

輝度変調型 3D 表示方式における奥行き知覚メカニズムの検討

竹中 俊江^{*1} 田村 徹^{*2} 降旗 隆^{*3}

A Study of Depth Perception Cues for Depth Fusion 3D Display

Toshie Takenaka^{*1} Tohru Tamura^{*2} Takashi Furuhashi^{*3}

Recently, a new three-dimensional display method which enables an observer to perceive an apparent 3-D image in continuous depth when the 2-D displays are positioned at different depths, and their luminances are divided between them according to the 3-D image depth. This method called DFD (Depth Fusion Display) may be based on the different perceptual cues from conventional stereoscopic image systems. It is necessary to investigate the 3-D perception cues of this new method in order to apply this method to 3-D display system. In this study, we investigated the 3-D perception cues of DFD. The results showed that the edge positions of the fusion images of left and right eyes are important cue to perceive a 3-D image in continuous depth.

1. はじめに

近年、ディスプレイシステムの進歩は目覚ましく、薄型、軽量、低消費電力の特徴をもつ液晶ディスプレイやプラズマディスプレイを目にする機会も増えている。一方、リアリティーと高臨場感を目指して立体表示ディスプレイの研究・開発が盛んに進められている¹⁾。現在の立体表示ディスプレイの多くは2眼立体表示方式と呼ばれ、左右眼用に2枚の視差画像を表示するタイプが主流である。この方式は、十分な奥行き感を得ることができ、特別なメガネを着用することで多人数が同時に立体映像を鑑賞することが可能となり、アミューズメント施設などで実用化されている²⁾。しかし、観察時に疲労感があることや、視差像の与え方によって不自然な立体像が知覚されたり、メガネを着用することに対する違和感など、問題点も多い³⁾。

輝度変調型 3D 表示方式[Depth-Fused 3-D (DFD) 方式]は、2眼立体表示方式とは異なり、奥行き位置の異なる2台のディスプレイに表示させた像の輝度比を変化させることで3次元像を表示する方式である^{4,5)}。図1に輝度変調型 3D 表示方式の概念図を示す。

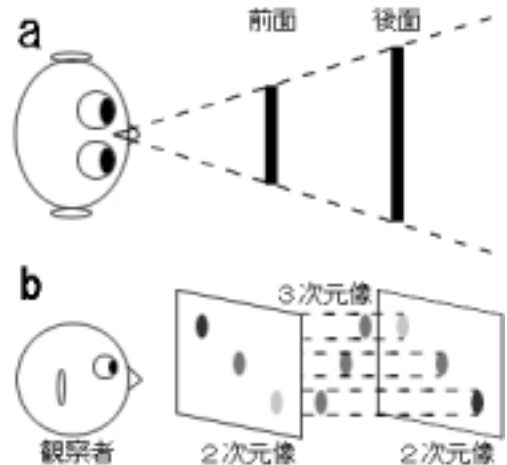


図1 輝度変調型 3D 表示方式の概念図

まず、観察者の正面に奥行き位置の異なる2台のディスプレイを配置する(図1a)。両ディスプレイ上に表示する画像の輝度を変化させることで立体像を知覚することが出来る。たとえば、対象物体をより観察者に近いところに知覚するようにするには前面ディスプレイ上の対象物体の輝度を高く、後面ディスプレイ上の対象物体の輝度を低くする。

*1 東京工芸大学大学院工学研究科画像工学専攻 *2 東京工芸大学工学部画像工学科助教授

*3 東京工芸大学工学部画像工学科教授

また、逆に遠ざけたい場合は前面ディスプレイ上の対象物体の輝度を低くし、後面ディスプレイ上の対象物体の輝度を高くする。両ディスプレイ上の輝度が等しい場合は中間付近に知覚される(図 1b)。この方式の特長は、従来の視差画像を利用した 2 眼立体表示方式ではなく、メガネなしで 3 次元像を知覚できることやディスプレイ 2 台とハーフミラー 1 枚といった従来方式に比べ簡単な装置で立体画像が表示できる点である。

ところで、視差画像を利用する従来方式は、人間が両眼視差を手がかりとして奥行きを知覚していることを利用した表示方式である⁶⁻⁹⁾。しかし、輝度変調型 3D 表示方式では、いかなる手がかりによって奥行きを知覚することが出来るかの検討が十分になされていない。そこで、本研究では、輝度変調型 3D 表示方式においていかなる手がかりによって奥行き知覚が成立するかについて検討した。

2. DFD 方式における奥行き手がかり

輝度変調型 3D 表示方式は NTT サイバースペース研究所が提案したもので、奥行きが知覚されるメカニズムについて左右眼の融合像のエッジ位置変化に基づく知覚モデルを提案している。以下に NTT が提唱している知覚モデルについて述べる⁴⁾。

図 2 は前面、後面ディスプレイ上に表示された物体を左右眼で見たときの網膜像で、左右眼像のエッジの位置は左眼では AL、CL、BL、DL、右眼では CR、AR、DR、BR の順となる。図 3a、図 3b は前面、後面のディスプレイ上に表示された対象物体の輝度とそれらが融合した融合像の輝度分布を左右の眼について示している。図 3a は後面ディスプレイ上の対象物体の輝度が前面ディスプレイ上の対象物体の輝度より低い場合を示している。ここで、融合像のエッジ位置を輝度変化の大きい部分であると仮定すると、左右眼の融合像のエッジは矢印で示した位置となる。次に、図 3b に示すように後面の対象物体の輝度が前面の対象物体の輝度に比べて高い場合を考えると、図 3a と比べて融合像のエッジ位置は左眼の像のエッジは左向きに、右眼の像のエッジは右向きに移動することがわかる。白矢印は図 3a の融合像のエッジ位置を示している。このように、融合像のエッジ位置は後面と前面の対象物

体の輝度変化に伴って移動することになり、これを手がかりに奥行きを知覚することができると考えている。

本研究の目的は、輝度変調による融合像のエッジ位置の変化が奥行き知覚の有効な手がかりとなっているかを検討することである。

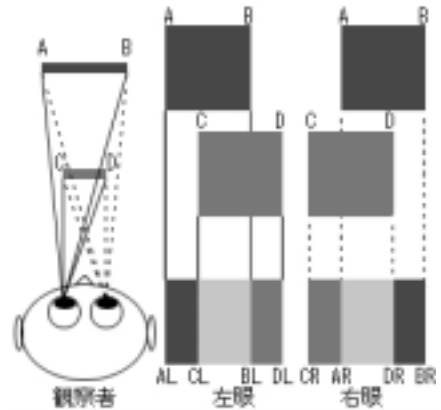
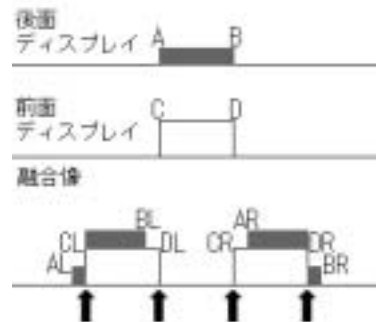
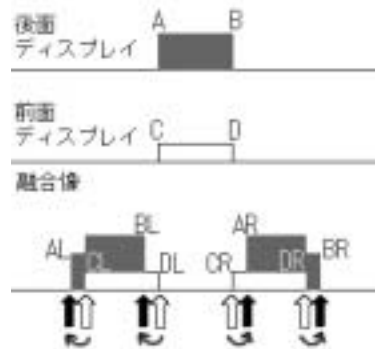


図 2 DFD 方式における網膜像のエッジ位置



a) 前面輝度が高く、後面輝度が低い場合



b) 前面輝度が低く、後面輝度が高い場合

図 3 DFD 方式における融合像の輝度分布

3. 実験1 ー単眼視による奥行き知覚ー

3-1 目的

輝度変調型 3D 表示方式の奥行き知覚手がかりが左右眼の融合像のエッジ位置変化であるとするならば、単眼では奥行き知覚が成立しないことになる。そこで、ここでは単眼の観察条件で奥行き知覚特性を調べ、両眼の場合と比較することにする。

3-2 実験方法

図4に示すようにディスプレイ2台とハーフミラーを配置し、 $a=30\text{cm}$ 、 $b=20\text{cm}$ 、 $c=150\text{cm}$ と設定した。ディスプレイ間距離は 10cm となる。呈示画像(図5)は、前面は直径 2.0cm 、後面は直径 2.1cm の円で、表示色は白色、背景は黒である。左右の円は指標で、左はディスプレイ B (前面)、右はディスプレイ A (後面) にのみ表示してあり、3次元像表示可能範囲の最前面と最後面となっている。中央の円が評価画像である。評価画像は後面と前面のディスプレイ両面に表示されており、両ディスプレイ上の表示輝度を足すと 90 cd/m^2 となる。実験では、後面と前面ディスプレイの表示輝度の和は 90 cd/m^2 で一定とし、後面と前面の輝度の配分を (0%、100%)、(10%、90%)、(20%、80%)…(90%、10%)、(100%、0%) の 11 条件とした。

被験者は評価画像が呈示されるごとに半透明の板に穴をあけた測定器を動かし、評価画像を知覚している位置に半透明の板を合わせた。その後、測定器の位置を奥行き知覚位置として記録した。ただし、ディスプレイ A よりも奥に評価画像を知覚した場合は被験者の手元にある定規を参考にして、目測でディスプレイ A からの奥行き知覚距離を申告してもらった。被験者は3名で、両眼視、単眼視共に1名につき5回の評価を行った。

3-3 結果と考察

図6に各被験者の両眼視条件 (○) と単眼視条件 (●) における奥行き知覚位置を示す。各データ点は5回の評価結果の平均である。横軸は前面ディスプレイ上に表示された評価画像の輝度の配分(%)、縦軸は後面からの奥行き知覚位置(cm)となっており、 0.0cm はディスプレイ A (後面ディスプレイ) の画面位置となっている。

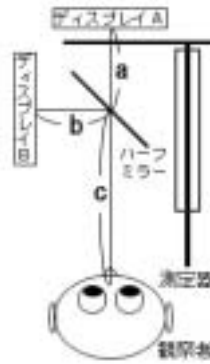


図4 実験装置

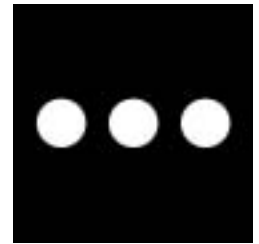


図5 呈示画像

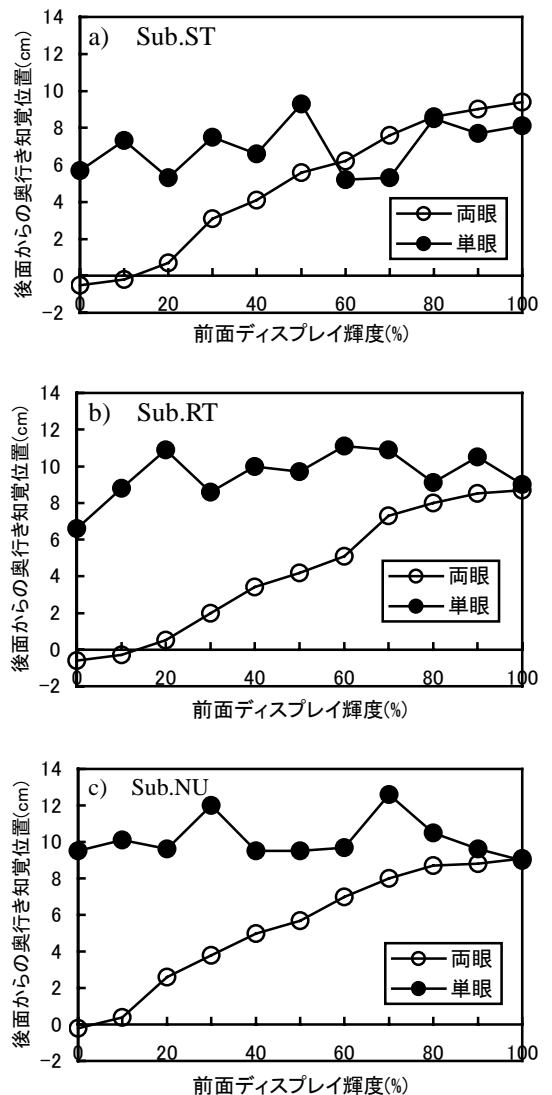


図6 両眼視条件と単眼視条件の比較

まず、両眼視条件の場合、前面ディスプレイ輝度の割合が0%から100%へと変化すると、それに対応して奥行き知覚位置も後面ディスプレイ位置から前面ディスプレイ位置へと変化しており、輝度変調による奥行き知覚が成立していることが分かる。一方、単眼視条件では、前面ディスプレイ輝度の割合が変化しても奥行き知覚位置に変化が生じず、輝度変調による奥行き知覚が成立していない。

両眼視条件と単眼視条件の奥行き知覚の違いを検討するために Sub.ST の両眼視条件及び単眼視条件における5回すべての評価結果を図7に示す。図7aより、両眼視条件ではすべての評価回で前面ディスプレイ輝度の割合が0%から100%へと変化すると、それに対応して奥行き知覚位置も後面ディスプレイ位置から前面ディスプレイ位置へと変化しており、規則性が見られる。各ディスプレイ輝度条件での標準偏差の平均は0.32となった。しかし、図7bの単眼視条件では各評価回の間で変動が大きく、前面ディスプレイ輝度の割合に対する奥行き知覚位置に規則性は見られない。各ディスプレイ輝度条件での標準偏差の平均は2.6となった。また、ほとんど奥行き位置が分からないといった被験者の報告もあった。

以上より、単眼視条件では輝度変調による奥行き知覚は成立しないことが分かった。少なくとも輝度変調3D表示方式の奥行き知覚手がかりは両眼からの情報によることになる。

4. 実験2

—エッジの輝度変化と奥行き知覚—

4-1 目的

輝度変調による奥行き知覚が融合像のエッジ位置の変化によるものならば、評価画像のエッジ部分の輝度のみを変化させても奥行き知覚位置に変化が生じるはずである。ここでは、評価画像のエッジ部分の輝度を変化させた際の奥行き知覚特性を評価し、評価画像全体の輝度を変化させた場合と比較する。

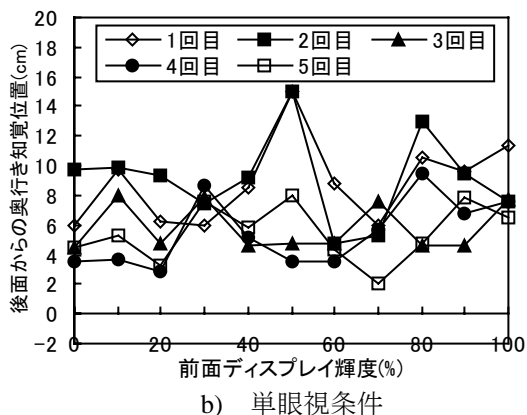
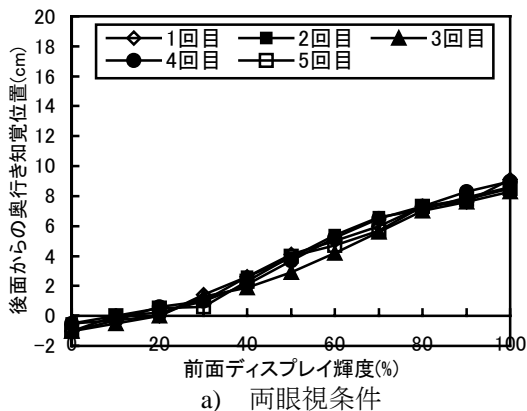


図7 Sub.STの結果

4-2 評価方法

ディスプレイ2台とハーフミラーを図4のように配置した。本実験はエッジ部分の輝度のみを変化させるので、エッジが分かりやすい白色正方形を評価画像とした。呈示画像は実験1と同様に指標と評価画像で構成し、前面画像は1辺2.0cm、後面画像は1辺2.1cmである。図8に評価画像の輝度分布を示す。表示前面評価画像と後面評価画像の中央部分の輝度は等しく、 45cd/m^2 に固定した。前面評価画像のエッジ部分の輝度を中央部分の輝度に対して-40%、-20%、0% (等しい)、+20%、+40%の5条件で変化させた。

前面評価画像のエッジの輝度を変えた条件のみをランダムな順番に呈示し、被験者は評価画像が呈示されるごとに測定器を動かし、評価画像を知覚している位置に合わせて奥行き知覚位置を記録した。エッジ効果を確認するため、前面評価画像全体の輝度を-40%、-20%、0% (等しい)、+20%、+40%と

した条件も同様に評価した。被験者は7名で、1名につき5回の評価を行った。

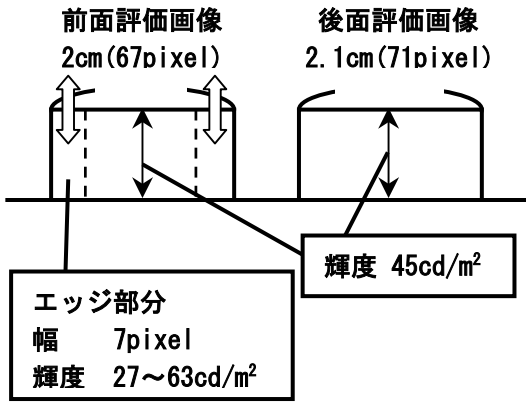


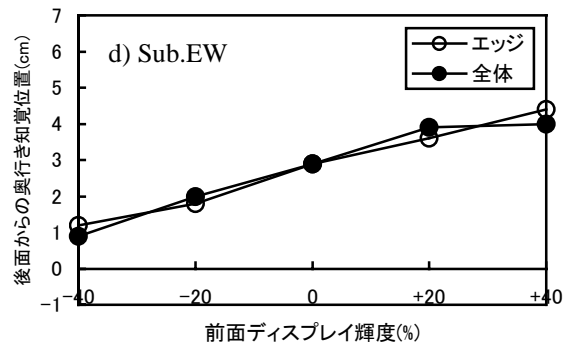
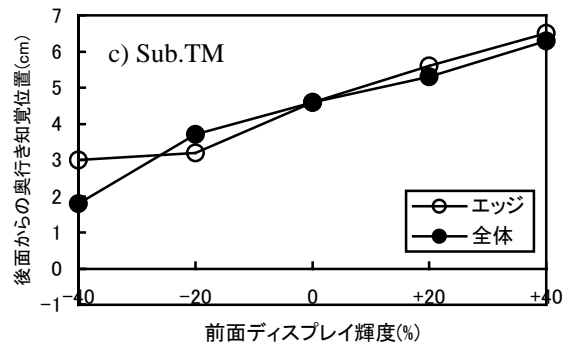
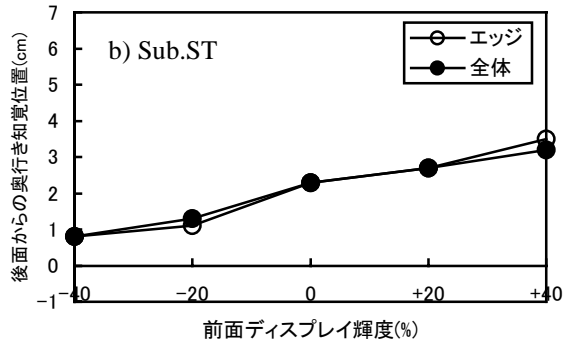
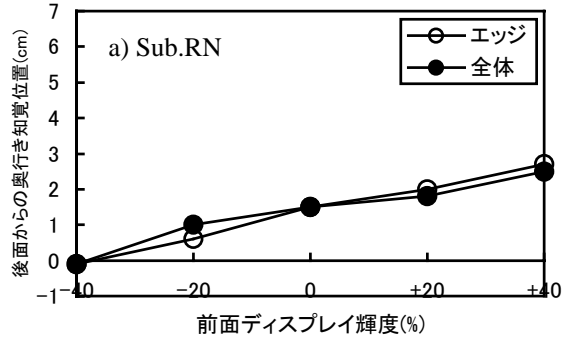
図8 評価画像の輝度分布

4-3 結果と考察

図9に被験者ごとの結果を示す。横軸は前面評価画像または評価画像のエッジ部分の輝度条件を示している。縦軸は後面からの奥行き知覚位置(cm)である。「エッジ」はエッジ部分の輝度を変化させた条件(○)、「全体」は前面評価画像全体の輝度を変化させた条件(●)の結果である。

7名中5名(Sub.RN、Sub.ST、Sub.TM、Sub.EW、Sub.RT)はエッジ部分全体の輝度を変化させた条件と全体の輝度を変化させた時の奥行き知覚位置とが一致していた。したがって、輝度変調による奥行き知覚手がかりとしてエッジ部分の輝度の効果が大きいことが分かる。しかし、Sub.HN および Sub.TZ は、全体の輝度を変化させた場合は奥行き知覚位置が変化しているのに対し、エッジ部分のみでは奥行き知覚位置に変化が見られなかった。エッジ部分の輝度と中央部分との輝度差が大きくなると、エッジ部分と中央部分とを別の対象と認識する場合がある。この2名に関しては、エッジ部分と中央部分とを別画像として認識してしまったのではないかと考えられる。

以上から、個人差はあったものの、エッジ部分のみの輝度変化でも奥行き知覚位置は変化し、エッジ部分は輝度変調型 3D 表示方式の奥行き知覚位置を決める重要な手がかり情報の1つであると考えられる。



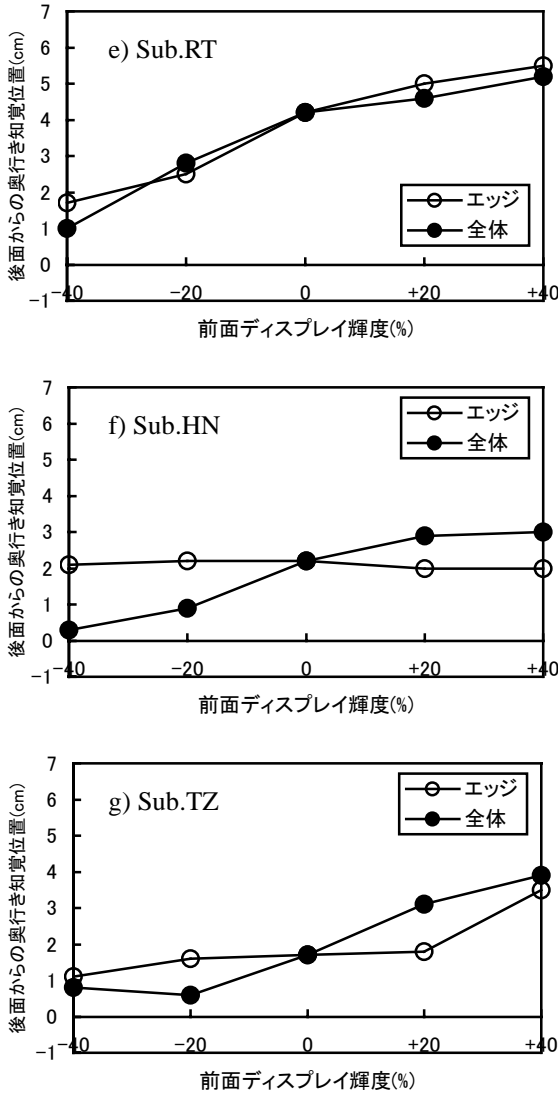


図9 エッジのみの輝度と評価画像全体の輝度を
変化させたときの評価結果の比較

5. まとめ

本研究では、輝度変調型 3D 表示方式における奥行き知覚の手がかりについて検討した。奥行き知覚手がかりとして両眼融合像のエッジ位置の変化が重要であるとする NTT のモデルをもとに2つの実験を行った。

1つ目の実験では単眼視の場合でも輝度変調による奥行き知覚が成立するかを調べた。結果、単眼視の場合は奥行きを知覚できないことが分かった。

2つ目の実験では画像のエッジ部分の輝度のみを変化させることで奥行きは知覚できるのかを調べた。被験者7名中5名がエッジ部分のみの輝度変化でも、画像全体の輝度を変化させたときと同じ位置に奥行きを知覚した。これにより、輝度変調型 3D 表示方式においてエッジ部分の情報は奥行き位置を決めるための重要な手がかりであることが分かった。

以上の結果はいずれも、輝度変調型 3D 表示方式の奥行き知覚手がかりとして両眼融合像のエッジ位置の変化が奥行き知覚に有効であるといったモデルの正当性を支持するものである。

今回の実験結果はモデルを支持する結果となり、輝度変調 3D 表示方式による奥行き知覚の手がかりとして両眼融合像のエッジ位置の変化が重要であるといった一応の成果が得られた。しかし、被験者によってはモデルで説明できない場合もあり、知覚メカニズムが完全に解明されたとは言い難い。輝度変調を利用した 3D 表示は、従来の 2 眼式立体表示方式と異なり、新しい可能性を秘めた方式であると考えられる。輝度変調型 3D 表示方式の奥行き知覚特性を詳細に調べ、奥行き知覚メカニズムを解明することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 谷千束: 高臨場感ディスプレイの特質と技術・応用動向, 映像情報メディア学会誌 Vol.55, No.8/9, pp.1064-1066, (2001).
- 2) 宮田一乗: デジタルアミューズメントを支える技術, 映像情報メディア学会誌, Vol.56, No.6, pp.902-904, (2002).
- 3) 矢野澄男, 井出真司, ハル スワイテス:

立体画像の見やすさと調節応答からみた
視覚疲労, 映像情報メディア学会誌, Vol.55,
No.5, pp.711-717, (2001).

- 4) 高田英明, 陶山史郎, 大塚作一, 上平員丈,
酒井重信: 新方式メガネなし 3次元ディス
プレー前後 2面の輝度比変化のみで連
続的な奥行きを実現ー, 3次元画像コンフ
ァレンス 2000 講演論文集, 4-5, pp.99-102,
(2000).
- 5) 陶山史郎, 高田英明: 前後 2面の輝度比分
布により奥行きを連続的に表現できる新
たなメガネなし 3D ディスプレイ, 画像電
子学会第 189 回研究会講演予稿, pp.69-74,
(2001).
- 6) 谷千束: 高臨場感ディスプレイ, 共立出版,
(2001).
- 7) 増田千尋: 3次元ディスプレイ, 産業図書,
(1990).
- 8) 渡部叡, 坂田晴夫, 長谷川敬, 吉田辰夫,
畑田豊彦: 視覚の科学, 写真工業出版,
pp.147-176, (1975)
- 9) 大石巖, 畑田豊彦, 田村徹: ディスプレイ
の基礎, 共立出版, (2001).