

博士論文概要

論文題目

奥行き融合型立体錯視の解明と
3次元表示への適用に関する研究

Research on Clarification of Depth-Fused 3-D
Visual Illusion and its Application to 3-D Display

申請者

高田	英明
HIDEAKI	TAKADA

国際情報通信学専攻
人工現実表現と知的コミュニケーション・
ユビキタス環境情報システム研究Ⅱ

2007年 7月

1. 研究の背景

近年の光ファイバ技術や無線技術の発達により、広帯域・高速ネットワークインフラの構築が進み、映像を中心とした高臨場感通信サービスの実現が期待されている。高臨場感通信が実現することで、場を共有する新たなコミュニケーションが可能となる。現実と区別がつかない程の高臨場感を実現する要素としては人間の5感(視覚・聴覚・触覚・嗅覚・味覚)を全て再現することが理想となるが、その中でも視覚として影響を与える映像技術はこの高臨場感の実現には大きな役割を果たしている。映像技術の研究としては広視野、高精細、高階調、3次元など各種の検討が進められているが、その中でも3次元映像は、電子博物館、ゲーム機やシミュレータ、携帯型端末等へ応用することにより、2次元映像に比べて臨場感を飛躍的に高めることのできる重要な要素であると考えている。また、遠隔操作やデザイン、医療等に應用すれば、操作の容易さや確実性を飛躍的に高めることも可能である。

3次元映像の表示手段としては、これまでも観察者に特殊な3Dメガネをかけさせることで右眼と左眼へ別々の画像を提示して立体感を得られるようにした2眼式(色メガネ方式、偏光メガネ方式、時分割メガネ方式)や、3Dメガネなどを用いずに表示装置の表示面上に右眼と左眼の画像を分離させる光学系を配置して立体感を得られるようにした2眼式(パララックスバリア方式、レンチキュラレンズ方式)、これを応用して複数の方向からの画像を提示できるように表示装置の表示面上の光学系を工夫した多眼式、複数の方向からの画像を観察者の眼の瞳孔内に複数入射するようにして自然な立体感を得られるようにした超多眼方式、奥行き方向に離散的に複数の表示面を積層して立体感を得られるようにした奥行き標本化方式(可変焦点レンズ方式、光源回転方式)、積層画像により奥行きを知覚する微分両眼立体視法などがある。また、物体からの光線の方向を記録/再生することで実物に近い自然な立体感が得られ、画質が極めて高いホログラフィ方式などがある。

しかし、2眼式や多眼式では立体視の要因のうち輻輳とピント調節の関係などに矛盾が生じて長時間視聴すると眼や頭が疲れる、超多眼式では極めて多数の視線方向からの画像を提示するために装置が大幅に複雑化する、奥行き標本化方式では扱う画像の面数が多くなり高速な表示デバイスが必要でありシステムが複雑となる、微分両眼立体視法では滑らかで緩やかな奥行き変化をする特殊な画像は表現できるが一般的な画像は表示できない、ホログラフィ方式では静止画は可能であるが動画化できるデバイスが存在しないなどの課題があった。また、多くの方式では、人の視覚機能への悪影響も懸念されるため、成長過程である子供向けの使用には注意を要していた。

これまでに、装置構成は複雑ではあるが立体視の要因をほぼ満足し、自然な立体視が可能な奥行き標本化方式において、物理的な複数の表示面の削減を目指し、連続的に焦点距離を変化させることのできる液晶レンズの研究を進め、空間上に複数の平面画像を積層して結像することのできる新しい3次元表示デバイスの研究を進めてきた。この液晶レンズを用いた奥行き標本化方式にて、制御する表示面数を大幅に削減させる方法について研究している過程で、前後2面の間に像を融合させることができる新たな立体錯視現象(DFD[Depth-Fused 3-D]錯視現象)を発見した。本現象は、観察者の疲労の問題についても従来の2次元表示装置と同等であるという結果も報告されている。本現象の発見により、3Dメガネなしで簡単な装置構成で3次元映像を長時間でも楽しめる3Dディスプレイの実現の可能性が見えてきたが、その現象の生じる範囲や表示構成などについては、まだ明らかとなっていない。

2. 論文の概要

本論文では、奥行き融合型立体錯視であるDFD(Depth-Fused 3-D)錯視現象の生じる条件の明確化と、その現象を用いた3次元表示装置および3次元表示システムへの応用に向けた構成技術の両面からの検討結果と知見を述べる。

DFD錯視現象の生じる条件としては、現象の生じる範囲と限界について主観評価実験による評価と検討を行い、DFD錯視現象の生じる条件と知覚メカニズムについての知見を得た。

表示システムへの応用としては、光の透過特性と偏光特性を利用した輝度除算型、偏光加算型のDFD表示の基本構成技術を新たに提案し、プロトタイプ構築により3次元表示装置実現への見通しを得た。また、DFD錯視現象による前後2面への輝度分配手法を新たに提案し、プロトタイプ構築により3次元表示システム実現への見通しを得た。

本論文の各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、本論文に密接な人間の奥行き知覚を中心とした視覚の生理的、心理的な要因と、従来の3次元表示技術の概要について整理した。また、本論文の基礎となるDFD錯視現象について述べた。

第3章では、DFD錯視現象の生じる範囲と限界についての知見を得た。前後2面間の距離を変化させた場合に、DFD錯視現象による2面の融合がどのように変化するかについて主観評価実験により評価し、前後2面間の距離が視角3分以下の条件で2面間の奥行きが融合できるという知見が得られた。これは、観察者の網膜像として前後2面の重なりによる共通領域があり、かつ左右眼での像の両端のエッジの順番が逆転しているというDFD錯視現象の基本的な条件全ての範囲で奥行き融合が生じるのではなく、この条件に加えてエッジの幅が小さい(前後2面の距離が狭い)場合のみで奥行き融合が生じていることを示している。また、DFD錯視現象の前後2面の像の大きさの違いによる影響について評価し、観察者の両眼の間の中心の1点から正確に前後像が重なり合っていない状態でも、前後2面の像が1つに融合し、かつ従来のDFDと同様な画質が保たれる範囲が存在するという知見が得られた。これより、前後像の大きさを同一にした新たな表示方式を提案し、観察者の前後方向の観察位置の制約を解消でき、かつ画質などに影響を及ぼさずにDFD表示を簡便に実現できるという見通しを得ることができた。

第4章では、光の透過特性を利用して前後2面を直接重ね合わせる輝度除算型の新たなDFD表示方法を提案し、従来の輝度加算型のDFD表示と同様に連続的な奥行き表現を透過率の変化により実現できる見通しを得た。主観評価実験より、前後2面の透過率の割合の変化によって連続的に奥行き位置が変化するという知見を得た。また、前後2面の透過型の表示面を直接重ね合わせた輝度除算型DFD表示のプロトタイプを構築し、自然なカラー3次元表示が可能であることを実証した。前後2面をハーフミラーなどの光学系を用いずに直接重ね合わせる構成のため、透明シートを用いた印刷物のように簡易で薄型な表示装置を簡単に構築できる見通しも得ることができた。

第5章では、光の偏光特性を利用して前後2面を直接重ね合わせる偏光加算型の新たなDFD表示方法を提案し、従来の輝度加算型のDFD表示と同様に連続的な奥行き表現を薄型な表示構成で実現できる見通しを得た。輝度加算型や輝度除算型DFD表示では前後2面の間では光の強度(輝度や透過率)を制御していたが、光の強度ではなく光の偏光方向のみを液晶を用いて制御する構成を提案し、この前後2面の偏光の変化と輝度の加算特性を測定により評価することで、従来の輝度加算型

のDFD表示と同様な特性を実現できることを実証した。また、前後2面の間にハーフミラーなどの光学系が不要で薄型なプロトタイプを構築し、フルカラーで動画表示が可能な表示装置を実現できる見通しも得ることができた。

第6章では、2次元画像と奥行き画像(デプスマップ)を用いて演算処理することでDFD表示に必要な前後2面への輝度分配を実現する輝度分配手法を提案し、輝度分配モジュールのプロトタイプを用いて本手法の妥当性を実証した。本手法は、2次元画像と奥行き画像を入力とし、2次元画像の輝度情報を奥行き画像による奥行き位置情報を用いて比率分配処理を行い、前後2面の画像を生成するものである。DFD錯視現象は表示される輝度に依存して知覚する奥行きが変化するため、前後2面の各々の表示装置の輝度特性を正確に補正するための補正処理や、前後2面の重なる位置合わせのための画像サイズの調整処理も考慮している。本手法の実証によって、通常の2次元画像に加えて奥行き画像を入力するだけで、DFD特有の特殊な画像生成を意識することなく、DFD表示装置側にて自動的にDFD輝度分配処理を行い表示できるようになり、利便性を大幅に向上できる。本モジュールのプロトタイプと偏光型DFD表示装置を接続した表示実験により、本手法が各種のDFD表示方式に対応できることを実証し、3次元表示システムとしての実現性を示すことができた。

第7章は、結論であり、本研究の総括を行った。

本論文により、DFD表示技術の応用に必要なDFD錯視現象の生じる条件の明確化と、3次元表示装置および3次元表示システムの実現に向けた要素技術を確立した。

研究業績

類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月日、 連名者
論文誌論文	<ul style="list-style-type: none"> ○ “Depth-Fused 3-D表示方式の前後像の大きさ変化による影響評価と簡易表示方式の提案,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J90-C, No. 2, pp. 166-173, 2007, <u>高田英明</u>, 陶山史朗, 伊達宗和, 寺島信義. ○ “Front and Rear Image Generation Module for Depth-fused 3-D Display,” IEEE Trans on Consumer Electronics, Vol. 52, No. 3, pp. 904-908, 2006, <u>H. Takada</u>, S. Suyama, M. Date and K. Kimura. • “DFD(Depth-fused 3-D)表示の奥行き知覚に与える ぼけの効果,” 映像情報メディア学会誌, Vol. 60, No. 3, pp. 431-438, 2006, 栗林英範, 石樽康雄, 陶山史朗, <u>高田英明</u>, 石川和夫, 畑田豊彦. ○ “Evaluation of the Fusional Limit between the Front and Rear Images in Depth-Fused 3-D Visual Illusion,” IEICE Trans. on Electron., Vol. E89-C, No. 3, pp. 429-433, 2006, <u>H. Takada</u>, S. Suyama and M. Date. ○ “A new 3-D display Method Using 3-D Visual Illusion Produced by Overlapping Two Luminance Division Displays,” IEICE Trans. on Electron., Vol.E88-C, No. 3, pp. 445-449, 2005, <u>H. Takada</u>, S. Suyama and K. Nakazawa. • “Reduction of Power Consumption in Compact DFD Display by Using FS Color Technology,” IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 52, No. 2, pp. 190-193, 2005, M. Date, T. Hisaki, <u>H. Takada</u>, S. Suyama and K. Nakazawa. • “Luminance addition of a stack of multidomain liquid-crystal displays and capability for depth-fused three-dimensional display application,” Applied Optics, Vol. 44, No. 6, pp. 898-905, 2005, M. Date, T. Hisaki, <u>H. Takada</u>, S. Suyama and K. Nakazawa. • “Compression of depth-fused 3-D images using depth map data,” Journal of Electronic Imaging, Vol. 14(2), pp. 023020-1 - 023020-7, 2005, K. Uehira, H. Unno, S. Suyama, <u>H. Takada</u>. ○ “前後 2 面のLCDを積層した小型DFDディスプレイ,” 映像情報メディア学会誌, Vol. 58, No. 6, pp. 807-810, 2004, <u>高田英明</u>, 陶山史朗, 伊達宗和, 昼間香織, 中沢憲二. • “Apparent 3-D image perceived from luminance-modulated two 2-D images displayed at different depths,” Vision Research, 44, pp. 785-793, 2004, S. Suyama, S. Ohtsuka, <u>H. Takada</u>, K. Uehira and S. Sakai. • “A Direct-Vision 3-D Display Using a New Depth-fusing Perceptual Phenomenon in 2-D Displays with Different Depths,” IEICE Trans. on Electron., Vol. E85-C, No. 11, pp. 1911-1915, 2002, S. Suyama, <u>H. Takada</u> and S. Ohtsuka.
国際学会	<ul style="list-style-type: none"> • “Projection-Type Depth Fused 3D (DFD) Display,” Proceeding of IDW’06, 3Dp-4, pp. 1393-1396, 2006, M. Date, <u>H. Takada</u>, S. Suyama, K. Tanaka and K. Nakazawa. ○ “Fusional Limit of distance between front and rear images in the depth-fused 3-D visual illusion,” 29th European Conference on Visual Perception 2006, Binocular and Stereo Vision, p. 31, 2006, <u>H. Takada</u>, S. Suyama, M. Date and Y. Gotoh. • “Minimum depth discrimination in a stereoscopic display with a depth-fused 3-D effect,” 29th European Conference on Visual Perception 2006, Binocular and Stereo Vision, p. 30, 2006, H. Kuribayashi, Y. Ishigure, <u>H. Takada</u>, M. Date, S. Suyama, K. Ishikawa and T. Hatada.

	<ul style="list-style-type: none"> • "Depth Reproducibility for Inclined View in DFD (Depth Fused 3-D) Display," Proceedings of IDW/AD'05, 3D4-6L, pp. 1793-1794, 2005, M. Date, <u>H. Takada</u>, Y. Gotoh, S. Suyama. • "A Method to Reproduce Apparent Continuous Depth in a Stereoscopic Display Using "Depth-Fused 3-D" Technology," Proceedings of the 25th International Display Research Conference (Euro Display 2005), 3.4, pp. 31-34, 2005, H. Kuribayashi, Y. Ishigure, M. Date, <u>H. Takada</u>, S. Suyama, K. Ishikawa, T. Hatada. • "Effect of depth perception cues produced by edge pattern for depth-fused 3-D display," European Conference on Visual Perception 2005, Posters 2: 3-D vision, p. 110, 2005, H. Kuribayashi, Y. Ishigure, S. Suyama, <u>H. Takada</u>, K. Ishikawa and T. Hatada. • "Evaluation of Visual Fatigue Relative in the Viewing of a Depth-fused 3-D Display and 2-D Display," Proceedings of IDW'04, VHFp-3, pp. 1627-1630, 2004, Y. Ishigure, S. Suyama, <u>H. Takada</u>, K. Nakazawa, J. Hosohata, Y. Takao and T. Fujikado. • "Luminance Additivity in Compact Depth-Fused-3D Display Using a Stack of Two TN-LCDs," Proceedings of IDW'03, 3D2-4, pp. 1409-1412, 2003, M. Date, <u>H. Takada</u>, S. Suyama and K. Nakazawa. ○ "A Compact Depth-Fused 3-D LCD," SID'03 Digest of Technical Papers, 58.2, pp. 1526-1529, 2003, <u>H. Takada</u>, S. Suyama, K. Hiruma and K. Nakazawa. • "A DEVELOPMENT OF STEREOTEST USING LUMINANCE MODULATION," Proceedings of the IXth Meeting of the International Strabismological Association, pp. 117-119, 2002, N. Sekimoto, M. Mizuno, K. Okai, A. Akaike, Y. Takami, S. Asonuma, J. Hosohata, S. Suyama, <u>H. Takada</u>, S. Sakai and T. Fujikado. • "Effect of the Compression of the Depth Map Image on Depth-Fused 3D Image Quality," Proceeding of Electronic Imaging Stereoscopic Displays and Virtual Realty Systems X, Vol. 5006, pp. 227-234, 2003, K. Uehira, K. Kono, K. Komiya, S. Suyama and <u>H. Takada</u>. • "A New Method for Protruding Apparent 3-D Images in the DFD (Depth-Fused 3-D) Display," SID01 DIGEST, 53.3, pp. 1300-1303, 2001, S. Suyama, <u>H. Takada</u>, K. Uehira, S. Sakai and S. Ohtsuka. • "A Novel Direct-Vision 3-D Display using Luminance-Modulated Two 2-D Images Displayed at Different Depths," SID'00 Digest of Technical Papers, 54.1, pp. 1208-1211, 2000, S. Suyama, <u>H. Takada</u>, K. Uehira, S. Sakai and S. Ohtsuka.
国内研究会(招待)	<ul style="list-style-type: none"> ○ "奥行き融合型メガネなし 3Dディスプレイ," 画像電子学会 第19回VMA研究会, pp. 25-32, 2007, <u>高田英明</u>. (招待講演) ○ "3次元表示技術の最近の動向," 画像電子学会 Advanced Image Seminar, pp. 29-42, 2007, <u>高田英明</u>. (招待講演)
国内研究会	<ul style="list-style-type: none"> • "投射型DFD (Depth Fused 3-D) 表示装置," 3次元画像コンファレンス 2006 講演論文集, P-2, pp. 105-108, 2006, 伊達宗和, <u>高田英明</u>, 陶山史朗, 田中敬二. • "Depth-fused 3D表示原理を利用した2眼式立体画像における最小奥行き弁別," 3次元画像コンファレンス 2006 講演論文集, P-3, pp. 109-112, 2006, 栗林英範, 石川和夫, 畑田豊彦, 石樽康雄, <u>高田英明</u>, 伊達宗和, 陶山史朗. • "フィールドシーケンシャルカラー液晶パネルを用いた奥行き融合型3次元(DFD)表示," 画像電子学会第16回VMA研究会, Vol. 16-3, pp. 1-7, 2006, 伊達宗和, <u>高田英明</u>, 陶山史朗. • "Depth-fused 3Dにおけるエッジ情報変化での奥行き知覚," 3次元画像コンファレンス 2005 講演論文集, P-6, pp. 101-104, 2005, 栗林英範, 石樽康雄, 陶山史朗, <u>高田英明</u>, 伊達宗和, 石川和夫, 畑田豊彦. • "Depth-fused 3D表示原理を応用した2眼式立体映像の1画素未満の視差表現方

<p>国内大会</p>	<p>法,” 3次元画像コンファレンス 2005 講演論文集, P-5, pp. 97-100, 2005, 伊達宗和, 石樽康雄, 高田英明, 陶山史朗, 栗林英範, 石川和夫, 畑田豊彦.</p> <ul style="list-style-type: none"> • “Depth-Fused 3-Dディスプレイと 2-Dディスプレイ観察時の視覚疲労評価,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol.28, No.66, pp. 25-28, 2004, 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. • “輝度変調型 3Dディスプレイによる立体映像負荷の視機能への影響,” 日本眼科医会「IT眼症と環境因子研究班」第3回研究会抄録, p. 12, 2004, 細島淳, 高尾泰子, 不二門尚, 石樽康雄, 陶山史朗, 高田英明, 中沢憲二. • “新方式メガネなし 3次元ディスプレイ -前後 2面の輝度比変化のみで連続的な奥行きを実現-,” 3次元画像コンファレンス 2000 講演論文集, 4-5, pp. 99-102, 2000, 高田英明, 陶山史朗, 大塚作一, 上平員丈, 酒井重信. <p>(その他 7件)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ “LCD2面の偏光角変化を用いた小型 3Dディスプレイ,” 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集, 1B4-3, pp. 119-122, 2003, 高田英明, 陶山史朗, 能登肇, 昼間香織, 中沢憲二. • “前後 2面の輝度比変化のみで奥行きを連続的に表現できる新たなメガネなし 3次元ディスプレイ,” 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, 22B4, pp. 307-310, 2001, 高田英明, 陶山史朗, 中沢憲二, 大塚作一. • “輝度変化を用いた新しい立体視検査,” 第57回日本弱視斜視学会報, 第38巻, 第1号, 1-5, p. 49, 2001, 関本紀子, 岡井佳恵, 倉野美和, 赤池麻子, 高見有紀子, 阿曾沼早苗, 細島淳, 不二門尚, 酒井重信, 陶山史朗, 高田英明. <p>(その他 1件)</p>
<p>海外解説 国内解説</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ “Depth-Fused 3D Display,” Display Asia, No. 6, pp. 62-69, 2006, H. Takada. ○ “眼に優しいDepth-Fused 3-Dディスプレイ,” 光技術コンタクト, Vol. 44, No. 6, pp. 316-323, 2006, 高田英明. ○ “眼に優しいDepth-Fused 3-Dディスプレイ技術,” 月刊ディスプレイ, Vol. 12, No. 4, pp. 61-68, 2006, 高田英明. • “輝度変調型 3Dディスプレイによる立体映像負荷の視機能への影響,” 日本の眼科, 第75巻, 第8号, pp. 1021-1022, 2004, 細島淳, 高尾泰子, 不二門尚, 石樽康雄, 陶山史朗, 高田英明, 中沢憲二. • “新たな立体知覚現象に基づくDFD(Depth-Fused 3-D)表示技術,” 日本画像学会誌, 142号, 第41巻, 第4号, pp. 374-378, 2002, 陶山史朗, 高田英明, 昼間香織. • “奥行き融合方式立体ディスプレイ,” 光学, Vol. 31, No. 3, pp. 148-150, 2002, 高田英明, 陶山史朗.
<p>表彰</p>	<ul style="list-style-type: none"> • IDW'06 Outstanding Poster Paper Award, ”Projection-Type Depth Fused 3D (DFD) Display,” M. Date, H. Takada, S. Suyama, K. Tanaka and K. Nakazawa • 3次元画像コンファレンス 2005 優秀論文賞, “Depth-fused 3D表示原理を応用した2眼式立体映像の1画素未満の視差表現方法,” 伊達宗和, 石樽康雄, 高田英明, 陶山史朗, 栗林英範, 石川和夫, 畑田豊彦. ○ 文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門, “新たな立体知覚現象の発見と解析に基づく3D映像装置の研究,” 大塚作一, 陶山史朗, 高田英明. ○ 電子情報通信学会 業績賞 イ項, “立体視の新たな原理の発見に基づく3D映像装置の研究開発,” 大塚作一, 陶山史朗, 高田英明. ○ 日本バーチャルリアリティ学会 学術奨励賞, “前後 2面の輝度比変化のみで奥行きを連続的に表現できる新たなメガネなし 3次元ディスプレイ,” 高田英明. • 3次元画像コンファレンス 2000 優秀論文賞, “新方式メガネなし 3次元ディスプレイ,” 高田英明, 陶山史朗, 大塚作一, 上平員丈, 酒井重信.