大画面立体ディスプレイ用 ハイブリッド・ホログラム・スクリーンの開発

宋 玄鎬***, 渋谷 岳人*, 本田 捷夫*

*千葉大学 自然科学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

**市立仁川専門大学 (〒402-750 韓国仁川市南区道禾洞235)

Development of Hybrid Hologram Screen for Large Auto-Stereoscopic Display

Hyun Ho SONG,*** Taketo SHIBUYA,* and Toshio HONDA*

*Graduate School of Science and Technology, Chiba University 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

**Incheon city college 235 Dowhadong, Manku, Incheon, 402-750 Korea

(Received August 15, 2002)

Hologram screen for auto-stereoscopic 3-D display has the merit that the size of viewing zone can be controlled adequately. But it has fundamentally color dispersion and color aberration when the hologram screen is illuminated by white light. Therefore, it is required that little color dispersion and little color aberration is realized. In this paper, we propose the hologram screen attached with Fresnel lens, and the effect of the screen is demonstrated by simulation and by a experiment.

Key Words: Auto stereoscopic display, Hologram screen, Viewing zone, Color dispersion, Color aberration

1. はじめに

レーザー光は単色性、指向性、干渉性が良い特徴を持つコヒーレントな光である。コヒーレントな光を用いて光波面そのものを記録・再生することにより理想的な立体像が表示できるホログラムでは、記録時にレーザーが使われる。ホログラムによる映画の試みはあるが、大部分は静止立体像表示に限られている。

一方、動画立体像表示技術の1つとして立体像をスクリーンに投写する方式がある。この方式で現在実用化されている方式はすべて、観察時に特殊なメガネを装着する必要があるが、裸眼で立体像が観察できる方式も研究開発されている。裸眼で観察できる方式にはレンチキュラスクリンを用いる方式、パララックス・バリア方式、凸レンズ方式、ホログラム・スクリーンを用いる方式がある¹⁾。

Fig. 1に凸レンズを用いる方式を示す。この方式の原理は、少し離れた2つの光源の像を凸レンズにより、観察者の左右の眼の位置にのみ集光させ、それと同時に、それぞれの眼に入る(光の)像に視差を持たせる。この方式は観察者が1人に限定され、しかも視域が狭い。この方式で視域を広くするためには視点追従が不可欠である。

左右それぞれの眼で視差画像が同時に観察でき、立体像が見える観察者の眼の位置範囲を「視域」と呼ぶ。この視域が広いことが立体ディスプレイには重要である。視域が広くなれば観察者は自由な姿勢で立体映像を見る

ことが可能になる。また、高臨場感ディスプレイのためには、表示・観察される立体像が大きいことも重要である。スクリーンに投影して見せるタイプの立体像表示システムでは、立体像が大きいことは、大きいスクリーンを意味する。広視域化やスクリーンの大型化を実現できる方式の1つとしてホログラム・スクリーンがある^{2,3)}。

本論文はハイブリッド・ホログラム・スクリーンを用いることによりホログラム・スクリーンで問題であった狭い視域を広く改善すると共にスクリーンの大型化できる方式に関する。

2. ホログラム・スクリーンの特徴と問題点

2眼立体像表示用ホログラム・スクリーンは前記視域の大きさを任意に調節できることが唯一最大の特徴である。

ホログラム・スクリーンの従来作成法として収束する

Fig. 1 Auto-stereoscopic display by a convex lens.

球面参照光を用いた場合の記録光学系をFig. 2に示す。スクリーンとしての使用時にはFig. 3(a)で示すように記録時の収束する点(Fig. 2のD点に該当)にプロジェクターの投影レンズを置き、そこから広がる光線束でホログラム・スクリーンを照明する。

ホログラム・スクリーンはFig. 3(a), (b)に示すように特定方向から入射した光を決められた方向範囲へのみ回折させる指向性の機能を持つ。すなわち、このような照明により、ホログラム・スクリーンからの+1次回折光は、観察者の眼の位置に記録時拡散板の実像を生じる。この実像の大きさが視域の大きさになる。

再生光源は2台のプロジェクターでありホログラム・スクリーンへ視差画像を投影し左右それぞれの目が視差画像を見て立体視を行う。この特徴はホログラム・スクリーン自体を大型化しても維持されるので、スクリーンの大型化に有利である。

しかし、プロジェクターは白色光であり、斜め下あるいは上から照明するので、大きい色分散および色収差が生じてしまう。この現象は、スクリーンサイズが大きくなる場合に顕著に現れ、スクリーンの大型化が原理的に困難になる。また、現実的問題として、スクリーンサイズを大型にしようとする、それより大きい有効径の大きい凹面鏡が必要になる。

3. 大型ホログラム・スクリーンにおける色収差

白色光であるプロジェクターでホログラム・スクリーンを照明すると記録時と再生時の光源の条件が一致しないため、再生時に色分散と色収差が必ず起こる。特にスクリーンサイズが大きくなると色分散と色収差量も大きくなることが予測される。

この色分散・収差量がどの程度になるかをホログラムの結像公式⁴⁾を用いて回折光線方向を計算し観察面でのスポットダイアグラム⁵⁾によりホログラム・スクリーンでの視域がどうかを数値計算した。

ホログラムの結像公式とは式(1)～式(3)に示される関係式である。

これらの式の中で、それぞれの記号は、次のとおりである。 λ_R :記録波長、 λ_C :再生波長、 R_0 :物体光点とホログラム・スクリーン面までの距離、 R_r :参照光点とホログラム・スクリーン面までの距離、 R_c :再生用照明光点とホログラム・スクリーンまでの距離、 R_i :ホログラム・スクリーンから近軸像点までの距離。それから添字o, r, cはそれぞれ物体光, 参照光, 再生照明光の各点光源を意味する。長さについては、Fig. 2とFig. 3に示している。数値計算の物体(光)の条件として、

$$\frac{1}{\lambda_c} \left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_c} \right) = \frac{1}{\lambda_R} \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right) \quad (1)$$

$$\frac{1}{\lambda_c} \left(\frac{X_i}{R_i} - \frac{X_c}{R_c} \right) = \frac{1}{\lambda_R} \left(\frac{X_o}{R_o} - \frac{X_r}{R_r} \right) \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_c} \left(\frac{Y_i}{R_i} - \frac{Y_c}{R_c} \right) = \frac{1}{\lambda_R} \left(\frac{Y_o}{R_o} - \frac{Y_r}{R_r} \right) \quad (3)$$

① 高さ125 mmの線状の拡散面

② 60 mm(H) × 125 mm(V)の拡散面

その他の条件は同じで、以下に示す。

記録時:

参照光: 収束する球面波で、ホログラム面の法線方向と35度の角で斜め下方向

記録レーザー光の波長: 532 nm

ホログラムサイズ(スクリーンサイズ): 17 inch(H) × 13 inch(V)

再生時:

照明光: 記録時参照光の収束点から発散し、記録時と逆方向に進む球面波(共役光波面という)による実像再生
なお、再生照明光は白色光であるが、計算では記録時と同じ532 nm(緑色)の波長の光、450 nmの波長の光(青色)、650 nmの光(赤色)を再生波長として計算を行った。

また、再生時には、Fig. 3(b)に示すように2台のプロジェクターをオフアクシスで用いるが、計算では、2台の

Fig. 2 Recording of the holographic screen by converging reference wave, and real image reconstruction of viewing-zone (side view).

Fig. 3 Use (Reconstruction) of the holographic screen of Fig. 2 (a)Side view, (b) Top view.

中間に1台のプロジェクターを置いて再生した場合を想定している。

上記の条件のもとで、記録時の拡散物体面の線状、あるいは矩形形状が、記録時の拡散物体面(立体像観察面)において、再生時にそれぞれどのような位置・形状に再生されるかを計算した。物体として60 mm(H) × 125 mm(V)の拡散面を用いた時の記録時の様子を、Fig. 4に示す。

計算した、一種のスポットダイアグラムの結果を、物体を①高さ125 mmの線状の拡散面とした場合についてはFig. 5、物体を②60 mm(H) × 125 mm(V)の拡散面にした場合についてはFig. 6に示す。

Fig. 5, Fig. 6よりわかるように、532 nmの波長では、ホログラム・スクリーンから回折される光線は、記録時の拡散面(スリガラス)と同じ線状、あるいは矩形を、記録時の拡散物体の位置と同じ位置に形成する。一方、450 nm, 650 nmの波長の光は、それぞれ大きさと形状が変わった矩形を形成する。

このように、収束する球面参照光を用いてホログラムを記録し、共役光により実像再生を行う場合は、ホログラム・スクリーンから回折した光線が同じ位置に集まらず、観察面において垂直・水平方向へ大きな横収差を持つ。その結果、水平方向視域幅を60 mmに制限することができず、このスクリーンでは2眼式オートステレオスコピック・ディスプレイを実現できない。

4. 色収差を小さくするハイブリッド ホログラム・スクリーン

2眼式で立体視を行う際に立体像が見える観察範囲である視域として、水平方向については約60 mm(ほぼ両眼の間隔)で、白色・均一明るさでスクリーンが見えることが不可欠である。これを実現するためには、前述の色分散・色収差の影響を相当小さくすることが重要である。そのためには、参照光の角度を小さくすることが基本的である。しかし、再生時の照明角度を浅くして再生を行うと、ホログラム・スクリーンからは回折しない0次光が観察者の目に入ってしまう、投影像の観察に邪魔になる。これを避けることが不可欠である。

Fig. 4 Optical set-up of recording the holographic screen of Fig. 2 for the simulation.

Fig. 5 Reconstructed image areas of vertical diffuse line object at the viewing-zone plane by three different wavelength light.

Fig. 6 Reconstructed image areas of squared diffuse object at the viewing-zone plane by three different wavelength light.

それを避けることができる可能性がある一つの方法として、ホログラム・スクリーンとしての使用時に、そのスクリーンにフレネルレンズを合わせて使用する方式を提案する。そうすると、参照光角度を浅くしても、0次光を実像に変換することになり、観察者の目に入る0次光を避けることができる。

記録方式はFig. 7に示すように、参照光角度を浅くし、また参照光波面として、発散する球面波とする。この記録方式だと、大きいホログラム・スクリーンの記録にも、Fig. 2に示すような、大きい凹面鏡を使う必要はない。このホログラム・スクリーンを照明(再生)する場合は、Fig. 8(a)に示すように、プロジェクターの投影レンズの位置・距離(再生光源の位置・距離、Fig. 7のLに該当)の関係が記録時の参照光と同じとし、ホログラム・スクリーンからの虚像を再生する。

フレネルレンズはまた、照明時(再生時)の虚像である拡散物体を実像に変換する働きも持たせている。このように、参照光の入射角度は光軸に対し浅くなれば観察時に生じる色分散・色収差が低減されると予想される。

Fig. 7 Recording of the holographic screen by diverging reference wave, and virtual image reconstruction of viewing-zone (side view).

フレネルレンズとホログラム・スクリーンを合わせた1つのスクリーンをここではハイブリッド・ホログラムスクリーンと呼ぶ。

このようにしてハイブリッドホログラム・スクリーンを用いた2眼式立体像再生システムの概念図をFig. 8(a), (b)に示す。この場合に観察面で視域がどのようになるかを、数値計算例として、以下に示す。

ホログラム・スクリーンを記録するとき、参照光は球面発散光とし、角度 α を15度、物体光は拡散面光源として250 mm (V) $\times$ 120 mm (H)、記録感光材料の中心までの距離は物体光と参照光共に1500 mmとする。前節の場合と同じように、再生光の観察面での拡散面の再生像の広がり、450 nm, 532 nm (ホログラム記録時の波長), 650 nmのそれぞれの波長について、求めた結果をFig. 9に示す。この計算では、フレネルレンズは、1,500 mmの拡散物体を、無収差で750 mmの位置に実像結像すると仮定している。

Fig. 9の結果はFig. 5, Fig. 6と比べると、どの波長に対しても、水平方向視域の広がりが小さく、ほぼ所定の範囲に収まっていることがわかる。

Fig. 8 Use (reconstruction) of the holographic screen of Fig. 7 attached with a Fresnel lens (hybrid hologram screen) assumed at the simulation and the experiment (a) Side view, (b) Top view.

Fig. 9 Reconstructed image areas of squared diffuse object at the viewing-zone plane by three different wavelength light (simulation).

Fig. 9に示すように、再生時に色分散から白色に見える垂直方向視域は55.75 mmであり、水平視域の幅は60 mmである。

5. 実験

ホログラム・スクリーンを作成するための記録条件はシミュレーションと同じである。記録波長は532 nmのSHG laser, ホログラム記録感光材料としては17 inch (H) $\times$ 13 inch (V)のコニカ(株)製P5600を用いた。拡散物体としてはスリガラスを用いた。

現像処理はMA現像液とEDTA漂白を経て自然乾燥した。

作成した17 $\times$ 13 inchのホログラム・スクリーンと焦点距離500 mmのフレネルレンズを合わせてFig. 8に示す再生光学系を用いて再生を行った。結果としてホログラム・スクリーンから750 mm離れた位置である観察面で設定したとおりの60 mmの水平視域を得ることができた。

このハイブリッド・ホログラムスクリーンをプロジェクター2台で白色照明し、観察面に紙を置いてその面を写真撮影した結果をFig. 10に示す。

この図で、Whiteで示されている囲まれた範囲内に左眼

Fig. 10 Reconstructed light intensity distributions in the experiment of the same condition of Fig. 9 (photograph by the illumination of two projectors, Color areas are surrounded by three circles).

(右の部分については右眼)を置けば、カラー立体像が観察できる。観察される立体像の一例をFig. 11に示す。この像は、Fig. 10のWhite部左右に撮像カメラを置き、スクリーン面を撮った写真である。カメラレンズ位置に両眼を置けば、立方体の立体像が明確に観察できる。

白色に見える垂直方向視域は、計算では前述のように約55.75 mmであるが、実際には約30 mmと、計算結果と比べて狭くなった。この理由は、記録時にスリガラスの上下の部分からの散乱光強度が弱く、完全拡散面でなかったことによる。

6. まとめ

本報告では広視域の状態で2眼式オートステレオスコピック・ディスプレイが可能なハイブリッド・ホログラム・スクリーンの作成を実現した。記録時は光軸に対して参照光の入射角度を15度と小さく設定することにより、観察の際に色収差の影響を低減化できた。再生入射角度が浅くなったときに生じる0次光が観察者の眼に入る問題は、フレネルレンズを合わせて使うことにより解決した。

Fig. 11 Images observed at the view-zone of right and left eye of Fig. 10, respectively (The photographs were taken by a camera positioned at the respective view-zone).

参考文献

- 1) 岡野 文男：光学 **31** (2002) 40.
- 2) C. Newswanger: US Patent, WO4799739 (1989).
- 3) M. R. Shires: US Patent, WO5521724 (1996).
- 4) E. B. Champagne: Opt. Soc. Am. **57** (1967) 51.
- 5) J. F. Miles: Opt. Acta **20** (1973) 19.