DFD (Depth-fused 3-D) 表示の奥行き知覚に与えるぼけの効果

Effect on Depth Perception by a Blur in a Depth-fused 3-D Display

学生会員 栗林英範^{†1}, 正会員 石樽康雄^{†3}, 陶山史朗^{†3},
正会員 高田英明^{†3}, 正会員 伊達宗和^{†3}, 石川和夫^{†2}, 正会員 畑田豊彦^{†2}
Hidenori Kuribayashi[†], Yasuo Ishigure^{†3}, Shiro Suyama^{†3},
Hideaki Takada^{†3}, Munekazu Date^{†3}, Kazuo Ishikawa^{†2} and Toyohiko Hatada^{†2}

Abstract When a blur in images was changed, we found a new depth effect in a DFD (depth-fused 3-D) display that consisted of two overlapping 2-D screens. In ordinary DFD displays, two images displayed on front and rear screens are identical, but their luminances are different. Observers can perceive an apparent 3-D depth depending on the luminance ratio between the front and rear images. The purpose of our study is to examine the depth perception cues of a DFD display when two identical images are made slightly different by changing a blur. We found that the depth was controlled by only changing the luminance distribution around the edges of an image without any change in the luminance ratio. We proposed a perception model for depth changed by a blur in this paper. The perceived depth was qualitatively evaluated using a predetermined value. We suggest that the binocular disparity between the effective edges defines the perceived depth.

キーワード：奥行き知覚, エッジ, ぼけ, 両眼視差, Depth-fused 3D

1. ま え が き

高臨場感を得るための表示システムの一つとして、立体表示方式の研究開発が行われている。この立体表示技術は、教育やアミューズメント分野だけでなく、医療分野においても、CT並びにfMRI画像の立体表示や、実体顕微鏡を用いた手術などで用いられている。立体ディスプレイの多くは、両眼視差を利用した2眼式/多眼式立体表示方式¹⁾が用いられているが、書割・箱庭効果のような立体歪み²⁾³⁾や、両眼輻輳と目のピント調節の不一致による視覚疲労⁴⁾など、実空間では起こらなかった問題が生じてしまう。これらの問題を解決するために、波面再生によるホログラフィ方式、瞳孔内に複数の光線を入れて幾何光学的に3次元空間を再生する超多眼方式⁵⁾⁶⁾、表示位置を光学的に補正する方式⁷⁾な

どが検討されているが、表示データ量が膨大で、装置構成が複雑になることから、実用化されるまでには至っていない。

以上の表示方式とは別に、DFD (Depth-fused 3-D) と呼ばれる立体表示方式が提案されている⁸⁾。この方式は、提示距離が前後に異なる二つのディスプレイに、同一形状の像を重ねて観察した時、この前後画像の輝度比を変化させることで、見かけの奥行き距離を前後画面間で変化させることができる。だが、この方式の問題点としては、奥行き再現範囲と観察位置が限定される点にあるが、表示データや装置構成が簡便にできるという利点もある。

この方式における奥行き知覚要因として、Suyamaら⁹⁾は、前後画像を重ねた時に発生する、微少なズレによる2重のエッジを、一つの仮想エッジとして知覚し、そのエッジが左右眼で位置がずれるため、両眼網膜像差として知覚するためであると報告している。さらに、仮想エッジの位置は前後画像の輝度比により変化させることができるとも報告している。田村¹⁰⁾は、単眼視条件では、この方式による奥行き感が知覚できないことから、奥行き知覚要因が、両眼視による立体知覚の一種であることを示した。さらに、両眼視条件で周辺の輝度を変化させて、仮想エッジモデルについても検討している。しかし、前後面の輝度を変化させた条件のみで行っており、前後面が同一の輝度で、エッジ領域の輝度分布のみを変化させた時の検討については、充分行われていない。

2005年4月26日受付, 2005年10月26日最終受付, 2005年12月4日採録

^{†1} 東京工芸大学大学院 工学研究科 メディア工学専攻

(〒243-0297 厚木市飯山1583, TEL 046-242-9506)

^{†2} 東京工芸大学 工学部 メディア画像学科

(〒243-0213 厚木市飯山1583, TEL 046-242-9506)

^{†3} NTT サイバースペース研究所

(〒180-8585 武蔵野市緑町3-9-11, TEL 0422-59-3416)

^{†1} Department of Media Engineering, Tokyo Polytechnic University

(583 Iiyama, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0297, Japan)

^{†2} Department of Media and Image Technology, Tokyo Polytechnic University

(1583 Iiyama, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0213, Japan)

^{†3} NTT Cyber Space Laboratories

(3-9-11, Midori-Cho, Musashino-Shi, Tokyo 180-8585, Japan)

本研究では、DFD表示方式で前後面に表示する像の中心部の輝度を一定にした状態で、エッジの輝度分布のみを変化させた時の知覚される奥行き距離について測定した。その結果から、仮想エッジ推定モデルの妥当性に関して検討した。

2. DFD表示方式

基本的なDFD表示方式の概念図を図1に示す。この図は、ハーフミラーによって、表示距離の異なる前後面の像を同

図1 DFD表示方式の概要

奥行き距離が異なる2面の像を重ねて観察した時、(a)のNo.1~4のように前・後面の輝度比〔前面または後面輝度/(前面+後面輝度)〕を変化させると、(b)に示すように前後面間で見かけの奥行き位置が変化した像として知覚される。

Schematic illustration of DFD display.

(a) The fundamental configuration of the front and rear planes and an example of two 2D images (Nos. 1-4). Dotted lines indicate that the alignment and magnification of the two 2D images were arranged to completely overlap at the center of the observer's eyes. Luminance ratios below the 2D images are contrast images and the background. (b) Apparent 3D images when front and rear images were overlapped. The observer views one image (Nos. 1-4) at different depths.

時に重ねて観察できるような機構になっている。観察者の位置からの視角が同じ大きさになる像を、重なるように前後面に表示する。観察者は、DFDの効果によって、奥行きのある一つの像として知覚する。このとき、図1(a)に示すような輝度比〔前面像または後面像輝度/(前面像+後面像輝度)〕に変化させた像を前後面に提示すると、観察者は、この2面の間で奥行き距離が異なる像として知覚できる(図1(b))。例えば、図1(a)のNo.2のように、前面像の輝度比を高く、後面像の輝度比を低くすると、前面に近い奥行き距離として知覚され、逆にNo.3のような輝度比にすると後面に近い奥行き距離として知覚される。

このような奥行き知覚に関して、Suyama⁹⁾は以下のようなモデルを報告している。

図2(a)の破線のように、両眼の中心から見て完全に重なる条件であっても、観察者の左右眼位置の違いから、前後面像は左右眼で微小に重なる位置(図2(a)の実線と1点鎖

図2 DFD表示方式の奥行き知覚モデル⁹⁾

(a) のような配置の前後面像を観察すると、左右眼の視点位置が異なるため、網膜上では(b)のように微小に異なる非対称な像となる。(c)は左右眼像に投影された輝度分布の例で、破線は提示画像の輝度分布、実線は知覚される輝度分布、矢印の位置は仮想的なエッジ位置を表している。左右眼像での仮想的なエッジ位置が異なるため、両眼網膜像として奥行きを知覚する。

Model of depth perception by DFD⁹⁾.

(a) The arrangement of front and rear plane. (b) Stimuli of Left-eye's Images. Left- and right-eye's retinal images are presented image that luminance distribution is different. (c) Luminance distribution of Left-eye's Images. Broken lines of luminance distribution are retinal image distribution. Solid lines are perceived distribution. Arrows are perceived edge positions. Since the perceived edge position is different, observers perceive depth as binocular disparity.

線)がずれて見え、網膜上には、図2 (b) のようなエッジ部分に輝度分布が段差となる像 (2重エッジ) が投影される。その網膜像の輝度分布を図2 (c) に示す。人の視覚系では、このような微小の2重エッジの対応付けが困難になると考えられる。これらのエッジを一つのエッジとして感じるために、2重エッジを持った像にローパスフィルタ処理を行い、図2 (c) の実線のような輝度分布に変換する。この輝度分布の最大勾配の位置 (図中の矢印位置) を、観察者は仮想的なエッジとして知覚する。この仮想エッジの位置が左右眼で異なっており、このズレ量を両眼網膜像差として、奥行きを知覚する。

3. 実 験

以上のように、前後面の像が重なったエッジ状態によって、奥行き距離が決定されるのであれば、提示された前後面像の輝度比を変えずに、エッジの輝度分布を変化させるだけで、奥行き距離も変化させることができると考えられる。そこで、前後面の提示像にぼけを与えることにより、中心部の輝度は一定のまま、エッジ情報だけを変化させた時に知覚される奥行き距離を測定した。

3.1 実験装置

図3 (a) に実験装置の概要を示す。表示装置として、前後2面のLCDを積層した薄型DFDディスプレイを用いた。このディスプレイは、前後2面に透明なLCDパネルを重ね、前後2面の偏光を変化させることで、薄型化を可能にしている^{11) 12)}。ディスプレイの大きさが4インチと小さいため、被験者とディスプレイの間に大型凸レンズ ($f=520\text{mm}$) を配置し、表示面を2倍に拡大表示して、知覚される観察距離が850mm、前後面の間隔が22mmになるように設定した。この提示位置関係より、網膜像に投影されるエッジ幅 (図2 (b) のw) は3arc minとなる (画面の解像度は1ピクセルが1arc min (視角分) になる)。凸レンズによる収差などの影響は、拡大前後に格子パターンを提示し、像の再現性で確認したところ、歪みなく再現されており、影響が見られなかったため、この観察条件で実験を行った。被験者は、前後面の像が両眼の中心から一つに重なる位置に、顎台で固定された状態で実験した。周囲の環境は照度0.02lxの暗室にし、最大表示輝度は $20\text{cd}/\text{m}^2$ とした。

3.2 提示画像

表示面上には、奥行き距離を調整する調整視標と、エッジを変化させる対象視標の二つの正方形を提示した。提示画像の例を図3 (b) に、左眼像における対象視標の輝度分布例を図4に示す。視標の大きさは1.0deg、両視標の間隔は1.5degにした。2重エッジ情報を変化させるために、前後面の像にぼけを与えた。そのぼけ像は、Gaussian分布の点像強度分布をコンボリューションして作成した。実験変数を表1に示す。ぼけ量の数値は、Gaussian分布の半値幅を示している。ぼけ像の提示は、前後面で同じぼけ量で変化する条件 (Case1) と、前後面のどちらか一方のみのぼけ量

(b) 提示画像配置

図3 実験装置

(a) に実験装置の構成図を示す。凸レンズを用いて拡大観察状態にし、観察距離が $850 \pm 11\text{mm}$ 、提示画面の画角が8arc degとなるように設置した。(b) は提示画像の画面内での配置である。左側に奥行き距離を調整するための像を、右側にエッジ状態を変化させた像を提示した。像の大きさは1deg、二つの像の間隔は1.5degとした。

The experimental apparatus.

(a) The schematic diagram of the experimental apparatus. Viewing distance was $850 \pm 11\text{mm}$. The field was 8 deg. Depth of stimulus was presented to middle position in the front and rear planes. (b) The arrangement of stimuli. The stimulus of left side was image to measure, and the stimulus of right side was image to change an edge pattern. The size of stimulus was 1 deg, and the distance between both stimuli was 1.5 deg.

図4 左眼像における対象視標の輝度分布の例

前面にぼけ像、後面にシャープ像を提示した時の左眼網膜上に投影される輝度分布の例を示す。前・後面像の中心位置が微小に異なるので、網膜上の輝度分布は左右非対称の分布になる。

Example of stimuli.

It is the example of left-eye's luminance distribution when the front plane was presented a blur image and the rear plane was presented a sharp image. Since left- and right-eye's position of the observer was different, retinal image distributions were asymmetry.

表1 実験変数

Case1は前後画像に同じぼけ量を提示した時で、Case2は前後面のどちらか一方のみのぼけ量を変化させた時の条件である。Case2の固定ぼけ量は、0.5,10arc minの3種類で行った。

Experimental condition.

Case 1 was condition that the front and rear planes were presented same blur images, and Case 2 was condition that the front or rear plane was presented a blur image. Fixed blur values of Case 2 were 0, 5, 10 arc min.

	前・後面変化	ぼけ量(arc min)	
		固定	変化
Case1	両面とも変化	-	0~10
Case2	片面のみ変化	0 (シャープ像)	0~10
		5	0~15
		10	0~20

が変化する条件 (Case2) で行った。さらにCase2では、前面を固定ぼけにする条件と、後面を固定ぼけにする条件の両条件とも行った。ぼけの変化量は1arc min間隔で行い、中心部の表示輝度は前後画像を合成して20cd/m²、輝度比は0.5に設定した。

3.3 実験方法

二つの視標が同じ奥行きに見えるように、調整視標の前後画像の輝度比を変化させ、知覚される奥行き距離を一致させるタスクを課した (図3 (a))。DFD条件下では、前後画像の輝度比と見かけの奥行き距離が比例関係になる⁹⁾という報告ある。そこで、輝度比変化による見かけの奥行き距離を確認した結果、比例関係であったので、奥行き知覚の評価尺度として用いた。調整視標の輝度比の初期値は、前後画像の中間距離になるように、0.5 (前後画像同一輝度) に設定した。対象視標としては、前後面のぼけ量が各条件で異なる像を提示した。試行回数は、各条件で10回ずつランダムな順で行った。1試行に要する時間は5~10分程度で、試行毎には休憩を入れて測定した。

被験者は、正常視力 (矯正を含む) で、立体視弁別能力が30arc secまで弁別可能な3名で行った。

3.4 実験結果

3.4.1 前後画像が同じぼけ量で変化した時の奥行き知覚 (Case1)

知覚される奥行きへのぼけ量による影響度を調べるために、ぼけ像を提示した時の見かけ上の奥行き距離について測定した。図5に、前後画像とも同じぼけ像を提示した時の、知覚される奥行き距離のグラフを示す。グラフの縦軸は、調整視標の前面像の輝度比で、0.5が前後面の中間、1が前面、0が後面の奥行き位置を表している。横軸は提示した対象視標のぼけ量で、グラフのシンボルは各被験者の結果を表している。

被験者Y.Mに関しては、ぼけ量が増え、見かけ上の奥行き距離には影響が少なく、ほぼ前後面の中間距離に知覚していた。また、被験者M.M, T.Kに関しては、ぼけ量が増加すると、奥に沈んだ像として知覚する傾向が見ら

図5 ぼけ像による奥行き距離知覚

グラフの縦軸は、調整視標の前面での輝度比で表示した。0.5が前面と後面の中間位置を表しており、0.5より大きいと前面側、小さいと後面側の奥行き位置を表している。横軸は、前後面に提示したぼけ量である。グラフのシンボルは、各被験者を表している。

Depth by blur image.

Luminance ratio of the front plane is plotted along the y-axis. The middle distance of the front plane and rear plane is 0.5. More than 5 arc min is near and less than 0.5 is far away. The front plane position is 1. The rear plane position is 0. Blur value that was perceived the front and rear planes is plotted along the x-axis. Form of symbols represents each observer.

図6 エッジ成分変化による奥行き距離知覚 (固定ぼけ量: シャープ像) グラフの縦軸は、調整視標の前面での輝度比である。横軸はぼけ量で、下にある画像は提示したぼけ像の例を表しており、上段が固定した視標で、下段が変動させたぼけ像である。グラフのシンボルは各被験者で、実線は前面にシャープ像を提示した時で、破線は後面にシャープ像を提示した時の奥行き距離知覚の変動を表している。

Depth by changing edge pattern. (Fixed image: sharp)

Luminance ratio of the front plane is plotted along the y-axis. Blur value that was perceived the front or rear plane is plotted along the x-axis. Images of the x-axis represent presented blur images. Upper parts indicate fixed images, and lower parts indicate a changing blur image. Form of symbols represents each observer. Solid lines are that the front plane was presented a fixed image, and broken lines are that the rear plane was presented a changing blur image.

れた。その中でもM.Mは、対象視標のぼけ量が5arc min以上になると、雲のような不安定な見え方になるとの内省報

(a) 固定ぼけ量: 5arc min

(b) 固定ぼけ量: 10arc min

図7 エッジ成分変化による奥行き距離知覚(固定ぼけ量:ぼけ像)

グラフの軸とシンボルの種類は、図6と同じである。縦太線は前後面に同じぼけ量を提示した状態、横太線は奥行き距離が前後面の中間位置を示している。(a)は固定のぼけ量が5arc minで、(b)は固定のぼけ量が10arc minの場合である。

Depth by changing edge pattern. (Fixed image: blur)

Axis and symbols are same in Figure 6. The vertical thick line indicates that the front and rear planes are presented same blur images, and the horizontal thick line indicates the middle distance of front and rear plane. (a) The fixed blur value is 5 arc min. (b) The fixed blur value is 10 arc min.

告から、このぼけ量以上から奥行き距離の判断が難しくなったと考えられる。したがって、2次元画像における奥行き手掛かりの一つの要因であるぼけによる心理的な奥行き感に影響される被験者と、影響されない被験者が存在したので、この結果を基本特性データとし、以降の実験結果を検討する。

3.4.2 前後画像いずれかのぼけ量が変化した時の奥行き知覚 (Case2)

前後画像の輝度比を変えるのではなく、エッジ成分のみを変化させることで、DFDの表示条件による見かけの奥行き距離を変化させることが可能となるのか、前後面のいずれか一方にぼけ像を、他方にシャープな像を提示した時に知覚される奥行き距離を測定した。図6に、一方の面に提

示したぼけ量と、見かけの奥行き距離との関係を示す。グラフの縦軸は、調整視標の輝度比、横軸はぼけ量(arc min)を表している。グラフのシンボルは各被験者で、実線が前面にシャープ像を、破線が後面にシャープ像を提示した時の結果である。

すべての被験者において、ぼけ量を5arc min近辺まで増加させると、シャープな像を前面に提示した時は前面側に、後面に提示した時は後面側に、奥行き量が増加した。このことにより、前後面の輝度比を変化させなくても、エッジ情報を変化させることにより、DFDによる立体像を再現することが可能であると考えられる。また、ぼけ量を5arc min以上に増加すると、奥行き量は飽和する傾向が見られた。

次に、片面をシャープ像で固定するのではなく、ある程

図8 仮想エッジ推定モデル

(a) 仮想エッジの推定方法を示す。輝度分布のグラフは、提示画像の左側エッジでの分布を示す。左右眼の輝度分布の差分を取ると、二つのピーク強度を持つグラフとなる。大ピーク強度をB、小ピーク強度をS、ピークの間隔をDとする。左眼像については、 D_L をピーク強度比で内分した位置 E_L が仮想エッジとなる。(b)に左眼像におけるぼけ量変化時の仮想エッジ位置の変化を示す。ぼけ量が増加すると、小ピーク強度(S)が減少する。図6の結果より、ぼけ量が5arc min以上で、見かけの奥行きが飽和することから、この辺りで小ピーク強度(S)の影響を受けなくなり、大ピーク強度(B)の位置が仮想エッジとして知覚される。

Detective model of perceived edge.

(a) Detective method of perceived edge. If the distribution of left- and right-eye's retinal image is differentiated, two peaks intensities occur. The large peak is B, the small peak is S, and the width between the large peak and small peak is D. The perceived edge is located a border which is divided D by the ratio of B and S. (b) The figure is the perceived edge position of left-eye when blur value was changed. When the blur value was increased, the small peak was decrease. From the Figure 6, when the blur value was more than 5 arc min, the perceived depth saturated. Therefore, the perceived edge is not influenced of the small peak and is perceived by the position of the large peak.

度のぼけ量で固定した時の、知覚される奥行き距離の測定結果を図7に示す。固定したぼけ量が、図7 (a)は5arc min、図7 (b)は10arc minにした時の測定結果である。グラフは被験者毎になっており、縦軸は調整視標の前面像の輝度比、横軸はぼけ量となっている。グラフ内の太縦線は前後面が同じぼけ像になった時の奥行き距離を表している。

図7より、すべての被験者において、前後面に同じぼけが提示された時を境に、前後面のエッジ成分の差が大きくなるにしたがって、見かけ上の奥行き距離が変化した。奥行きの変化方向は、前後面像が同じぼけ量の奥行き位置に比べ、前面のぼけ量を減少させると前面側へ、増加させると後面側へ移行する傾向であった。したがって、前後面像のエッジ領域の輝度分布を変化させることで、前後の表示面間に立体像を変化して再現することができると考えられる。

4. 考 察

実験結果から、前後面の輝度比を変化させずに、エッジの輝度分布を変化させることで、前後の表示面間で知覚される奥行き位置を変化させることが可能であった。これはSuyamaら⁹⁾のモデルと同様に、前後面像を合成した輝度分布に仮想的なエッジが存在して、そのエッジ部のズレが両眼網膜像差として知覚されているためと考えることもできる。しかしここでは、別なアプローチにより、仮想エッジ位置を推定するモデルについて図8を用いて考察する。

合成した前後面像の網膜像輝度分布を、隣接する輝度値の差分をとって、エッジ部分の輝度変化量を求めた。提示したぼけ量が小さい時は、輝度分布が階段状になるため、極大値を持つ部分が二つ存在する。図8 (a)に輝度分布を差分した時のピーク強度の例を示す。もし、対応点がエッジの最大勾配で検出されるのであれば、シャープ像のエッジ位置で奥行きを知覚し、ぼけ量を変化させて提示しても、見かけの奥行きは変化しない。しかし図6より、前後面のどちらか片面にぼけ像を提示すると、見かけの奥行きが変化していることから、この二つのピーク間に仮想的なエッジが存在し、奥行きを判断していると推定される。仮想的なエッジ位置は、差分をとった時に発生した二つのピーク強度が関係していると考えられる。そこで、このピーク強度の比率で、ピーク間隔を内分した所に、仮想エッジが位置すると仮定した。図8 (a)より、左眼像の仮想エッジ位置は、大ピーク強度を B_L 、小ピーク強度を S_L 、ピーク間隔を D_L とすると、 D_L を PB_L と PS_L に内分した位置が仮想エッジ E_L となる。同様に右眼像の仮想エッジを求めると ER となる。

ぼけ量の違いによる仮想エッジ位置変化の様子を図8 (b)に示す。ぼけ量を2arc minに増加させると、ピーク強度比率(S_L/B_L)が変化し、ピーク強度による D_L の内分比も変化する。よって、仮想エッジ位置が移動する。よって、左右眼のエッジ位置のズレを両眼網膜像差とし、見かけの奥行きを知覚していると考えられる。

さらに図6より、ぼけ量を5arc min以上に増加させると、

(a) 固定ぼけ量=0arc min

(b) 固定ぼけ量=5arc min

(c) 固定ぼけ量=10arc min

図9 モデルによる計算値と測定値との比較

グラフの縦軸は、推定モデルより求めた左右眼の仮想エッジのズレ量である。横軸は変動させたぼけ量である。シンボルは、全被験者の平均をモデルに当てはめて求めた量で(◆: 前面が固定像, ■: 後面が固定像)。太線はモデルによる計算値を示す。

Comparison of calculation and measurement value by the Detective model.

Difference left- and right-eye's perceived edge is along the y-axis. Changing a blur value is along the x-axis. Symbols represent value that applied this model for the average for the three subjects. (◆: the fixed image is presented the front plane, ■: the fixed image is presented the rear plane.) Thick line is the value that is calculated by the detective model.

見かけの奥行き位置が飽和状態になる傾向が見られた。これは、このぼけ量以上からピーク強度比率が小さくなり、小ピーク強度(S_L)の影響を受けにくくなっていると考えられる。したがって、ピーク強度比率が小さくなると、大ピーク強度(B_L)の位置を仮想エッジとして知覚すると推測できる。

このモデルに従い、各実験条件で左右眼像の仮想エッジを求め、そのエッジの差分を両眼網膜像差として計算すると図9のグラフになる。図6、図7より、被験者によって絶対値は異なるが、ぼけ量を変化させた時の、知覚される奥行き距離変化は同じ傾向であった。したがって図9の実測値は、被験者毎の結果 (Case2) の、前後面像のぼけ量が同じときの奥行き量 (Case1) を基準値とした相対値変化を求めて、その値の全被験者平均とした。

図9より、実測値と計算値でズレは見られるが、定性的にはほぼ同じ形状を示す結果となった。値のズレは、ぼけ像による心理的な奥行き感が影響していると考えられる。これらのことにより、仮想エッジ位置を、このモデルで推定することが可能であると考えられる。

5. む す び

本実験結果から、DFDによる立体像の提示条件において、前後面像の輝度比を変化させなくても、エッジ付近の輝度分布だけを変化させることで、見かけの奥行き距離を変化させることが可能であった。したがって、前後面像を合成した輝度分布に仮想的なエッジが存在し、そのエッジのズレを両眼網膜像差として奥行きを知覚すると考えられる。また、仮想エッジ推定モデルを構築し、DFDによる表示条件での立体提示において、前後面像が重なったエッジ情報を変化させた時の奥行き距離を推定することが可能になった。

〔文 献〕

- 1) 畑田豊彦：“疲れない立体ディスプレイを探る”，日経エレクトロニクス，444，pp.205-223 (1988)
- 2) 安達恒夫，宮原誠，大和淳二：“2眼式立体画像における箱庭・書き割り現象の解析”，信学会技報，8，40，pp.33-40 (1985)
- 3) 山之上裕一，奥井誠人，岡野文男，湯山一郎：“2眼式立体画像における箱庭・書き割り効果の幾何学的考察”，映情学誌，56，4，pp.575-582 (2002)
- 4) 矢野澄男，江本正喜，三橋哲雄：“両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因”，映情学誌，57，9，pp.1187-1193 (2003)
- 5) 本田捷夫，永井大輔，稲垣隆二，下松雅也：“投影光学系扇形配列方式による立体映像表示装置の開発”，3D画像コンファレンス2001講演論文集，pp.165-168 (2001)
- 6) 中沼 寛，亀井浩之，高木康博：“128指向性画像を高密度表示する自然な3次元ディスプレイの開発”，3D画像コンファレンス2004講演論文集，pp.13-16 (2001)
- 7) 柴田隆史，河合隆史，寺島信義，大槻正樹，三宅信行，葭原義弘，岩崎常人：“立体映像を用いた眼精疲労の解消と光学補正”，3D映像，18，3，pp.14-19 (2004)
- 8) S. Suyama, H. Takada and S. Ohtsuka: "A Direct Vision 3-D Display Using a New Depth-fusing Perceptual Phenomenon in 2-D Displays with Different Depth", Special Issue of IEICE Transaction on Electronics, E85-C, 11, pp.1911-1915 (2002)

- 9) S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira and S. Sakai: "Apparent 3-D Image Perceived from Two Luminance-modulated 2-D Images Displayed at Different Depths", Vision Research, 44, 8, pp.785-793 (2004)
- 10) 田村 徹：“輝度変調3D表示方式における奥行き知覚手がかりの検討”，映情学誌，58，6，pp.811-816 (2004)
- 11) 高田英明，陶山史朗，伊達宗和，昼間香織，中沢憲二：“前後2面のLCDを積層した小型DFDディスプレイ”，映情学誌，58，6，pp.807-810 (2004)
- 12) M. Date, T. Hisaki, H. Takada, S. Suayma and K. Nakazawa: "Luminance Addition of a Stack of Multidomain Liquid-crystal Displays and Capability for Depth-fused Three-dimensional Display Application", Applied Optics, 44, 6, pp.898-905 (2005)

栗林 英範 2000年，東京工芸大学大学院工学研究科光工学専攻修了。2002年，同大学大学院工学研究科メディア工学専攻博士課程に入学し現在に至る。両眼立体視特性に関する研究に従事。学生会員。

石榑 康雄 1998年，豊橋技術科学大学工学研究科修士課程知識情報工学専攻修了。2000年，同大学工学研究科博士後期課程電子・情報工学専攻修了。同年，日本電信電話（株）入社。以後，サイバースペース研究所にて高臨場感入出力技術の研究開発に従事。博士（工学）。正会員。

陶山 史朗 1979年，九州大学理学部物理学科卒業。1981年，同大学工学研究科応用物理学専攻修士課程修了。同年，日本電信電話公社入社。1990年，九州大学工学博士取得。現在，日本電信電話株式会社NTTサイバースペース研究所主任研究員。3次元画像入出力技術に関する研究に従事。工学博士。

高田 英明 1995年，東海大学開発工学部情報通信工学科卒業。1997年，電気通信大学大学院情報システム学研究科情報システム設計学専攻博士前期課程修了。同年，日本電信電話（株）入社。現在，同社NTTサイバースペース研究所。3次元画像表示技術に関する研究に従事。

伊達 宗和 1990年，学習院大学理学部物理学科卒業。1992年，東京工業大学総合理工学研究科電子システム専攻修士課程修了。同年，日本電信電話（株）に入社。液晶光学素子および3D表示の研究に従事。博士（理学）。

石川 和夫 1972年，東京写真大学工学部写真工学科卒業。同年，同大学助手を経て，現在，東京工芸大学工学部メディア画像学科講師。この間，画像工学，視覚工学，生体情報処理に関する研究に従事。

畑田 豊彦 1970年，早稲田大学大学院理工学研究科応用物理学専攻博士課程修了。同大学理工学部助手，日本放送協会放送科学基礎研究所研究員を経て，現在，東京工芸大学工学部教授。視覚工学，画像評価の研究に従事。工学博士。正会員。