Depth-Fused 3次元ディスプレイ

中沢 憲二

NTTサイバースペース研究所 (〒180-8585 東京都武蔵野市緑町3-9-11)

Depth-Fused Three-Dimensional Display

Kenji NAKAZAWA

NTT Cyber Space Laboratories, 9-11 Midori-Cho 3-Chome, Musashino, Tokyo 180-8585

(Received July 10, 2006)

The depth fused 3D (DFD) display system is introduced as a promising stereoscopic display system providing less fatiguing means of viewing information. The stereovision is achieved simply by viewing two planes allocated at distances such that each plane has the same image, but different luminance. The mechanism of the DFD, other related interesting research findings, and some equipment based on the DFD mechanism are described. The results of a fatigue evaluation are also introduced.

Key Words: Display, Stereovision, Depth fused 3D, Fatigue evaluation

1. はじめに

液晶やプラズマを中心とした薄型ディスプレイの分野では、材料から装置、製造にわたる技術の目覚ましい進展により、今日、一般家庭でも30インチを超える臨場感豊かなTVが見られるようになってきた。スポーツやドラマ、映画、ニュース、ドキュメンタリー番組など多彩なプログラムをこれまで以上に手に取るように体感できるようになる。今後、インターネットと連携したプログラムにより、さらに臨場感が高まり、際限のない魅力的な世界が広がるように思える。

3Dディスプレイに対する期待は古くからあり、理想的な方式であるホログラフィや、手軽に立体視ができる両眼視差方式に基づく眼鏡式方式をはじめ、様々な方式が提案され、検討されてきた¹⁾。国内では3Dコンソーシアム^{†1}や立体映像産業推進協議^{†2}など、産業の創出も念頭においた各機関の連携による取り組みも行われている。しかし、なかなか3Dディスプレイとしての産業が育たないのが現状である。3Dディスプレイの産業化において、人間が通常の生活を送っている上で感じる立体視の現象を装置上でそのまま再現するのが難しいため、実世界と矛盾が生じることも阻害要因になっている可能性がある。例えば、ディスプレイを観察する位置を変えても、その位置に応じた立体像が観察されない、あるいは、長時間観察すると疲れを感じるといった問題がある。

この論文では、3D表示の再現空間という観点からするとごく限定的であるが、「疲れる」要因に対しては、2Dディスプレイの観察と同程度であるDFD方式を紹介する。

2. Depth Fused 3D (DFD) 現象

DFDの表示方式の基本的な概念図と立体像としての知覚のされ方をFig. 1に示す。DFDでは、表示距離の異なる前後面の像を視野角が同じになるようにオーバーラップして観察すると、前面像と後面像の明るさの比に応じて知覚される像の位置が異なって見える現象である²⁻⁴⁾。例えば、Fig. 1 (a)のNo.3のように、前面像の輝度を高く、後面像の輝度を低くすると、Fig. 1 (b)に示すように、前面に近い奥行き距離として知覚され、逆にNo.2のようにNo.3とは逆に、前面像の輝度を低く、後面像の輝度を高くすると後面に近い奥行き距離として知覚される。Fig. 2は輝度の変化に対して知覚される奥行き位置を定量的に評価した結果である。この結果から輝度の割合に対してほぼ直線的に奥行きが変化することが分かる。また、各試行間の測定結果や各試験者間のばらつきも小さいことが示された。

このような奥行き知覚に関する陶山らのモデル³⁾を紹介する。Fig. 3に知覚モデルを示す。Fig. 3 (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、

^{†1} URL: <http://www.3Dc.gr.jp/index.html>

^{†2} URL: <http://rittaikyo.jp/>

Fig. 1 Schematic diagram of "depth-fused 3D" technology. The fundamental configuration of the front and rear planes, including an observer, and an example of two 2D images (squares nos. 1-4) are illustrated in (a). The dotted lines in the figure indicate that the alignment and magnification of the two 2D images were arranged to completely overlap at the viewpoint between the observer's eyes. The apparent 3D images are shown in (b). A demonstration of the left- and right-eye images produced from the front and rear images is illustrated.

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 (Fig. 3 (a) の実線と1点鎖線) がずれて観察され、網膜上には Fig. 3 (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 Fig. 3 (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1つのローパスフィルタ処理を行い、実線に示すような輝度分布に変換され、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、奥行きが知覚されると説明している。このように、DFD表示方式は異なる奥行きに設置した2枚のディスプレイ上に、奥行きに応じて輝度変調をかけた画像を表示し、それらの画像を重ねて表示することにより、2枚のディスプ

Fig. 2 Results of experimental investigation of the relationship between the perceived depth and the luminance ratio of the front and rear images and clarification of the observation conditions. This figure shows the dependence of the perceived depth on luminance ratio of the two 2D images. The four lines and symbols are the results for four subjects (IR, AT, UY, and AK). Each value is the average of four sessions.

Fig. 3 Model of depth perception in DFD. The viewing condition is shown in (a). Left- and right- eye images of two 2D images are shown in (b). The vertical edges in the right- (left-) eye image are C, A, D, L. The upper (middle) row shows the both-eye images when only the rear (front) image is presented. The lower row shows the left- and right-eye images when both front and rear images are presented. Image luminance distribution of the left- and right- eye images is shown in (c). The curves indicate the luminance distributions reconstructed from low-spatial-frequency channels (low-pass filtered distributions of the left- and right-eye images). The arrows indicate the left and right edges of the low-pass filtered image, respectively.

レイ間で連続的に奥行きが存在するかのように知覚させる表示方式である。この方式は、さらに表示面の枚数を増やすことによって奥行きの再現量を増大させることが

できる。一方、画像が滑らかでゆるやかな奥行き変化を提示する場合については、この方法と同様な構成で理論的にステレオマッチングが可能なが、既に、安藤らによって示されている^{5,6)}。

次にDFD現象に関する取り組みを紹介する。田村は、単眼視条件では奥行き感が知覚できないという実験結果を示し、奥行き知覚要因が両眼視による立体知覚の一種であると説明している。さらに、両眼視条件で周辺の輝度を变化させた仮想エッジモデルについても検討しており、陶山らのモデルをサポートする結果が得られている⁷⁾。

不二門らは健常者に対して効き目の視力をフィルタにより落としていたとき、2眼立体視方式とDFD方式で差が生じるかどうかを調べ、DFD方式のほうがより弱い視力であっても立体視しやすいと報告している⁸⁾。

栗林らは、DFDによる立体像の提示条件において、前後画像の輝度比を变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变化させることができるとの結果を得ている⁹⁾。このことから、前後画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示唆している。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、前後画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を可能としている。

さらに、栗林らは2眼立体視におけるステレオ視において、左右画像作成時における画素のずれによって原理的に生じる離散的な奥行き感が左右画像のエッジ領域をわずかにぼかすことによって、連続的な奥行きとして観察されることも報告している¹⁰⁾。すなわち、2眼立体視用コンテンツ作成時にDFD現象を利用すれば、より自然な立体視が可能となることが示された。

3. DFD現象を利用した3D表示装置構成

3.1 ハーフミラーを用いた光学的画像重ね合わせ

ハーフミラーを用いたDFDディスプレイ装置の構成をFig. 4に示す³⁾。Fig. 4 (a)に示すように、前後2面の表示面は、ハーフミラーによって観察者から光学的に重なり合う構成である。この2面の組を基本単位として、Fig. 4 (b)のように奥行き方向に複数組み合わせ配置し、奥行きの再現空間を拡大できる。Fig. 5にハーフミラー型DFDディスプレイのプロトタイプを示す。表示面は5面である。2面の表示面の光学的な重なりという観点からは、2面の組を4組配置しており、各々中間の表示面は、前方の組の後面と後方の組の前面を共用している。この装置の3D表示の再現空間は、対角28インチ、奥行き600 mmである。単純な構造で装置を実現できるが、前後2面の間にハーフミラーが斜めに配置されているため3D表示の再現空間に比較して、ディスプレイやハーフミラーの設置空間が大幅に広くなるという欠点があった。さらに、3D表示空間がDFDディスプレイ装置筐体の前面からかなり奥になるという問題もあった。

Fig. 4 3D display equipment using half mirror. Fundamental architecture of the equipment of two planes overlapped by one half mirror is shown in (a). Advanced architecture of equipment using a combination of several fundamental architectures (b).

Fig. 5 Prototype of the DFD using a half mirror.

3.2 液晶の偏光特性を利用した画像重ね合わせ

装置の小型化を目指して、半透明な表示面を直接、積層して重ね合わせる構成として、前後2面の透明なLCD (液晶ディスプレイ) パネルを重ねる方式が検討された。液晶の偏光特性を利用して、前後2面における偏光変化の加算が、前後2面の表示面の輝度比変化に対応するといった現象に着目した方式¹¹⁾である。また、カラーフィルタを使わない、低電力化を狙ったRGBバックライトによるフィールドシーケンシャル方式も提案された¹²⁾。

3.2.1 一般のLCDディスプレイ

LCDディスプレイの構成をFig. 6に示す。観察者側から、検光子(偏光板)、LCDセル、偏光子(偏光板)、バックライトという構成となる。表示輝度はLCDセルの偏光の変化量で決まる。例えば、TN (Twisted Nematic) モードのLCDディスプレイでは、「黒」の表示状態では液晶分子が垂直に配向しているため、入射光の偏光は膜厚を通して変化しない。一方「白」の表示状態では液晶分子が90°ねじれた配向をしているため、直線偏光を入射するとその偏光方向はねじれに沿って膜厚を通して90°回転する。この「黒」と「白」の間にある「中間調」の表示は、偏光方向の回転が0~90°の間で変化する偏光の回転角度を α としたとき、 $\sin^2\alpha$ のパラメータで輝度を表現できる。

3.2.2 偏光加算型DFDディスプレイ

高田らによる、LCDを2面積層したDFDディスプレイの

Fig. 6 Conventional LCD display architecture. Image is displayed by changing the polarization of the light at the LCD cell.

構成をFig. 7に示す¹¹⁾。前面LCDセルと後面LCDセルを、検光子と偏光子の間に、いわゆるDFDによる3Dの再現空間となる間隔を設けて設置した。通常の1面のLCDディスプレイのLCDセルを前後2面に積層することで、前面のみ偏光を変化させた場合には前面のみ輝度が増加し、前面の偏光状態を変化させず、後面のみ偏光を変化させた場合には後面のみの輝度が増加する。前面と後面の両方の偏光を同時に変化させると、後面の液晶で変化した偏光状態をもつ光が前面の液晶への入力光となり、前面の液晶でも偏光状態が増加する。そのため、それぞれのLCDディスプレイの輝度は、それぞれの液晶でどの程度、偏光したかに依存する。

この偏光の変化量について、後面LCDと前面LCDにおける偏光角の変化の状態と輝度について、以下の(1)~(3)の3つの場合に分けて説明する。

(1) 偏光の変化量が、後面LCDセルでは α だけ増加し、前面LCDセルでは変化しない0の時、Fig. 7 (a)に示すように加算された全体の偏光の変化量は α になる。この時、全体の輝度は後面LCDセル単体と同様な値 $L_{1R} (= \sin^2 \alpha)$ となる。

(2) 偏光の変化量が、後面LCDセルでは変化しない0であり、前面LCDセルでは β だけ増加する時、Fig. 7 (c)に示す

Fig. 7 DFD architecture using two LCD cells. 3D image is produced by adding the variations of polarization changes induced in both the rear LCD cell and the front LCD cell.

ように加算された全体の偏光の変化量は β になる。この時、全体の輝度は前面LCDセル単体と同様な値 $L_{1F} (= \sin^2 \beta)$ となる。

(3) 偏光の変化量が、後面LCDセルでは α だけ増加し、前面LCDセルでは β だけ増加する時、Fig. 7 (b)に示すように加算された全体の偏光の変化量は $\alpha + \beta$ になる。この時、全体の輝度は $L_2 (= \sin^2 (\alpha + \beta))$ となる。

Fig. 8に一般的な偏光加算型DFDの一例を示す。対角インチ、奥行き7.2 mmのカラー3Dディスプレイである。

3.2.3 偏光変化の加算特性

TNモードのLCDの場合について、偏光変化の加算特性が調べられた¹³⁾。前面と後面の透過率に対する前後2面の全透過率の関係をFig. 9 (a)に示す。ハーフミラーを用いたDFDディスプレイのように完全に線形な輝度加算となる場合を実線と破線で示している。TNモードの偏光変化を加算したときの実測値を線形な加算特性と比較すると、前面あるいは後面LCDセルの輝度が最小($\alpha = 0$ あるいは $\beta = 0$)の時と、輝度の和が最大($\alpha + \beta = 90^\circ$)の時に、ずれがほぼ0となり、それ以外の時には若干ずれる。これは、前面あるいは後面輝度が最小、あるいは輝度の和が最大となる場合には $L_2 = L_{1F} + L_{1R}$ となり、それ以外では $L_2 \neq L_{1F} + L_{1R}$ になるためである。このずれが及ぼす影響をシミュレーションしたものがFig. 9 (b)である。横線が奥行ききの等高線、縦線が全透過率の等高線である。完全に線形であれば、奥行きと積層した全透過率の等高線は縦横の正確な昇目となる。歪みは見られるものの、表現できない領域はない。

カラー表示では、前後2面のLCDセルが各々RGBのカラーフィルタを持っていることから、前後2面のRGBの各々の色のフィルタ間で独立した偏光の変化になる。これより、前後2面のLCDセルの同じ色の画像同士で偏光の変化を制御できるため、カラー表示に関してもモノクロの場合と同様に偏光変化の加算特性を実現できる。また、TNモード以外のLCD(S-IPS, PVA, MVA, CPAモードなど)については、伊達らの報告によると、各々の偏光変化に関して何らかの加算性が成り立ち¹³⁾、DFDディスプレイに応用できることが示されている。

Fig. 8 Prototype of 3D display using two LCDs.

Fig. 9 Luminance addition characteristics (a). Contour plot for 3D reproducibility of two TN-mode LCDs (b).

4. 観察時の疲労評価結果

一般に2眼式の3D映像が視覚疲労に影響を与える可能性があることは良く知られている¹⁴⁾。これは、両眼視差の交点である輻輳点が3D空間を自由に移動するのに対して、眼球レンズを調節すべき画像の表示面は固定されていること、すなわち、輻輳と調節の不一致が主な原因と考えられている。DFD方式は2面の表示面をオーバーラップさせて、奥行き方向に融合させる3Dディスプレイである。原理上、ディスプレイを奥行き方向に複数面有することから、輻輳と調節の不一致による視覚疲労が少ないと予測される。逆に、2眼式でない視覚への影響も考えられるが、まず、日常使用している通常の2D画像とDFDについて、石樽らによって実施されたアンケートによる主観的な評価結果¹⁵⁾を説明する。

4.1 疲労評価実験方法

実験には、面間隔5 mmの4インチディスプレイを用いた。被験者は屈折異常以外に眼疾患のない健康者10名(24-48歳、平均29.4歳)である。Fig. 10に実験の流れを示す。4インチのDFDには、前面・中面・後面の奥行き位置に3

Fig. 10 Experimental task (DFD or 2D). The subjects were ten healthy people, none of whom had eye problems other than ametropia, 24-48 years old (average: 29.4). Front, middle, and rear stimuli consisting of three white squares were presented at random depth positions on a DFD display with a 4-inch diagonal.

つのターゲット(図中の白い四角)がランダムに表示される。2D表示については奥行きの手がかりがないため、正方形の大きさを大中小と変化させて表示した。被験者は3つのターゲットのうち、奥行きが中間(中面)に知覚されるターゲットをキーボードの矢印キーで回答する。5分間の練習を行い、続いて視機能の測定を行い、20分間の作業を実施した。その後、再度、視機能の計測を実施した。アンケートによる主観評価は10項目(目が疲れる、しょぼしょぼする、かすむ、痛い、ぼんやりする、重い、悪心を感じる、吐き気がする、めまいがする、眠気がする)について5段階評価である。

4.2 実験結果

Fig. 11に2DとDFDの作業終了後の主観評価結果を示す。横軸は評価項目であり、縦軸は評価値(スコア)であり、値は全被験者の回答の平均である。値が大きいほど

Fig. 11 Results of subjective testing. The horizontal axis indicates evaluation items and the vertical axis indicates the scores, each of which is an average calculated from the answers of all subjects because all subjects had the same tendency for each evaluation item.

程度が高い(疲れる等)ことを示す。この結果から、2DとDFDともに作業終了後に一定の疲労を示しているが、これらに有意な差はない。このように、被験者は2DとDFDの作業において、平均として客観評価結果からDFDは2D程度の疲労状態であることが分かった。

5. まとめ

DFD方式による3Dディスプレイを紹介した。DFD方式においては、その原理に基づいた装置化とともに、DFD現象に関する探求も引き続き行われている。新たな現象の発見やメカニズムの解明により、装置化への手がかりやコンテンツ制作における新たな知見が得られる可能性もある。地道な探求を通して、DFDも含め3Dディスプレイが薄型ディスプレイに続く、革新的なディスプレイとして豊かな生活を築くツールとなるよう発展させたい。

参考文献

- 1) 大越 孝敬:「三次元画像工学」朝倉書店(1991)。
- 2) 大塚 作一, 陶山 史朗, 高田 英明, 石樽 康雄: 信学技報 **EID2000-51** (2000) 37.
- 3) S. Suyama, H. Takada, and S. Ohtsuka: Special Issue of IEICE Transaction on Electronics **E85-C** (2002) 1911.
- 4) S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira, and S. Sakai: Vision Research **44** (2004) 785.
- 5) 安藤 繁: 計測自動制御学会論文誌 **24** (1988) 973.
- 6) 安藤 繁, 山梨雅彦: 第30回自動制御連合講演会 (1987) p. 537.
- 7) 田村 徹: 映像情報メディア学会誌 **58** (2004) 811.
- 8) N. Sekimoto, M. Mizuno, K. Okai, A. Akaike, Y. Takami, S. Asonomura, J. Hosohata, S. Suyama, H. Takada, S. Sakai, and T. Fujikado: Progress in Strabismuis 9th Meeting of International Strabismological Association (2003) p. 117.
- 9) 栗林 英範, 石樽 康雄, 陶山 史朗, 伊達 宗和, 石川 和夫, 畑田 豊彦: 映像情報メディア学会誌 **60** (2006) 431.
- 10) H. Kuribayashi, M. Date, S. Suyama, and T. Hatada: J. SID **14/5** (2006) 493.
- 11) 高田 英明, 陶山 史朗, 伊達 宗和, 昼間 香織, 中沢 憲二: 映像情報メディア学会誌 **58** (2004) 807.
- 12) M. Date, T. Hisaki, H. Takada, S. Suyama, and K. Nakazawa: IEEE Trans. Electron Devices **52** (2005) 190.
- 13) M. Date, T. Hisaki, H. Takada, S. Suyama, and K. Nakazawa: Appl. Opt. **44** (2005) 898.
- 14) 畑田 豊彦: 日経エレクトロニクス **444** (1988) 205.
- 15) 石樽 康雄, 陶山 史朗, 高田 英明, 中沢 憲二, 細島 淳, 高尾 泰子, 不二門 尚: 信学技報 **EID2004-30** (2004) 25.

レーザーワード

DFD (Depth-Fused 3D)

立体視の現象のひとつ。特殊な画像でなく明確なエッジを含む一般的な画像を観察者から見て重なるように表示すると、観察者はこれを奥行き異なる2つの像としてではなく、奥行き方向に融合した1つの像として知覚する現象。また、表示したい3D画像の奥行きの位置に応じて前後2面の画像の輝度比を変化させると奥行き位置が連続

的に変化して知覚される。ハーフミラーを使って2組のディスプレイ上に表示された画像を光学的に重畳する方式や、液晶ディスプレイの偏光特性を利用して輝度比を制御する方式による装置化が実現されている。

(中沢 憲二)