

全周観察型立体ディスプレイ

圓道知博

Three-Dimensional Video Displays Viewable from All Horizontal Directions

Tomohiro YENDO

Many researches on three-dimensional video technologies, especially glasses-free displays are activating with progress of the latest display devices and other related technologies. One of the most important characteristics of glasses-free displays is the width of the viewing zone. Some kinds of displays allow observers to see 3D images from all horizontal directions. By displaying principles, such displays can be classified into three types: volume display type, multi-view type, and ray-based type. In this report, the latest instances of such all-around display technologies are described.

Key words: all-around display, multi-view, ray-based, volume display, multiplex hologram

「全周」という言葉は、立体ディスプレイの分野では2種類の意味で使われている。1つは、観察者の周囲を映像で取り囲むという意味であり、特にバーチャル・リアリティーの分野でも高い没入感を得る目的で使用される。イリノイ大学のCAVE¹⁾や、東京大学のTWISTER²⁾などがこれにあたる。もう1つは、立体映像の周りを観察者が自由に動き回ってさまざまな角度から眺めることができるようなものである。本稿では後者を取り扱い、これを「全周観察型」とよぶこととする。両者は、一見したところ観察者がディスプレイの内側から見るか外側から見るかだけの違いととらえられがちであるが、技術的には大きな違いがある。それは、前者が基本的に一人観察を前提としているのに対し、後者は多人数同時観察を前提としているためである。

観察者が1人であれば、その人の両眼に対応する2つの画像を表示すればよい。観察者の左右眼の位置を計測（あるいは仮定）し、対応する2つの画像を何らかの方法で観察者の左右眼それぞれに見せるという考え方である。これに対し、多人数同時観察に対応するためには、観察者の位置に合わせて画像を提示するという考え方ではなく、

どの方向から見た場合にも適切な画像が観察されるように空間に対して画像を提示するのである。どこから見ても適切な画像が見られるだけの映像情報を光として空間中に展開する必要がある。

一方で、二次元的な解像度の要求水準も異なる。没入型のディスプレイは観察者の視野全体を覆うほどに視野角が大きいと、多くの画素が要求されるが、全周観察型の場合はディスプレイの外から眺めるため、観察者の視野に占める角度はそれほど大きくはならない。

さて、全周観察可能な立体映像として最もよく知られているもののひとつが、円筒形のマルチプレックスホログラム³⁾であろう。これは銀塩フィルム等を用いたホログラムであるため、動画像表示は不可能である。電子ホログラムは光の波長オーダーの超高精細な表示デバイスが要求されるため、実用的な画質を実現するまでにはしばらく時間が必要と思われる。

電子的に表示内容が制御可能、すなわち動画像表示が可能で全周観察を実現している方式には、現在のところ

1. ボリュームディスプレイ
2. 多視点ディスプレイ

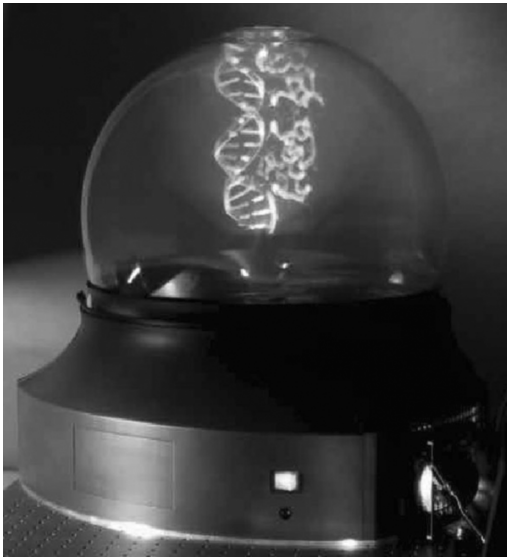


図1 Perspecta⁴⁾.

3. 光線再現ディスプレイ

に分類されるものがある。以下ではこれらについて最新技術を紹介する。

1. ボリュームディスプレイ

全周観察可能なディスプレイとして最も早くから存在したのは、ボリュームディスプレイに分類されるものである。ボリュームディスプレイとは、何らかの方法で三次元空間中の点から実際に光を放射し、そのような点の集合として立体映像を表示する方式である。その方式としては、透明な結晶もしくは気体中の点を発光させる方式、表示面を高速に移動させながら断面を次々と表示していく方式がある。特に後者は体積走査方式とよばれる。体積走査方式の具体例としては、二次元のLEDアレイそのものを回転または振動させるもの、回転するスクリーンに映像を投影、あるいはレーザーで描画するものなどがある。

ボリュームディスプレイは立体像の表示された位置から実際に光が発せられているので、眼の水晶体調節刺激の再現が可能であり、眼精疲労の原因になると指摘されている輻輳調節矛盾が生じないというすぐれた特長がある。また、現状で左右のみならず上下方向の視差を再現している数少ない方式のひとつでもある。一方で、原理的に光を遮ることができないため、背後にある物体もすべて透けて見える映像となってしまう（ファントムイメージとよばれる）。そのため、実写画像の表示などには適さない。

近年商品化された Actuality Systems 社の Perspecta⁴⁾

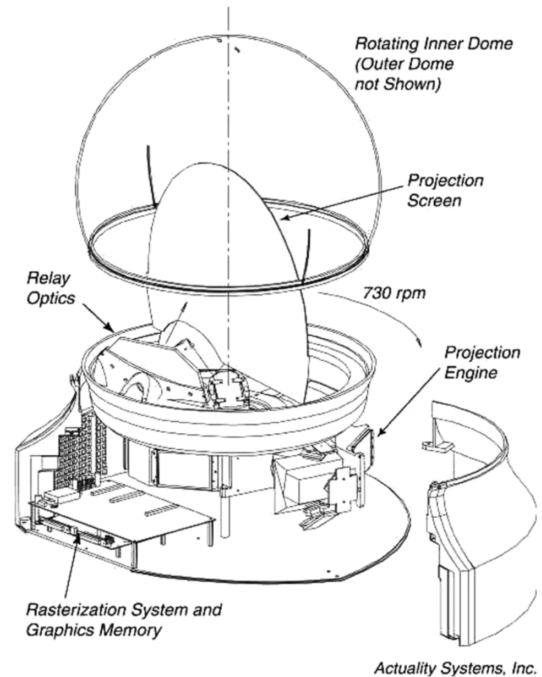


図2 Perspecta の構造⁴⁾.

は、体積走査方式で全周観察を実現している。図1のように直径20インチのガラスの半球内に立体映像が表示される。この半球内には図2のように直径10インチの円形スクリーンがあり、720 rpm で回転する。このスクリーンにプロジェクターからスクリーンの角度に応じた断面画像を次々と投影することによって、立体画像の表示が実現される。スクリーンが半回転すると半球状空間が完全に掃引されたことになるので、フレームレートは24 Hz である。この間に198枚の断面画像が表示される。このような高速な画像投影は通常のプロジェクターでは不可能であるが、Texas Instruments 社の DMD (digital micromirror device) を使用し、PWM (パルス幅変調) による階調数を減らすことによって実現している。

内山らは産総研などと共同で空中に直接映像を出す装置を開発した⁵⁾ (図3, 図4)。赤外パルスレーザーを集光させ、空気をプラズマ化して発光させる。レーザー光の焦点位置を三次元空間中に自由に制御することで、空中(三次元空間)に実像としてのドットアレイからなる三次元映像の表示を実現したものである。2006年2月の発表^{*1}によると、レーザー装置の限界により100ドット/秒の表示であるが、さらにドット数を増やして滑らかな映像を描画させたいとしている。また、文献5)によると原理的にはフルカラー表示の達成も可能であるとしている。

*1 http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2006/pr20060207/pr20060207.html

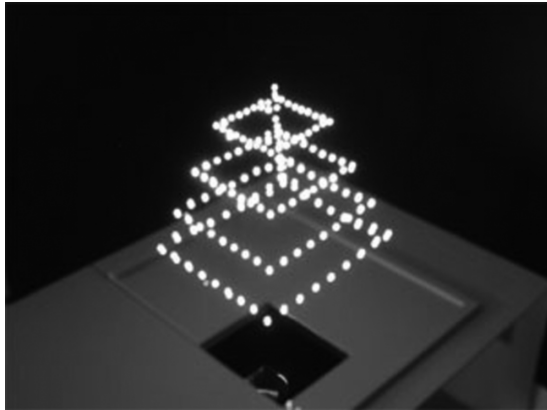


図3 空中描画装置*1.

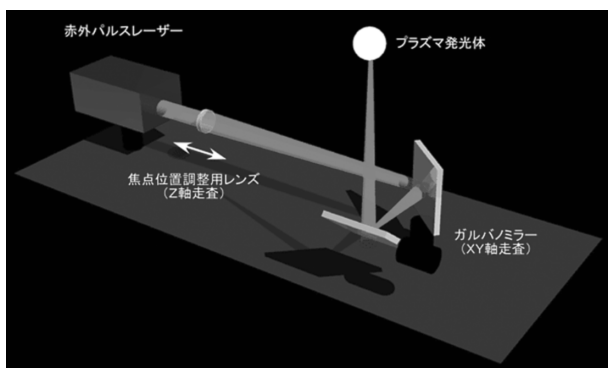


図4 空中描画装置のしくみ*1.

2. 多視点ディスプレイ

多視点ディスプレイは多眼式ともよばれ、もともとはメガネ不要の2眼式ディスプレイから発展したものと考えることができる。代表的なものとしてはレンチキュラー方式やパララクスバリア方式がある。

大塚らが開発した Transpost⁶⁾ とよばれる全周観察型ディスプレイは、再帰性反射特性を有するスクリーンを利用した投影型の多視点ディスプレイである (図5 (b))。基本的な原理自体は従来より存在するものであるが⁷⁾、回転スクリーンや鏡を利用した多方向投影といった工夫によって全周観察型の多視点画像表示がうまく実現されている。

再帰性反射とは、光を入射した方向に戻す特殊な反射のことをいう。このような性質をもつスクリーンに対しプロジェクターで画像を投影すると、反射光はもとのプロジェクターの位置に集まるため、他の位置からは画像が見えない。次に、水平方向のみに再帰性をもたせ、垂直方向には通常の拡散反射する特性をもたせると、プロジェクターの真上や真下の位置からは画像が見えるようになり、水平位置が異なる場所からは見えない。複数のプロジェクターを水平方向に並べ、同時に投影すると、目の位置に応じたブ

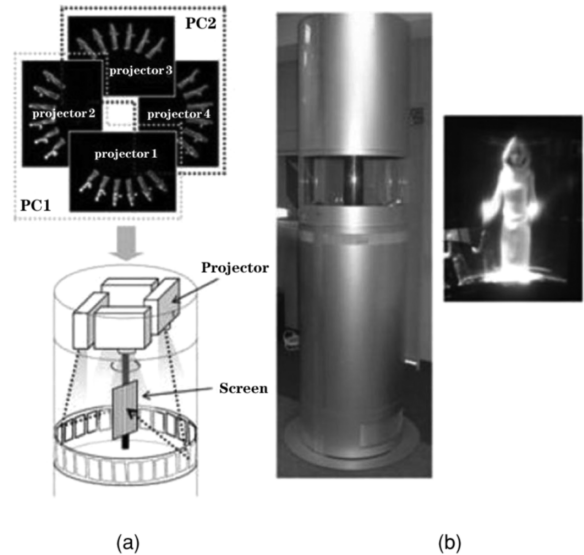


図5 Transpost⁶⁾.

ロジェクターの画像のみが見える。プロジェクターの配置を両眼間隔以下にすれば、両眼立体視が可能な多視点ディスプレイが実現される。

Transpost では全周観察に対応するため、このような再帰性反射スクリーンを高速に回転させ、周囲から映像を投影している。スクリーンとしてはコーナーミラーを用いているが、垂直方向に拡散性をもたせるためのレンチキュラーシートを重ねている (図6 (a))。またコーナーミラーは入射角が $\pm 45^\circ$ の範囲でしか使えず、これを超えた角度から入射した光は意図しない方向に反射するため (図6 (b))、ノート PC 画面の覗き見防止などの目的に用いられるプライバシーフィルターを組み合わせることで、不要な反射を防いでいる。

また、視差数分のプロジェクターを用意する代わりに、1台のプロジェクターの画像を鏡で振り分けて利用することによって視差画像数を多くしている点も特徴である (図5 (a))。ディスプレイと双対の構造をもつ撮影システム、すなわちスクリーンの位置に被写体、プロジェクターの位置にカメラを置いたシステムと接続することで、撮影から表示までをリアルタイムで実現している。この際、基本的には画像処理等は不要であり、カメラで撮影された画像はそのままプロジェクターで表示すればよい。

従来の静止したスクリーンに複数プロジェクターで投影する方式の場合、スクリーンに再帰性反射の性質が必須であったが、Transpost のようにスクリーンを回転させて用いる場合、実は単に正面からの光のみを反射し、他は吸収するようなスクリーンでも可能である。田中らの Live-Dimension⁸⁾ (図7) ではそのようなスクリーンを用いてい

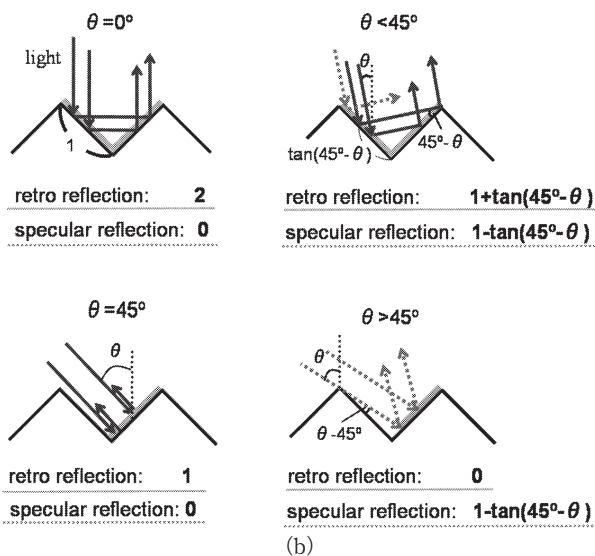
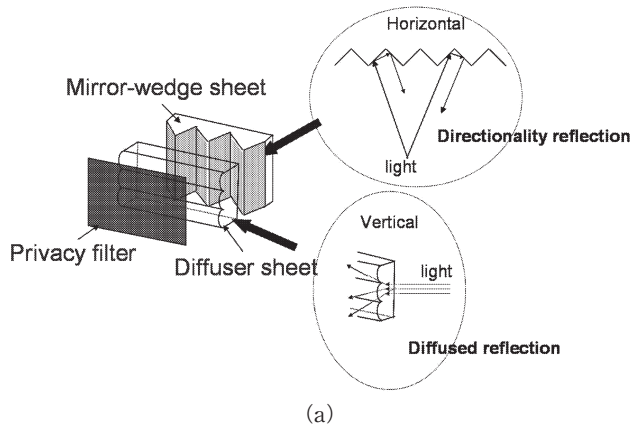


図6 Transpostの再帰性反射スクリーン⁶⁾。

る(図8)。12台のプロジェクターを直接並べており、Transpostより単純かつ少々力ずくな構成といえるが、表示画像の画素数およびプロジェクターの画素の利用効率という点では有利である。

Transpostの再帰性反射スクリーンは、スクリーンが投影光に対して垂直でない場合も反射するため明るさの点で有利である反面、ブレが生じる原因ともなる。これは、上下方向に関しては拡散反射をするため、視点とプロジェクターの上下方向に位置が異なる場合スクリーンの位置によって画像が見える位置がずれるためである。このブレはスクリーンの移動量が大きい外側ほどひどくなる。LiveDimensionのスクリーンは投影光に対してほぼ垂直になった瞬間のみ光を反射するため、このようなブレは少ない反面、明るさの点では不利である。

3. 光線再現ディスプレイ

光線再現ディスプレイは、立体映像を光線の集合として

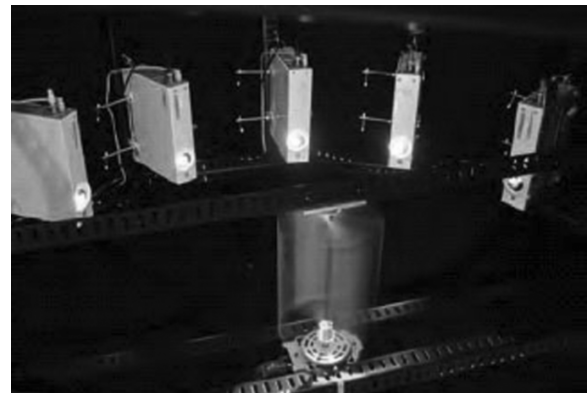


図7 LiveDimension⁸⁾。

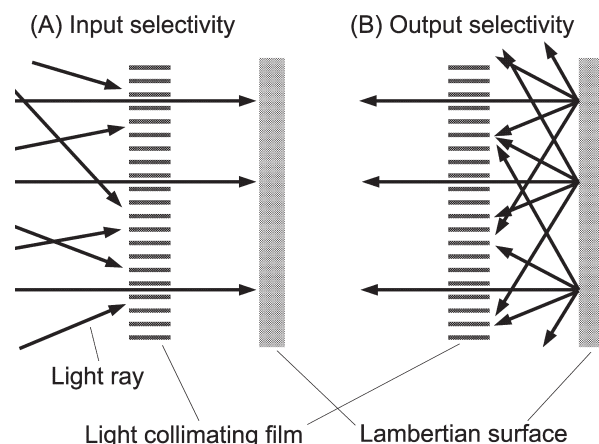


図8 LiveDimensionのスクリーン⁸⁾。

再現する方式である。ディスプレイの各画素から光線とよべるほどに高い指向性をもった光をさまざまな方向に射出し、さらに射出方向ごとにその色を独立に制御することで実現される。表示に指向性をもたせるという技術的には多視点ディスプレイと類似のものであり、両者を明確に区別することは難しいが、空間上に複数の視点位置を定義して、それぞれの視点ごとに対応する画像を見せるという考えに基づくものが多視点ディスプレイ、特に視点を定義しないものが光線再現ディスプレイとよばれる傾向にある。視点を定義せずさまざまな距離からの観察を許す場合は、視点位置を定義する場合に比較して、表示により高い指向性と細かな角度ピッチでの制御が要求される。

筆者らの提案している Seelinder⁹⁾は全周観察型の光線再現ディスプレイである(図9)。その構造は図10に示すように、LED等の発光強度を高速に制御可能な光源を鉛直方向に並べた一次元光源アレイを円筒面上に複数配置した光源部分と、その外側の円筒パララクスバリア(縦スリットが一定間隔で入った円筒)からなり、光源部分は比較的低速で、円筒パララクスバリアは比較的高速で互いに逆



図9 Seelinderの外観。

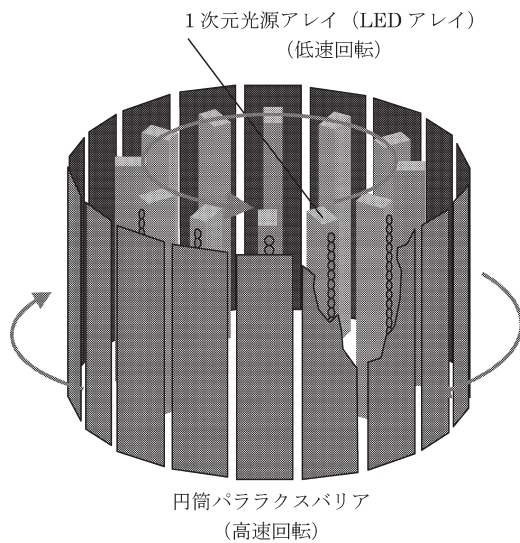


図10 Seelinderの構造。

方向に回転する。光源からの光は、スリットを通して細い光線束となって外に射出され、その射出方向は、光源とスリットの相対位置の変化によって水平方向に走査される。これに同期して光源の強度を制御することによって、方向ごとに異なる輝度の表示を時分割で行うことができる。これにより、被写体から飛来する光線の状態を円筒面上で再現することが可能となる(図11)。

パララクスバリアは多視点表示方式で最も歴史のある方



図11 表示画像の例。

法であるが、回折現象による影響から指向性の限界が指摘されていた。本提案では円筒形のパララクスバリアとLEDアレイの双方を互いに逆方向に回転させるという独自の構造によって、高い指向性と狭角度ピッチの光線制御を可能としている。そのピッチは1度以下である。本ディスプレイは視点を定義していないが、多視点ディスプレイと比較するならば360以上の視点数に相当する。例えば前出のTranspostの24視点に比較して非常に細かいため、観察者が頭を動かした際に生じる見え方の変化(運動視差)が滑らかでより自然な表示であるといえる。

以上、ディスプレイの周囲360°から観察可能な立体ディスプレイについて紹介した。全周観察型のディスプレイはさまざまな方向から観察できるため、立体形状や位置関係が把握しやすく、特にボリュームディスプレイは航空管制や医用画像、各種計算機シミュレーションで得られるボリュームデータの表示に適している。多視点ディスプレイや光線再現ディスプレイでは実写画像の表示が可能であるため、多人数がメガネなしで自由な方向から観察できるという特長を生かした、不特定多数向けの展示や広告といった用途に適しているだろう。

全周観察型ディスプレイを実現しようとする場合、ディスプレイ形状は通常の平面では不可能であり、ここで紹介した例と同じように(半)球形または円筒形などが基本になると思われる。表示デバイスとして現在の主流であるフラットパネルディスプレイを用いてこれを実現することは難しく、現状では機械的な回転運動を利用する方式が多い。しかし、現在盛んに研究されているフレキシブルな表示デバイスが実用化することで、円筒もしくは球形の表示面の実現が容易になり、機械的運動を伴わない全周観察ディスプレイの登場が期待される。

文 献

- 1) C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. DeFanti: "Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE," *Proc. SIGGRAPH '93* (1993) pp. 135-142.
- 2) 田中健司, 林 淳哉, 川淵一郎, 稲見昌彦, 舘 暲: "裸眼全周囲ステレオ動画ディスプレイ TWISTER III", *映像情報メディア学会誌*, **58** (2004) 819-826.
- 3) L. Cross: "The multiplex technique for cylindrical holographic stereograms," *Proc. SPIE, annual technical conference San Diego seminar 10* (1977).
- 4) G. E. Favalora, J. Napoli, D. M. Hall, R. K. Dorval, M. Giovinco, M. J. Richmond and W. S. Chun: "100 million-voxel volumetric display," *Proc. SPIE*, **4712** (2002) 300-312.
- 5) 内山太郎: "3D 空中描画装置", *光技術コンタクト*, **44** (2006) 324-330.
- 6) R. Otsuka, T. Hoshino and Y. Horry: "Transpost: A novel approach to the display and transmission of 360 degree-viewable 3D solid images," *IEEE Trans. Visual. Comput. Graph.*, **12** (2006) 178-185.
- 7) 大越孝敬: 3次元画像工学 (朝倉書店, 1991) 第5章.
- 8) K. Tanaka and S. Aoki: "A method for the real-time construction of a full parallax light field," *Proc. SPIE*, **6055** (2006) 605516-1-11.
- 9) 圓道知博, 川上直樹, 舘 暲: "周囲360度から観察できる3次元ディスプレイ 'Seelinder'", *映像情報メディア学会誌*, **59** (2005) 1506-1509.

(2006年6月5日受理)