ホログラフィと光線再現による3次元ディスプレイ

山口 雅浩

東京工業大学 像情報工学研究施設 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-R2-56)

Three-Dimensional Displays Based on Holography and Light-Ray Reproduction

Masahiro YAMAGUCHI

*Imaging Science & Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology,
4259-R2-56 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8503*

(Received August 24, 2006)

In this article, a 3D display technology based on light-ray reconstruction using holography is introduced, mainly focusing on the holographic 3D printer (holoprinter), which automatically prints the hardcopy of a digital 3D image by means of a holographic stereogram. The principle and system of recording and reconstructing full-color, full-parallax (both horizontal and vertical parallaxes) 3D images are described. It is also presented that the use of 3D displays based on light-ray reconstruction, such as a holographic stereogram, is significant for the realistic reproduction of gloss, shade, and texture of an object surface. Finally, by comparing a holographic stereogram and a hologram, discussions are given on the limitation of 3D displays by light-ray reconstruction, and the features of wavefront reconstruction are addressed as well.

Key Words: Holography, Holographic stereogram, 3D display, 3D printer, Light-ray reproduction

1. はじめに

ホログラフィは物体からの光を波動として記録し、再現することができるので、きわめて自然な立体像を再現する3Dディスプレイの技術として期待されている。写真技術としてのホログラフィでは、物体にレーザー光を照射し、その反射光と参照光を干渉させてホログラムを記録する必要があるが、3次元映像の表示媒体として用いるためには、デジタルの3次元画像データからホログラムを生成する必要がある。これを実現する方法として、ホログラフィック・ステレオグラム (Holographic Stereo-gram: HS) と計算機合成ホログラム (Computer Generated Hologram: CGH) の2種類のアプローチがある。HSは、物体を多方向から撮影して得られる2次元画像列(多視点画像)からホログラムを合成するもので、ステレオグラムの原理により立体像を表示する。HSには非常に多くの方向数の多視点画像を記録することができるので、その場合、HSは3次元空間内の光線を再現することによって立体像を表示しているとみなすことができる。CGHは、光の伝播や干渉をコンピュータ上でシミュレーションし、ホログラムとして記録される干渉縞を計算により求める方法である。ホログラフィによる立体像表示には膨大なデータ量の情報が必要となるため、電子的なディスプレイを実現するためには、膨大な量の情報を処理・表示可能なデバイスの出現が期待される。

筆者らは、HSを用いてデジタルの3次元画像をハードコピーとして出力する技術として、ホログラフィック・3Dプリンタ¹⁻⁴⁾(以下、ホロ・プリンタ)の開発を行ってきた。プリンタの場合には大量の情報をハードコピー中に記録することができるので、現行のデバイスを用いても画質の高い立体像表示を実現することが可能である。現在開発しているホロ・プリンタは、水平・垂直方向の視差情報(フルパララックス)を再生できるHSを、フルカラーで記録するものである。

本稿では、ハードコピーとして光線再現による3Dディスプレイを実現するHSの技術に関して、筆者らが開発を行ってきたホロ・プリンタを中心に紹介する。また、ホロ・プリンタを用いた検討を通じて、光線再現による3Dディスプレイが、3次元的な形状もしくは奥行きを表示するだけでなく、物体表面の光沢や質感をよりリアルに再現するために有効であることを紹介する。また、HSは高密度に光線を再現することができるので、自然な立体像を観察することが可能である。そこでHSを、波面を再生するホログラムと比較することにより、光線再現による立体像表示の限界と、波面再生による立体像表示の意義についても議論する。

2. ホログラフィック・ステレオグラムと ホロ・プリンタ

Fig. 1にホロ・プリンタの概念図を示す。コンピュータの周辺装置として利用する3次元版のイメージプリンタを実現することを目的として開発が行われている。このような装置ができれば、多視点画像入力や3次元形状計測装置、3Dコンピュータ・グラフィックス(CG)、CAD(コンピュータ支援デザイン)などによって生成された3次元画像データを立体像のハードコピーとして出力できるようになる。最近、プラスチックなどによって3次元モデルを自動的に作成する「3Dプリンタ」が出現しているが、これらが立体形状の出力装置であるのに対して、ホロ・プリンタは3次元の画像としてのハードコピーを出力する装置と位置づけられる。

筆者らは、このようなホロ・プリンタをHSの自動合成技術に基づいて実現する方法を提案した¹⁾。HSは多視点画像列から合成されるホログラムであり、数百から数万以上の多視点画像を高密度に記録・再現できるため、両眼視差に加えて、視点を移動させても像の跳びがなく連続的に動的視差を再現できる。視点位置のサンプリングを十分細かくすれば、物体から様々な視点に向かう光線を再現でき、ホログラム面付近に再生される像であれば、波面を再生するホログラムとほぼ見分けがつかない自然な像を観察できる。同様に多眼立体表示の原理に基づく方法にレンチキュラー写真やパララックスバリア方式があるが、レンチキュラーでは視点の数が2から10程度である。

HSに関する初期の研究として、1967年にPoleが提案した方法は、物体をハエの目レンズで記録し、そのレーザー光による共役再生像をホログラムに記録するものである⁵⁾。McCrickardら、De Bitettoなどは、視差を持った画像を撮影した写真からホログラムを合成する手法を報告している^{6,7)}。さらに、Kingらは、計算機で作成した架空の物体の立体像をHSの手法を用いて作成した⁸⁾。HSを白色光源で再生するためには、ホログラム記録のプロセスを2回使い、レインボウまたはリップマンホログラムとして記録する。しかしデジタルの3Dデータから自動的に記録するためには、1ステップのプロセスが望ましい。Crossの開発したマルチプレックスホログラム⁹⁾は、360度から観察できる円筒型のHSを1ステップで記録できる方法で、その後医用画像の立体像表示へも応用されている¹⁰⁾。ま

Fig. 1 The concept of holoprinter.

た、平面型¹¹⁾や半円筒のアルコーブ型ホログラム¹²⁾を1ステップで記録する技術においては、像の歪を補正するために、ホログラムの特性を考慮した特殊な光線追跡により露光する画像を作成する手法が開発されている。一方で、HSを自動合成するために、画像を液晶パネルなどの空間光変調器に表示してホログラムを作成する技術が開発され¹³⁾、これらによりデジタルの3次元画像データから直接ホログラムの露光を行うことが可能となった。

HSとしては、視点を水平に移動したときの視差情報のみを記録・再現する方法(Horizontal-parallax-only: HPO)と、水平及び垂直に視点を動かしたときの視差情報を記録する方法(Full-parallax: フルパララックス)がある。水平方向の視差のみしか記録しない場合には、記録する視差方向数が少ないので高速に記録を行えるという特徴がある一方で、観察位置によっては再生像に歪を生じてしまう。筆者らの開発したホロ・プリンタでは、歪のない正確な立体像を表示するために、フルパララックスの視差情報を記録する。フルパララックスでは多数の視差方向の画像を記録する必要があるが、上からまたは下から覗き込んだときに見える像を再現することができる。一例として、水平に100方向、垂直に80方向とすれば8000方向の視点の画像(8000点の視点位置からの画像)を1枚のホログラムに記録することになる。

筆者らによるホロ・プリンタの提案以外にも、MITのKlug(現: Zebra Imaging)らによるウルトラグラムプリンタ(HPO¹⁴⁾、フルパララックス¹⁵⁾や、Dutch Holographic Lab.のNulandらなどによるOffice holoprinter (HPO)¹⁶⁾、ソニーによるパーソナライズド・ホログラムプリンタ(HPO)¹⁷⁾など、ホロ・プリンタの研究や事業化が行われている。

3. 立体像表示の原理

HSの原理は多視点画像の記録・再現に基づくものであるが、視点の数を十分に多く記録する場合、3次元的な物体から発せられる全ての光線情報を再現するものと考えることができる。以下にその原理を簡単に説明する。

Fig. 2 (a)のように3次元空間内に存在する物体をある視点から観察する場合の像は、視点の空間座標を中心とした透視投影によって得られる。このとき、Fig. 2 (a)に示す参照面Aを考えると、物体上の一点から発した光線は、視点位置ごとに面A上の異なる位置を通過する。ここで面A上の1点(例えば点A₁)に注目すると、視点位置ごとに物体上の異なる点から発した光線が点A₁を通過する。もし面Aの位置に画像表示媒体を置き、点A₁を通過する全ての光線を再現すれば、点A₁にあるピンホールから実際の物体を覗くのと同じことになる。さらに面A上の各点で同様に全ての光線を再現すれば、面Aの位置に窓があり、その窓を通過する全ての光線が再生されると考えることができる。このとき、どの視点位置から窓を見ても、あたかもそこに物体があるかのように立体像を観察することができる。

Fig. 2 (a)では面Aが視点と物体の間にあるが、Fig. 2 (b)のように物体が面Aの前後になるようにA'面を仮定しても

Fig. 2 (a) Geometry of observing light-rays from 3D objects, which are located at the back of a reference plane A. (b) 3D objects are located at the front and back of the reference plane A'.

同様である。ホロ・プリンタでは、Fig. 2 (a)の面Aまたは(b)の面A'での光線を全て再現するようにホログラムを作成する。

ホログラムの記録にはレーザーを用い、Fig. 3に示すような光学系によって行う。液晶パネルなどに画像を表示し、その液晶パネルを透過したレーザー光をレンズによってホログラム面に集光する。これは物体光と呼ばれる。そしてホログラム面の裏側から、細いレーザービームを同じ点に入射する(参照光)。ホログラムは、高解像度の感光材料(銀塩感光材やフォトポリマーなど)に、物体光と参照光が干渉して形成される微細な(0.2~0.3 μm)干渉縞が記録される。ホロ・プリンタシステムでは、1回の露光で記録されるのは0.2~0.3 mm角程度の小さなホログラム(要素ホログラムと呼ばれる)で、ホログラム感光材料を移動させて順次ホログラム面を塗りつぶすように露光することにより、Fig. 4 (a)のように、多数の要素ホログラムが2次的に配列されて1枚のホログラムができあがる。

物体光と参照光を反対方向から入射して干渉させることによって記録するホログラムはリップマンホログラムと呼ばれ、ブラッグ回折により波長選択性を持つ。現像処理などの過程で感光材料の乳剤の厚みが変化しなければ、白色光で照明して再生したとき、記録時に用いたレーザー光と同じ波長の光(多くのディスプレイホログラムでは数十nm程度のスペクトル線幅を持つ)が再生される。このため、3原色のレーザーを使って多重記録す

Fig. 3 Schematic illustration of optical system for recording full-parallax holographic stereogram. BS: beam splitter, M: mirror.

Fig. 4 (a) Recorded hologram is comprised of a 2D array of elementary holograms. (b) Reconstruction of hologram recorded by Fig. 3, where light-rays modulated by LCD panel are reproduced.

ば、後述するようにフルカラーの像を表示することも可能である。

作成されたホログラムに再生照明光を与えると、記録された光が波動として再現される(Fig. 4 (b))。言い換えれば光線の方向と強度が再現されるので、記録のときに液晶パネルに表示した画像に応じて、ホログラム面上の1点から各方向に向かう光線の強度が変調されて再生される。これを利用して、例えばFig. 2の点A₁やその他の各点を通る光線を記録・再現すれば、あらゆる視点位置から、各視点位置に応じた像を観察することができる。

液晶パネルに表示する画像(露光画像)は、一種の光線追跡の方法を用いて作成する。Fig. 5は、Fig. 2 (b)のA'面にホログラムがあるとしたときの露光画像の作り方を示している。これは、ホログラム面上の1点を中心とした透視投影であるが、物体は投影中心の前側と後側の両方にあるので、通常の光線追跡とは多少異なっている。通常のCGのレンダリングソフトでは、投影の中心が視点位置に設定されるので、このような画像を作成することができない。この場合、Fig. 2のような配置で多数の視点位置の画像を生成し、画像変換を行うことによって液晶パネルに表示する画像を作成する。Fig. 6はその概念図である。各視点位置での画像(透視画像)を描画した後、露光画像上の各点に対応する光線が記録されている透視画像上の点を見つけることによって露光画像を作成する。これは、CGで近年研究が進んでいるImage-based rendering (IBR)と同様の方法である。この方法は、様々な視点から撮影した実写の映像からホログラムを記録する場合にも応用できる。

Fig. 5 The calculation of the image for exposure. P is a projection plane, which corresponds to the LCD plane in Fig. 3 (a) or the virtual image of lens pupil in Fig. 3 (c).

Fig. 6 Geometry for the generation of the image for exposure from perspective images. The pixel x' in the image for exposure can be rendered from the pixel x in the perspective image of viewpoint y . It is equivalent to the image-based rendering technique.

4. 記録システム

1994年に開発されたホロ・プリンタの試作装置 (Fig. 7)³⁾は、大きさが840 mm × 500 mm × 450 mmで、コンピュータ制御により自動記録を行うことができる。2002年に開発したフルカラーの記録システム⁴⁾では、Fig. 8に示すように、赤色のHe-Ne (633 nm)、緑色のNd-YAG-SHG (533 nm)、及び青色のHe-Cd (442 nm) レーザーを用いている。記録にはガラス乾板に塗布された銀塩感光材料 (ロシア製感光材PFG-03C)を使用した。Fig. 8のシステムで記録された立体像の写真をFig. 9に示す。このホログラムは、

Fig. 7 Prototype full-parallax holoprinter.

Fig. 8 The optical system for full-color, full-parallax holographic stereogram. AOM: Acousto-optical modulator for a shutter, BS: beam splitter, DM: dichroic mirror, PRD: pseudo-random diffuser [2], LCD: liquid crystal display panel.

0.25 mm間隔で100 × 150個の要素ホログラム (各要素ホログラムに赤緑青が多重露光されている) から構成されており、高解像度で鮮やかな立体像が得られている。

ホロ・プリンタシステムの現在の課題は、記録時間の問題と画質の向上である。記録時間については、露光点数が多いため、例えばFig. 9のホログラムの記録に12時間程度を要している。ホログラムには数百nmの干渉縞を記録するので、ホログラム感光材料の移動により生じる振動が静止するまで待ち時間を設ける必要がある。したがって、振動の影響を抑えるために記録システムの安定化を図ることで、待ち時間を短縮し、各要素ホログラムの記録を高速化することができる。また複数の要素ホログラムを同時に記録する並列露光システムなどによる高速化は可能である。一方、画質については、明るさ、階調性、S/N、視域などに関して従来の2次元の映像表示と比較して劣る点が多い。今後、液晶パネルや光学系、データ処理方法、感光材料及び現像処理過程などを改善することで、画質を向上することが必要である。

色再現性に関しては、作成したHSからの再生光を分光放射輝度計で計測し、ホログラム面上に再生される平面色パッチの再現特性を調べたところ、十分に広い色再現域が得られること、背景光の影響や多重露光によるクロストークについて適切な補正を行えば、ある程度色再現特性をモデル化できることが示されている¹⁸⁾。また、同じ条件で複数の色パッチを作成したとき、色のばらつきが大きい。露光・現像条件の安定化など、意図したとおりの色再現性を得るために、今後の検討が必要である。

5. 物体表面の特性と光線情報

ある物体表面に光が入射したとき、反射した光の強度は角度依存性を持つ。特に強く反射する方向から観察したとき、表面に光沢が現れる。実際の物体を観察する際の光沢の見え方は、物体と照明光源の位置関係、観察位置、照明光源の種類や配置などによって変わる。また、周囲の風景が映りこむ様子も再現されるリアリティに大きく影響する。これらを忠実に再現することができ

Fig. 9 Photograph of reconstructed image recorded by full-color, full-parallax holoprinter.

ば、光沢感、質感、素材感の再現性を向上できるものと考えられる。

光線再現やホログラフィによるディスプレイでは主に立体像表示の機能が注目されているが、物体の形状が平面であっても、上述のような物体表面からの反射光の角度依存性を再現するために有用と考えられる。実写のホログラムでは、表面に凹凸を持つ油絵、光沢を持つ金属表面、複雑な反射特性を持つ蝶の羽などをリアルに表示している例がある。デジタル映像の出力媒体としても、このような性質を利用して高リアリティの映像再現に適用することが期待される。

2章に述べたHSのような光線情報を再現するディスプレイは、ホログラム面から各方向へ再現される光線の強度を制御することで立体像を再生しており、これを利用して物体表面からの反射特性を再現することが可能である。物体の反射特性の角度依存性を考慮してHSを作成する場合、物体に対する照明の方向などを工夫することで、より優れた光沢感や質感を表現することができる。そのために、撮影された画像から鏡面反射成分と拡散反射成分を分離し、照明光の位置と光線の方向を考慮して再合成することによって、HSに記録する画像を作成する。これによって、任意の照明環境の下で実物を観察する場合と同様な光沢・質感を再現するHSを作成することができる。Fig. 10にその一例として平面状の物体(皮革)の再生像を示す¹⁹⁾。第4章に述べたようにホログラムの画質が不十分で写真からはわかりにくい、観察方向によって光沢の様子が変化して再生されている。今後、HSの画質を向上することにより、金属、皮、塗装、布地などの質感をリアルに表示することが可能になると期待される。

このことから、3次元画像を生成する際に、3次元形状に数枚の2次元画像をマッピングするような方式は光沢や質感再現性の点で劣るため、3Dディスプレイのメリットを生かしきれないことになる。高いリアリティを持つ映像再現のためには、物体表面から反射される光線の角度依存特性を考慮して3次元画像の入出力システムを構築す

Fig. 10 The photograph of the reconstructed image recorded by holoprinter, where the image was generated using the gloss synthesis technique based on dichromatic reflection model.

ることが望ましい。

6. 光線情報と波面再生

これまで述べたようにホロ・プリンタにより記録されるフルパララックス・HSは、光線を記録再現するディスプレイといえる。この点で、インテグラルフォトグラフィやパララックスバリア方式を用いて空間像再現を行う立体像表示方法と同様の原理に基づくものといえる。ただしパララックスバリアなどの方式では、開口による回折の影響により、光線のサンプリング密度を十分高くすることができない。レンズアレイを用いる場合は、レンズの収差などによって光線の再現精度が低下する。これに対して本稿で紹介したフルパララックス・HSは、光線再現に基づくディスプレイの限界に近い再現精度を持つ方式と言える。光線のサンプリングが十分に細かければ、Fig. 11に示すように観察者の瞳の中に多数の光線が入射するので、目の焦点位置を再生像上に合わせたときに最も鮮明な像が観察される。これにより視差方向の数が少ない一般的なステレオグラムとは異なり、視覚系の焦点調節の状態と矛盾しない立体像表示も可能と考えられる。しかしながら、光線再現による立体像表示では幾何光学的な近似を行っているため、その能力には限界がある。

波面を再生するホログラフィは、物体からの波面を忠実に再現するので、究極の立体像表示方法であり、光線を再現する方式とは本質的に異なると言われる。波面を再生するホログラムをホロ・プリンタで記録するHSと比較するために、ホログラムをFig. 4 (a)の要素ホログラムと同じように小さな領域に分割することを考える。HSのように光線を再生するディスプレイにおいては、再生される波面はそれぞれの光線方向を法線とする平面波の集まりになる。これとホログラムから再生される波面を、分割した小領域において比較すると、ホログラムには

- (a) 光線方向を法線とする平面波の成分
 - (b) 物体表面の一点から広がる球面波が、この小領域内で曲率を持つ成分
 - (c) 異なる小領域間での相対的な位相差の成分
- が記録されているのに対して、HSにはそのうち光線の方向を示す項(a)のみが記録されている²⁰⁾。真のホログラムではこれらの位相成分により再生像上で波面の位相が一致し、高い分解能で像を再生できるが、HSではこの位相

Fig. 11 Observation of point object when the light-ray sampling density is higher than the pupil size of observer's eye. The image becomes smallest when the observer adjust the focus on the point object.

情報が記録されていないため、特にホログラム面から離れた位置の像の分解能が低下する。

これと密接に関連するのが回折による光線の広がりの問題である。パララクスバリア方式の立体像表示では、パララクスバリアの開口によって、またHSでは各要素ホログラムの開口によって回折し、再生される光線が広がりを持つ。このため記録できる光線本数に限界がある。また、光線がサンプリングされて再生されるため、ホログラム面から離れた位置での光線のサンプリング密度は低下する。ホログラフィでは上記の(b)や(c)の成分により、光線のサンプリングによる分解能低下は起こらない。これらのことから、奥行き深い情景を表示する場合には、光線再現のディスプレイでは限界があり、ホログラムのような波面再生技術を利用することが有効と考えられる。

7. おわりに

本稿では、筆者らの開発してきたホロ・プリンタについて紹介するとともに、ホロ・プリンタによって記録されるフルパララクスHSのような光線再現によるディスプレイの利用方法と限界について述べた。光線や波面を再現する技術は、立体像表示や表面の質感再現など、高いリアリティを持つ映像表示に有効と考えられ、このような特性を考慮した今後の研究の発展が期待される。

なお、本研究は凸版印刷(株)総合研究所の協力により行われているものである。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(課題番号17300032)による。

参考文献

- 1) M. Yamaguchi, N. Ohya, and T. Honda: *Practical Holography IV, Proc. SPIE* **1212** (1990) p. 84.
- 2) M. Yamaguchi, H. Endoh, T. Honda, and N. Ohya: *Opt. Lett.* **19** (1994) 135.
- 3) M. Yamaguchi, T. Koyama, H. Endoh, N. Ohya, S. Takahashi, and F. Iwata: *Practical Holography IX, Proc. SPIE* **2406** (1995) p. 50.
- 4) M. Takano, H. Shigeta, T. Nishihara, M. Yamaguchi, S. Takahashi, N. Ohya, A. Kobayashi, and F. Iwata: *Electronic Imaging 2003, Proc. SPIE* **5005** (2003) p. 126.
- 5) R. V. Pole: *Appl. Phys. Lett.* **10** (1967) 20.
- 6) J. T. McCrickerd and N. George: *Appl. Phys. Lett.* **12** (1968) 10.
- 7) D. J. DeBitetto: *Appl. Opt.* **8** (1969) 1740.
- 8) M. C. King, A. M. Noll, and D. H. Berry: *Appl. Opt.* **9** (1970) 471.
- 9) L. Cross は文献で発表していない。初期の文献としては、L. Huff and R. L. Fusek: *Opt. Eng.* **19** (1980) 691.などに説明がある。
- 10) J. Tsujiuchi: *Practical Holography VI, Proc. SPIE* **1667** (1992) p. 86.
- 11) D. Kang, T. Honda, M. Yamaguchi, and N. Ohya: *Practical Holography VI, Proc. SPIE* **1667** (1992) p. 127.
- 12) S. A. Benton: *Computer Generated Holography II, Proc. SPIE* **884** (1988) p. 106.
- 13) T. Honda, M. Yamaguchi, D. Kang, K. Shimura, J. Tsujiuchi, and N. Ohya: *Practical Holography III, Proc. SPIE* **1051** (1989) p. 186.
- 14) M. A. Klug, M. W. Halle, M. Lucente, and W. J. Plesniak: *Practical Holography VII, Proc. SPIE* **1914** (1993) p. 15.
- 15) M. A. Klug, A. Klein, W. J. Plesniak, A. B. Kropp, and B. Chen: *Proc. Practical Holography XI, SPIE* **3011** (1997) p. 78.
- 16) E. van Nuland and W. Spierings: *Practical Holography VII, Proc. SPIE* **1914** (1993) p. 9.
- 17) A. Shirakura, N. Kihara, and S. Baba: *Practical Holography XII, Proc. SPIE* **3293** (1998) p. 246.
- 18) 重田 博昭, 高野 雅美, 村上 百合, 小尾 高史, 山口 雅浩, 大山 永昭, 高橋 進, 小林 昭彦, 岩田 藤郎: 3次元画像コンファレンス (2003) p. 61.
- 19) 土田 勝, 窪小谷 聡, 村上 百合, 小尾 高史, 山口 雅浩, 大山 永昭, 西原 隆, 岩田 藤郎: *Optics Japan 2001 講演予稿集* (2001) p. 373.
- 20) 山口 雅浩, 本田 捷夫, 大山 永昭: *光学* **22** (1993) p. 714.

レーザーワード

ホログラフィック・ステレオグラム (holographic stereogram)

物体を多方向から撮影して得られる2次元画像列(多視点画像)から合成されるホログラム。多数枚の2次元画像を同時に再生することで、ステレオグラムの原理により立体像を表示する。このため、直接レーザー光で照明することが困難な物体や、デジタル化された画像データ、コンピュータグラフィックスなどからホログラムを作成することができる。記録方式として、視点を水平に移動したときの視差情報のみを記録・再現する方法

(Horizontal-parallax-only: HPO)と、水平及び垂直に視点を動かしたときの視差情報を記録する方法(Full-parallax: フルパララクス)がある。視点位置のサンプリングを十分細かくすれば、3次元空間内の光線を再現することによって立体像を表示しているとみなすこともできる。この場合、ホログラム面付近に再生される像であれば、波面を再生するホログラムとほぼ見分けがつかない自然な像を観察できる。
(山口 雅浩)