

## ■2 群 (画像・音・言語) - 4 編 (3 次元画像)

---

### 3 章 3 次元画像表示

#### 【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 3-1 2 眼式
- 3-2 多眼式
- 3-3 体積表示
- 3-4 ホログラム

## ■2 群-4 編-3 章

### 3-1 2 眼式

(執筆著者：堀越 力) [2011年8月 受領]

2 眼式の 3 次元画像表示装置は、古くは Wheatstone のステレオスコープが始まりと言われている。左右の目に異なる画像を見せるという両眼視差をベースとした基本的原理は今も変わらない。2 眼式の 3 次元表示装置の方式は、主に、スコープ式、メガネ式、裸眼式の 3 つの種類がある。スコープ式は、先に述べたステレオスコープがあるが、最近では、ヘッドマウントディスプレイを用いて、左右のディスプレイに視差画像をする方式が主流である。メガネ式には、主にアナグリフ方式、波長分割方式、偏光眼鏡方式、液晶シャッタ方式がある。メガネ式は、映画館、アミューズメント施設や大型 TV など、大画面で同時に複数の人が同じ 3 次元コンテンツを楽しむ場合によく使われている。

また、家庭用 3DTV に関しても、液晶シャッタ方式から商品化が始まっている。一方、携帯電話は携帯ゲーム機など、モバイル用途では、3 次元コンテンツを見るためにわざわざ 3D メガネを掛けることは考えられず、裸眼式が主流である。裸眼式は、立体映像が見える視域が狭いため、主にパーソナル用途の携帯端末で普及している。裸眼式としては、パララックスバリア方式、レンチキュラーレンズ方式、光源分割方式などが使われている<sup>1)2)</sup>。

本節では、現在主流となっているメガネ式と裸眼式の 2 つについて、以下、各方式に関して説明する。

#### 3-1-1 メガネ式

##### (1) アナグリフ方式 (波長分割方式)

アナグリフ方式は、1853 年に Rollman により提案された最も歴史の古い方式である。この方式は、右目が青色、左目が赤色の眼鏡を掛ける方式である。提示する立体画像は、右目用は青色で描画した画像、左目用画像は青色で描画し、左右の眼でそれぞれ青赤色のフィルタを通して、それぞれの画像のみが見えるようにした方式である (図 1・1)。そのため、コンテンツも青と赤を基調とした画像のみに限られる。立体画像の制作が容易であるばかりでなく、3D 専用眼鏡も、左右の眼に赤青のセロファンを貼り付けるだけで 3D 眼鏡が作れることから古くから利用されている方式である。フィルタの色は、ほかに、赤とシアン、マゼンダと緑など、補色関係の色が使われる。

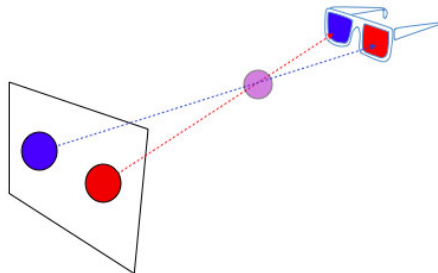


図 1・1 アナグリフ方式

しかし、この手法は、特定色のフィルタを通して画像を見るため、色再現性に課題がある。また、長時間視聴していると、眼がチカチカしてくるなど、眼の疲労も大きい。そこで、図1・2に示すように、RGBそれぞれの色の波長帯を異なるバンドパスフィルタで左右の眼に分割して提示するようにし、色再現性を大幅に改善した波長分割方式が実用化されている。

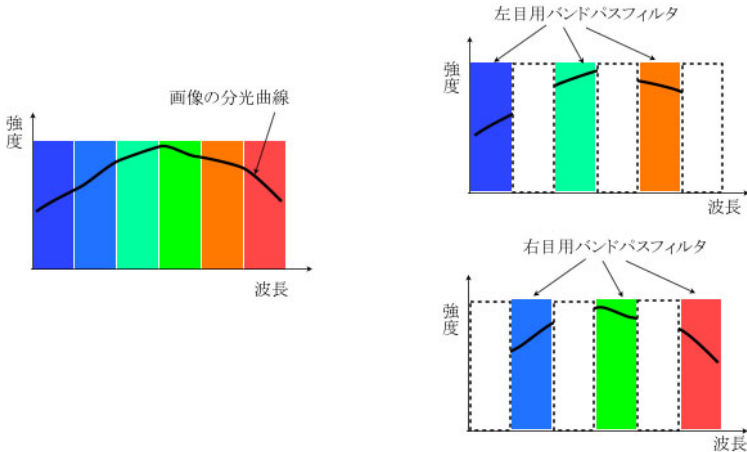


図1・2 波長分割方式

この方式は、左右の色味が若干異なってしまう点と、高精度のバンドパスフィルタが必要であるため、眼鏡が割高になってしまうといった課題はあるが、ディスプレイ側、スクリーン側は従来と同じスクリーンを用いることができるメリットは大きい。一般にアナグリフ方式は、左右の視点の画像を同時に表示するため、ディスプレイ解像度は半分になってしまう。そこで、最近では、左右の画像を、1つの画面で分けるのではなく、交互に時分割で表示する方式も存在する。この場合、画像を投影するプロジェクタは、144 Hzで左右の眼の映像を交互に切り替えて投影している。3D眼鏡を掛けた視聴者は、左右の眼の映像をそれぞれの眼で、72 Hzで視聴することになり、従来のフィルム映画よりも3倍早いフレームレートで映像を提示することになるため、時分割によるちらつきは感じずに、立体映像を楽しむことができる。

## (2) 偏光眼鏡方式

偏光眼鏡方式は、光の偏光状態を変え、偏光フィルタで左右の眼の画像を分離して提示する方式である。使われている偏光状態としては、直線偏光と円偏光の2種類がある。

直線偏光を利用する方式は、左右の眼に提示する画像を直行する偏光状態で区別する。図1・3に示すように、右の眼には、垂直偏光状態の光のみ、左目には水平偏光状態の光のみを透過させる偏光フィルタを用いて、左右の眼の映像を分離している。また、直線偏光ではなく、円偏光を利用した方式もある。円偏光方式の場合は、右目・左目用の映像の光線を右回転の円偏光状態と左回転の円偏光状態の光線を用いて画像を分離する。この場合は、透過する光の角度範囲が広いため、頭を傾けても立体視が可能であるが、直線偏光の方式に比べ、光の分離性能が良くなく、左右の画像が混じってしまうという問題もある。

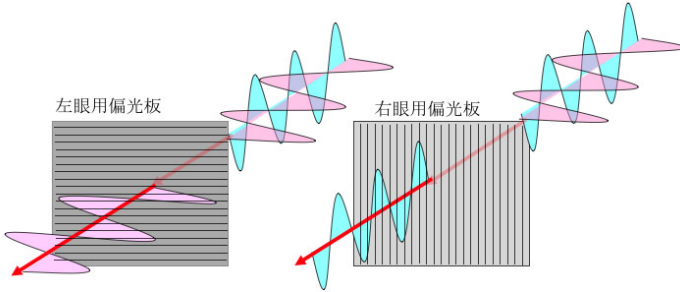


図 1・3 偏光眼鏡方式

偏光眼鏡方式は、偏光フィルタを眼鏡に貼り付ければよく、安価に眼鏡を作ることが可能である。しかしながら、映画館のように映像を投影する方式の場合、異なる2つの偏光状態で映像を投影するために、通常は、2つのプロジェクタを用意しなければならない。また、従来の一般的なスクリーンでは、光が反射する際に、偏光状態も変化してしまう。そのため、偏光方式で用いるスクリーンは、反射した光の偏光状態が変化しないように、特殊なシルバースクリーンを用意しなければならない。

据え置き型ディスプレイでは、先の2種類の偏光状態を有する偏光フィルタをディスプレイ表面に走査線毎に交互に貼り付ける方式がある。この場合、縦方向の解像度が半減してしまうというデメリットは存在するが、昨今のディスプレイの高解像度化に伴い、クリアな3次元映像が実現できている。また、左右の眼の映像は同時に表示されているため、フリッカがないことも特徴である。

### (3) 液晶シャッター方式

液晶シャッター方式は、液晶シャッターを取り付けた眼鏡で、左右の眼の映像を時分割で切り替える方式であり、家庭用3DTVの方式として急速に普及した。それは、家庭用TVが、高解像度化に加え、動きぼけをなくすために高フレームレート化が進んでいたことから、この高フレームレートの制御回路を左右の画像の高速切り替えに容易に流用できたことが一つの要因である。液晶シャッターによる3次元表示は、ディスプレイ側で左右の視点の画像を高速(1/60秒以下)に切り替え表示し、それに同期して眼鏡側の左右の液晶シャッターがON/OFFする仕組みである。右目用の映像が提示されている間は、視聴者の液晶シャッター眼鏡の左目のシャッターが閉じられた状態となり、ディスプレイ側が左目の映像に切り替わると、シャッター眼鏡側は、左

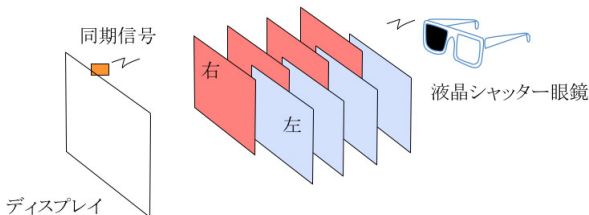


図 1・4 液晶シャッター方式

目にシャッタが閉じられて、右目のシャッタが開けられる。この切り替えを高速に行うことでフリッカなしの高品質な立体映像が観察できる。

### 3-1-2 裸眼式

両眼視差をベースとした2眼の裸眼方式は、観察者が眼鏡を掛ける代わりに、ディスプレイ側が光の方向を制御して左右の眼に降り分けていることになる。主に、パララックスバリア方式、レンチキュラーレンズ方式、光源分割方式が使われている。

#### (1) パララックスバリア方式

パララックスバリア方式は、ディスプレイに表示された右目用・左目用の映像がそれぞれの異なる眼で見えないようにバリアで隠す方式である。基本的な原理は、1902年に Ives により提案された。この方式は、図 1・5 に示すように、ディスプレイ全面にスリット上のバリアを配置し、左右の映像が、それぞれの反対側の眼で見えないように隠すことで、左右の映像を分離する方式である。この手法はモアレパターンが現れやすいことから、スリットを階段状にしたステップバリア方式<sup>3)</sup>も提案されている。また、液晶パネルを利用してスリットを表示することで、スリットを電氣的に ON/OFF することが可能となるため、2D・3D モードの切り替えが必要な携帯電話や携帯ゲーム機に多く利用されている。この方式は、バリアにより光を遮ってしまうため、3D 表示したときに輝度が低下してしまうという課題がある。また、ディスプレイに2つの視差画像を同時に表示するため、解像度が半分になってしまう課題がある。これを解決する手段として、バリアを、図 1・5 の白黒の位置が反転した2パターン用意し、時分割で交互にバリアを切り替え、これに同期させてスクリーン側の右眼左目用画像を入れ替えれば、解像度劣化のない立体映像を表現することもできる<sup>4)</sup>。

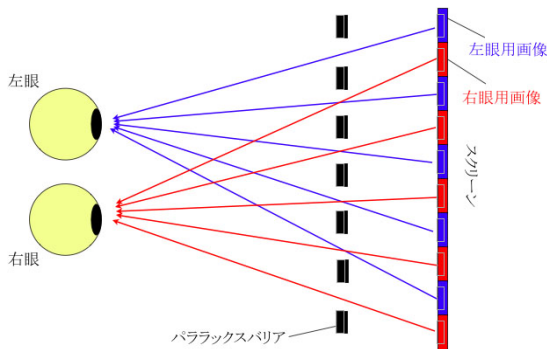


図 1・5 パララックスバリア方式

#### (2) レンチキュラーレンズ方式

レンチキュラーレンズ方式の原理は、1912年、Hess によって特許が出されている。この方式は、かまぼこ上のレンズを横に並べたシートで、ディスプレイの光線の方向を制御する方式である。図 1・6 に示すように、レンズの背後に右眼用、左眼用の画像を交互に配置し、レンズ効果により、左右の眼に、それぞれの画像の光のみが届くようにしている。しかし、レンズを

ディスプレイに貼り付けてしまうことから、バリア方式のような2D・3Dの切り替えが難しい。また、レンズを貼り付けた状態で2D画像を表示すると解像度が低下してしまうという課題があったが、昨今のディスプレイの高解像度化により、この課題を解決する方式も提案されている。つまり、左右視差画像を表示する横方向の画素数を倍にした横倍密度画素（Horizontal Double-Density Pixels）構成により、3D表示であっても解像度劣化のない表示も可能である<sup>5)</sup>。

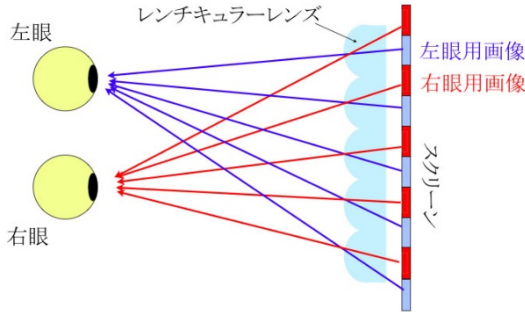


図1・6 レンチキュラーレンズ方式

### (3) 光源分割方式

右眼用、左眼用の光源を用意し、左右交互に切り替え、この切り替えに同期させて画像を切り替える方式であり、時分割方式の一種である（図1・7）。観察者の左右の眼に、それぞれに単独に光を照射できる2組のLED光源を備えたバックライトと、視差画像を高速に書き換える液晶パネルを組み合わせた方式がある<sup>6),7)</sup>。右眼には右眼用の光、左目には左目用の光が入る位置から観察すると、3次元画像として見る事ができる。この方式は、立体視ができる領域がディスプレイ中央正面に限定されるが、視域を外れた場合は片方の視点の画像のみが見えるため、視差情報を利用した他の手法の課題である逆視の状態が発生しない点が特徴である。

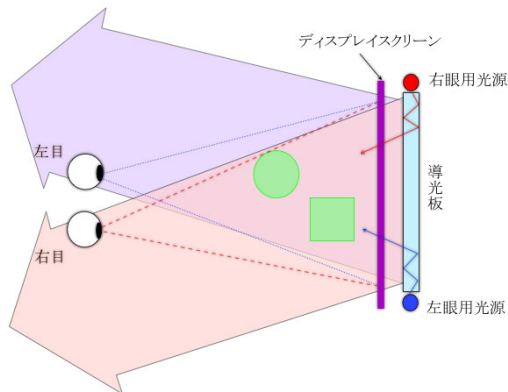


図1・6 スキャンバックライト方式

## ■参考文献

- 1) “立体視テクノロジー 一次世代立体表示技術の最前線—,” (株)NTS, 2008.
- 2) 河合隆史, 盛川浩志, 太田啓路, 阿部信明: “3D 立体映像表現の基礎—基本原理から制作技術まで—,” オーム社, 2010.
- 3) Mashitani et al. : “Step barrier system multiview glassless 3D display,” SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI, Proceedings, vol.5291, pp.265-272, 2004.
- 4) B. Kim, et al. : “A 2.4 inch 4 view 3D Display,” IDW'07, 3D4-3, pp.2263-2266, 2007.
- 5) S. Uehara, N. Ikeda, N. Takanashi, M. Iriguchi, M. Sugimoto, T. Matsuzaki, H. Asada : “A 470×235-ppi poly-Si TFT-LCD for high-resolution 2-D and 3-D autostereoscopic displays,” Journal of the SID vol.13, no.3, pp.209-214, 2005.
- 6) A. Yuuki, et al. : “A new field sequential stereoscopic LCDs by use of dual-directional-backlight,” Asia Display 2004, p.255, 2004.
- 7) 結城昭正: “スキャンバックライト立体 LCD—高精細で見やすい 3D-LCD—,” 日本化学会講演予稿集, vol.86, no.1, p.91, 2006.

## ■2 群-4 編-3 章

---

### 3-2 多眼式



## ■2 群-4 編-3 章

### 3-3 体積表示

(執筆者：陶山史朗) [2011年7月 受領]

体積表示（体積型 3D 表示方式，Volumetric 3-D display，奥行き標準化型とも呼ばれる）は、実物の 3D 物体を、光点の集積，あるいは光点の 2 次元的な集合体である 2D 画像の積層として再現する方式である<sup>1)2)</sup>。図 3・1 に、体積表示の原理を 2D 画像の積層で再現する場合を例として示す。まず、通常の 3D 物体を奥行き方向に標準化し、2D 像（奥行き標準化像）の集まりとする。次に、これらの奥行き標準化像を積層して提示することにより、3D 像の体積表示を行う。標準化と積層の仕方に関して、図 3・1 は一例であり、各方式において異なる。また、光点の集積で再現する方式では、実物を光点の集積に分解し、これを空間に再現することで体積表示を行う。

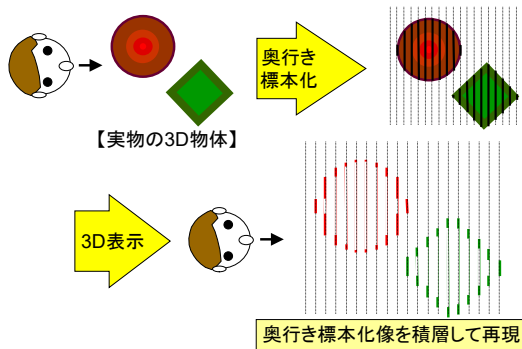


図 3・1 体積表示の原理の例

体積表示は、3D 像を構成する空間の光点を観察者が実際に見ることになるため、立体視の生理的要因（両眼視差，輻輳，ピント調節，運動視差）<sup>3)</sup>の間で矛盾が発生することが少ない利点を有しており，疲労感<sup>4)</sup>や違和感を抑制できると期待される。一方，観察者から見て後方の画像が透けて見えるファントム現象や，視点を変えても 3D 像の明るさが変化しない欠点を有しており，CT 画像などの元来より透けている表示コンテンツに適していると考えられる。ただし，他の 3D 表示方式との融合も提案されており，これにより疲労感や違和感を抑えつつ，一般的な 3D 映像を表現することも可能となると考える。

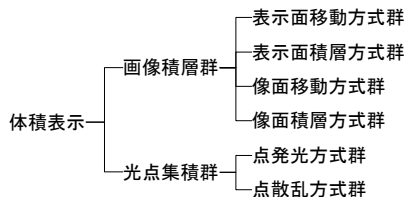


図 3・2 体積表示の分類

図 3・2 に、体積表示の分類例を示す。大きな分類としては、2D 画像の積層で表現する画像積層群と、光点の集積で表現する光点集積群に分けられる。前者の画像積層群としては、実際の 2D 表示装置を移動/積層する方式群と、2D 像を形成して移動/積層する方式群に分けられる。移動の方向は、平行、回転など各方式によって異なる。後者の光点集積群としては、空間の一点からの発光を利用する点発光方式群と、光ビームの散乱点で構成する点散乱方式群に分けられる。

体積表示の提案は他の 3D 表示方式に比べて比較的新しいが、例えば 1960 年代に提案されたパリアフォーカルミラー方式<sup>9)</sup>をはじめとして、多くの方式が提案されてきた。近年、1990 年代以降、また新たな方式の提案がなされるようになってきている。以下、最近の提案を中心に紹介する。

### 3-3-1 表示面移動・積層方式群

2D 表示装置を直接的に移動して積層させる方式として、多くの方式が提案されてきている。移動方向としては、平行、回転などがある。移動周期は残像時間内であることが必須なため、高速な移動が必要となる。この高速な移動において空気抵抗の影響が大きく表示装置が遠動しやすく、大画面化や奥行きを深くするには課題があると考えられる。この遠動の影響は、平行の方が大きいと考えられる。そこで、平行の場合に遠動の影響を抑制する駆動法などが提案されている<sup>9)</sup>。ただし、回転の場合には回転中心付近と外側で 3 次元的な解像度が異なってくる欠点がある。また、3D 像の領域に実際に表示装置が存在するため、3D 像に直接手を触れることができない欠点も有する。一例として、Actuality Systems の Perspecta を紹介する<sup>7)</sup>。図 3・3 に示すように、3 枚のミラー群とともに円盤状のスクリーンを高速で回転させ、これに高速プロジェクタにより回転方向に標本化した標本化像を 198 層で提示することにより 24 frame/s の 3D 像を得ている。全周から 3D 像を観察可能である利点を有し、表示領域は直径 25 cm である。ただし、円盤の高速回転の際に円盤に遠動が生じていると考えられ、3D 像の若干のぼけの原因となっている。

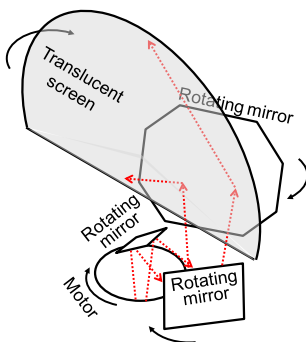


図 3・3 表示面回転方式

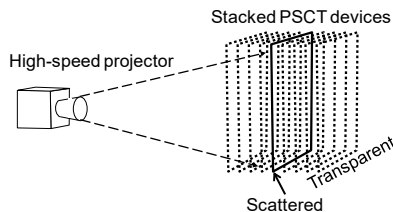


図 3・4 散乱板積層方式の原理

次に、表示装置を積層する方式は、透過度の高い表示装置が少ないため、実機としての提案は少ない。まず、白黒液晶ディスプレイは比較的透過度が高いため、この積層が提案されている<sup>8)</sup>。ただし、カラー化が困難であり、かつ枚数が増えると後方の解像度が低下する課題が指

摘されている。次に、透過度の高い表示装置として、図 3・4 に示すように散乱/透過を高速に切り替えられる PSCT (Polymer Stabilized Cholesteric Texture) 素子の積層を用いた方式が提案されている<sup>9)</sup>。積層した PSCT 素子の中の 1 枚のみを散乱状態とし他を透過状態として、これを高速切り替えることにより奥行き方向に散乱スクリーンが移動している状態を等価的に実現できる。これに高速プロジェクトで画像を投影することにより、体積型 3D 像を提示できる。20 層の積層で、表示領域：約 40×30×10 cm, 更新レート：20 frame/s, 視域角：90 度を実現しており、表示品質も比較的高い。

最後に、積層枚数を減らしても連続的な奥行きを表現できる DFD (Depth-Fused 3-D) 方式が提案されている<sup>10)~14)</sup>。図 3・5 に、2 枚積層の場合の原理図を示す。まず、表示したい 3D 物体の 2D 射影像を前後面に観察者から見て重なるように表示すると、奥行き方向に融合した 1 つの像として知覚される。更に、前後面の輝度の割合を変化させると、その奥行きが変化して知覚される。

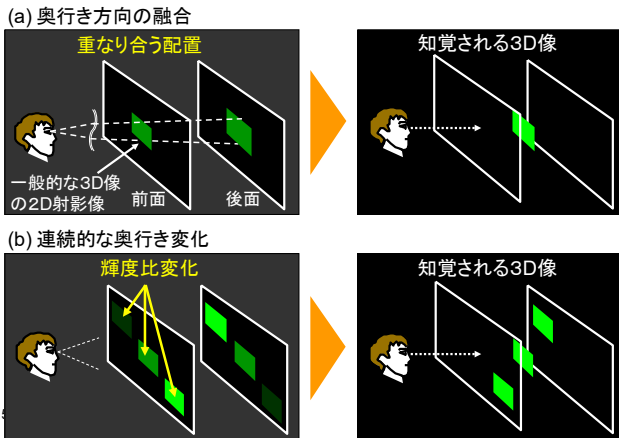


図 3・5 DFD (Depth-Fused 3-D) 表示方式の原理

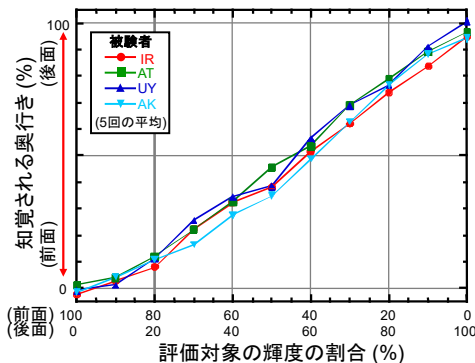


図 3・6 DFD 表示における奥行き知覚

図 3・6 に、輝度比と知覚される奥行き位置との関係を示す。被験者による違いは少なく、各被験者とも輝度比に応じて連続的に奥行きが変化して知覚されている。図 3・7 に、具体的な構成方法を示す。

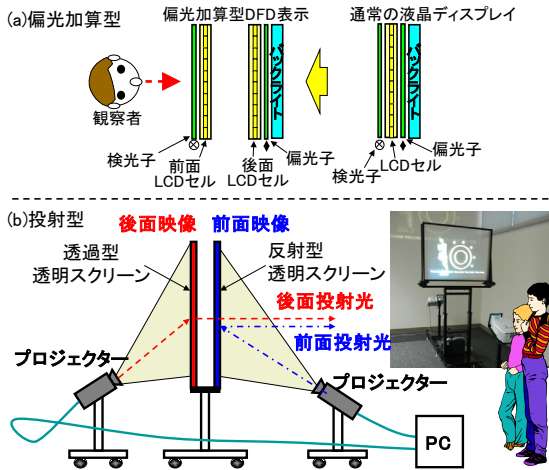


図 3・7 DFD 表示の具体的な構成方法

液晶ディスプレイを用いる場合には、図 3・7(a)のように前後面の間の偏光板をなくした構造とし、偏光方向の加算性を利用した積層方法が提案されている。偏光板を除くことで輝度の割合の制御が容易になる利点がある。大画面用としては、図 3・7(b)のようにプロジェクタと異方性スクリーンの 2 組構成が提案されている。この異方性スクリーンは、散乱/透過に対して投射角度と偏光方向による選択性を有している。この構成により、観察位置は限定されるが、40 インチ以上の大画面 3D 表示が可能となる。

### 3-3-2 像面移動・積層方式群

2D 表示面そのものを移動・積層するのではなく、レンズ系やミラー系を用いて、その 2D 像を移動・積層する方式が、パリアフォーカルミラー方式<sup>5)</sup>をはじめとして多く提案されている。この方式群は表示面移動・積層方式群に比べて空気抵抗の影響や表示装置そのものの透過度の影響を受けにくい利点があるが、レンズやミラー光学系によって視域角が制限される面がある。また、体積表示においては、この方式群だけが、何も無い空中に 3D 像を描画できる利点を有する。

2D 表示面の像を高速に移動させ、時分割で積層する方式が幾つか提案されている。まず、図 3・8 に示すように、ミラーを振ることで凸レンズあるいは凹面鏡への入射角を変化させ、斜めに配置された 2D 表示面の結像位置を変えて 2D 画像を時分割で積層する方法が提案されている<sup>15),16)</sup>。積層される 2D 像は観察者から見て斜めに積層される形となり、積層面の間の境界を分かりにくくできる利点を有していると考えられる。図 3・9 に空間への 3D 表示例を示す。視域角は横 10×縦 5 度程度であり、観察位置の変化に対して、良好に視差が生じていることが

分かる。表示領域は  $10 \times 10 \times 6.5 \text{ cm}$  とまだ小さいが、積層する 2D 画像の数として 200 層以上がすでに実現できており、かつ動画としても 20 frame/s が得られており、今後の展開が期待される。

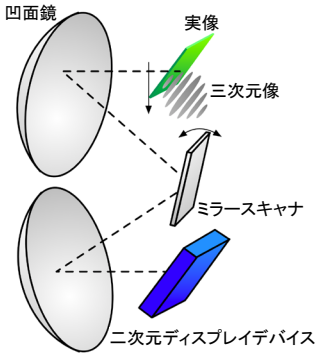


図 3・8 傾斜像面を用いた 3D 表示方式

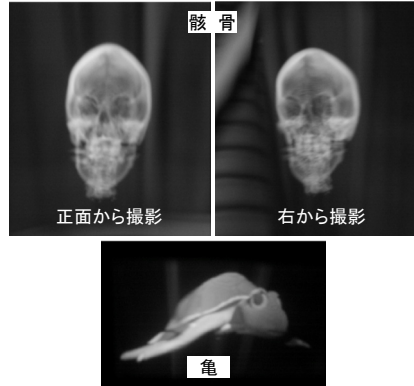


図 3・9 傾斜像面を用いた 3D 表示例

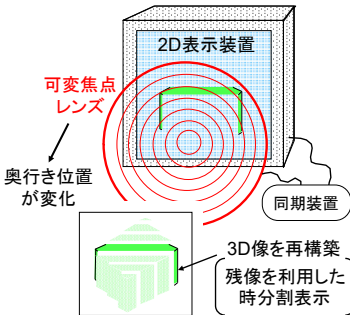


図 3・10 液晶可変焦点レンズ方式

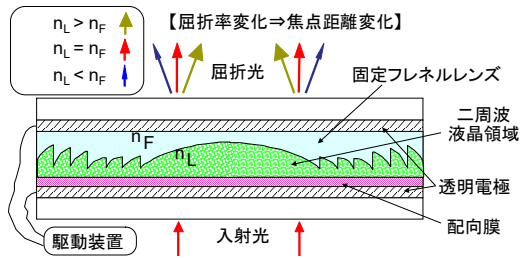


図 3・11 液晶可変焦点レンズの構造と動作原理

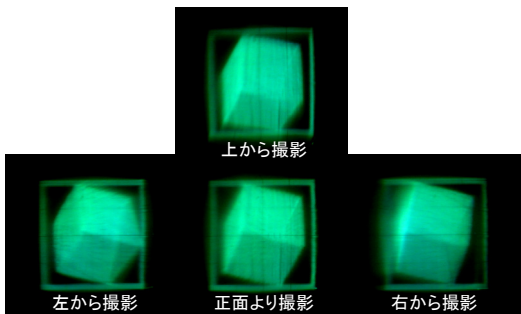


図 3・12 液晶可変焦点レンズ方式での 3D 表示例

図 3・10 に示すように、焦点距離を高速で変化できる液晶可変焦点レンズを利用して、2D 表示面の像位置を移動させて積層する方式も提案されている<sup>17)</sup>。キーマイデバイスである液晶可変焦点レンズは、電界により液晶の傾きを高速変化させることで、図 3・11 に示すように実効屈折率を高速変化させ、焦点距離を連続的に高速変化できる。図 3・12 に 3D 表示例を示す。単色ではあるが、空間浮遊 3D 像を実現できており、視域角も±10 度程度あり十分に両眼で立体視できる。

次に、図 3・13 に示すように、偏光方向により 2 種類の焦点距離を有する偏光 2 焦点レンズを積層し ( $n$  個)、偏光方向を切り替えることで、多数 ( $2^n$  個) の焦点距離が切り替え可能な光学系を作り出し、これを用いて 2D 画像を積層する方式が提案されている<sup>18)</sup>。視域や表示領域はまだ小さいが、図 3・14 に示すように奥行き異なる空間浮遊像が実像として描画可能であり、表示画像も比較的にきれいな利点がある。

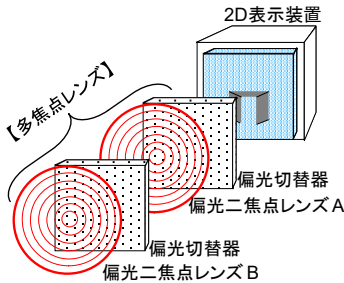


図 3・13 多焦点レンズ方式の概要

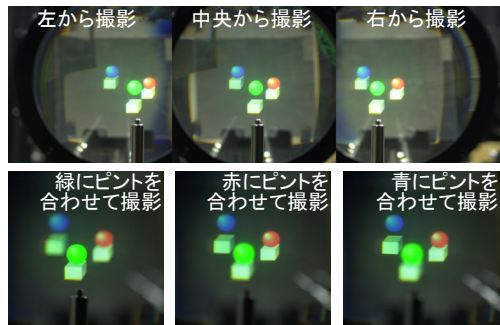


図 3・14 多焦点レンズ方式における表示例

これまでと異なる視点から、体積表示と多眼式を組み合わせた方式が提案されている<sup>19)~21)</sup>。異なる方式の融合により、欠点を補うという新たな試みである。この方式は、図 3・15 に示すように、先に述べた 2D 表示面の積層による体積表示に DFD 表示を適用したものと、多眼式の一つである Coarse Integral Imaging 方式を融合させたものである。この融合により、体積表示の利点である疲労感や違和感などを抑制しながら、体積表示の欠点であるファントム現象をなく

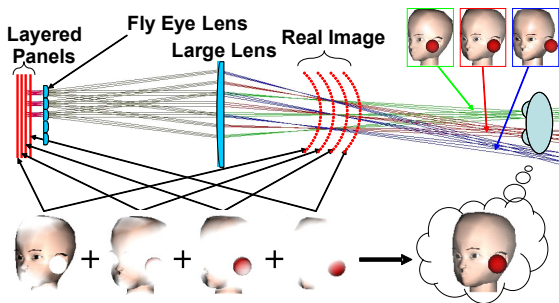


図 3・15 体積表示と多眼表示の融合方式

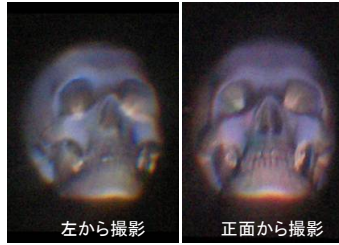


図 3・16 融合方式による 3D 表示例

すことができ、かつ視点によって明るさの異なる 3D 像も表現できるようになる。図 3・16 に、空間への 3D 表示例を示す。3 層の積層と横 10×縦 6 視差を有することで、違和感の少ない体積表示の特性を活かしながら、見る位置よる 3D 像の違いを見事に表現できている。また、画質に若干の問題を残しているが、これは主に使用している光学系に起因するため、本質的な問題ではないと考えられる。

### 3-3-3 点発光方式群

点発光方式群は、何らかの励起により点発光を発生させ、これを 3 軸方向にスキャンすることにより、3D 表示を行う方式である。現在のところ、特殊な媒質中における二光子励起による発光を利用するものと、高エネルギー密度のパルスレーザーによる空中プラズマの発光を利用するものが提案されている。エネルギー効率の面から大がかりになる面を持つが、本質的に上下左右を問わず全方位から見える 3D 像を構築できる利点を有する。

二光子励起を用いる方法は 1960 年代から提案されており、図 3・17 に示すように 2 種類の波長の高出力レーザーを用いて、その交差点のみを発光させ、これをスキャンすることで 3D 像を得ている<sup>2)</sup>。通常の一光子励起による発光では、目的の位置までの媒質中を走っている間に発光してしまうため 3D 表示できない。これに対して、二光子励起では 2 種類の波長のレーザーが交差する点のみしか発光しないため、3D 表示を行うことが可能となる。現状では表示領域：1 cm<sup>3</sup>、解像度：0.1 mm 程度である。

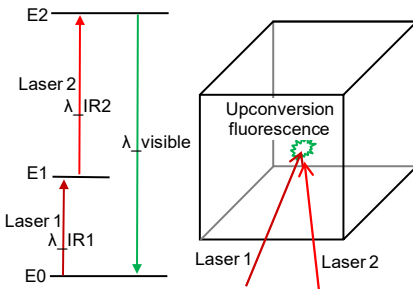


図 3・17 二光子励起による点発光

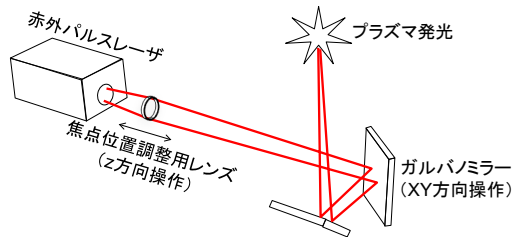


図 3・18 空中プラズマによる点発光

次に、図 3・18 のように、高出力 (200 W, 1 kHz) のパルスレーザーの集光点において空气中にプラズマが発生し、白色に発光することを用いた 3D 表示方式が提案されている<sup>23)</sup>。現状では、1000 dots/s と表示できる画像がかなり限定されるが、空中に全方位から見える明るい表示を実現できる。何もない空中に全方位表示が可能となるため、緊急時の掲示などの特殊用途に有効と考えられる。

### 3-3-4 点散乱方式群

点散乱方式群は、主にレーザービームを 3D スクリーンに当て、その散乱光により 3D 表示を行う方式である。3D スクリーンは、通常は高速回転する斜めや螺旋状のスクリーンによって構成される。この高速回転に同期して、レーザービームを正確にスキャンすることで表示を行う。散乱によるため、視域を広くできる利点がある。ただし、現状ではレーザービームのスキャン速度に限界があるため、表示できる画素数が限られている。まず、角度を調整可能な斜めのスクリーンを高速で回転させ、これに上方よりレーザービームを照射する方式が提案されている<sup>24)</sup>。表示領域が直径 1 m 近くと極めて大きい、画素数が領域の大きさに比べて少ない欠点がある。次に、螺旋状のスクリーンを高速回転させて、レーザービームを照射する方式が提案されている<sup>2)</sup>。表示領域：直径 30 cm, 更新レート：20 frame/s で、音響光学素子を用いてレーザービームを高速スキャンすることで、描画できるボクセル数を増加させている。ただし、螺旋状のスクリーンにより自己オクルージョンが発生しており、描画できない領域を有している。

最後に、体積表示は直接的に光点や 2D 画像を 3 次元的に集めることで 3D 表示を行うため、疲労感や違和感を抑制できると期待される。しかしながら、体積表示だけではファントムとなる欠点があり、かつ観察位置による色や明るさの違いを表現できない。したがって、他の表示方法と積極的に融合して、欠点を補うことにより次のステージへ上がれると考えられる。更に、単に光学的に積層するだけでは、必要とするデータ量が 2D 画像にして何百枚以上と膨大となるため、これを減らすための立体知覚的なブレイクスルーも必要となると考えられる。

今後、体積表示に対して、他方式との融合や知覚現象との融合が行われ、必要なデータ量が少なく、かつ自然で疲労感や違和感の少ない 3D 表示システムに発展していくことを期待したい。

#### ■参考文献

- 1) 増田千尋：“3次元ディスプレイ,” 産業図書, pp.139-153, pp.192-193, 1990.
- 2) K. Langhans, D. Bahra, D. Bezcenya, D. Homanna, K. Oltmanna, K. Oltmanna, C. Guilla, E. Riepera, and G. Ardeyb：“FELIX 3D Display: An Interactive Tool for Volumetric Imaging,” Proc. SPIE, 4660, p.176-190, May 2002.
- 3) 大越孝敬：“三次元画像工学,” 朝倉書店, pp. 36-44, 1991.
- 4) 三橋哲雄, 畑田豊彦, 矢野澄男：“画像と視覚情報科学,” コロナ社, pp.269-279, 2009.
- 5) A.C. Traub：“Stereoscopic Display Using Rapid Varifocal Mirror Oscillations,” Applied Optics, vol.6, no.6, pp.1085-1087, Jun. 1967.
- 6) 山本 欧：“蛍光表示管を用いたボリュームディスプレイと表示データ生成ツール,” 芸術科学会論文誌, vol.8, no.1, pp.15-24, 2009.
- 7) G.E. Favalora, J. Napoli, D.M. Hall, R.K. Dorval, M.G. Giovinco, M.J. Richmond, and W.S. Chun：“100 Million-



- voxel volumetric display,” Proc. SPIE, vol.4712, pp.300-312, Apr. 2002.
- 8) 永津昭人：“積層型液晶パネルによる3次元画像表示,” テレビジョン学会技術報告, vol.20, no.5, pp.61-66, 1996.
  - 9) A. Sullivant：“DepthCube solid state 3D volumetric display,” Proc. SPIE, vol.5291, pp.279-284, 2004.
  - 10) S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira, and S. Sakai：“Apparent 3-D image perceived from luminance-modulated two 2-D images displayed at different depths,” Vision Research, vol.44, pp.785-793, 2004.
  - 11) 高田英明, 陶山史朗, 伊達宗和, 昼間香織, 中沢憲二：“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.
  - 12) S. Suyama, Y. Ishigure, H. Takada, K. Nakazawa, J. Hosohata, Y. Takao, and T. Fujikado：“Evaluation of Visual Fatigue in Viewing a Depth-Fused 3-D Display in Comparison with a 2-D Display,” NTT Technical Review, vol.3, no.12, pp.82-89, Dec. 2005.
  - 13) S. Suyama, H. Takada, K. Uehira, S. Sakai, and S. Ohtsuka：“A New Method for Protruding Apparent 3-D Images in the DFD (Depth-Fused 3-D) Display,” SID’01 Digest of Technical Papers (53.3), pp.1300-1303, Jun. 2001.
  - 14) M. Date, H. Takada, S. Suyama, K. Tanaka and K. Nakazawa：“Projection-Type Depth Fused 3D (DFD) Display,” Proc. IDW’06 (3Dp-4), pp.1393-1396, 2006.
  - 15) D. Miyazaki, K. Shiba, K. Sotsuka, and K. Matsushita：“Volumetric display system based on three dimensional scanning of inclined optical image,” Optics Express, vol.14, no.26, pp.12760-12769, Dec. 2006.
  - 16) D. Miyazaki, T. Honda, K. Ohno, and T. Mukai：“Volumetric Display System Using a Digital Micromirror Device Based on Inclined-Plane Scanning,” Journal of Display Technology, vol.6, no.10, pp.548-552, Oct. 2010.
  - 17) S. Suyama, M. Date, and H. Takada：“Three-Dimensional Display System with Dual-Frequency Liquid-Crystal Varifocal Lens,” Jpn. J. Appl. Phys. 1, vol.39, no.2A, pp.480-484, Feb. 2000.
  - 18) T. Sonoda, H. Yamamoto, and S. Suyama：“A new volumetric 3D display using multi-varifocal lens and high-speed 2D display,” Proc. SPIE, vol.7863, p.786322, Jan. 2011.
  - 19) H. Kakeya, T. Kurokawa, and Y. Mano：“Electronic realization of coarse integral volumetric imaging with wide viewing angle,” Proc. SPIE, vol.7524, p.752411, Jan. 2010.
  - 20) S. Sawada and H. Kakeya：“Coarse integral volumetric imaging with flat screen and wide viewing angle,” Proc. SPIE, vol.7863, p.78631L, Jan. 2011.
  - 21) Y. Ueda and H. Kakeya：“Multilayered Integral Imaging with Improved Image Clarity,” SID’11 Digest of Technical Papers (P7), 2011.
  - 22) E. Downing, L. Hesselink, J. Ralston, and R. Macfarlane：“A Three-Color, Solid-State, Three-Dimensional Display,” Science, vol.273, pp.1185-1189, 1996.
  - 23) 木村秀尉, 相田繁夫, 浅野 明, S. Jarusirisawad, 佐々木史雄, 木村龍実, 屋代英彦, 森 雅彦, 鳥塚健二, 菅 博文, 中村俊一, 久保村浩之, 松岡伸一, 吉井健裕, 佐藤方俊：“空間立体描画技術とその高性能化,” 映像情報インダストリアル増刊号, vol.39, no.13, pp.50-53, Dec. 2007.
  - 24) R.D. Williams and F. Garcia：“A Real-Time Autostereoscopic Multiplanar 3D Display System”, Society of Information Display Digest, pp.91-94, 1988.

## ■2群-4編-3章

### 3-4 ホログラム

(執筆著者：吉川 浩) [2018年3月 受領]

ホログラフィの原理は、1948年にデニス・ガボールにより電子顕微鏡の性能向上法として発表された<sup>1)</sup>。当時はレーザーのような干渉性の良い光源がなかったためあまり注目されなかった。1964年にエミット・リースらがレーザーを用いて汽車の模型を記録した写真を掲載した論文を発表し<sup>2)</sup>、3次元画像の記録・再生法として注目されるようになった。当初は「波面再生法」と呼ばれ、その名の通り被写体で反射や散乱された光の波面を記録・再生する技術であり、表示以外にも計測や光学素子、光記録、偽造防止などにも利用されている。後に「ホログラム」と呼ばれるようになった。

ホログラム (Hologram) とは、完全な記録という意味で、被写体からの光をホログラム面における波面情報を完全に記録し再生することができる。ここでいう「完全」とは、撮影時の被写体からの光と物理的に全く同じ光を再生できるということであり、再生像を見る限りは実物との区別ができない。ホログラムとは波面が記録された物を指し、ホログラムを作る方法をホログラフィと呼んでいる。本文では、ホログラフィの原理からその種類や応用などを3次元画像表示の観点から解説する。それ以外の用途も含めたより詳しい解説は専門書を参照されたい<sup>3)~6)</sup>。

#### 3-4-1 ホログラフィの原理

波面再生であるホログラフィは、他の3次元表示技術に比べて、より奥行き深い像でも高い画質を維持できる特徴がある。物体からの光の波面を記録するためには、光の位相分布を記録する必要があるが、位相を直接記録できる記録材料や電子デバイスは知られていない。そこで、光の干渉を利用して、位相情報を振幅情報に変換して記録を行う。図4・1に示すように同じレーザー光源から出た光を2つに分け、一方で物体を照明し、もう一方の光は記録材料全体に一樣に照射する。物体で反射や散乱をした光を物体光と呼び、一樣に照射した光を参照光と

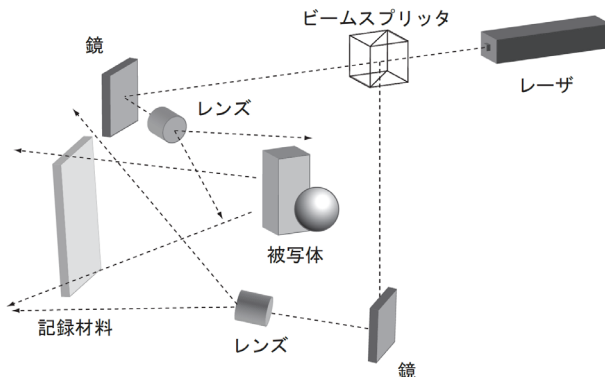


図4・1 ホログラムの記録光学系の例

呼ぶ。物体光と参照光が記録材料上で干渉し、物体光の位相情報を干渉縞強度の空間的な周期に変換し、物体光の振幅情報は干渉縞強度のコントラストに変換して記録する。干渉縞が記録された材料を現像処理し、図4・2のように記録時と同じ位置に戻し、記録時の参照光のみを照射すると、記録位置に物体があった位置に再生像を観察することができる。このとき、記録時と再生時の光の波長や参照光の条件が同じならば、歪みのない再生像を得ることが可能である。逆に言うと、波長や参照光の条件を変えてしまうと再生像が歪んでしまう。また、再生用の照明として白色光源を用いると波長ごとに異なる歪みを持つ再生像が重なって見えるためにぼんやりと広がった像になってしまう。そのため、ホログラムを白色光で再生するには、後述するように何らかの工夫が必要となる。

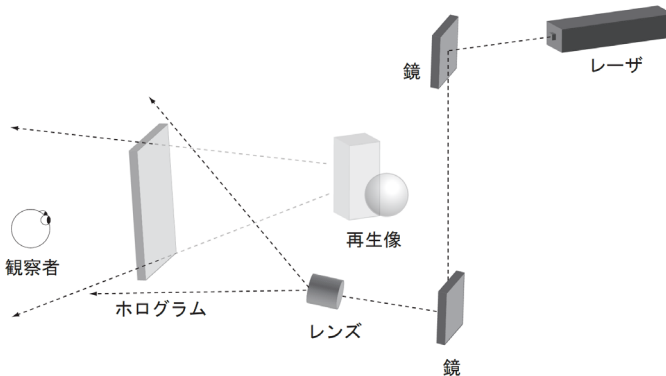


図4・2 ホログラムの再生光学系の例

### 3-4-2 各種のホログラム

ホログラムの分類法には、記録材料の厚みや像の再生方法、像の記録方法がある。以下に、代表的なホログラムについて簡単に説明する。

#### (1) フレネルホログラム

図4・1は最も基本的なホログラムの記録光学系で、物体がホログラムに比較的近く、フレネル回折領域にあるのでフレネルホログラムと呼ばれる。また、再生にもレーザーが必要であるのでレーザーホログラムとも呼ばれる。

#### (2) イメージホログラム

フレネルホログラムを太陽光や電球などの光、いわゆる自然光で照明すると波長ごとに異なる角度で回折し、結像位置も波長ごとに異なるため、ぼやけた像となってしまう。このときの再生像のぼけは、ホログラムと像の距離が近いほど小さくなる。しかし、被写体をホログラムのすぐ近くに置くくと参照光を遮ってしまい、干渉縞が記録できない。そこで、図4・3に示すように結像レンズを使い被写体の像をホログラム上に結像させて記録するイメージホログラムが提案された<sup>7)</sup>。このホログラムは奥行きがそれほど深くなければ、白色光でもぼけの少ない再生像を観察できる。

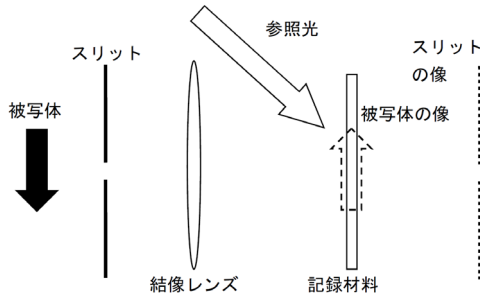


図 4・3 イメージ及びレインボウホログラムの記録光学系の例  
イメージホログラムの記録では、スリットは使用しない。

### (3) レインボウホログラム

レインボウホログラム<sup>8)</sup>は奥行きのある深い像でも白色光で鮮明に再生できる。イメージホログラムでは被写体と感光材料の間に結像レンズを挿入したが、レインボウホログラムでは更に図 4・3 のように被写体と結像レンズの間に水平なスリットを挿入する。記録したホログラムを白色光で再生すると、スリットの像が波長により異なる角度で再生される。スリットの像の位置からホログラムを観測すると、その位置に対応する単色での像が観測されるため、波長の違いによる像のぼけが解消されて鮮明な像が観測される。視点を左右にずらしたときは3次元画像であるので異なる視点からの像が観測できる。ただし、視点を上下に移動したときは、像の色が変化する。クレジットカードなどについている銀色のホログラムにもレインボウホログラムが多く使われている。

### (4) ホログラフィックステレオグラム

ホログラムの撮影にはレーザーが必要で、干渉縞の細かさは光の波長程度のため撮影中に動かない被写体でないと記録できない。そのため、撮影可能な対象が限られてしまう。そこで、多数の視点から撮影した2次元画像をホログラムに多重記録し、視点の移動に伴って画像が切り替わるホログラフィックステレオグラム<sup>9)</sup>が提案された。カメラで撮影できる画像が使えるので屋外の風景や人物、更にはコンピュータグラフィックスからもホログラムが作成できるようになった。この方式は、波面再生ではなく光線再生であり、奥行きのある深い像の場合は像のぼけが問題となる。

### (5) デニシュクホログラム

図 4・1 や図 4・3 では、物体光と参照光をホログラムの同じ側から照射している。この場合、干渉縞はホログラム面内に2次的に分布するので平面ホログラムとも呼ばれる。物体光と参照光をホログラムの反対側から照射すると、干渉縞は感光材料の厚み方向に変化するため干渉縞の周期よりも十分に厚いホログラムが必要となる。このようなホログラムは体積ホログラムと呼ばれる。体積ホログラムの光の回折は、平面ホログラムと異なり波長選択性があり、記録時と同じ条件で白色照明光を照射すると、記録に使用したレーザー光源と同じ波長の光のみが回折されて単色の鮮明な立体像を観察できる。このホログラムは発明者の名前をとりデニシュクホログラム<sup>10)</sup>とも呼ばれる。図 4・4 にデニシュクホログラムの再生像の例を示す。



図 4・4 デニシユクホログラムの白色光での再生像の例

### 3-4-3 デジタルホログラフィディスプレイ

レーザーにより撮影したホログラムは、実物と区別できないほどのリアルな記録が可能であるが、その撮影には特別な機材と専門的な知識と高度な技能が必要である。そこで、コンピュータを使って誰でも簡単にホログラムを作成できるようにする研究が行われている。コンピュータで干渉の計算を行い、高分解能のプリンタで出力するか、液晶などの電気的に書き換え可能なデバイスに表示すればよい。原理は簡単であるが、干渉縞の周期が光の波長程度となるので、超高精細な出力と膨大な画素数が必要なことが問題である。

#### (1) 計算機合成ホログラム

レーザーによるホログラムの記録過程をコンピュータでシミュレーションすることで、ホログラムの干渉縞の生成が行える。3次元表示のためには、物体を点光源の集まりとして計算する方式<sup>11)</sup>が早くから行われていて、白色光再生のための計算方法も各種提案されている<sup>12)</sup>。また、コンピュータグラフィックスのように物体を多角形パッチ（ポリゴン）の集合で表現して干渉縞を計算する手法も提案されている<sup>13)</sup>。

#### (2) ホログラフィックプリンタ

ホログラフィックプリンタ<sup>14)</sup>は、ホログラフィックステレオグラムを出力するものと、計算機合成ホログラムの干渉縞パターンを出力するフリンジプリンタに大別できる。フリンジプリンタでは、電子線描画装置やレーザープロッタなど、半導体集積回路の作成のための機器を利用した例や、専用のプリンタの開発が行われている。また、前述のデニシユクホログラムは白色光再生に適しているが、干渉縞が3次元構造を持つため、直接計算したりプリントすることは困難である。そこで、まず平面ホログラムを計算し、その再生像をデニシユクホログラムとして光学的に転写するプリンタが提案されている<sup>14)</sup>。

#### (3) ホログラフィックビデオ

ホログラフィの原理を応用したビデオディスプレイ（テレビジョン）のアイデアはエミット・リースらにより1965年の論文で既に検討されている<sup>15)</sup>。原理自体は単純で、ホログラムを記録する感光材料を実時間で書換え可能なデバイスに置き換えればよい。しかし、ハイビジョンよりけた違いに高精細で広帯域なデバイスが要求されるので、その実用化は容易ではないが、究極の3次元ディスプレイという夢に向けて活発に研究が行われている<sup>16)</sup>。液晶パネルなどを空間光変調式として利用する方式では、構成をシンプルにできる利点がある。しかし、8Kス

ーパーハイビジョン用のパネルでも 1 枚では画素数が十分ではないので、多数のパネルをタイル状に並べる必要がある。別の方法として、高速の変調器を走査する方式も研究されている。また、レインボウホログラムのように上下方向の視差を棄却すると、要求される画素数を 2 桁程度低減することができ、同一画素数ならば画面を大きくすることが可能である。

#### ■参考文献

- 1) D. Gabor : “A new microscopic principle,” Nature, vol.161, no.4098, pp.777-778 (1948)
- 2) E.N. Leith and J. Upatnieks : “Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects,” Journal of the Optical Society of America, vol.54, no.11, pp.1295-1301, 1964.
- 3) 辻内順平 : “ホログラフィー,” 裳華房, 1997.
- 4) P. Hariharan : “ホログラフィの原理,” オプトロニクス社, 2004.
- 5) 久保田敏弘 : “ホログラフィ入門—原理と実際—,” 朝倉書店, 2010.
- 6) 伊藤智義, 下馬場朋祿 : “ホログラフィ入門—コンピュータを利用した 3 次元映像・3 次元計測—,” 講談社, 2017.
- 7) L. Rosen : “Focused—Image Holography with Extended Sources,” Applied Physics Letters, 9, pp.337-339, 1966.
- 8) S.A. Benton : “Hologram Reconstructions with Extended Incoherent Sources,” J. of Opt. Soc. of America, 59, p.1545A, 1969.
- 9) J.T. McCrickerd and N. George : “Holographic Stereogram from Sequential Component Photographs,” Applied Physics Letters, 12, pp.10-12, 1968.
- 10) Y.N. Denisjuk : “Photographic reconstruction of the optical properties of an object in its own scattered radiation field,” Soviet physics- Doklady, 7, pp.543-545, 1962.
- 11) J.P. Waters : “Holographic image synthesis utilizing theoretical methods,” Applied Physics Letters, vol.9, no.11, pp.405407, 1966.
- 12) H. Yoshikawa : “Computer-Generated Holograms for White Light Reconstruction,” in Digital Holography and ThreeDimensional Display, T.-C. Poon, Ed. Springer, pp.235255, 2006.
- 13) K. Matsushima, M. Nakamura, and S. Nakahara : “Silhouette method for hidden surface removal in computer holography and its acceleration using the switch-back technique,” Optics Express, vol.22, pp.24450-24465, 2014.
- 14) H. Yoshikawa and T. Yamaguchi : “Review of Holographic Printers for Computer-Generated Holograms,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol.12, no.4, pp.1584-1589, 2016.
- 15) E.N. Leith, J. Upatnieks, K. Hildebrand, and K. Haines : “Requirements for a wave-front reconstruction television facsimile system,” J. SMPTE, vol. 74, No.10, pp.893-896, 1965.
- 16) 三科智之 : “立体電子ホログラフィー技術,” 電子情報通信学会誌, vol.93, no.6, pp.492-498, 2010.