《2》
超臨場感技術の基礎

《2-1》
立 体 映 像

〔正会員〕高木 康博[†]

キーワード 立体表示，立体ディスプレイ，超臨場感，ホログラフィー，超多眼

1 ま え が き

将来の超臨場感技術において，立体映像が果たす役割は大きい．超臨場感技術が何かは，本特集1章「超臨場感技術の概要」ですでに説明があったと思うが，そこでは現在実用化されている技術を超えた究極の立体表示技術が用いられるであろう．本稿では，このような将来の立体表示技術を中心に紹介する．

超臨場感技術に用いられる立体表示に必要なと考えられる要件としては，

- (1) 裸眼表示
- (2) 安全性（視覚疲労などの人体への悪影響がない）
- (3) 高精細
- (4) 多人数
- (5) 大画面

が挙げられる．デバイス技術の限界から，現状ですべてを満たす立体表示技術は存在しない．本稿では，デバイス開発の課題も含めて，将来の立体表示技術について説明する．

2 ホログラフィ

ホログラフィ¹⁾は，物体からの波面を再生するため，現在考えられている立体表示方式のなかで最も理想的な立体表示方式と言われている．

電子的なホログラフィ表示の原理を図1に示す．電子ホログラフィで用いられる表示デバイスは，空間光変調器と呼ばれる．表示物体を物体点の集まりと考え，空間光変調器で物体点に集光する球面波を発生することで，立体表示を実現する．空間光変調器としては，2次元表示用の液晶ディスプレイ等と同様に2次元的に並んだピクセル群を持つものが一般的である．

上述のように，ホログラフィは空間に集光する光で物体点を発生するため，人間は物体点に対して目のピント合わせできる．すなわち，図2(a)に示すように，立体像に対し

図1 電子的ホログラフィによる立体表示

図2 波面再生型と光線再生型での目の調節

[†] 東京農工大学 大学院工学研究院

"Basics of Ultra-Realistic Communication Technologies: Three-Dimensional Image" by Yasuhiro Takaki (Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo)

て目のピントが合う。これに対して、現在の立体表示方式では、図2 (b) に示すように、スクリーンから広がる光線で立体像を表示する。光線の広がり、光線の表示角度ピッチと同程度にしないと立体像にモアレが生じる。そのため、目のピントは立体像ではなくスクリーン付近に合い、「調節輻輳矛盾」という問題が生じる。調節とは、目のピント合わせ機能を言い、輻輳とは、両眼の回転角を基に三角測量の原理で奥行きを知覚する機能を言う。光線で立体表示する場合は、輻輳は正しく機能するが、調節は正しく機能しない。この二つの立体知覚の生理的要因の不一致が、立体映像観察時の視覚疲労を引き起こすと言われている。ホログラム表示では、調節が正しく機能するため、このような問題は生じない。

電子的なホログラフィ表示の問題点は、多人数と大画面を実現するのが難しい点にある。光の波面を再現するには、波面の間隔が光の波長であるから、図3に示すように、空間光変調器のピクセルピッチを光の波長程度にする必要がある。サンプリング定理からピクセルピッチで再現できる球面波の広がり角が決まり、球面波の広がり角で立体像が見える視域角が決まる。ピクセルピッチを p で、光の波長を λ で表すと、視域角は $2\sin^{-1}(\lambda/2p)$ で与えられる。可視光の波長は $0.4\sim0.8\mu\text{m}$ であるから、実用的な視域を得るためには、 $1\mu\text{m}$ 以下のピクセルピッチが必要になる。また、ホログラム表示では、2次元ディスプレイのように画面サイズに比例してピクセルピッチを拡大することができないため、実用的な画面サイズを得るには、莫大なピクセル数が必要になる。

電子ホログラフィの実現では、視域の拡大と画面サイズの拡大が最大の課題である。その解決法が世界中で研究されている。音響光学素子を用いる方法²⁾、複数の空間光変調器を用いる方法^{3)~5)}、時分割表示を用いる方法⁶⁾、アイトラッキングを用いる方法⁸⁾、解像度変換技術を用いる方

法⁸⁾、水平走査を用いる方法⁹⁾、光書込み材料を用いる方法¹⁰⁾などが提案されている。

また、電子ホログラフィには、スペックルによる画質劣化や膨大な情報量などの課題もある。

3 波面再生と光線再生

裸眼立体表示は、波面再生型と光線再生型に分類できる。前者はすでに述べたホログラフィである。後者は多眼表示¹¹⁾やインテグラルイメージング¹²⁾と呼ばれるもので、それぞれ、1次元レンズアレイ(レンチキュラレンズ)や2次元レンズアレイ(フライアイレンズ)を用いて、光線の進行方向を制御する¹³⁾。

波面再生型と光線再生型の違いについて説明する。波面再生型は、すでに述べたように空間に集光点を発生するため、立体像に目のピントが合う。光線再生型では、各光線は、レンズアレイのあるスクリーン面でビーム径が最小になり、スクリーンから離れると光線は広がる。光線のビーム径が最小になる面をスクリーンから離れた距離に設定することもできるが、その前後では光線は広がる。光線再生型ではインコヒーレントな光を用いるため、広がった光線を空間の一点で多数交差させても、ビーム径が小さくなることはない。したがって、ホログラム表示のように、空間の任意の距離にビーム径が最小になる集光点を作り出すことはできない。そのため、後述する超多眼表示を除いては、光線再生型では調節輻輳矛盾が生じる。

また、波面再生型における集光点のビーム径は、理論的には、空間光変調器のピクセルピッチ程度にできる。すなわち、ミクロンオーダーで物体の細部が表現できるため、高精細な立体像が得られる。これに対して、光線再生型では、目のピントはスクリーン前後にあるため、立体像の細部を観察しようとする、レンズアレイのレンズ構造が見える。図4 (a) は光学的ホログラフィ、すなわち、写真技術で作製

図3 電子ホログラフィにおける空間光変調器のピクセルピッチと視域角の関係

図4 波面再生型と光線再生型の再生像の違い（口絵カラー参照）

図5 光線再生型での調節応答の誘起

したホログラムの再生像を示す。図4 (b) は、レンチキュラレンズを用いた多眼式立体ディスプレイの再生像を示す。

光線再生型の優れている点は、波面再生型に比べて、視域と画面サイズを大きくできる点にある。光の偏向に、微細ピクセル構造による光の回折ではなく、レンズによる光の屈折を用いるため、レンズ背面のピクセルの間隔を波長オーダーまで小さくする必要はない。なお、光線再生型では、レンズアレイと組合せる表示デバイスとして液晶パネル等のフラットパネルディスプレイが用いられる。光線再生型でも広い視域を得ることはそれほど容易ではないが、大きな画面サイズは単純に大型のフラットパネルディスプレイを用いればよいので実現は容易である。そのため、現状の裸眼立体ディスプレイには光線再生型が用いられている。

4 超多眼表示

光線再生型で、立体像への目のピント合わせを可能にするのが超多眼表示¹⁴⁾、あるいは、高密度指向性表示¹⁵⁾である。これらは、小さな角度ピッチで光線を高密度に発生することで、図5 (a) に示すように、立体像の1点を通る光線が2本以上同時に目の瞳に入る状態を作り出す。目のピントをスクリーンに合わせると2点以上に分離して見え、立体像にピントを合わせると1点に見える。輻輳と調節が一致すると1点に見える、調節輻輳矛盾が解決される。

ただし、光線のビーム径はスクリーン上で最小であるから、スクリーンに目のピントを合わせると複数のシャープな点が見える。ここで、人間がボケを感じない奥行き範囲は目の被写界深度で与えられ、通常は瞳の大きさでその範囲が決まる。瞳に2本以上の光線が同時に入る状態では、光線の広がりを実質的な瞳となるため、被写界深度は光線の角度ピッチで決まり、その奥行き範囲が拡大する。この拡大された被写界深度内では、光線のボケは知覚されないため、安定的に立体像に対するピント合わせが可能になることが示されている¹⁶⁾。

高密度指向性表示は、上述のように、光線の進行方向を

微小な角度ピッチでサンプリングする。これに対して、超多眼表示は、図5 (b) に示すように、多眼表示の視点数を増やし視点間隔を小さくすることで光線密度を高める。多眼表示では、空間に複数の視点を設定し、レンズアレイの各レンズから各視点に集まる光線群でその視点から立体物を見た視差画像を表示することで、裸眼立体表示を実現する。通常の多眼表示では、視点間隔を両眼間隔、あるいは、その半分程度に設定する。

光線の角度ピッチを小さくし高密度に光線を発生するためには、スクリーンを構成する各レンズに多くのピクセルを対応させる必要がある。そのため、高解像度なフラットパネルディスプレイが必要になるが、光の偏向にレンズを用いるため、必要な解像度はホログラムよりは低い。

超多眼表示や高密度指向性表示の難しさは、従来の多眼表示の10倍程度の画像情報を表示する必要がある点にある。そのため、さまざまな表示システムが提案されている。光源アレイの空間走査¹⁴⁾、マルチプロジェクション方式^{15) 17) 18)}、高精細液晶パネルを用いたレンチキュラ方式^{19) 20)}、ヘッドマウント型²¹⁾などが提案されている。また、時分割表示の利用²²⁾、レンチキュラ方式とマルチプロジェクション方式のハイブリッドな構成方法²³⁾、フラットパネルディスプレイに必要な解像度を低下させる方法²⁴⁾などが研究されている。

超多眼表示や高密度指向性表示では、小さな角度ピッチで光線をサンプリングするため、滑らかな運動視差が得られる。また、微妙な光線変化が再現されるので、光沢感や透明感といった物質のもつ質感再現²⁰⁾も可能になる。

5 大画面表示

スクリーンの大型化は、臨場感の向上に大きな効果をもつ。そのため、大画面かつ多人数で観察できる裸眼立体表示システムが開発されている。

このような表示システムの実現には、現状ではプロジェクタアレイ^{15) 17) 18)}が利用される。プロジェクタアレイを用いた裸眼立体表示システムの構成例を図6に示す。これは、リ

図6 プロジェクタアレイによる大画面立体表示（水平断面図）

図7 立体ディスプレイの利用形態

アプロジェクション型の構成を示している。スクリーンはフレネルレンズ等の大型レンズになっていて、プロジェクタのレンズの像を観察者側の空間に結像する。この結像位置に目を置くと対応するプロジェクタの表示画像が見えるので、この結像位置が多眼表示の視点になる。また、通常はスクリーンに垂直方向の拡散機能を持たせて、垂直方向に視域を拡大する。フロントプロジェクション型の構成は、スクリーンに再帰性反射スクリーン等を用いることで実現できる。

画面の大型化は、通常は観察者数増加の要求を伴う。そのため、大画面化は、視点数増加や視域拡大が必要になる点が難しい。フルHD解像度プロジェクタを63台用いた画面サイズ200インチの大規模な表示システム²⁵⁾の開発が報告されている。

6 利用形態

従来の2次元表示テレビは、垂直表示面を正面から見る利用形態を基本としている。現状の立体ディスプレイもこの形態（図7(a)）を基本とするが、立体表示の場合は、さまざまな利用形態が可能である。

図7(b)に、円筒表示面を全周から観察する利用形態²⁶⁾を示す。表示面の奥に立体表示することで、円筒内部に物体が存在するように表示できる。

図7(c)に、水平表示面を全周から観察する利用形態^{27) 28)}を示す。水平面上側に立体表示すれば、テーブルの上に物が存在するように表示できる。当然、平面下側に立体表示することもできる。

以上のように、立体表示ではさまざまな利用形態が可能であるため、従来の2次元表示では実現できなかった新しい臨場感表現の実現が期待できる。

ただし、垂直表示面に比べて、円筒表示面や水平表示面では、観察距離が短くなる傾向があるため、立体像のボケが問題になる場合がある。

7 水平視差型と水平垂直視差型

立体ディスプレイは、視差の与え方で、水平視差型と水平垂直視差型に分類できる。前者は水平方向にのみ視差を

もち、後者は垂直方向にも視差をもつ。

ホログラフィは、本来は水平垂直視差型として考案された。しかし、白色光再生²⁹⁾や、暗室以外での撮影・記録を可能とする³⁰⁾ために、水平視差型が開発された。電子ホログラフィでも、水平視差型と水平垂直視差型があるが、水平視差型は表示情報量が少ないので、大画面化と広視域化に適している。

光線再生型では、水平視差型は1次元レンズアレイで、水平垂直視差型は2次元レンズアレイで実現される。水平視差型の方が表示する画像情報が圧倒的に少ないので、解像度の高い立体像が得られる。そのため、実用化されている立体ディスプレイは、ほとんどが水平視差型である。

人間の両眼は水平方向に並んでいるので、両眼視差情報は水平視差が支配的で、通常の観察条件では垂直方向の人体移動が小さいことから、立体ディスプレイでは、水平視差型が古くから主流である。現在、商品化されているメガネあり立体テレビも、水平視差型である。垂直視差がないと寝ころんで見ることができないと言われることがあるが、水平視差型を寝ころんで見ると2次元映像が見え、横に動けば運動視差が生じる。水平視差型は、光線を垂直方向に拡散するため、垂直方向の視域はかなり広い。

それでは、垂直視差があることのメリットは何であろうか。水平視差型では、観察位置が奥行き方向に移動すると立体像の縦横比が変化するが、垂直視差型では、正しい縦横比が得られる。水平視差型では、垂直方向に光を拡散させるため立体像のボケが水平垂直で異なるが、水平垂直視差型では等しい。

超臨場感という観点でみると、解像度が高い点で水平視差型が優れていて、垂直方向の画像変化がある点で水平垂直視差型が優れている。

8 むすび

超臨場感技術に必要な立体表示技術は、まだまだ研究開発段階にある。超臨場感技術に必要な立体表示性能は、超臨場感とは何かを含めて、今後、明らかになるであろう。しかし、超臨場感技術で用いられる立体表示技術の大きな

特徴は、単に表示装置の数値的な性能向上を狙うのではなく、人間の存在を重要視し人間を含めた形での研究開発が行われている点にある。このような新しい形の技術開発が、今後の日本の国際競争力強化に繋がると思う。

(2011年2月10日受付)

〔文 献〕

- 1) D. Gabor: "A new microscopic principle", Nature **161**, pp.777-778 (1948)
- 2) P.St. Hilaire, S.A. Benton and M. Lucente: "Synthetic aperture hologram: A novel approach to three-dimensional display", J. Opt. Soc. Am. **9**, pp.1969-1977 (1992)
- 3) K. Maeno, N. Fukaya, O. Nishikawa, K. Sato and T. Honda: "Electro-holographic display Using 15 mega pixels LCD", Proc. SPIE **2652**, pp.15 (1996)
- 4) J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park and B. Lee: "Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators", Opt. Express **16**, pp.12372-12386 (2009)
- 5) T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, R. Oi and T. Kurita: "Viewing-Zone-Angle-Expanded Color Electronic Holography System Using Ultra-High- Definition Liquid-Crystal Displays with Undesirable Light Elimination", J. of Display Tech., to be published
- 6) M. Stanley, et. al.: "100-megapixel computer- generated holographic images from Active Tiling: A dynamic and scalable electro-optic modulator system", SPIE **5005**, pp.247 (2003)
- 7) R. Häussler, A. Schwerdtner, N. Leister: "Large holographic displays as an alternative to stereoscopic displays", SPIE **6803**, pp.68030M-1-9 (2008)
- 8) Y. Takaki and Y. Hayashi: "Increased horizontal viewing zone angle of a hologram by resolution redistribution of a spatial light modulator", Appl. Opt. **47**, pp.D6-D11 (2008)
- 9) Y. Takaki and N. Okada: "Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed SLM", Appl. Opt. **48**, pp.3255-3260 (2009)
- 10) S. Tay, et al.: "An updatable holographic three- dimensional display", Nature **451**, pp.694-698 (2008)
- 11) 大越孝敬: "3次元画像工学", 朝倉書店 (1991)
- 12) M.G. Lippmann: "Epreuves reversibles donnant la sensation du relief", J. de Phys. **7**, pp.821-825 (1908)
- 13) 高木康博: "立体映像とフラットパネル型立体表示技術", 光学, **35**, pp.400-409 (2006)
- 14) T. Honda, et al.: "A display system for natural viewing of 3-D images", Three-dimensional television, video and display technologies, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, pp.461-487 (2002)
- 15) Y. Takaki: "High-Density Directional Display for Generating Natural Three-Dimensional Images", Proc. IEEE **94**, pp.654-663 (2006)
- 16) Y. Takaki and H. Kikuta: "3D Images with Enhanced DOF Produced by 128-Directional Display", 13th International Display Workshops, pp.1909-1912 (2006)
- 17) H. Nakanuma, H. Kamei and Y. Takaki: "Natural 3D display with 128 directional images used for human-engineering evaluation", Proc. SPIE **5664**, pp.28-35 (2005)
- 18) Kikuta and Y. Takaki: "Development of SVGA resolution 128-directional display", Proc. SPIE **6490**, p.U1-8 (2007)
- 19) Y. Takaki: "Thin-type natural three-dimensional display with 72 directional images", Proc. SPIE **5664**, pp.56-63 (2005)
- 20) Y. Takaki and T. Dairiki: "72-directional display having VGA resolution for high-appearance image generation", Proc. SPIE **6055**, 60551H1-8 (2006)
- 21) S.K. Kim, D.W. Kim, Y.M. Kwon and J.Y. Son: "Evaluation of the monocular depth cue in 3D displays", Opt. Express **16**, 21415-21422 (2008)
- 22) 金箱 翼, 高木康博, "時間多重表示モジュールを用いた高密度指向性立体ディスプレイ", 映情学誌, **63**, pp.1133-1138 (2009)
- 23) Y. Takaki and N. Nago: "Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display", Opt. Express **18**, pp.8824-8825 (2010)
- 24) Y. Takaki, Y. Tanaka and J. Nakamura: "Super multi-view display with a lower resolution flat-panel display", Opt. Express, to be published
- 25) 岩澤昭一郎, 矢野澄男, 河北真宏, 境雅久, 配野泰行, 佐藤正人, 安藤広志: "プロジェクタレイ方式裸眼立体ディスプレイの試作", 映情技報, **34**, 43, pp.29-32 (2010)
- 26) T. Yendo et al.: "The Seelinder: Cylindrical 3D display viewable from 360 degrees", J. of Visual Communication and Image Representation **21**, pp.586-594 (2010)
- 27) 吉田俊介, 矢野澄男, 安藤広志: "周囲から観察可能な光線野再生型テーブル様裸眼立体ディスプレイ", 3次元画像コンファレンス2010, pp.51-54 (2010)
- 28) H. Horimai, D. Horimai, T. Kousketsu, P.B. Lim and M. Inoue: "Full-Color 3D Display System with 360 Degree Horizontal Viewing Angle", 3D映像, **24**, 2, pp.7-10 (2010), <http://www.holymine3d.com/prod/prod03.html>
- 29) S.A. Benton: "Hologram reconstruction with extended incoherent sources", J. Opt. Soc. Am. **59**, pp.1545-1546 (1969)
- 30) J.T. McCrickerd and N. George: "Holographic stereogram from sequential component photographs", Appl. Phys. Lett. **12**, pp.10-12 (1986)

高木 康博 (たかき やすひろ) 1986年, 早稲田大学理工学部卒業。1988年, 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。1992年, 同研究科博士後期課程修了。1991年, 同大学助手。1994年, 日本大学文理学部専任講師。1998年, 同助教授。2000年, 東京農工大学工学部助教授(現在, 准教授)。主に, 立体映像技術に関する研究に従事。博士(工学)。正会員。