

3Dディスプレイ技術の現状と将来

東京農工大学大学院共生科学技術研究院
高木康博

1. はじめに

最近、立体ディスプレイ技術に対する関心が高まってきた。立体映像ブームは過去に何回かあり、今回が第3の波¹⁾であると言われている。しかし、一方で、今回は本格的な流れになる予感がすると口にする技術者や研究者も多い。

本稿では、さまざまな立体ディスプレイ技術について解説しながら、立体ディスプレイ技術の現状と将来について述べる。

2. 今、なぜ、3D

我が国が世界に先駆けて開発したハイビジョン方式とデジタルテレビ技術は、目覚ましい発展を遂げてきた。デジタルテレビは、既に、フルHD解像度、階調数12ビット、フレームレート240FPSと十分な性能を達成している。ディスプレイ産業の持続的発展のためには、つぎの開発ターゲットが必要である。次のテレビ技術としては、スーパーハイビジョンが提案されている。スーパーハイビジョンの解像度は7,680×4,320で、フルHD解像度の16倍の情報量が必要である。これに対して、2眼式立体表示であれば2倍の情報量でよい。このように考えると、ディスプレイ産業にとっては、スーパーハイビジョンより立体の方が、より近い開発ターゲットに見えることがわかる。

一方で、映画産業は、既に立体化に動き出している。映画産業も成熟産業であるが、映画の立体化により、観客数と売上が増加することが明らかになり、映画館の立体化が急速に進んでいる。映画コンテンツ自体も、昔のようなびっくり映像ではなく、無理のない立体表現を効果的に活用した良質なものが作られている。

以上のような状況の中、ディスプレイ産業も立体化に大きく舵を切りだそうとしている。

3. 立体表示の意義

立体表示の利点は、高い臨場感が得られる点にある

ことは言うまでもない。ここでは、これ以外に、立体ディスプレイ導入のメリットについて述べる。

アナログテレビ時代は、ブラウン管ディスプレイが主流であったため、箱に映像が表示されていた。これに対して、現在のデジタルテレビは、フラットパネルディスプレイが主流になったため、リビングの壁を映像に変えることに成功した。すなわち、デジタルテレビ導入のメリットは、アナログテレビよりも少ない設置面積で、壁に広がる映像平面が手に入る点にあると言えることができる。それでは、立体テレビ導入のメリットは何であろうか。立体テレビ導入のメリットは、壁を超えるような映像空間が手に入る点にある。すなわち、仮想的にリビングの大きさを広げる効果が得られる。以上を、図1に示す。

また、最近では、携帯電話で映像を見る機会が増えている。現在の2次元ディスプレイでは、手のひらの映像表示が実現できている。立体表示では、手のひらを超えた映像空間を手に入れることができる。

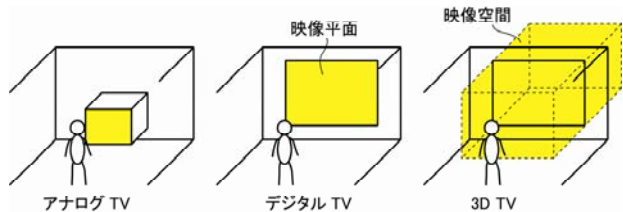


図1 リビングへのディスプレイの導入メリット: アナログテレビは箱の中の映像、デジタルテレビはリビングの壁を映像平面に変えた、立体テレビはリビングの壁を超える映像空間の創出によりリビングを広げる効果をもつ。

4. 人間の立体知覚

立体映像は、2次元映像に比べて、人体に与える影響が大きいことが知られている。そのため、立体ディスプレイの開発においては、ヒューマンファクターに関する十分な考慮が必要である。ここでは、人間の立体知覚の要因²⁾について簡単に説明する。

人間の立体知覚の要因としては、生理的要因と心理的要因がある。

生理的要因には、4つの要因がある。これらを、図2に示す。両眼視差は、左右の眼の網膜像の対応点間の水平ずれ量にもとづく奥行き知覚である。輻輳は、

一点を注視したときの左右の眼の回転角から3角測量の原理で奥行きを知覚する。調節は、眼のピント合わせによる奥行き知覚である。運動視差は、視点移動による網膜像の変化にもとづく奥行き知覚である。以上の生理的要因は立体ディスプレイの研究開発で重要であり、これらを矛盾なく満たすことが望ましい。

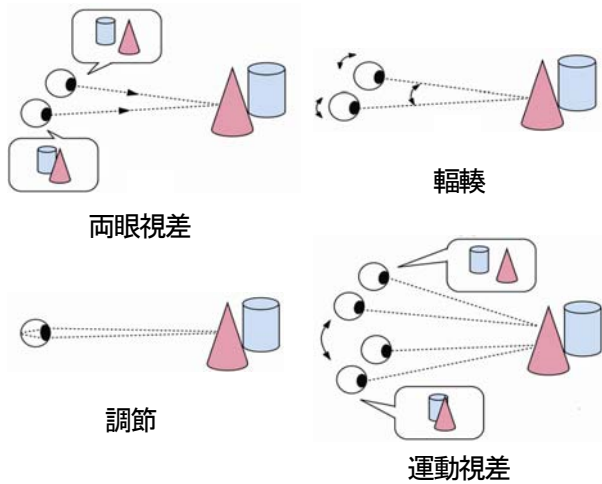


図2 立体知覚の生理的要因：直接人間の視覚の生理現象に基づくもので、4つの要因がある。立体ディスプレイの研究開発では、これらを矛盾なく満たすことが重要である。



図3 立体知覚の心理的要因：2次元画像でも機能する立体視要因であり、有効に活用することで、効果的なコンテンツ作成が可能になる。

心理的要因は、人間が経験的に獲得したもので、さまざまな要因があるが、代表的なものに、相対的大きさ、パースペクティブ(遠近画法的効果)、遮蔽、陰影、テクスチャ勾配、大気透視などがある。図3に、例を示す。これらの心理的要因は立体映像コンテンツ制作において重要であり、効果的に利用することで優れた

コンテンツ作成が可能になる。

5. 最も基礎となるメガネあり方式

最も基礎的な立体表示方式が、メガネあり2眼式立体表示である。立体映画や、これから家庭用に実用化が予定されている立体テレビで利用される方式である。

(1) 表示原理

2眼式立体表示では、右眼と左眼にそれぞれの眼から見た画像を表示することで、立体感を与える。この場合、生理的要因のうち、両眼視差と輻輳が機能する。

図4に示すように、右眼と左眼に異なる映像を表示するために、光学フィルタを取り付けたメガネをかける。右眼用と左眼用の画像を同一画面に表示し、光学フィルタにより分離する。光学フィルタとしては、偏光フィルタ、波長フィルタ、液晶シャッターなどが用いられる。

偏光メガネを用いる方法では、回転方向が逆の円偏光で左右の画像を表示し、左右に対応する円偏光のみを通過する円偏光子を取り付けた偏光メガネをかけて観察する。以前は、円偏光ではなく、直交する直線偏光が利用されたが、この場合は、頭の傾きにより左右の画像間にクロストークが生じる問題点があった。

波長フィルタを用いる方法では、赤青の色フィルタを用いるアナグリフと呼ばれる方法が古くから用いられている。実際に見た方も多いと思うが、赤青の色フィルタで左右の画像を分離しても、フルカラー表示できる点に注意して欲しい。最近では、つぎの映画技術で述べるように、より高度な方法が用いられるようになっている。

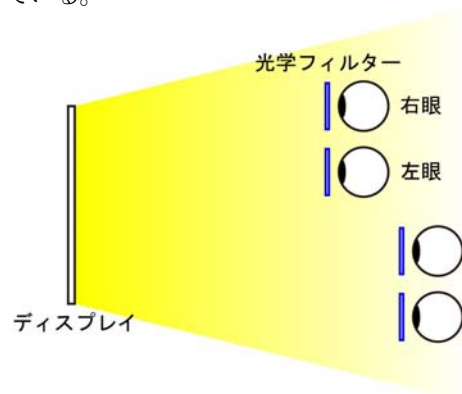


図4 メガネあり2眼式立体表示：メガネに取り付けた光学フィルタで、左右の映像を分離する。

時分割表示では、左右の映像を交互に表示する。これに同期して、メガネに取り付けた左右の液晶シャッタを交互に開閉する。この場合、ディスプレイは、倍速駆動する。

(2) 立体映画技術

以前の立体映画では、左右の映像を表示するために2台のプロジェクタを用いた。そのため、設置や保守に難しさがあった。最近では、DLP プロジェクタの倍速表示で、1台のプロジェクタで実現できるようになった。DLP プロジェクタは映画のデジタル化で既に導入済みの場合が多く、この場合は、大きな投資を必要とせずに立体化が実現できる。また、4k2k プロジェクタの画像を特殊な光学系で2つの画像に分離する方法も実用化されている。

偏光メガネを用いる方法としては、RealD 方式がある。DLP プロジェクタの倍速駆動で、左右の画像を交互に表示する。これに同期して、プロジェクタ手前に設置した ZScreen と呼ばれる液晶変調器で、右回りと左回りの円偏光に交互に変調する。この方式のメリットは、偏光メガネが安価であるため、使い捨てが可能である点にある。ただし、スクリーンは、偏光を保持するシルバースクリーンに変える必要がある。

波長選択メガネを用いる方法としては、Dolby 方式がある。この場合も、DLP プロジェクタで左右の画像を倍速表示する。その際、RGB の3つの波長帯をそれぞれ2つに分けて、右眼表示と左眼表示に利用する。観察者は、対応する RGB 3つの波長帯を透過するバンドパスフィルタを取り付けたメガネを装着して、観察する。従来の青赤フィルタを用いる方法に比べると、違和感の少ないカラー表示が実現できる。この方法では、スクリーンは従来のホワイトスクリーンのままで良いことが大きなメリットである。ただし、メガネが高価であるため、洗浄後に再利用される。

液晶シャッタメガネ方式としては、XpanD 方式が知られている。DLP プロジェクタで左右の映像を倍速表示し、これに同期して開閉する液晶シャッタメガネをかけて観察する。この方式も、スクリーンはホワイトスクリーンで良いが、メガネは高価であるため洗浄後再利用する。

なお、立体映画は、大画面かつ多人数で利用する立

体表示として分類できるが、大画面かつ多人数で利用できる立体表示の実現方法としては、現状ではメガネを用いた方式しか現実的な解はない。

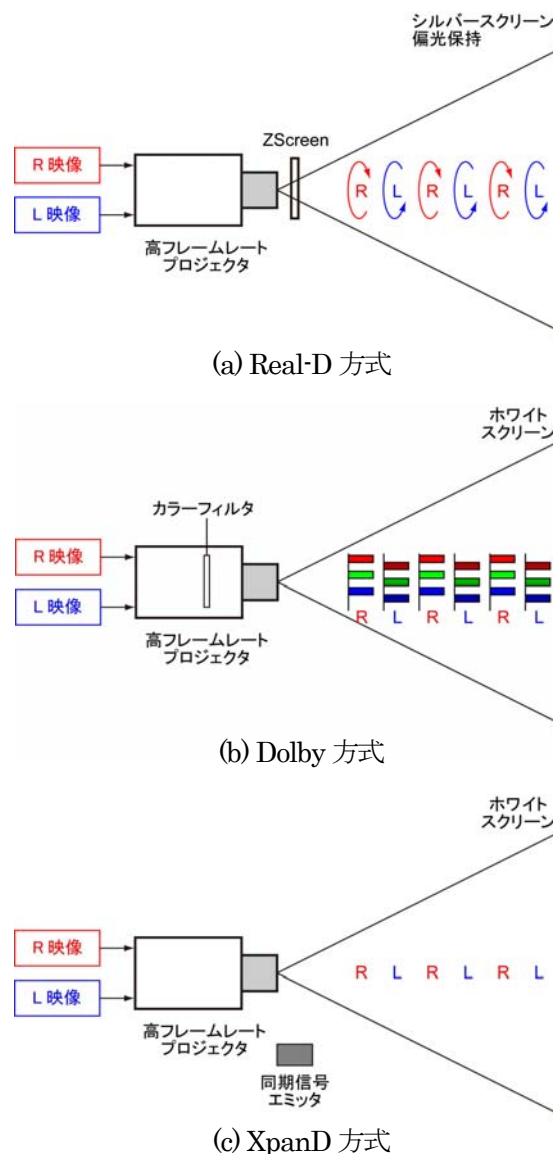


図5 立体映画技術：(a) 偏光メガネを用いる RealD 方式、(b) 色フィルタメガネを用いる Dolby 方式、(c) 液晶シャッタメガネを用いる XpanD 方式。

(3) メガネありフラットパネル立体ディスプレイ

家庭への立体ディスプレイの普及を考えると、現在のようにフラットパネル型テレビが普及している状況下では、立体ディスプレイもフラットパネル型であることが望まれる。これには、偏光メガネを用いる実現方法と、液晶シャッタメガネを用いる実現方法がある。

偏光メガネを用いる方法では、図6に示すように、走査線毎に回転方向が逆の円偏光を与える円偏光板を

張り付ける。奇数と偶数の走査線で、左右の画像を表示する。この方式を用いると、比較的容易に立体化が実現できる。ただし、垂直解像度が半分に減少する。また、フラットパネルディスプレイのピクセルと偏光板の間隔が大きくなると、観察する垂直位置によって、偏光板と走査線の対応関係にずれが生じるといった問題点がある。この方式は、有沢製作所より Xpol という名称で商品化されている。

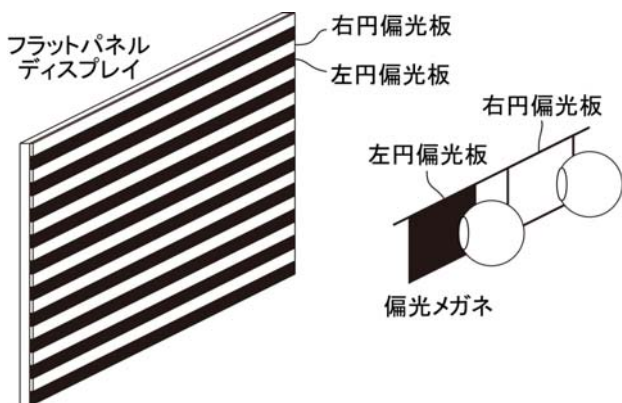


図6 偏光メガネを用いたフラットパネル立体ディスプレイ：奇数走査線と偶数走査線で回転方向が逆の円偏光板を取り付ける。有沢製作所より Xpol として商品化。

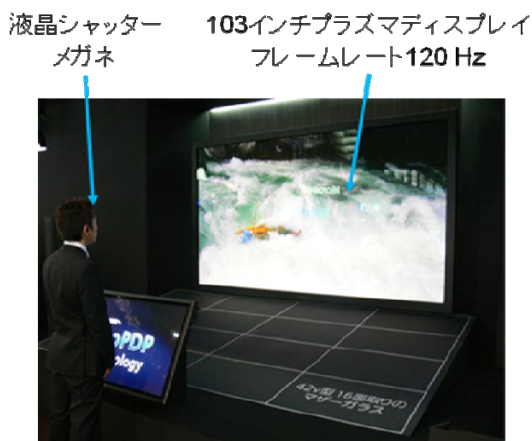


図7 液晶シャッターメガネを用いたフラットパネル立体ディスプレイの例：CEATEC JAPAN 2008 で、パナソニックから発表のあったプラズマディスプレイを用いた立体ディスプレイ。

液晶シャッターメガネを用いる方式では、フラットパネルディスプレイの高速駆動が利用される。図7は、CEATEC JAPAN 2008 でパナソニックが発表したもので、103 インチのプラズマディスプレイを 120 FPS

で駆動している。プラズマディスプレイの高速応答性をうまく利用した例である。液晶パネルでも、4 倍速駆動して、黒フレームを間に入れて左右の映像を表示することで、クロストークを低減した立体ディスプレイの発表がなされている³⁴⁾。

6. 本格普及のためのメガネなし方式

立体テレビが家庭に本格的に普及するためには、やはり、メガネなしの立体表示⁵⁰⁾が必要である。ここでは、本格的普及という言葉をも、2次元表示よりも立体表示で映像を見る割合が多くなる状態という意味で使っている。

メガネなし立体表示を実現しようとする、技術的なハードルは一気に高くなる。メガネを用いる場合には、光学フィルタで左右の画像を容易に分離することができる。メガネを用いずに、どのようにして左右の画像を分離するのか？それには、“視点”を空間に設定する。視点とは、右眼と左眼を置いて見る位置のことをいい、図8に示すように、それぞれの視点位置に集光する光線で、対応する右眼用画像と左眼用画像を表示する。視点位置に眼を置いて見れば、対応する画像を見ることができる。このように、視点を用いることでメガネなし表示が実現できる。しかし、観察位置が制限されることがわかる。

また、後述するメガネなし表示を実現するパララックスバリアやレンチキュラレンズを用いた立体ディスプレイでは、図8に示すように、視点が空間的に繰り返して発生する。このことを利用すると、多人数での観察が可能になる。ただし、正しい視点位置に眼があるかどうかは観察者にはわからないので、左右の眼を誤った視点位置に置く可能性がある。この場合、逆立体視といい、奥行きが逆になった立体像が見える。

家庭での利用では、多人数が不特定の場所でディスプレイを観察するために、逆立体視が大きな問題になる。極端に言えば、50%の確率で逆立体視が生じることになる。逆立体視の解決方法としては、眼の位置を検出して表示画像を入れ替える方法が提案されているが、この方法では多人数の観察に対応できない。

ただし、モバイル用途等に用いられる小画面の立体ディスプレイでは、観察者は1名であり、通常は顔の

中心付近に画面を置いて見ることから、逆立体視が問題にならないことが多い。

なお、メガネをかけることが立体映像特有の疲労を引き起こし、メガネなしでは疲労が少ないといったことが言われるが、これは間違いである。立体知覚の生理的要因に関しては、メガネなしでもメガネありでも、2眼式では両眼視差と輻輳しか機能しない。メガネありが見にくい原因としては、メガネによる左右の画像分離の不完全さに起因するクロストークの発生、時分割表示によるフリッカの発生などの原因が考えられる。

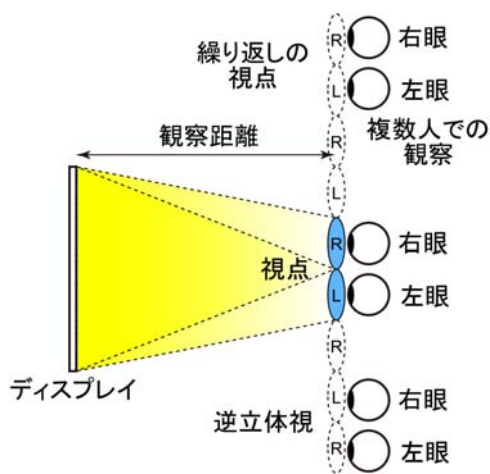


図8 メガネなし立体表示：左右の眼を置いてみる視点位置に集光する光線で左右の画像を表示することで、メガネなし表示を実現。

7. メガネなしの本命、多眼式

以上のように、メガネなし2眼式を、家庭のリビングで多人数で利用することは難しい。この問題を解決するのが、多眼式立体表示である。

多眼式立体表示では、図9に示すように、空間に3つ以上の視点を設定する。視点間隔は、平均両眼間隔63 mm以下とする。逆立体視は、視点の繰り返しの境界部分で生じるから、視点数が多くなるほど逆立体視になる確率が低くなることがわかる。

各視点に、視点位置に応じた視差をもつ画像（視差画像）を表示すると、運動視差が得られる。立体像の正面だけでなく、側面も見ることができるようになる。すなわち、4つの生理的要因のうち、両眼視差、輻輳、運動視差の3つが機能することになる。

多眼式の立体ディスプレイの問題点は、視点数に反

比例して解像度が低下することにある。最近のフルHD解像度を見慣れた利用者が、立体であれば、解像度低下を容認するかは疑問がある。

視点数が少ないと、頭を動かして見たとき、不連続な画像の切り替わりが知覚される。これが、観察者の感じる臨場感を低下させる可能性がある。滑らかな運動視差は臨場感を高める。しかし、不完全な運動視差は、運動視差がない2眼式より臨場感が低く感じられる場合がある。

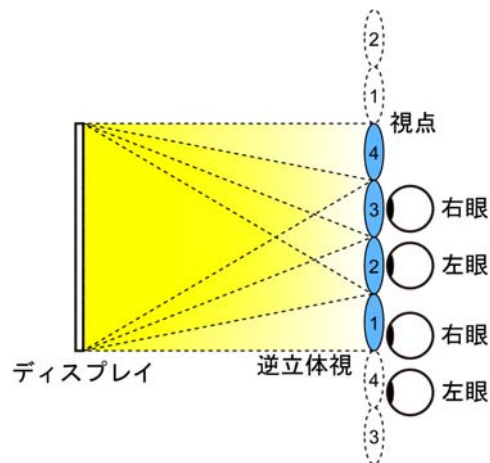


図9 多眼式立体表示：空間に3つ以上の視点を設定することで、運動視差が得られ、逆立体視になる可能性が低下する。

8. メガネなしのハードウェア

メガネなしの立体ディスプレイのハードウェアとしては、2眼式と多眼式で共通のものが用いられる。両者の違いは、発生する視点数の違いにある。

(1) フラットパネル型

フラットパネル型としては、パララックスバリア方式とレンチキュラ方式がある。

パララックスバリア方式を図10に示す。フラットパネルディスプレイにパララックスバリアを取り付けた構造になっている。パララックスバリアとは、スリットを水平方向に並べた1次元スリットアレイである。ひとつのスリットに対して水平方向に複数の色画素（色画素群）を対応させる。このとき、スリット間隔を、色画素群の水平幅より若干小さくする。そうすると、色画素群から出て対応するスリットを通過する光線群を考えたとき、すべてのスリットを通過した光線

群が、ディスプレイから特定の距離で交わることがわかる。この交わった位置に視点が形成される。例えば、視点1から見ると、各スリットに対応する色画素群のうち色画素1だけが見えることになる。色画素から発せられる光線は、対応するスリット以外に隣接するスリットにも入射するが、これが繰り返しの視点を発生させる。なお、ひとつのスリットに2個の色画素を対応させると2眼式となり、3個以上対応させると多眼式となる。

レンチキュラ方式では、図 11 に示すように、光線制御に、パララックスバリアの代わりにレンチキュラレンズを用いる。レンチキュラレンズとは、一次元のレンズであるシリンドリカルレンズ(かまぼこレンズ)を水平方向に並べたものである。レンチキュラレンズは、光線の偏向に関しては、基本的にはパララックスバリアと同じ働きをもつが、レンズであるため視点に対する光線の集光性に優れている。

いずれの方式でも、視点数の増加に伴い、水平解像度が逆比例して低下することがわかる。解像度低下を水平方向と垂直方向にバランスよく行うことで、解像度低下を緩和する方法として、斜めレンチキュラ方式⁷⁾やステップバリア方式⁸⁾が提案されている。

両者を比較すると、パララックスバリア方式は、作製が容易で作製精度も高いが、光の利用効率が低い。これに対して、レンチキュラ方式は、光の利用効率は高いが、樹脂で作製されることが多いため湿度や温度などの環境変化による形状変化が問題となる。

2眼式立体表示の具体例を図 12 に示す。初期のものにはパララックスバリアが用いられていたが、最近ではレンチキュラレンズを用いるものが増えている。小画面であれば、樹脂の変形の影響は小さい。ただし、日立の携帯電話用のもののように、縦置きと横置きの立体表示に対応できるように、パララックスバリアが用いられている例もある。小画面のものが多いが、これは、前述のように、小画面では利用者が1名で正面から見るため逆立体視が生じ難いためである。また、アクティブなパララックスバリアやレンチキュラレンズを用いて、解像度低下がない2次元表示と、立体表示の切り替えを実現しているものも多い。

多眼式立体ディスプレイの例を図 13 に示す。各社

で開発が進められているが、視点数や画面サイズに対する考え方は各社で異なっている。実際に市販されたのは Philips と NewSight のディスプレイである。多眼式立体ディスプレイは、解像度の低下が問題点として指摘されている。

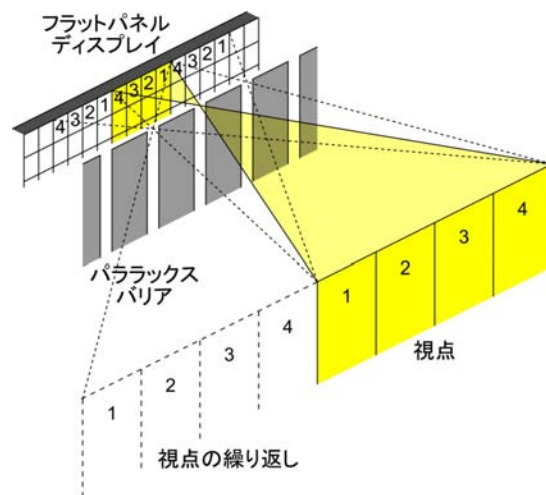


図 10 パララックスバリア方式:スリットアレイであるパララックスバリアで光線を制御して、特定の距離に視点群を発生させる。

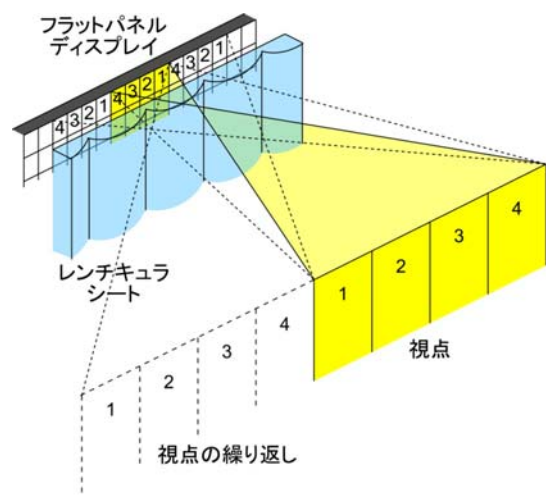


図 11 レンチキュラレンズ方式:シリンドリカルレンズアレイであるレンチキュラレンズで光線を制御して、特定の距離に視点群を発生させる。



シャープ SH-251is
パララックスバリア



シャープ PC-RD3D
パララックスバリア



三菱電機
レンチキュラ



NEC 液晶テクノロジー
レンチキュラ



日立 H001
パララックスバリア



富士フイルム
FinePix REAL 3D
レンチキュラ

図 12 メガネなし2眼式立体ディスプレイの例



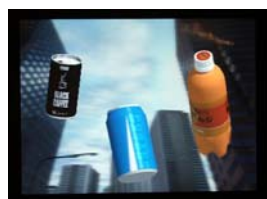
Newsight 8眼
パララックスバリア



三洋電機 4眼、7眼
パララックスバリア



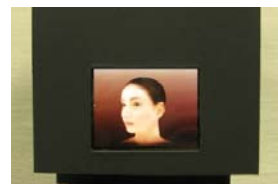
Philips 9眼
レンチキュラ



東芝 12, 16, 30眼
レンチキュラ



NTT ドコモ 30 指向性
レンチキュラ



セイコーエプソン 8眼
レンチキュラ

図 13 多眼式立体ディスプレイの例

(2) マルチプロジェクタ型

フラットパネル型では、視点数と立体表示解像度の積が用いるフラットパネルディスプレイの解像度になるため、両者にはトレードオフの関係がある。しかし、図 14 に図示したプロジェクタアレイを用いれば、立体表示解像度と視点数を独立に増やすことができる。スクリーンとしては、前面投射型の場合には再帰性反射スクリーンが、背面投射型の場合にはフレネルレンズなどの集光性スクリーンが利用される。いずれの場合も、プロジェクタレンズの像が空間に結像される。このプロジェクタレンズの像の位置に眼をおくと、そのプロジェクタの表示画像のみが見える。すなわち、レンズの像が視点を形成する。

プロジェクタアレイを用いたメガネなし立体ディスプレイは、装置が大型で高価であるため、幅広い普及には向かない。コストよりも大画面のメガネなし立体表示を優先する場合や、立体視の研究などに用いられる。ハンガリーの Holografika 社より、72 インチのメガネなし立体ディスプレイが商品化されている。また、日本でも、NICT がハイビジョン解像度のディスプレイを開発している。

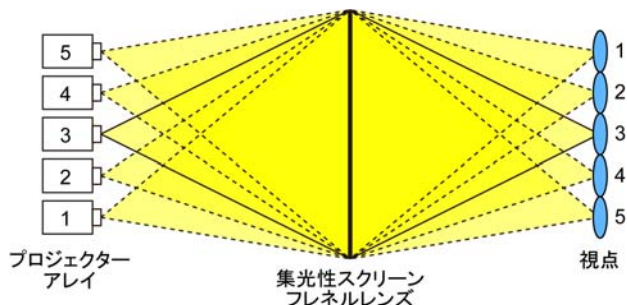


図 14 プロジェクタアレイを用いたメガネなし立体ディスプレイ：大型で高コストであるが、解像度と視点数を任意に増やすことができる。

9. 現在の立体表示の課題

以上、現在用いられている代表的な立体表示技術について説明した。実は、これらには、立体知覚の生理的要因に対して、2つの問題点がある。

第1の問題点は、調節と輻輳の不一致^{9,10}である。従来の立体表示では、2眼式でも多眼式でも、図 15(a) に示すように、左右の眼に異なる映像を表示することを原理としている。この場合、輻輳は正しく機能し、立体の奥行き位置を知覚する。しかし、眼のピントは

映像を表示しているディスプレイのスクリーン上に合うため、調節は正しく機能しない。人間の立体視機能には輻輳で知覚した奥行き位置に調節を誘導する輻輳性調節と呼ばれる機能があるが、従来の立体表示では、調節がこれに従うことができない。このような調節と輻輳の矛盾は、実世界では生じないため、眼精疲労を引き起こすと言われている。ただし、調節が機能するのは1~2 m以内であるので、主に観察距離が中短距離の場合に問題となる。

第2の問題点は、運動視差の欠如あるいは不完全さである。図15(b)に示すように、2眼式では運動視差は機能しない。多眼式では、頭を動かすと見える画像は変化するが、視点と視点の間を眼が移動する際に、不連続な画像の切り替わりが知覚される。人間は、自身の運動に対する網膜像変化を常に予測しているため、このような運動視差の欠如や不完全さが違和感となり、臨場感が低下すると言われている。

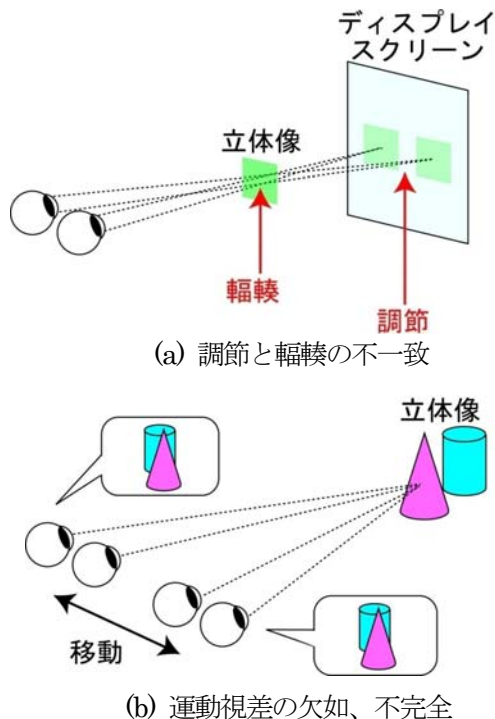


図15 従来の立体表示の課題: 調節と輻輳の不一致は眼精疲労を引き起こし、運動視差の不完全さは臨場感を低下させる。

10. 人に優しい自然な立体表示

将来、立体ディスプレイが家庭まで幅広く普及するためには、上記の生理的要因に対する課題が解決された人に優しい立体表示の実現が望まれる。これを「自

然な立体表示」と呼ぶ。

自然な立体表示の実現方法としては、超多眼表示¹¹⁾ (Super Multi-View 表示、以下、SMV 表示と略す) が知られている。これは、図16(a)に示すように、多眼式の視点間隔を両眼間隔より狭めて瞳孔径以下にすることで、瞳に2つ以上の視点が入る状態を作り出す。そうすると、空間の一点を通る光線が2本以上同時に瞳に入射するようになり、この点に対して眼がピント合わせ可能になるとするものである。瞳の大きさは周囲の明るさによって変化するが2~8 mm と小さいことから、高密度に非常に多数の視点を用意する必要がある。

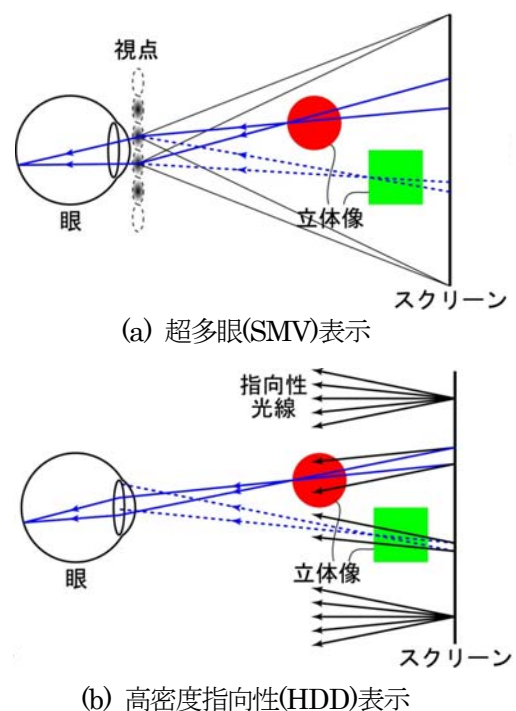


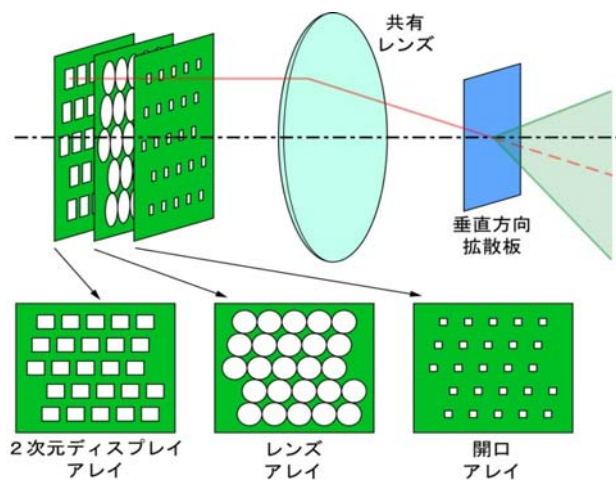
図16 超多眼(SMV)表示と高密度指向性(HDD)表示: 空間の1点を通る光線が2本以上同時に瞳に入射する状態を作り出し、調節が機能するようにする。

一方で、最近では、視点を空間に設定するのではなく、光線を進行方向でサンプリングし、物体から発せられる光線を再現する空間像方式が用いられるようになってきている。空間像方式において、SMV 表示と同様な考え方で、調節と輻輳の不一致を解決しようとするのが高密度指向性表示^{12,13)} (High-Density Directional 表示、以下、HDD 表示と略す) である。図16(b)に示すように、光線のサンプリング角度ピッチを狭めて光線の指向性を高めることで、空間の一点

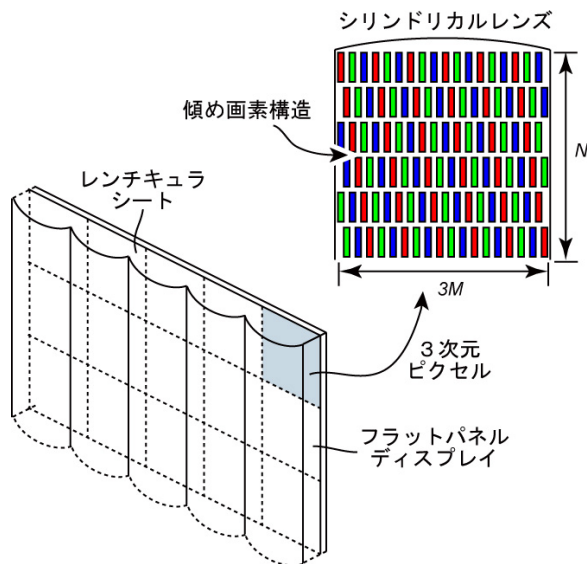
を通る光線が2本以上同時に瞳に入射するようになる。光線の表示角度ピッチは、調節輻輳の不一致が問題になる約1~2 m 以内の観察距離で、最短観察距離を600 mm として瞳孔径を5 mm とすると、約0.1~0.5°と非常に小さくする必要がある。両眼で立体像を観察するためには、視域角は30°以上は必要であるから、表示画像数は約60以上と非常に多くする必要がある。

以下では、著者が研究を行っているHDDディスプレイの研究状況について紹介する。

HDD ディスプレイでは非常に多くの画像表示を実現する必要がある。その構成方法には、マルチプロジェクション型とフラットパネル型の2種類がある。



(a) マルチプロジェクション型



(b) フラットパネル型

図17 高密度指向性(HDD)ディスプレイ：マルチプロジェクション型とフラットパネル型の2種類の構成方法がある。

図17(a)に、マルチプロジェクション型の構成方法を示す。プロジェクション結像系を2次的に配置したマルチプロジェクションシステムである。ただし、結像系の水平位置が一致しないように変形2次元配置することで、すべての画像を異なる水平方向へ表示する。プロジェクタを2次的に配置するため多数のプロジェクタが配置できるので、水平方向に高密度な画像表示が可能になる。

図17(b)にフラットパネル型の構成方法を示す。レンチキュラ方式の構成を用いている。ただし、フラットパネルディスプレイの色画素配置としては斜め色画素配置が最も適している。これは、従来のRGBストライプ配列とは異なり、同色の色画素を斜め方向に水平位置が一致しないように配置するもので、クロストークを抑えて表示画像数を増加させることができる。図18に、著者の研究室とセイコーエプソン(株)が共同で開発した斜め色画素配置を有する液晶パネル¹⁴⁾の顕微鏡写真を示す。

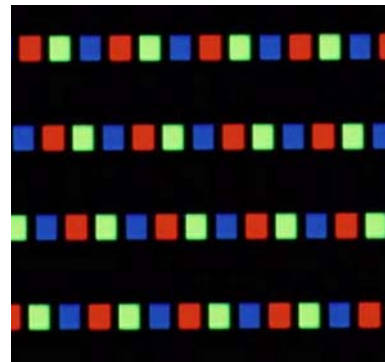


図18 斜め色画素配置をもつLCDパネルの顕微鏡写真:16視点立体表示用にセイコーエプソンと共同開発。

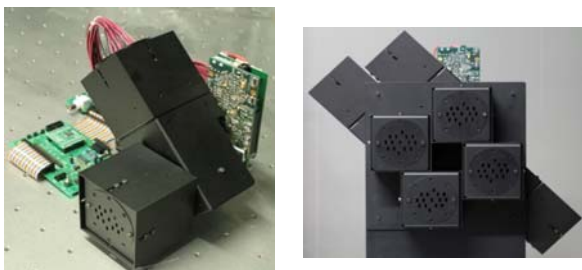
現在までに試作したHDDディスプレイを表1に示す。プロジェクション型は、表示画像数と解像度を独立に増やすことができるため、解像度がQVGA相当の64指向性ディスプレイから解像度がSVGAの128指向性ディスプレイ^{12,13,15,16)}まで試作している。ここで、指向性とは表示画像数のことである。

最近では、時間多重表示技術を導入して、ひとつのプロジェクタで複数の画像表示を可能にし、必要なプロジェクタ数の削減を実現している¹⁷⁾。図19(a)に15枚の画像を表示できる時間多重表示モジュールの写真を、同図(b)に4台のモジュールを組み合わせる60枚

の画像を表示する光学エンジンの写真を示す。

一方、フラットパネル型では、表示画像数と立体表示解像度の間にトレードオフの関係がある。解像度が320×400の72指向性ディスプレイ¹⁸⁾を試作し、これを2つ組み合わせた解像度がVGA相当(640×400)のディスプレイ¹⁹⁾を試作している。なお、30指向性ディスプレイ²⁰⁾は、モバイル用にNTTドコモと開発したもので、観察距離が短いことから表示角度ピッチはやや大きな値に設定している。ただし、前述の斜め色画素配置を有する液晶パネルは最近開発されたもので、表1のプロトタイプディスプレイは、色画素配置を傾けるかわりに、レンチキュラレンズの方を傾けた斜めレンチキュラ方式¹⁵⁾を用いて実現されている。

また、表示画像数増加のために、マルチプロジェクション型とフラットパネル型の構成方法を組み合わせた超多眼立体ディスプレイの新しい構成方法²¹⁾も提案している。図20に、16視点フラットパネルディスプレイを16台使い、これらをマルチプロジェクション光学系で多重結像して256視点表示を実現した表示システムの写真を示す。



(a) 時間多重表示モジュール (b) 光学エンジン

図19 時間多重表示を用いたHDDディスプレイの実現：15指向性表示モジュールを4台組み合わせて60指向性表示光学エンジンを実現。

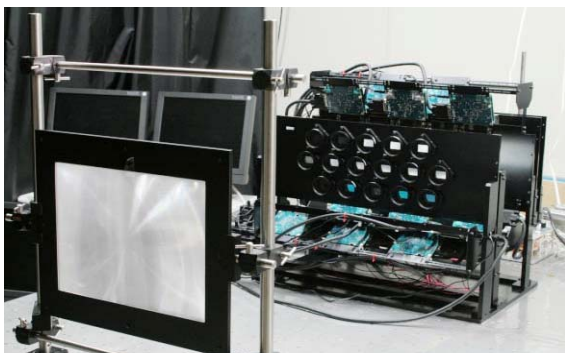


図20 マルチプロジェクション型とフラットパネル型の構成方法を組み合わせた256視点超多眼立体ディスプレイ。

試作したHDDディスプレイに対する人間の調節応答の測定を行った。その結果、調節応答の誘起は、眼の被写界深度の拡大により説明できることを報告している^{22,23)}。

1.1. インテグラルフォトグラフィー

以上で説明してきた立体表示方式では視差が水平方向に限定される水平視差型であるのに対して、水平と垂直に視差を有する立体表示方式がインテグラルフォトグラフィーである。これは、図21に示すように、フラットパネルディスプレイにレンズアレイを組み合わせた構成を用いる。レンズにより、フラットパネルディスプレイの画素から発せられる光線を、水平方向と垂直方向に偏向させる。

インテグラルフォトグラフィーは、水平方向と垂直方向に光線を制御するので、フラットパネルディスプレイには水平視差型の2乗の画素数が必要になる。このため、現状では、立体解像度は水平視差型に比べてかなり低い。また、自然な立体表示を実現しようとすると、約60°以上の表示画像数が必要になる。以上のように、インテグラルフォトグラフィーは、実現の難易度が高い立体表示技術である。

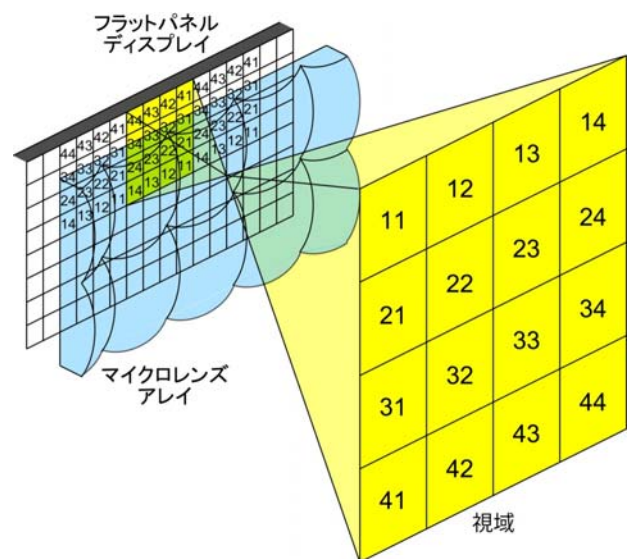


図21 インテグラルフォトグラフィー：水平方向と垂直方向の視差を実現するためにレンズアレイを用いる。

インテグラルフォトグラフィーの研究は、日本では、NHK 技研で活発に行われている。スーパーハイビジョン技術を応用したディスプレイが試作されている。

なお、インテグラルフォトグラフィーの長所として、寝ころんでも使える点が挙げられている。水平視差型では、寝ころんで見ると画像は2次元画像として見え、多眼式では運動視差が得られる。

1 2. ホログラフィー

ここまで説明した立体表示技術では、光を光線として扱う。これに対して、光を波面としてより正確に扱う立体表示技術がホログラフィーである。ホログラフィーは、物体から発せられる光の波面を再生するため、理想的な立体表示方式であると言われていて、立体知覚の4つの生理的要因がすべて機能すると言われている。

電子的なホログラム表示を図 22 に示す。本来、ホログラムは写真技術として提案されたものであるが、電子的に実現するためには、光の振幅や位相を電子的に変調する空間光変調器が用いられる。空間光変調器には、通常の液晶テレビと同様な構造をもつ液晶変調素子がよく用いられるが、光の波面の間隔が波長であることから、表示デバイスの画素ピッチを波長程度にする必要がある。ただし、2次元ディスプレイのように画面サイズに比例して画素ピッチを変えることはできないので、実用的な画面サイズを得るためには膨大な画素数が必要になる。したがって、実現の難易度は極めて高く、技術的ブレークスルーが必要である。

ブレークスルーのひとつが、水平視差型ホログラフィーである。視差を水平方向に限定することで、高解像度が必要な方向が水平方向のみになるため、空間光変調器に必要な画素数を大幅に削減できる。このような水平視差型ホログラフィーの実現方法としては、音響光学素子を用いる方法²⁴⁾、解像度変換光学系を用いる方法²⁵⁾、Digital Micro-mirror Device(DMD)を用いる方法²⁶⁾などが提案されている。図 23 に、著者の研究室で研究している DMD を用いた水平視差型ホログラムの再生像を示す。画素ピッチ 2.5 μm を実現している。

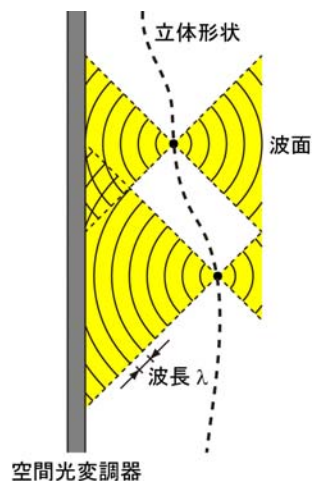


図 22 ホログラフィー：光の波面を再生する理想的な立体表示方式であるが、実現には1 ミクロン程度の画素ピッチと膨大な画素数を必要とする。



図 23 水平視差型ホログラフィーの再生像の例:DMD と水平走査光学系で画素ピッチ 2.5 μm のホログラム表示を実現。

1 3. 将来展望

最後に、技術の流れをもとに、立体表示技術の将来を展望する。図 24 に、立体表示技術の流れを示す。

現在は、もっとも基礎的なメガネあり2眼式立体表示が、立体テレビとして実用化が検討されている段階にある。リンビングの不特定位置にいる多人数に対して現実的なコストで立体表示を実現するためには、現状ではメガネを用いるしかない。また、この方式では、立体映画を中心に、効果的かつ疲労感の少ない立体コンテンツの開発が活発に行われている。

メガネなし2眼式立体表示については、観察者がディスプレイの真正面で観察し逆立体視が生じ難いモバイル用の小画面ディスプレイが実用化されている。

多眼式立体表示は、逆立体視が生じ難いことが特徴であり、将来の家庭への本格的普及を可能にする立体表示方式として期待されている。視点数を増やしつつ解像度低下を如何に抑えるかが、重要な研究開発課題である。

多眼式の先には、2つの分かれ道がある。ひとつは

インテグラルフォトグラフィーであり、もうひとつは超多眼／高密度指向性表示である。両者でフラットパネルディスプレイに必要な画素数は同等であると考えられる。垂直視差を重視する場合には前者を選択することになり、解像度や安全性を重視する場合には後者を選択することになる。

将来的には、両者を統合した水平垂直に視差をもつ自然な立体表示が実現されることが期待される。これに必要なフラットパネルディスプレイの解像度が実現されれば、水平視差型ホログラフィー実現の可能性も見えてくる。

最終的には、水平垂直に視差をもつホログラフィーの実現が、立体ディスプレイの研究開発のゴールとなる。しかし、そのためには、今後、数多くのブレークスルーが必要になる。

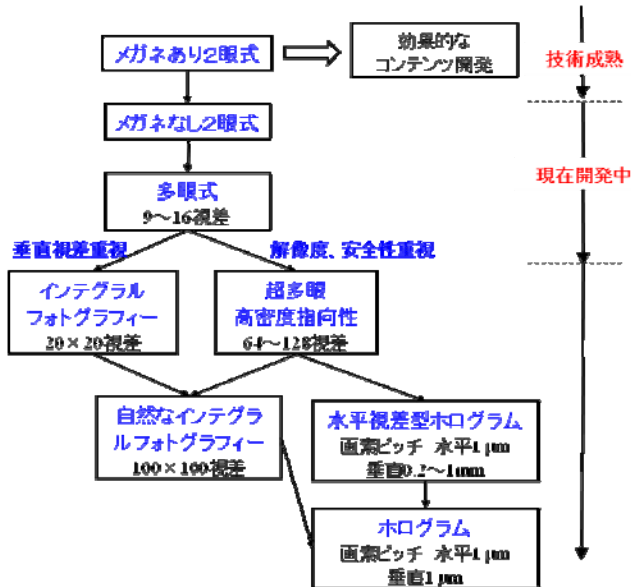


図 24 立体表示技術の流れと将来展望

1.4. まとめ

本稿では、立体表示技術の紹介を中心に、その現状と将来について述べた。立体ディスプレイが家庭に本格的に普及するためには、ディスプレイだけでなく、当然、カメラ技術や伝送技術などの関連技術も重要である。これらの技術に関しては、著者の勉強不足から、今回は省かせて頂いた。また、標準化も重要であり、これについては、産総研の氏家氏から本号の別記事で解説がある。

冒頭に述べた、が今回は第3の波と言われているが、

これを如何に持続的な流れに繋げていくかが重要である。立体映画の良質なコンテンツが今後大量に供給されることが予想されるが、これを、メガネをかけて家庭で楽しむだけでは、以前の家庭用ホームシアターゲームの二の舞になる可能性がある。これを機に、家庭への本格的普及を目指して、メガネなし立体ディスプレイの研究開発を活発化することが、日本の将来のディスプレイ産業の復権に繋がると考える。

参考文献

- 1) 日経エレクトロニクス、「特集 3Dディスプレイ 3度目の正直」、no.987、2008年。
- 2) 大越孝敬：三次元画像工学、朝倉書店(1991年)
- 3) S. S. Kim, et. al., "World's First 240-Hz TFT-LCD for Full-HD LCD-TV and Its Applications to 3-D Display," 47th SID International Symposium (2009).
- 4) D. Suzuki, et. al., "Crosstalk-Free 3-D Display with Time-Sequential OCB-LCD," 47th SID International Symposium (2009).
- 5) 高木康博、「立体映像とフラットパネル型立体表示技術」、光学, vol.35, no.8, p.400-409 (2006).
- 6) 高木康博、「将来の3次元ディスプレイと人のビジョン」、映像情報メディア学会誌, vol.60, no.10, p.1566-1573 (2006).
- 7) C. van Berkel: U.S. Patent No. 6064424 (2000).
- 8) K. Mashitani, et. al., "Step barrier system multiview glassesless 3D display," Proc. SPIE, vol. 5291, 265-272 (2004).
- 9) 畑田豊彦, 「人はどのように立体視しているか?」、オプトロニクス, vol.12, p.47-55 (1993).
- 10) 畑田豊彦, 「疲れない立体ディスプレイを探る」、日経エレクトロニクス, vo.444, p.205-223 (1988).
- 11) 梶木善裕: 超多眼領域を用いた3Dディスプレイ, 光技術コンタクト, vol. 36, p.624-631 (1998).
- 12) 高木康博: "変形2次元配置した多重テレセントリック光学系を用いた3次元ディスプレイ", 映像情報メディア学会誌, vol. 57, p.293-300 (2003).
- 13) Y.Takaki, "Density Directional Display for Generating Natural Three-Dimensional Images,"

Proc. IEEE, vol.94, p.654-663 (2006).

14) Y. Takaki, et. al., "Flat panel display with slanted pixel arrangement for 16-view display," Proc. SPIE, vol.7237, 08-1-8 (2009).

15) H. Nakanuma, et. al., "Natural 3D display with 128 directional images used for human-engineering evaluation," Proc. SPIE, vol. 5664, p.28-35 (2005).

16) Kikuta and Y. Takaki: "Development of SVGA resolution 128-directional display", Proc. SPIE, vol. 6490, p.U1-8 (2007).

17) 金箱 翼、高木康博、「時間多重表示モジュールを用いた高密度指向性立体ディスプレイ」、映像情報メディア学会誌、vol.63、no.8、p.1133-1138 (2009)

18) Y. Takaki, "Thin-type natural three-dimensional display with 72 directional images," Proc. SPIE, vol. 5664, p.56-63 (2005).

19) Y.Takaki and T.Dairiki, "72-directional display having VGA resolution for high-appearance image generation," Proc. SPIE, vol.6055, X-1-8(2006).

20) M. Tsuboi, et. al., "Real Time Rendering for a Full Parallax 3D Display Using High-Density Directional Images," 13th International Display Workshops, p.1379 (2006).

21) 名郷日陽など、「256視点超多眼立体ディスプレイ SMV256の開発」、3次元画像コンファレンス2009、p.161-164 (2009).

22) 福富武史など、「高密度指向性画像で表示した3次元画像における調節応答」、映像情報メディア学会誌、vol.58, p.69-74 (2004).

23) Y. Takaki and H. Kikuta, "3D Images with Enhanced DOF Produced by 128-Directional Display," 13th International Display Workshops, p. 1909-1912 (2006).

24) P. St. Hilaire, et. al., "Electronic display system for computational holography," Proc. SPIE, vol. 1212, p.174 (1990)

25) Y. Takaki and Y. Hayashi, "Increased horizontal viewing zone angle of a hologram by resolution redistribution of a spatial light modulator," Appl. Opt., vol. 47, no. 19, p.D6-11 (2008).

26) Y. Takaki and N. Okada : "Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed SLM," Appl. Opt., vol. 48, no. 19, p. 3255-3260 (2009).

表1 現在までに試作された高密度指向性(HDD)ディスプレイ

指向性数	64	128	128	72	72	30
構成法	Projection	Projection	Projection	Flat-panel	Flat-panel	Flat-panel
水平表示 角度ピッチ	0.34°	0.23°	0.28°	0.38°	0.38°	0.71°
水平視域角	21.6°	29.6°	35.7°	27.6°	27.6°	21.2°
3次元解像度	~QVGA	~QVGA	SVGA	320×400	640×400	256×128
スクリーンサイズ	9.25"	13.2"	12.8"	22.2"	22.2"	7.2"

写真

