

単眼ステレオ立体視方式 3次元情報ディスプレイ

高木 美和, 阪本 邦夫

島根大学総合理工学部 数理・情報システム学科

Monocular Multi-view Stereoscopic 3-D Information Display

Miwa TAKAKI and Kunio SAKAMOTO

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

Abstract

A stereoscopic 3-D display system is useful for constructing a virtual space. We have developed a 3-D display using the parallax polarizer barrier. In this paper, we describe the result of a depth estimation using the multi-focus retinal images to design a monocular multi-view stereoscopic display. And the newly-developed 3-D information display using the trial monocular stereoscopic display is shown.

1. ま え が き

近年、バーチャルリアリティ（仮想現実感）の研究が盛んに行われるようになり、医療、教育、CAD/CAMなど様々な分野でバーチャルリアリティの技術が実際に用いられるようになってきた。これら各分野への応用を視野にいれて、現在も様々な3次元画像技術の研究開発が行われている。3次元の画像を表示する装置は、大きく分けると特殊なメガネを必要とする表示装置と、必要としない表示装置の2種類のもが提案されているが、それぞれについて様々な表示方式の研究が続けられている。一般にメガネを必要とするディスプレイは、没入感や臨場感を伴った立体像の表示に適しており、また容易に大画面表示を行うことができ、観察者は没入感や臨場感を伴った立体像を観察することができるため、現在、様々なバーチャルリアリティのシステムで採用されている。

メガネ型の立体表示装置は、両眼視差を利用した2眼立体視が一般的であり、様々な方式が提案されている¹⁾⁻⁴⁾。従来は、プロジェクタとスクリーンを組み合わせることで大画面表示を行い、観察者は液晶シャッタなどを備えた特殊なメガネを着用することにより、立体視を行うものが一般的であったが、近年では表示デバイスやレンズ光学系などの小型、軽量化により、表示系をメガネ部分に組み込んだ立体ヘッドマウントディスプレイ（HMD）装置の開発や応用研究が主流になってきている。

筆者らは立体映像を用いた3Dワークスペースシステム⁵⁾⁻⁹⁾の構築を目指し研究を行っているが、遠隔操作シ

ステムにおいて3次元画像による情報表示を行う場合、メガネなし立体テレビモニタを用いる方法や立体HMD装置を用いる方法などが考えられる。しかし、メガネ式の立体表示装置では、メガネの着用が煩わしく、また偏光特性を有したメガネを着用した場合には、液晶モニタ画面の映像を見ることができないなど、実空間に存在する制御用端末の操作性を損なう恐れがある。また、従来の立体テレビモニタ装置を用いる場合でも、両眼視差のみを利用した立体表示法を採用しているため、長時間の使用において疲労感が伴うという問題があった。そこで筆者らは、コンピュータなどの制御用端末に表示される情報に加えて、3次元画像による制御情報の提供を行うために、両眼立体視において単眼での焦点調節を誘導することにより、長時間の使用においても疲労感を伴わない立体表示が可能な単眼視差表示を利用した立体表示法を採用し、この方式によるHMD型の立体情報ディスプレイを実現するため、単眼ステレオ立体視¹⁰⁾による立体表示装置の試作を行った。

本稿では、距離計測シミュレーションにより、設計パラメータ（単眼視差数、単眼視差間隔など）を変化させた場合の単眼での奥行き知覚への影響について検討し、単眼視差表示の有効性について確認し、単眼ステレオ立体表示を立体テレビモニタで実現する方法について報告する。試作した立体映像表示システムは、偏光パララックスバリア⁷⁾⁸⁾を採用することにより、多眼表示を実現するとともに、観察視点位置を自由に設計できるという特徴をもち、2眼立体視が基本である従来のパララック

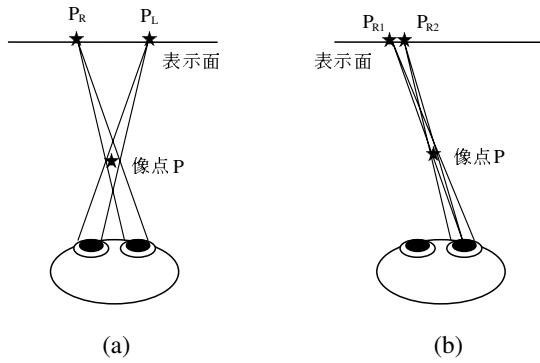


図 1 ステレオグラムによる立体視の原理

スバリアを用いた立体表示方式に比べ、視差画像の表示に利用する画素配置が縦横方向で均一である、視点間隔を単眼ステレオ視を実現できるように調整可能であるなど優れた特性を備えている。

2. 単眼ステレオ立体視による立体情報表示

2.1 単眼ステレオ方式による立体像表示

図 1 は、ステレオグラムを利用した立体像表示の原理を示したものである。図 1(a) は両眼視差を利用した通常のステレオグラム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 を表示面に表示することにより、観察者は空間上に像点 P があるように知覚することができる。一方、単眼ステレオ方式では図 1(b) に示すように空間上に像点 P を表示するため、単眼で複数の視差像 P_{R1} , P_{R2} を観察する。この場合、観察者は複数の視差像が重なあわさっ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、網膜上に投影される像は最も自然な状態となり、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うことができる¹¹⁾。

単眼ステレオ表示は、従来の両眼視差表示と組み合わせることで立体表示をより完全なものに近づける技術として提案されており、両眼立体視におけるヒトの瞳による調節誘導効果については、眼球調節機能測定装置を使用した測定により確認が行われている¹²⁾。また、単眼ステレオ表示による調節誘導効果については、カメラを用いたシミュレーションにより、その可能性が確認されており¹³⁾、単眼のみの場合でもある程度の奥行きを知覚できると考えられる。

2.2 単眼視差画像による奥行き表示

単眼ステレオ表示により再現される 3 次元空間の精度は、視差画像の撮影間隔、視差画像の画像数のほか、個々の視差画像の解像度にも影響する。2 視差の視差画像により立体像の表示を行う場合、実際の物体位置の奥行き情報は図 2 に示すように階段状に奥行きが表示位置が変化し、例えば 0.5mm 間隔で表示を行う場合、560mm か

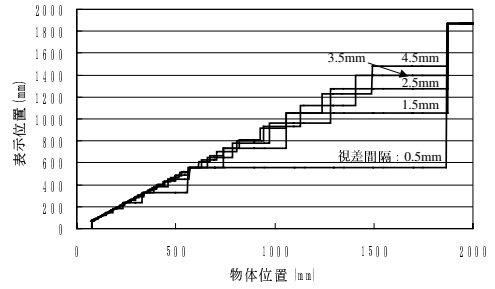


図 2 視差画像による奥行き表示

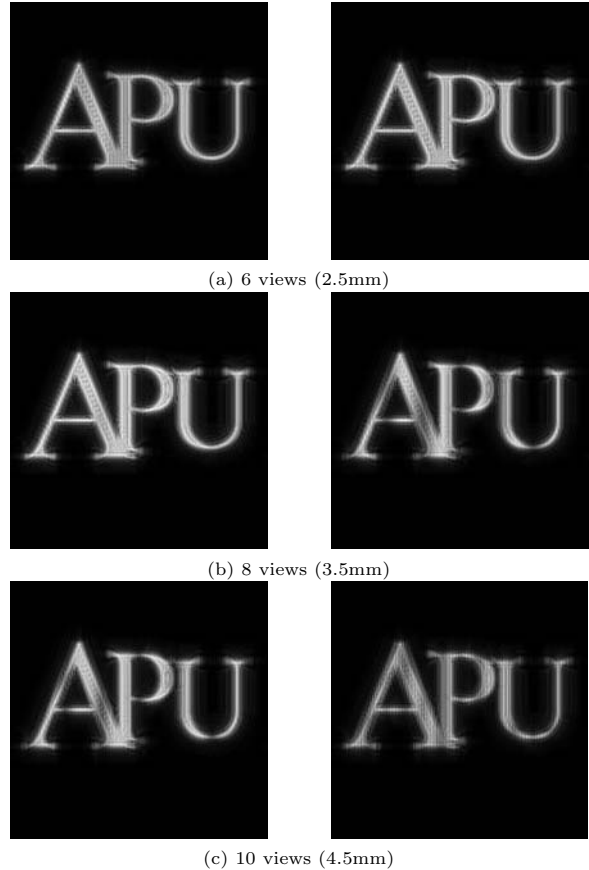


図 3 計算機シミュレーションによる網膜像

ら 1800mm までに存在する物体はすべて奥行き 560mm に存在する物体として取り扱われるため、奥行き表示を精度良く行うには、視差間隔を広げて奥行き表示に使用できる画素数を増やす必要がある。しかし、視差画像が単なる二重像として知覚されることなく単眼による奥行き知覚が可能となるのは、単眼視差間隔が 1mm 以下となる場合であるため、奥行き表示に使用できる画素数を増やすためには、表示視差数も増やす必要がある。そこで、多視差の場合の単眼立体視について検討を行うため、網膜像を計算機シミュレーションにより生成した。

図 3 は、単眼視差間隔 0.5mm で 6 視差、8 視差、10 視差の視差画像の表示を行った場合、すなわち立体像の観察可能な範囲（水平方向）が 2.5mm、3.5mm、4.5mm の場合のそれぞれについて、左列は焦点調節を 'A' 付近

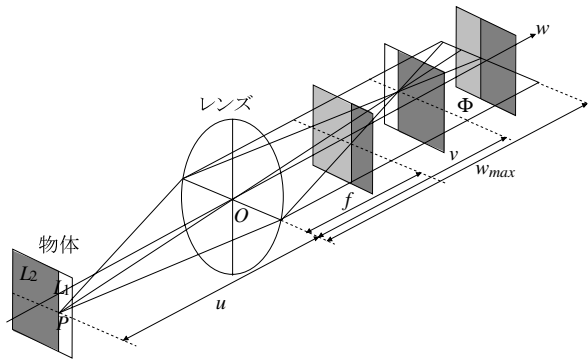


図 4 多重フォーカス画像空間

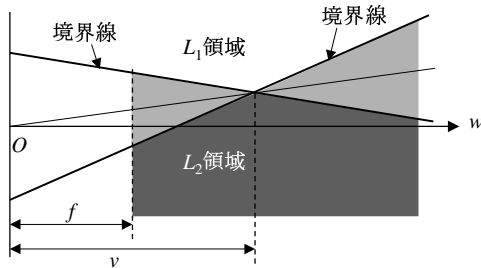


図 5 多重フォーカス画像空間上の直線エッジ部分の明度分布

(210mm の近方) に、右列は ‘U’ 付近 (280mm の遠方) に合わせた場合の網膜像を光学シミュレーションにより生成した結果である。図 3 の結果からわかるように、約 5mm の視差間隔で瞳に入射するような視差画像が存在する場合でも、二重像として知覚されることがない。このことは、視差間隔が 1mm を超える範囲で複数の視差画像が観察される場合でも、表示する立体像のそれぞれの単眼視差間隔 (サンプリング間隔) が 1mm 以下であれば、正しく立体像の知覚が行えることを示しており、多視差化を行うことにより奥行き表示を精度良く行うことができる可能性を示している。

以上のように単眼立体視では奥行き検出の感度は両眼視の場合に比べ悪くなるが、500mm 程度までの至近距離での奥行き表示は充分可能であると考えられる。しかし、現時点で使用できる液晶パネルの画素数や表示可能な単眼視差数に制限があるため、単眼 2 視差程度の表示を行う単眼ステレオ立体表示装置を左眼、右眼にそれぞれ用いて、両眼立体視において単眼立体視による焦点調節の誘導効果を利用する方が、遠方までの立体表示が可能となるため、より効果的な立体情報表示を行う立体ディスプレイの構築を行うことができる。

3. 焦点調節による距離推定シミュレーション

3.1 フォーカスを利用した距離推定

フォーカスは、従来から単一カメラで任意の物体までの距離情報を得るために利用されている。一般にレンズの焦点距離を f 、レンズから物体までの距離を u とした

とき、レンズの公式

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$

が成立するようにレンズから観察面までの距離 v を調節すると、図 4 に示すように物体の合焦画像が得られる。これはフォーカス調節に伴って変化する画像中のぼけの度合を連続的に評価することによって合焦となるフォーカス位置を決定し、レンズから物体までの距離を求めるもので Depth from Focus と呼ばれており、この原理はオートフォーカスカメラとして既に実用化されている。このフォーカスを利用して、単眼ステレオ立体ディスプレイにより表示される仮想物体までの距離の推定を行うために、3次元空間上に配置された直線エッジに対する多重フォーカス画像から距離推定を行うアルゴリズム¹⁴⁾を使用した。これについては次節で述べる。

3.2 多重フォーカス画像空間と距離推定

フォーカス調節を図 4 におけるレンズと観察面間の距離 w を変化させることにより行うと、この w が結像位置 v に一致するとき、合焦画像が得られる。フォーカスを順次変化させた場合の観察面の画像を、対応する観察面の位置に並べることにより、図 4 に示すような 3次元画像空間 (多重フォーカス画像空間) を構成することができる。距離推定シミュレーションでは、図 4 に示すようなレンズの光軸に垂直な平面物体上の明度 L_1, L_2 ($L_1 > L_2$) が一様な領域の境界に存在する直線エッジを利用する。エッジ上の 1 点 P とレンズの中心 O を結ぶ直線は、多重フォーカス画像空間内で点 P のぼけ像の中心点を結ぶ直線になっており、この直線を含む平面のうち、観察画像面との交線が直線エッジと直交する平面 Φ を考えると、この断面画像の明度分布は図 5 に示すような画像となる。図 5 の画像には明度 L_1, L_2 の領域以外に、明度 L が $L_2 < L < L_1$ となる点 P のぼけ像を示す領域が存在するが、図 5 に示した明度 L_1, L_2 の領域の境界を示す 2 直線を検出し、この 2 直線の交点を求めることにより合焦フォーカス位置の検出を行うことができるため、レンズから直線エッジまでの距離を求めることができる。

3.3 距離推定シミュレーション

3次元空間上に配置された直線エッジに対する多重フォーカス画像から距離推定を行うアルゴリズムを使用して、単眼ステレオ立体ディスプレイにより表示される仮想物体までの距離の推定を行った。この距離推定シミュレーションでは、直線エッジを仮想物体として表示した場合のフォーカス調節に伴って変化する網膜像を、水晶体として焦点距離 f のレンズ、網膜の映像投影面としての観察面から構成される眼球のモデルを用いて、光学シミュレーションにより生成し、これらの網膜画像を多重フォーカス画像として距離の推定を行った。表 1 は 300mm、600mm、1200mm、1800mm の位置に直線エッ

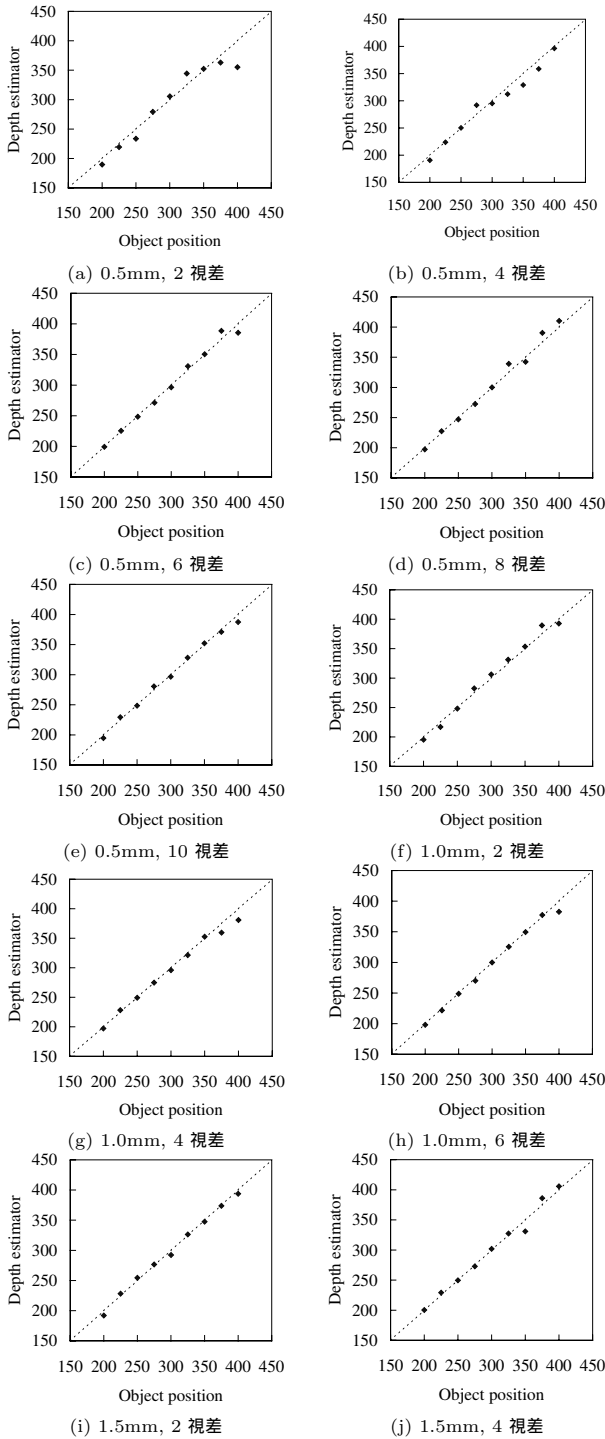


図 6 単眼視差間隔, 視差数の違いによる距離知覚特性

ジを表示した場合について, 単眼ステレオ立体ディスプレイの単眼視差間隔, 視差数別に, 直線エッジ上の 38 点に対して距離推定シミュレーションを行って得られた推定距離の平均値 \bar{u} および標準偏差 σ を求めた結果である. また, 図 6 は 300mm 前後 (200mm から 400mm まで) の範囲に表示された直線エッジに対して距離の推定を行った結果を図示したものである.

以上の結果から, 単眼 2 視差のステレオ立体像表示で

も, 近方にある物体は近くに, 遠方にある物体は遠くにあるように, 大まかな奥行きについては充分知覚することができるが, 単眼視差間隔をより細かく, そして表示視差数をより多くしたほうが, 焦点調節による奥行き知覚が正確かつ滑らかに行えることが確認できた. また, 遠方に表示された物体に比べ近方に表示された物体に対する距離推定結果の方が, 正確かつ安定して行われていることも確認できた. これは図 2 に示したように, 単眼視差画像を用いて表示できる物体の位置は, 近方の物体ほど正確に表示でき, 遠方になるにしたがって実際の物体位置と表示位置のずれが大きくなるという, 単眼ステレオ表示による立体像の表示特性と一致した結果となっている.

4. パララックスバリアを用いた単眼ステレオ視立体情報ディスプレイ

4.1 パララックスバリア方式の原理

図 7 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 7 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上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, 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開口ピッチ P_B と設置位置 Z_B は幾何学的に決定され, それぞれ $P_B = 2P_L E / (E + P_L)$, $Z_B = P_L Z_E / (E + P_L)$ と求められる. また, パララックスバリアの開口比は 2 眼式立体表示の場合には $1/2$ とするのが最適とされている¹⁵⁾. このような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 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, 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化に伴う観察視点位置の間隔は, 等間隔であるのが一般的である.

そこで, 画素分割を液晶パネルの奇数・偶数ラインに振り分けて, 解像度劣化を防ぐとともに, 奇数・偶数ラインごとに観察視点位置が異なるようパララックスバリアの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 7 において, 奇数・偶数ラインでの視点位置のずれ ΔD を, $\Delta D = kP_L$ (k は任意定数) として, 水平 2 画素分の幅の定数倍のずれを与

表 1 距離推定シミュレーション結果

単眼視差間隔	視差数	300 mm		600 mm		1200mm		1800mm	
		\bar{u} (mm)	σ (mm)	\bar{u} (mm)	σ (mm)	\bar{u} (mm)	σ (mm)	\bar{u} (mm)	σ (mm)
0.5mm	2	305.56	0.730	587.13	8.401	1146.65	30.332	2026.76	130.591
	4	295.26	8.792	597.89	10.494	1066.80	11.477	1581.24	314.674
	6	296.40	1.827	591.39	8.452	1554.48	31.742	1612.82	208.835
	8	300.16	1.569	569.52	5.655	1272.86	49.085	1509.39	85.168
	10	296.65	1.931	597.04	5.494	1186.03	20.261	1668.74	97.546
1.0mm	2	306.13	0.586	636.26	4.626	1298.51	6.671	1694.74	6.952
	4	295.97	4.480	639.69	3.575	1075.65	19.635	1955.98	122.376
	6	300.00	0.526	596.52	2.487	1092.33	36.533	1620.19	161.434
1.5mm	2	292.33	7.300	563.17	6.347	1030.03	49.641	1587.80	154.745
	4	301.81	0.341	562.57	3.493	1061.45	25.654	1625.58	48.374

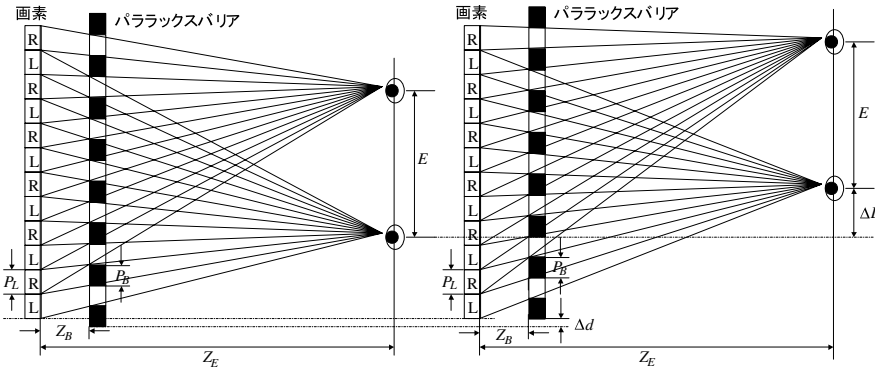


図 7 パララックスバリア方式多視点立体ディスプレイ

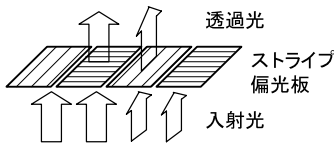


図 8 偏光板を用いた遮光バリア

えるように設計する．このとき，パララックスバリアのシフト幅 δd は， $\delta d = \Delta D \bmod P_L$ （ただし， \bmod は剰余演算）となる．2眼式の場合には E の値は 65mm とするのが一般的であるが，多眼式の場合には E ， ΔD を任意の値で設計できるため，観察視点位置の間隔を等間隔，あるいは左右眼の周辺位置など任意に設計することができる．このように図 7 に示す例では，液晶パネルの 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ているため，4 眼式の立体表示装置となる．なお，図 7 では，バリアの遮光部分にブラックマスクを用いているが，液晶ディスプレイの映像が偏光特性を有しているため，偏光パララックスバリアを用いて視差分離を行うことが可能である．

4.2 偏光パララックスバリアの構成

図 8 に示すように，偏光フィルタは偏光方向により光の透過，不透過の選択性があるため，偏光特性を有する液晶ディスプレイの映像に対してパララックスバリアとして利用できる．したがって偏光方向の異なる偏光フィルタを図 9 のように市松格子状に配することにより偏光を利用したパララックスバリアを構成できる．しかし，

液晶ディスプレイの映像は偏光特性を有しているが，ガラス基板上の様な偏光フィルタを通過しているため，すべての画素は同一方向の偏光となっている．そこで，奇数あるいは偶数ラインのいずれかに $1/2$ 波長板を配することにより，図 9 に示すように液晶ディスプレイの画素の偏光方向が，奇数および偶数ラインで直交するようにして，偏光を利用することにより画素分割を液晶パネルの奇数・偶数ラインに振り分け可能な構造にした．また市松格子状に配した微小偏光フィルタの高さは，液晶ディスプレイパネルの画素の高さと同一とするように設計する．このためパララックスバリア設置間隔 Z_B が十分に小さい場合には，図 7 の例のようにバリアの遮光部分にブラックマスクを用いた場合でも，観察者の眼の高さにより観察すべき画素が遮光されるということは生じないが，観察距離 Z_E を長くするために Z_B を大きくする必要がある場合には，遮光部分に偏光フィルタを利用することにより，ブラックマスクでは遮光される画素も，その大部分を観察することができるため，観察距離などに制約を受けることなく自由に設計することができる．なお図 9 のブラックマスクの領域は，奇数・偶数の両ラインの画素に対し遮光すべき領域である．

4.3 バックライトの構成

従来のパララックスバリア方式のディスプレイにおいては，映像表示に用いる光源として液晶ディスプレイのバックライトを使用している．このバックライトは拡散光を発する平面状光源であるため，図 10 に示すように

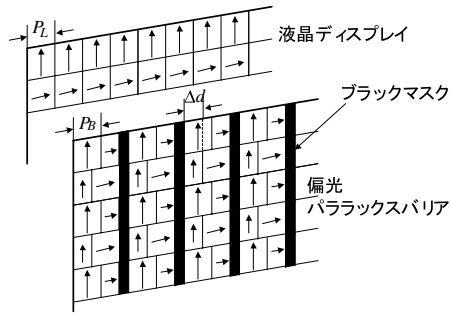


図 9 偏光パララックスバリアの構造

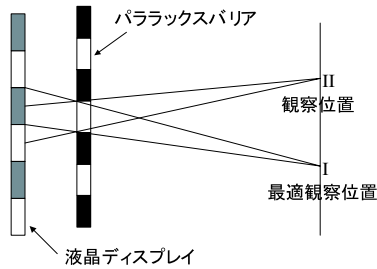


図 10 パララックスバリアの観察位置条件

パララックスバリアにより視差分離された映像を観察する最適観察位置 I として設定した位置以外では、例えば観察位置 II のように、本来観察されるべき画素の一部が欠け、その欠けた画素と同面積の観察されるべきでない画素が観察されることになる。このため、右眼、左眼双方の画素の一部をとともに観察することになり、この位置では、視差分離が適切に行われていないクロストーク領域となる。2 眼式のパララックスバリアディスプレイでは眼間距離を 65mm として設計しており、視差分離が適切に行われる領域が存在するが、多眼化において観察視点位置を左右眼の周辺位置に配置するため、 ΔD を小さな値を設定にした場合には、視差分離されるべき観察視点位置がともにクロストーク領域内に入ってしまう。そこで、図 11 のようなレンズ光学系を用いて、パララックスバリア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光源を平面状拡散光バックライトの代わりに用いることにより、右眼で左眼映像、左眼で右眼映像が観察される逆視領域が存在せず、 ΔD の値に関わらずクロストーク領域の生じない多眼立体ディスプレイを構築することができる。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 11 に示すレンズ光学系のレンズ部分にレンチキュラレンズスクリーンを追加配置することにより、垂直方向のみ拡散作用を持たせることができ、垂直方向の視域を広げることが可能である。

4.4 4 眼立体映像表示

図 12 は、 $E=105.6(\text{mm})$ 、 $\Delta D=36.3(\text{mm})$ の不規則な観察位置となるように設計した偏光パララックスバリアを用いた場合に観察された映像である。また、混成視差

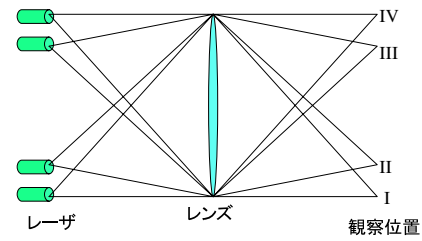


図 11 バックライトのレンズ光学系

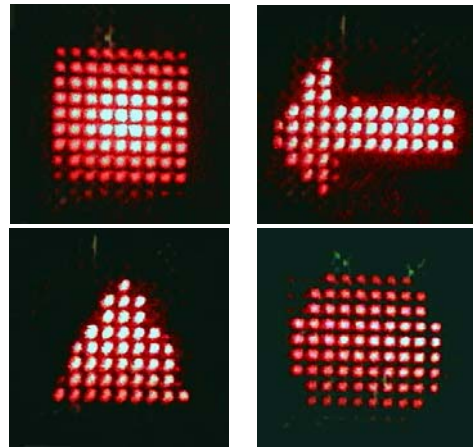


図 12 観察画像

画像の表示を行う画素の大きさは縦横とも 3.3mm、その映像の視差分離を行うためのバリアの開口幅は 3.2mm とした。各観察位置が互いにクロストーク領域に入らないように、前節で述べたレンズ光学系を用いたバックライトを使用しているため、適切に視差分離が行われていることが確認できる。

5. むすび

単眼視差表示の有効性を確認するため、立体表示装置の設計パラメータ（単眼視差数、単眼視差間隔など）の違いによる単眼での奥行き知覚への影響について、距離推定シミュレーションにより検討を行った結果について述べた。このシミュレーションにより、単眼 2 視差のステレオ立体像表示でも、近方にある物体は近くに、遠方にある物体は遠くにあるように、大まかな奥行きについては充分知覚可能であることが確認できた。また、単眼視差間隔をより細かく、そして表示視差数をより多くしたほうが、焦点調節による奥行き知覚が正確かつ滑らかに行える可能性があることも明らかとなった。

また、偏光パララックスバリアを用いた多視点立体ディスプレイの構築方法について述べた。視差混成画像の画素分割を液晶パネルの奇数・偶数ラインに振り分けることにより、多視点化に伴う解像度劣化を防ぐとともに、観察視点位置の間隔を任意に設計することが可能で、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光源をバックライトとして用いることにより、

適切に視差分離が行われることを確認した。提案方式では観察視点位置の間隔を任意に設定可能であるため、これら観察位置を瞳孔径の範囲内に配置することにより、超多眼式の立体ディスプレイとして利用することも可能であると考えている。

3D ワークスペースシステムなどにおいて、単眼視差立体像表示装置を両眼に用いた立体情報ディスプレイを使用することにより、両眼立体視において単眼立体視による焦点調節の誘導効果が得られるため、長時間の使用においても疲労感を伴わない立体画像による制御情報の提示を行うことができる。

今後は提案ディスプレイの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。

【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) 辻内順平編著：“ホログラフィックディスプレイ”，産業図書（1990）
- 4) 志水英二，岸本俊一：“ここまで来た立体映像技術”，工業調査会（2000）
- 5) 阪本邦夫，高木美和：“立体映像へのインタラクションのための3次元位置計測の一手法”，映情学誌，57，9，pp.1152 - 1154（2003）
- 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) 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）
- 8) 阪本邦夫，高木美和：“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”，映情学誌，58，11，印刷中（2004）
- 10) 阪本邦夫，猿田和樹，武田和時：“単眼ステレオ立体視ディスプレイの試作”，映情学誌，54，3，pp. 388-393（2000）
- 11) 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）
- 12) T. Sudo, H. Morishita, T. Osaka, N. Taniguchi：“3D display using intersection of light beams”，SPIE Proc., 3957，pp. 215-224（2000）
- 13) T. Kajiki, H. Yoshikawa, T. Honda：“Ocular Accommodation by Super Multi-View Stereogram and 45-View Stereoscopic Display”，Proc. of The Third International Display Workshops Vol. 2，pp. 489-492（1996）
- 14) 浅田，藤原，松山：“多重フォーカス画像を用いたエッジ検出と距離計測”，信学論，J77-D-II，6，pp. 1048-1058（1994）
- 15) H. Yamamoto, S. Muguruma, T. Sato, K. Ono, Y. Hayasaki, Y. Nagai, Y. Shimizu and N. Nishida：“Optimum Parameters and Viewing Areas of Stereoscopic Full-Color LED Display Using Parallax Barrier”，IEICE Trans.Electron.，Vol.E83-C，No.10，pp.1632-1639（2000）