララックスバリア方式と同様の観察映像も得ることができる。さらに、同一の焦点距離 f をもつレンズであれば、レンズの口径はバリア開口部の幅と同一の設計とすることも可能である。このようなレンチキュラレンズ板に遮光スリットを付加、あるいは逆に、バリア開口部にレンズ（あるいは、同等の機能を持つホログラム回折格子）を付加した構造は、レンチキュラ方式の亜種と考えることができる。この亜種として取り上げた構造は、従来の2眼式や4眼式といった一般的な立体表示法を実現する限りでは、特に必要となる重要技術ではない。しかし、このレンズと遮光バリアの組合せ構造は、レンズ板、または遮光バリア単体では生成不可能な視差光束を再現することができる。その1つの適用例が、超多眼表示に必要な視差光束の生成であるが、これについては次章で述べる。

4. 4眼式装置による単眼視差表示

4.1 超多眼式立体表示

図 9 は、立体視を利用した立体像表示の原理を示したものである。図 9(a) は通常の両眼立体視の原理を示したもので、空間上に像点 P を表示する場合、左眼から見た視差像 P_L と右眼から見た視差像 P_R を表示面上に表示すると、観察者は両眼視差により空間上に像点 P があるように知覚する。図 9(b) に示すように超多眼方式では、空間上に像点 P を表示するため、左眼で P_{L1} 、 P_{L2} 、右眼で P_{R1} 、 P_{R2} というように単眼で複数の視差像を観察する。この場合、観察者は複数の視差像が重畳された網膜上の光量分布を映像として知覚することになるが、眼球の焦点調節を空間上の像点位置 P に合わせた場合に、

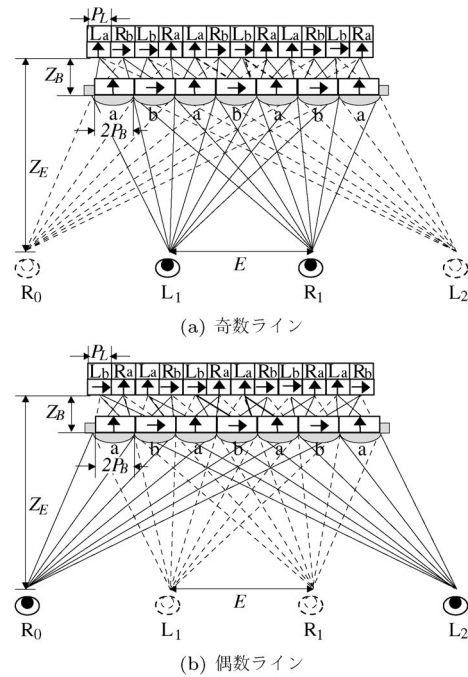


図 7 レンチキュラ 3D ディスプレイの構造

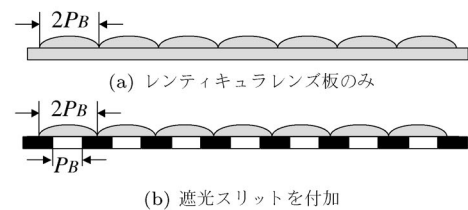


図 8 レンズを用いた視差分離機構の構造

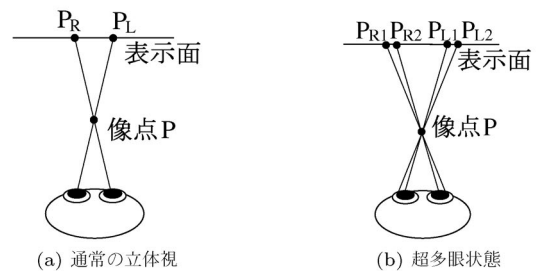


図 9 立体視の原理

最も網膜上に投影される像が自然なものとなる。このため、この焦点調節が整合した生理的に自然な状態で、安定して立体像の観察を行えることが見出されている。

超多眼式の立体表示は、現在のところ垂直方向には視差が無いが、45 視差のものが実現されている⁷⁾。このため、運動視差を有しているが、いずれの観察位置でも瞳孔内に複数の視差光束を入射させる必要があるため、非常に多くの視差映像を表示する必要がある。しかし、従来の2眼式立体表示のように運動視差を再現しない場合には、左右眼で2視差ずつ計4視差の光束を瞳に入射できるディスプレイを構築すれば、超多眼式の立体表示を実現することができる。

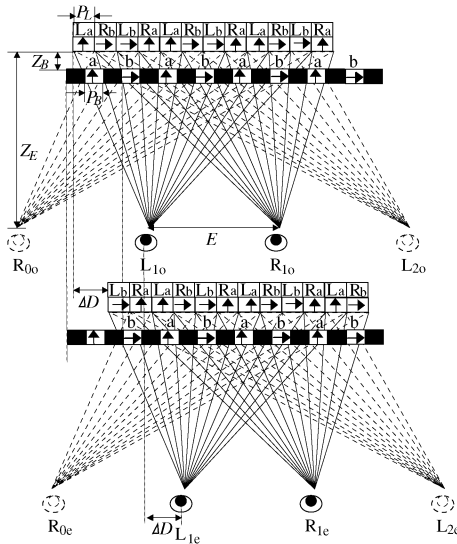


図 10 パララックスバリアの配置

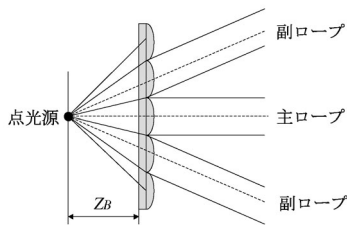


図 11 視差光束生成のレンズ光学系

4.2 視差光束の生成原理

視差光束の光路は、レンズが貼付されたパララックスバリア、あるいはレンチキュラレンズ板のみのいずれの場合でも同一であるため、ここではバリア開口部を通過する光束を考え、視差光束の生成原理を説明する。超多眼式の立体表示を実現するためには、瞳孔内に少なくとも2本の視差光束が入射している必要があり、左右眼で2視差ずつ計4視差の光束を生成しなければならない。また、瞳孔内に2本の視差光束を入射させるため、視差映像の観察位置間隔が不均一な多眼表示を実現しなければならない。そこで、4眼式立体表示の原理を適用し、画素分割を奇数・偶数ラインに振り分けて、解像度劣化を改善するとともに、奇数・偶数ラインごとに観察視点位置が異なるように画素配置とパララックスバリアの相対位置を左右にシフトさせ、観察視点位置の間隔を任意に設計することにした。図10に示すように、奇数・偶数ラインでの視点位置のずれ ΔD を、バリア開口ピッチの整数倍のずれとなるように設計すれば、パララックスバリアの開口は縦ストライプの形状とすることができる*。m番目(mは整数)の画素の偏光方向を、奇数・偶数ラインで互いに直交させる構成にすると、m番目の画素は奇数・偶数ラインで偏光方向の異なるスリットを

* この場合、画素配置のみ ΔD だけシフトさせ、パララックスバリアはシフトさせる必要がない。

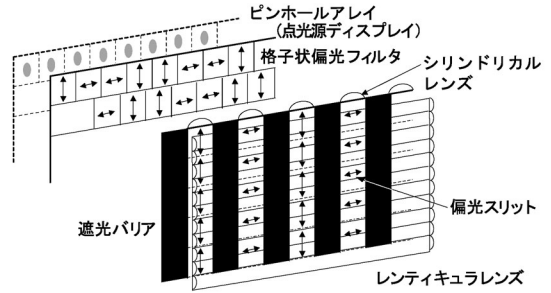


図 12 超多眼式立体ディスプレイ装置の構成

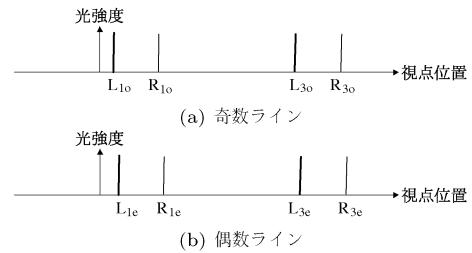


図 13 超多眼式ディスプレイの光強度変化

通過させなければならない。このため ΔD は、開口ピッチ $2P_B$ の奇数倍となり、 $\Delta D = 2(2k + 1)P_B$ (kは整数)と表せる**。左右映像の観察位置間隔 E を眼間距離である65mmとし、シフト量 ΔD として瞳孔径より小さな値を採用すると、観察視点位置が左右眼の周辺に2点ある超多眼式の立体表示を実現できる。

一般に、パララックスバリアによる視差分離では、図6に示したように、映像を観察する最適観察位置(例えば、位置Iなど)として設定した位置以外でも、同一の映像を観察できる範囲が存在する。超多眼表示を行う場合には、単眼観測点位置において2本の視差光束が瞳上で重畳しないように分離する必要がある。このため、パララックスバリアの設置位置にレンズ群を配置するとともに、映像表示用の光源として点光源を採用し、図11のようなレンズ光学系を用いて、ディスプレイの設計において観察位置と設定した位置にのみ光が収斂するような視差光束を生成する。焦点距離 f のレンズ群と点光源との間隔 Z_B は $Z_B = f$ となるように配置されており、各視差光束は瞳孔径の1/2以下の光束径を有する平行光とするため、必要に応じて点光源の放射角や遮光処理を施してレンズの開口を調整する。

図12は、超多眼式立体ディスプレイ装置の構成を、図13は、視差映像の観察視点位置の配置を示したものである。超多眼表示を行う場合には、パララックスバリアなどの視差分離機構の左右方向へのシフトに加え、画素列のシフトも行う必要があるため、映像表示を行う点光源としてLED素子を利用し、奇数・偶数ラインで左右にシフトさせて配置する。偏光を利用することにより奇数・偶数ラインを振り分け、4視差の多眼表示において

** 図10は $k = 0$ の場合、すなわち $\Delta D = 2P_B$ の状態を示したものである。

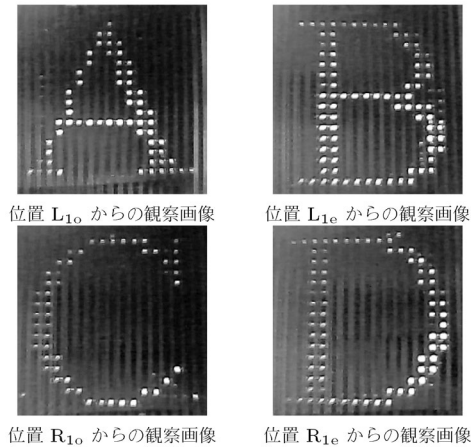


図 14 各視点位置での観察画像

水平画素方向のみの解像度劣化を改善すると同時に、図 13 に示すように、左右の視差映像の観察位置が $4E$ (眼間距離の 4 倍) ごとに配置されるため、「逆視」防止も実現されている⁵⁾。また、本方式では水平方向にのみ視差があり、垂直方向には視差が存在しないため、図 12 に示した最前面に配置された横ストライプのレンチキュラレンズスクリーンにより、垂直方向のみ拡散作用を持たせ、垂直方向の視域を広げている。

4.3 立体映像表示実験

偏光を利用した奇数・偶数ライン画素振り分け方式の 4 眼立体表示装置の視差分離を拡張して、超多眼表示を行うための視差光束の生成について、図 12 の構成の装置を試作し検証した。使用するシリンダリカルレンズは、市販の焦点距離 $f=10.4(\text{mm})$ 、3 線/インチのレンチキュラレンズ板 (レンズピッチは 7.58mm) のレンズ形状を複製して作製した。作製したシリンダリカルレンズはポリエステル樹脂製で、レンズを 5mm 間隔で配置できるように、型に流し込む液量を調節して、焦点距離 10.4mm 、レンズ幅 5mm のシリンダリカルレンズを複製した。作製したレンズの一部に、樹脂を流し込む際に生じた細かな気泡が存在するが、レンズを通して LED 画素を直視するような用途では、特に影響はなく映像表示に使用することができる。

このシリンダリカルレンズの中心部分を利用して視差光束を生成するため、遮光バリアを 2.5mm の開口とした。このとき、視差混成画像の視差分離を行うためのバリアの開口幅が $P_B = 2.5(\text{mm})$ 、レンズのピッチが $2P_B = 5.0(\text{mm})$ となり、眼間距離 E を 65mm と想定すると、視差混成画像の表示を行う画素間隔は $P_L = 2.6(\text{mm})$ 、奇数・偶数ラインの左右シフト量 $\Delta D = 2P_B = 5.0(\text{mm})^*$ として、各パラメータを設定して立体ディスプレイを設計し、表示実験を行った。映像表示には単色の LED 素子を利用し、発光面前方の近距

離の位置に各 LED に対応させてピンホールをアレイ状に配置して、映像表示に使用する点光源アレイを形成した。また、遮光バリアおよびレンズの設置位置 Z_B はレンズ焦点距離 f に等しい 10.4mm であるため、観察距離 Z_E は 270.4mm である。この設計観察距離 Z_E では、各視差映像の光束は 1 点に収斂し、この単眼観測点位置において、 2.5mm 径の平行光束が $\Delta D = 5.0(\text{mm})$ の間隔で瞳に 2 光束入射する。このため、単眼での観察により 2 視差の映像を瞳上で分離して観察できる。

図 14 は、左眼用映像 2 点、右眼用映像 2 点の観察位置で観察される映像をカメラ撮影したものである。レンズ光学系を用いて平行光 (ビーム径が均一な光線) の視差光束が生成されているため、表示面から設計観察距離だけ離れた平面上に光束が収束する。これら収束点 (観察位置) において縦横 1 画素おきの画素のみ観察できるように適切に視差分離が行われており、4 つの図形パターンを含んだ混成画像が分離され、各観察位置において 1 つの図形パターンのみが観察できている。

5. む す び

4 眼式多眼立体ディスプレイの構築方法、また、4 眼視では観察位置がかなり限定されることになるが、実験的な試みとして超多眼式の立体表示について述べた。パララックスバリア方式やレンチキュラ方式の立体映像表示の多眼化を行う場合に、偏光を利用することで、視差混成画像の画素分割を奇数・偶数ラインに振り分けることにより、多視点化に伴う水平方向への解像度劣化を改善することができ、また、この 4 眼式立体ディスプレイにおいて、点光源とレンズ光学系を用いて映像表示を行うことで、ビーム径が均一な平行光からなる視差光束が生成できるため、超多眼式の立体ディスプレイへの適用も可能であることが確認できた。本論文では、映像表示に LED を使用することを想定して、加工作業の容易なピッチ幅の大きなシリンダリカルレンズや偏光スリットを用いて実験を行った。偏光スリットについては、インクジェット印刷技術により工業的に作製することも可能であるため、ピッチ幅の狭いレンチキュラレンズ板とを組合せた立体ディスプレイを構築することもできる。今後は、光学実験台上で検証した結果を基にして、大画面立体ディスプレイの構築を行い、立体映像を用いたワークスペースシステムへの適用、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の重畳表示や連携操作の実現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。

* 図 10 に図示した状態。関係式 $\Delta D = 2(2k + 1)P_B$ において $k = 0$ 、すなわち $\Delta D = 2P_B$ を採用して設計した。

〔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：“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）
- 5) 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立体ディスプレイの一方式”，映情学誌，**58**，**11**，pp.1669 - 1671（2004）
- 6) 阪本邦夫，木村理恵子：“単眼カメラ画像を用いた指差しポインタの構成”，映情学誌，**58**，**5**，pp.721 - 723（2004）
- 7) 梶木，吉川，本田：“集束化光源列（FLA）による超多眼式立体ディスプレイ”，3次元画像コンファレンス'96 講演論文集，pp. 108-113（1996）

