ステレオ画像投射方式の繰返し複数視点ホログラムスクリーンディスプレイ

Recursive Multi-view Stereoscopic Display Using Hologram Screen

岡本正昭[†], 魏 臻^{††}, 正会員 志水英二^{††}
Masaaki Okamoto[†], Zhen Wei^{††} and Eiji Shimizu^{††}

Abstract This paper discusses multi-view technology for a projection-type stereoscopic display. The multi-focal screen of this display employs the diffractive function of a Holographic Optical Element (HOE). For three dimensional (3D) displays to be viewable without special glasses, multi-view is very important, and this requirement is difficult to meet because the wide viewing area conflicts with the separation of viewing area between the right and left eyes. Holography is suitable for developing such an optical device. The display is a recursive multi-view stereoscopic display that uses multiple mirrored focal point HOEs. The advantage of this display is that it doesn't require mixing of stereoscopic images. The configuration is very simple because of the type of projection. The stereoscopic images from two cameras can be directly observed without editing them. The display lets more than one observer view the same 3D image at the same time.

キーワード：3次元ディスプレイ、多視点ディスプレイ、ステレオディスプレイ、ホログラムスクリーン、回折格子

1. ま え が き

3次元物体から発せられる光の波面を忠実に再生できるホログラフィは、上下左右あらゆる方向に適正な視差を有し、特殊メガネを必要としない非装着型の理想的な3次元表示技術と言われる¹⁾²⁾。しかし、光学ホログラフィは静止画に限られ、電子ホログラフィによる動画表示³⁾⁴⁾は、サイズやコスト面で未だ商用レベルに達しない⁵⁾。現実には、非装着型の3次元ディスプレイも装着型と同様に、水平方向の視差に基づく2眼ステレオグラム方式を中心に開発されている。しかし、観察者と画面の位置関係が固定的でない非装着型では、視域に自由度があり観察位置が制約されない多視点ディスプレイが重要になる。そこで画素単位に光線方向を制御する、画素分配方式の多視点ディスプレイが研究されている。代表例にレンチキュラ方式¹⁾やホログラフィック光学素子(HOE)の回折機能を利用した方式⁶⁾⁷⁾がある。ところが、画素分配方式は視点数の増加に反比例して、解像度が減少する本質的な弱点を抱えている。

複数プロジェクタで視差の異なる多数の原画を同一画面上に重ね合せた後、原画毎に異なる方向に再分配する投射方式の多視点ディスプレイでは、解像度減少の問題はない。Newswangerは視点数だけ多重記録したHOEスクリーンを画面に使う方法を提案している⁸⁾。しかし、HOEの多重記録にともなう、回折効率低下とクロストークによるゴースト像発生という新たな問題がある。著者らは、多重記録にともなう問題解決には、1回記録で多重再生する1焦点HOEが有効であることを示した⁹⁾¹⁰⁾。HOEに投射する複数の照明光角度を記録時の参照光角度から少しずつ変移させると、各照明光による再生光が記録時の物体光と少しずつ異なる方向に独立して回折するレンズ類似の特性を利用すれば、多重記録が不要になる。

一方、画素分配方式も投射方式も、視点数が増えるとも必要原画数も増えて、原画撮影装置や表示装置の構成が複雑になりコスト増を招き、実用面で問題になる。ホログラフィのような完全な連続多視点表示が望まれるケースもあるが、実用面では特徴的な数視点、あるいは2眼ステレオの立体視で充分という場合も少なくない。それでも立体表示を長時間多用する現場では、観察位置の自由度は欠かせない。観察位置の数を減らさずに、視差画像数のみを減らした簡易な複数視点ディスプレイ研究の意義がここにある。同一の2眼ステレオ画像を複数の位置で観察できる3次元ディスプレイは、実用的な非装着型ディスプレイの1つとして価値が有ると考えられる。

著者らは、2台のプロジェクタを使い1組の左右視差画像

2002年4月15日受付, 2002年7月3日最終受付, 2002年9月6日採録

[†]財団法人イメージ情報科学研究所

(〒559-0034 大阪府住之江区南港北1-14-16, WTC-18F, M-Box : 114, TEL 06-6616-5008)

^{††}大阪市立大学 工学部

(〒558-0022 大阪府住吉区杉本3-3-138, TEL 06-6605-2678)

[†]Labs. of Image Information Science and Technology

(WTC-18F, M-Box : 114, 1-14-16, Nanko-kita Suminoe-ku, Osaka, 559-0034, Japan)

^{††}Faculty of Engineering, Osaka City University

(3-3-138, Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-0022, Japan)

をHOEスクリーンに投射して、HOEの回折により視差画像のペアを横方向に繰り返し、交互に複数分配提供するディスプレイを考案した。視差画像数が2、視点数が4以上の偶数となる3次元ディスプレイである。以下では、従来の多視点ディスプレイと区別して、本装置を投射方式の繰返し複数視点ディスプレイと呼ぶ。

パララックスバリアやレンチキュラなどを使って、画素分配方式でも繰返し複数視点ディスプレイを構成できるが、表示の際に左右の視差画像を混合する前処理が必要で、左右2台のカメラ画像を直接プロジェクタでスクリーン投影できる投射方式の方が簡便さで有利である。

本稿では、1枚のHOEと2台のプロジェクタおよび2枚の原画を用意するだけで、メガネなしでかつ複数位置で立体視可能な、2眼ステレオ画像投射方式の繰返し複数視点HOEスクリーンディスプレイについて報告する。最初に、1焦点HOEの1回記録・多重再生による立体視の原理を説明する。次に、対面反射鏡を使う鏡映複焦点HOEの製作方法を述べる。そして、1焦点HOEの立体視原理を鏡映複焦点HOEに拡張した繰返し複数視点立体視を説明する。さらに鏡映複焦点HOEを組合せて、画面サイズの大きいディスプレイが構成できることを示す。最後に、試作ディスプレイの概要紹介と考察検討を行う。

2. 1焦点HOEの立体視原理

HOEを用いた投射方式の多視点ディスプレイの原理を説明する。本論文で対象とするHOEは、すべて透過型でかつ体積型のホログラムとする。フィルム厚さ数 μm 程度の市販ホログラム記録材料を使う場合は、反射型よりも透過型の方が回折光が明るく、かつ体積型ホログラムでないと高次回折が生じて回折光を特定の方向に集光させるのが難しいからである。

模式図1において、プロジェクタAからHOEスクリーンに投射された原画像の光は、HOEの照明光となり指向性のある回折光を生じて観察視点aに集光する。プロジェクタB、

図1 多視点ディスプレイの構成
Layout of multi-view display.

図2 1焦点HOEの多視点化
Multi-viewing of one focal point HOE.
(a) Recording, (b) Reconstruction.

C、Dの照明光もそれぞれb、c、dに回折光を集光する。そこでaに左目bに右目を置けば、AとBの原画の視差による立体視が可能になる。目の位置を順に横に移動すると多視点の立体視になる。このような回折機能を提供する多視点HOEは、Newschwangerのように観察位置の方向の数だけ多重記録して製作するのが一般的である⁸⁾。すなわち、参照光と物体光の焦点を多重度の数だけ形成して、多視点HOE=多焦点HOEとする。しかし、多重度が増えると回折効率が低下し、クロストーク像を生じる¹¹⁾。

他方、1焦点HOEは図2(a)のように点 R_0 に収束する参照光と点 O_0 から発する物体光との干渉縞を、1回だけ記録材料Hに記録して作る。図2は光学系を上から見た平面図で、実際の参照光の光軸は上下に傾斜している(体積型HOEでは 30° 以上の傾斜角が必要である¹¹⁾)。

Hを再現して参照光側から照明する共役再生により、物体光側に回折光を集光させる。Champagneによれば、ホログラムの波面再生特性からHOE中心と照明光源の距離が一定ならば、回折光の集光距離も一定になる¹²⁾。図2(b)では、HOE中心からの距離が焦点 R_0 に等しい点 R_R から照明光を発すれば、回折光も焦点 O_0 と等しい距離の点 O_R に集光する。同時に点 R_L からも照明光を発すれば、点 O_L に回折光が集光する。 R_R からの光を O_R で、 R_L からの光を O_L で観察できる。最初から(O_R, R_R)と(O_L, R_L)の光の組合せで、2重記録した2焦点HOE類似の2視点HOE機能が、1焦点HOEでも実現できる。3視点以上も同様である。

ただ1焦点HOEは、焦点 R_0 以外から照明光を投射するので、体積型HOEのBragg条件から外れるため、 R_0 からの変移角度が増えると、回折効率の低下や再生波長の変化が懸念される。しかし、本研究のHOEは透過型なので、通常200nm以上の波長選択性と 10° 以上の角度選択性が確保されるため、多少の角度変移は影響しない¹¹⁾。むしろ、単一記録で干渉縞が揃うので、散乱光の発生が少なく明るいことと、多重記録の干渉縞混在に起因するクロストークがないことのメリットが大きい。

図3 回折角の変移

Transition of diffractive angle.

(a) Case of bragg angle, (b) Case of quasi-bragg angle.

図4 鏡映複焦点HOE

Multiple mirrored focal points HOE.

(a) Recording, (b) Reconstruction.

1焦点HOEを多視点HOEとして使えるように、照明光と回折光のBragg角からの変移量(図2(b)では $\Delta\phi_R$, $\Delta\phi_L$, $\Delta\psi_R$, $\Delta\psi_L$ に相当)の関係を調べておく。Bragg回折は、図3(a)に示すように、体積型HOE内部の干渉縞における鏡面反射則と等位相干渉則とから導かれる^{1)13)~15)}。

波長 λ とHOE内部の干渉縞間隔 Λ の関係は、Bragg条件

$$\lambda = 2n\Lambda \sin(\theta) \quad (1)$$

となる。 n はHOE内部の屈折率、 θ はBragg角を表す。

このHOEをBragg角 θ の近傍の入射角 ϕ で照明したときに回折光の出射角を ψ とする。回折条件は、図3(b)に示すように、点Aで反射した光の波面が点Bにおいて照明光の波面と位相が一致する場合に成立して¹⁶⁾、

$$\lambda = n\Lambda \sin(\phi) + n\Lambda \sin(\psi) \quad (2)$$

となる。式(1)、式(2)両式で

$$\phi = \theta - \Delta\phi, \quad \psi = \theta + \Delta\psi$$

とすると、

$$2 \sin(\theta) = \sin(\theta - \Delta\phi) + \sin(\theta + \Delta\psi) \quad (3)$$

の関係が成立し、照明光のBragg角からのずれが少ないと、

$$\Delta\phi = \Delta\psi \quad (4)$$

になる。すなわち、目標の視点が焦点方向から変移している角度 $\Delta\psi$ に等しい角度 $\Delta\phi$ で、1焦点HOEに対して原画を投射すれば良い。同様に視点の数だけ対応する原画を投射すると、2視点を含め多視点の立体視が可能になる。

ただし、図3はHOE内部の議論で、実際には屈折率を考えてSnellの法則で空気中に変換するため、図2の場合では

現実の照明光と回折光の角度変移量は多少異なる。

3. 鏡映複焦点HOEの製作

1焦点HOEは、Bragg角 θ の近傍で照明光角度 ϕ を逐次変化させて視点数を増やせるが、角度変移量 $\Delta\phi$ をHOEの角度選択性の幅以上に大きくできない¹¹⁾。1焦点HOEよりも回折方向角度を大きくして、かつ複数の焦点位置に画像を提供できるように、単一照明で横方向に複数の回折光焦点を形成できる鏡映複焦点HOEを検討する。

鏡映複焦点HOEは、池上により提案された対面する平面鏡を使ってホログラムの視域を拡大する方法¹⁷⁾を、HOEの焦点の複数化に応用したものである¹⁸⁾¹⁹⁾。

図4(a)は鏡映複焦点HOEの記録光学系である。参照光は平行光とし焦点距離 R_0 を無限大にする。最終的に複数のHOEを横に並べて組合せるので、HOE全体として照明光焦点を共通化し、結像条件を統一するためである。点 O_0 は実物体光源である。 O_0 を挟んで鏡 M_1 , M_2 を平行に対面して置くと、 O_0 の無限繰返し像 O_1 , O_2 , O_3 , ...が並ぶ。実物体光源 O_0 が拡散光源ならば、 O_1 , O_2 , O_3 , ...からの光もHに届きすべて物体光として作用する。

現像後のHに対し鏡 M_1 , M_2 を取り除き、図4(b)のように R_0 の方向から平行照明光で共役再生する。記録時の物体光源群の位置に回折光が集光し、 O_1 , O_2 , O_3 , ...と無限個の焦点群が形成され、回折光の方向角が拡大する。照明光 R_0 として2次元画像を投射すると O_1 , O_2 , O_3 , ...の位置で同一

の映像が観察できる。

鏡映複焦点HOEは、いずれの回折光焦点もBragg条件を満足して明るいが、1参照光/多物体光の1回記録がコヒーレント重複記録となり、1焦点HOEよりも回折効率が物体光源数に反比例して低下せざるをえない⁵⁾。しかし、Newswangerの多参照光/多物体光の多焦点HOEのように、インコヒーレント重複記録で物体光源数の2乗に反比例する効率減少よりも、低下レベルはずっと少ない。

4. 繰返し複数視点立体視

鏡映複焦点HOEに対して、2章で述べた1焦点HOEの2眼ステレオ視のように、Bragg角近傍で2方向から左右の視差画像を投射すると、視差画像を横方向に交互に複数分配提供する繰返し複数視点ディスプレイができる。

図5(a)のように同時に R_R と R_L の方向から平行光で鏡映複焦点HOEを共役照明する。 R_R による O_{*R} と R_L による O_{*L} が直線状に交互に連続して回折光の集光点が配列される。ここで添字の*には0, 1, 2, ...の数字が順に入る。以下同様とする。2つの照明光 R_R , R_L として、右左の異なる視差画像(図では黒四角と白四角)を投射すれば、任意の O_{*R} と O_{*L} の組合せペアの位置(図では黒丸と白丸)で、2眼ステレオ視が可能になる。

しかし、撮影時の物体光源群が円周配置でなく横方向に直線状なので、HOE中心と各焦点 O_* の距離が異なることと、HOE内外の屈折率差により、回折光群の横方向変移量が均一でない。HOEの中央付近と脇の方では、回折光 O_{*R} と O_{*L} のペアの瞳間距離 d_* が異なり立体視に影響する。

そこで、各回折光の焦点 O_* の方向角の違いが瞳間距離 d_* に与える影響を調べる。実物体光源に対応する回折光 O_0 の焦点距離を r_0 (一定値)とする。空気中で焦点の方向角が β_* となる回折光 O_* の集光点の角度変移量を $\Delta\beta_*$ とする。部分拡大図5(b)から、焦点間距離 $(O_* - O_0)$ は、

$$O_* - O_0 = r_0 \tan(\beta_*) \quad (5)$$

となる。HOE中心Pを中心として焦点距離 PO_* を半径とす

る円が、 PO_{*R} の延長と交わる点を Q_R 、 PO_{*L} と交わる点を Q_L とする。 O_*Q_R および O_*Q_L は $\Delta\beta_*$ が小さいので円弧で近似できて $(PO_*)(\Delta\beta_*)$ となる。 Q_RQ_L も円弧で近似すれば、 Q_RQ_L と $O_{*R}O_{*L}$ の交角は β_* で近似できる。したがって、 $O_{*R}O_{*L}$ の距離 d_* は $(O_*Q_R)/\cos(\beta_*)$ の2倍で近似され、

$$\begin{aligned} d_* &= 2(PO_*)(\Delta\beta_*)/\cos(\beta_*) \\ &= 2(r_0/\cos(\beta_*))(\Delta\beta_*)/\cos(\beta_*) \\ &= 2r_0(\Delta\beta_*)/\cos^2(\beta_*) \end{aligned} \quad (6)$$

を得る。 β_* に対するHOE内部の角度を γ_* とし、 $\Delta\beta_*$ に対して $\Delta\gamma_*$ とすると、屈折率を n としたSnellの法則、

$$\sin(\beta_*) = n \sin(\gamma_*) \quad (7)$$

を微分して、

$$(\Delta\beta_*)\cos(\beta_*) = n(\Delta\gamma_*)\cos(\gamma_*) \quad (8)$$

が得られる。式(8)を、式(6)式に代入し、HOE内部の焦点の変移量に関して式(4)と等価な $\Delta\gamma_* = \Delta\gamma_0$ を考慮すると、

$$d_* = (2r_0n(\Delta\gamma_0)\cos(\gamma_*)/\cos^3(\beta_*)) \quad (9)$$

となる。HOE中央部で

$$d_0 = 2r_0(\Delta\beta_0) = 2r_0n(\Delta\gamma_0)$$

なので

$$d_* = d_0 \cos(\gamma_*)/\cos^3(\beta_*) \quad (10)$$

となり、式(7)から d_* は最終的に β_* に依存する関数となる。 $r_0 = 35\text{cm}$ 、 $d_0 = 6\text{cm}$ とし、 $n = 1.63$ の場合^{1) 11)}について、 β_* と $(O_* - O_0)$ および d_* の関係を図6に示す。

図6で、方向角 β_* が 31° で瞳間距離 d_* が1.5倍の9cmに達するので、片側 30° の範囲内で設計すれば隣接焦点による集光点相互の重なり合いを回避し易い。 30° の方向は $r_0 = 35\text{cm}$ の場合には、焦点間距離 $(O_* - O_0) = 20\text{cm}$ に相当し、左右両側あわせて40cmの観察域となる。

図6において 30° の方向で瞳間距離の誤差 $(d_* - d_0)$ は2.8cmになる。そこで、記録時の物体光を拡散面光源にし、各回折光の集光エリアを点でなく面に変えて誤差分を吸収する。面状の集光エリアを観察瞳枠と呼ぶ。観察瞳枠は増

(a) 2眼ステレオ表示

(b) HOE境界部の拡大図

図5 鏡映複焦点HOEの立体視

Stereoscopic view of multiple mirrored focal points HOE.

(a) Recursive stereoscopic view, (b) Refraction on the boundary of HOE.

図7 HOEのサイズ条件
Condition of HOE size.

(a) Recording, (b) Reconstruction.

図6 焦点間距離と瞳間距離の変化
Variation of inter-focus and inter-pupil distance.

図8 鏡映複焦点HOEの組合せ
Combination of mirrored focal points HOEs.

大する瞳間距離をカバーする以外に、観察者側の両眼距離の個人差の吸収効果や、観察者が回折光の集光エリアに瞳を位置合わせする探索余裕効果も兼ねることができる。

観察瞳孔を設けることで、左右2枚の視差画像を鏡映複焦点HOEに投射した場合、片側30°(両側60°)の観察域で瞳間距離が保たれて繰返し複数視点立体視が可能になる。

5. HOEスクリーンサイズの拡大

観察瞳孔と鏡映複焦点HOEのサイズの関係を検討する。観察瞳孔の幅を x 、HOEの記録材料の幅(対面反射鏡間の距離)を y とした場合の配置を図7に示す。図7(a)は記録時、図7(b)は再生時である。再生時の u は左右のペアとなる観察瞳孔 O_{*R} と O_{*L} の間の隙間を表し、 v は隣のペアの観察瞳孔間の隙間を表す。 w は観察者の両眼距離を表し、設計の便宜上 $w=6\text{cm}$ とする。

目を横に移動した時、観察不可領域が少ない方が望ましいので $u=v=0$ として考える。必然的に $y=2x$ となる。 x が w を越えると両眼に同一映像が届く場合が発生するので、 x の上限は6cmとなる。 $2x$ が w に達しない場合も、ステレオ画像が両眼に分配できなくなるので、 x の下限は w の半分3cmとなる。すなわち $3\text{cm} \leq x \leq 6\text{cm}$ 、 $6\text{cm} \leq y \leq 12\text{cm}$ となる。この範囲の x で瞳間距離の誤差($d_* - d_0$)=2.8cmも吸収できる。以上から観察瞳孔を連続的に配置するには、HOE

も観察瞳孔もサイズ範囲が制限されることがわかる。

そこで、幅が限られたHOEを複数横に並べて、図8のように組合せスクリーンにする。図は H^a 、 H^b 、 H^c 3枚の組合せである。3枚組のHOEに対して、図5(a)と同様に2方向から平行照明光を投射すると、各HOEの回折光の集光点が規則的にシフトした形で重なり合う。

例えば、図の中央の右目相当位置では、 H^a の O_{2R}^a 、 H^b の O_{0R}^b 、 H^c の O_{1R}^c の集光点が重なるので、その位置の観察瞳孔を通してHOE3枚分の右目画像を見ることができる。そこで、プロジェクタから H^a 、 H^b 、 H^c に図のようにそれぞれA、B、Cの文字を投影すれば、観察瞳孔を通して一続きのABCの文字列を観察できる。左目についても同様で、 H^a の O_{2L}^a 、 H^b の O_{0L}^b 、 H^c の O_{1L}^c の集光点が重なる観察瞳孔を通して、左目用の文字列abcを観察できる。他の観察瞳孔も同様で、右目用ではABCの文字列が、左目用ではabcの文字列が観察できる。文字列の代わりに左右の視差画像を投射すれば、鏡映複焦点HOEを複数横に並べた大画面の繰返し複数視点ディスプレイになる。

6. 試作実験と考察

6.1 試作実験

試作した繰返し複数視点ディスプレイの概要を図9に示す。同じ性能の液晶プロジェクタを2台用意できなかった

図9 繰返し複数視点ディスプレイの構成
Layout of recursive multi-view display.

図10 繰返し複数視点ディスプレイの例
Example of recursive multi-view display.

ので、原画2枚組を1台のプロジェクタから投射し、第1反射鏡で左右の原画を分離、第2反射鏡でHOEへの投射方向を調整するようにした。原画サイズが小さくなり解像度が低下するが、装置の機能確認には充分である。

HOEスクリーンは、図7と同様に5つの焦点数を持つ鏡映複焦点HOE ($y=10\text{cm}$) を図8のように3枚組みにして縦 $20\text{cm} \times$ 横 30cm とした。したがって、2眼ステレオで観察可能な位置は図9のように3カ所できる。照明光総距離は 200cm で、液晶プロジェクタと第1反射鏡間 40cm 、第1反射鏡と第2反射鏡間 60cm 、第2反射鏡とHOE中心間 100cm である。照明光のHOEへの投射角は 45° である。回折光の観察距離は 35cm である。観察者の両眼距離 $w=6\text{cm}$ とし、観察瞳孔の幅 $x=4\text{cm}$ に設定した。観察瞳孔相互の隙間は $u=2\text{cm}$ 、 $v=0\text{cm}$ である。HOE記録時のレーザ波長が 532nm なので、回折光からは照明光よりも緑の感度の強い映像が提供される。

図10は試作装置全体の写真である。写真の上部がHOEスクリーンで、原画投射用の液晶プロジェクタと原画の左右

図11 観察瞳孔の分布
Distribution of viewing pupil frames.

分離用のミラー群が下部に見える。図11はHOEスクリーン手前の観察位置付近に白板を置き、HOEに関して反対のプロジェクタ側から観察瞳孔となる、回折光の集光エリアの分布状況を撮影した写真である。

図11の6カ所の観察瞳孔にカメラを据えて、HOEスクリーン上の映像を撮影した写真を図12に示す。図12(a)と図12(d)が左側の観察瞳孔のペア、図12(b)と図12(e)が中央の観察瞳孔のペア、図12(c)と図12(f)が右側の観察瞳孔のペアの視差画像の映像である。撮影する方向により画面の端までの距離が異なるので、台形状の歪みが出て各ペアの視差画像が違ってくるように見えるが、いずれも同じ照明光による同じ視差画像のペアである。3枚のHOE間で製作時の品質ムラが多少あるが、いずれの観察瞳孔からもスクリーン全体の映像が観察できている。原画サイズによる解像度の問題は残るが、プロジェクタを2台にすれば改善可能である。

6.2 結果の考察

繰返し複数視点HOEスクリーンディスプレイの開発結果について考察する。以下、(1)、(2)で立体映像の品質、(3)、(4)でHOE製作技術の改良、(5)、(6)で現行技術での性能限界、(7)、(8)で残された課題と解決法の提案を述べる。

(1) 視角の変化

2眼ステレオ画像を用いて繰返し複数視点を形成する立体表示では、通常、画面の正面位置だけが撮影時のカメラの方向と観察者の視線の方向(視角)が一致して正確な立体視になる。観察位置を横に移動すると視角が変化する。本方式でも、図8において中央2列の観察瞳孔のペアの位置では視角が正しいが、左側2列のペアや、右側2列のペアでは視角が外れている。視角が外れると図12のように画面両端までの距離差による台形的な変化と、実質的な画面幅(画角)の縮小によるアスペクト比の変化を生じる。

しかし、視角が外れても左右の視差画像の融像による立体視は可能で、観察対象の立体像が見る方向で形状変化する印象は受けにくい。これは、見え方が変化してもスクリー

(a) 左側左目用

(d) 左側右目用

(b) 中央左目用

(e) 中央右目用

(c) 右側左目用

(f) 右側右目用

図12 HOEスクリーン映像

Images on HOE screen.

(a) Left view at left side, (b) Left view at center, (c) Left view at right side, (d) Right view at left side, (e) Right view at center, (f) Right view at right side.

ンそのものは変化していないという経験的知識が強く影響しているためと考えられる。通常、2次元ディスプレイを斜めから見た時に、画像の歪みを意識しないのと同様である。

ただし、観察しながら目を横に移動する場合に、立体像も同じ方向に回転して追いかけてくるように見えるのは、日常の立体視で経験しない現象なので多少違和感を覚える。

(2) 投影画像歪み

本装置のように、プロジェクタから原画をHOEスクリーンに投射する方式では、投射方向がHOEの法線に一致しないことに起因する上下伸張歪み、台形歪み、ねじれ歪みなどがある^{9) 10)}。実験では、投射する原画に逆歪み補正編集をした。最近の高機能プロジェクタでは自動的に補正できるものもあり、カメラ入力画像を編集なしに直接投射する際のネックにはならないと思われる。

(3) 観察瞳枠の構造

HOEを正面以外の方向から観察する時、観察瞳枠を平板

で作ると、視線が斜めになるほど枠幅の実効サイズが狭まり、目の位置合わせが難しい。円筒状の拡散板曲面を物体光源に用いて、回折光の集光エリアの幅がどの方向でも円筒の直径分確保されるようにして、観察を容易にした。

(4) 回折光焦点数の制限

図6で瞳間距離 d_* の変化が少ないのは 30° までで、それから外れる領域は立体視が難しく回折光が無駄である。しかも、鏡映複焦点HOEのようにコヒーレント重複記録する場合、物体光源数が増えるのに反比例して回折効率が低下する⁵⁾。対策として、遮蔽板を使い撮影時に記録する物体光源の数を減らし、回折光焦点数を制限した。

図7(a)において、対面反射鏡 M_1 , M_2 の表面の I_1 , I_2 の位置に遮蔽板を置く。遮蔽板のH側の先端の位置は、Hの方から M_1 , M_2 の間を覗いたときに、ちょうど必要数の物体光源像 O_0 , O_1 , $\dots$, O_* だけが、遮蔽板の像 I_1 , I_2 , I_3 , $\dots$ に隠れないで見える位置とする。これで回折光焦点が有効な数に

制限され、回折効率が改善される。

(5) 画面サイズの限界

HOEスクリーンを組合せて画面拡大する場合でも、画面の片側の端の前方観察位置から、画面の他方の端が見える視角に限界があり、4章の片側30°の回折方向角がほぼ対応する。実際の画面サイズの幅は、視角とともに観察距離で決まるが、観察距離は対面反射鏡の幅に依存する。

縦方向についても画面サイズは対面反射鏡の辺長に依存する。ムラのない干渉縞の記録には高価な表面反射鏡が必要で大型化が難しい。現実的な画面サイズの限界は縦横数十cm程度となる。

(6) 観察位置の数

観察位置の数は、組合せるHOEの枚数に対応する。HOEの横幅が $6\text{cm} \leq y \leq 12\text{cm}$ で、画面全体の横幅が試作装置の30cmから倍の60cm程度までとすると、3~10箇所の観察位置(観察瞳枠の数はその倍)が提供可能になる。

(7) HOEスクリーンの完全カラー化

試作機では、記録波長532nmに依存して緑がかった映像となった。RGB3本のレーザを使ってHOEを記録すれば完全にカラー対応できる。また、文献20) 21)によれば単一のレーザを用いてカラー化するのも可能である。基本的要点は、レーザ3本の場合は、式(1)のBragg角 θ を固定して、記録すべき干渉縞間隔 Λ に応じて記録波長 λ を変更するのに対して、レーザ1本の場合は記録波長 λ を固定してBragg角 θ を変更してHOEを記録することにある。

(8) 逆視現象

本方式のような繰り返し複数視点ディスプレイは、目の位置によっては両眼に入る映像が左右逆転する逆視現象が存在する。図7(b)の隙間 u, v を調整して、提供する視差画像が逆になる場所では、片眼しか見えないようにして防止するのも便法となる。

7. む す び

鏡映複焦点HOEスクリーンを組合せた、2眼ステレオ画像投射方式の繰返し複数視点ディスプレイを開発した。

鏡映複焦点HOEは、入射光と出射光の関係が1対多になり、複数箇所に同一画像を提供できる特徴がある。1焦点HOEの1回記録・多重再生による立体視の原理を、鏡映複焦点HOEに拡張して2重再生を行い、左右の視差画像を横方向に繰り返し、交互に複数提供する仕組みを実現した。観察位置をほぼ連続的に配置するには、1枚の鏡映複焦点HOEのサイズに制約があるため、HOEを複数横に並べて組合せて大画面化する方法を考案した。

投射方式の繰返し複数視点ディスプレイは、2枚の視差画像を直接利用して特殊メガネなしの立体表示が実現できる特徴を備えている。同一映像が複数位置に提供されるので、同時に少人数の人が同じ立体像を観察することも可能である。

最終的には、2台のカメラと2台のプロジェクタおよび遠

隔通信を使って、簡易なスタイルで使える非装着型の繰返し複数視点ディスプレイに仕上げたいと考えている。

〔文 献〕

- 1) 大越孝敬：“3次元画像工学”，朝倉書店（1991）
- 2) 辻内順平編著：“ホログラフィックディスプレイ”，産業図書（1990）
- 3) J. S. Kollin, S. A. Benton and M. L. Jepsen: “Real-Time Display of 3-D Computed Holograms by Scanning the Image of an Acousto-Optic Modulator”, Holographic Optics II, SPIE 1136, pp. 178-185 (1989)
- 4) N. Hashimoto, K. Hoshino and S. Morokawa: “Improved Real-Time Holography System with LCDs”, Practical Holography VI, SPIE 1667, pp. 2-7 (1992)
- 5) 辻内順平：“ホログラフイー”，裳華房（1997）
- 6) J. H. Kulick, S. T. Kowel, G. P. Nordin, A. Parker, R. Lindquist, P. Nasiatka and M. Jones: “ICVision - a VLSI - based Diffractive Display of Holographic Stereograms”, Practical Holography VIII, SPIE 2176, pp. 2-11 (1994)
- 7) T. Toda, S. Takahashi and F. Iwata: “3D Video System using Grating Image”, Practical Holography IX, SPIE 2406, pp. 191-198 (1995)
- 8) C. Newswanger: “Real Time Autostereoscopic Displays Using Holographic Diffusers”, U. S. Patent 4,799,739, 24 (Jan. 1989)
- 9) 岡本, 安東, 山崎, 志水: “1焦点ホログラムを利用した大型フルカラー多眼3次元表示装置”, 3D Image Conference '99, pp. 99-104 (1999)
- 10) 岡本, 志水: “ホログラムスクリーン大画面カラー立体表示”, 高臨場感ディスプレイフォーラム'99, 映情学技報23, 70, pp. 37-42 (1999)
- 11) 久保田敏弘: “ホログラフィ入門-原理と実際”, 朝倉書店 (1995)
- 12) E. B. Champagne: “Nonparaxial Imaging, Magnification and Aberration Properties in Holography”, J. Opt. Soc. Am., 57, 1, pp. 51-55 (1967)
- 13) W. L. Bragg: “A New Type of X-Ray Microscope”, Nature, 143, p.678 (1939)
- 14) W. L. Bragg: “The X-Ray Microscope”, Nature, 149, pp. 470-471 (1942)
- 15) E. G. Ramberg: “The Hologram - Properties and Applications”, RCA Rev., 27, pp. 467-499 (1966)
- 16) G. Saxby: “Practical Holography”, Second Edition, Prentice Hall (1994)
- 17) 池上: “レインボウ・ホログラムの視域拡大”, ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報, 3, pp. 2-4 (1982)
- 18) M. Okamoto, K. Komatsu, I. Nakamura, T. Kubota and E. Shimizu: “Hologram Fluctuating in a Kaleidoscope”, Sixth International Symposium on Display Holography, SPIE 3358, pp. 225-231 (1997)
- 19) 魏, 岡本, 志水: “多焦点ホログラムによる交互連続視点ステレオディスプレイ”, 3D Image Conference 2001, pp. 133-136 (2001)
- 20) 岡本, 安東, 山崎, 志水: “ブラッグ条件を満足するアクロマチックホログラフィ”, 3D Image Conference '99, pp. 287-292 (1999)
- 21) M. Okamoto, T. Ando, K. Yamasaki and E. Shimizu: “Color Control of Hologram Image Using a Single Laser Under the Bragg Condition”, Practical Holography XIV and Holographic Materials VI, SPIE 3956, pp. 64-84 (2000)

おかもと まさひと
岡本 正昭 1971年, 京都大学工学部数理工学科卒業。1973年, 同大学院修士課程修了。同年, 大阪ガス(株)に入社。1995年より, (財)イメージ情報科学研究所に出向中。ホログラフィ, 3次元ディスプレイの研究に従事。

ウイ シェン
魏 臻 1978年, 青海師範大学物理学部卒業。1986年, 陝西師範大学大学院物理学前期博士課程修了。1992年, 青海師範大学物理学部助教授。現在, 大阪市立大学大学院工学研究科後期博士課程在学中。ホログラフィックディスプレイの研究に従事。

しみず えいじ
志水 英二 1963年, 大阪大学工学部電子工学科卒業。同年, 大阪市立大学工学部助手。1983年, 同工学部電気工学科教授となり, 現在に至る。電子回路, オプトロニクス, 光情報処理および動画ホログラフィの研究に従事。工学博士。正会員。