

3Dディスプレイ技術：裸眼からホログラフィーまで

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、薄型テレビに眼鏡型の立体視機能が次々に搭載されている。立体携帯、立体ゲーム機、立体デジカメなどの映像機器の立体化も進んでいる。一部で裸眼立体テレビも商品化され、話題になっている。立体映像の普及は着実に進んでいる。

一方で、本格的なメガネなし立体表示の実現を望む声は大きい。本稿では、将来の立体ディスプレイ技術として裸眼立体表示技術について、現在の技術から将来の技術まで、その表示原理と課題について解説する。特に、人間の立体知覚のメカニズムと対比しながら、これらの技術について説明する。

2. 裸眼立体表示の分類

2次元ディスプレイに対して立体ディスプレイがもつ最大の特徴は、「視差」を有することである。すなわち、見る位置によって見え方が変わる、右目と左目で異なる映像が見えることである。

裸眼立体ディスプレイは、視差の与え方で「水平視差型」と「水平・垂直視差型」の2種類に分類できる。水平・垂直視差型は「フルパララックス型」とも呼ばれる。水平視差型は、人間の目が水平方向に並んでいて、水平方向の視差が人間のもつ立体知覚において支配的であることから、水平視差のみを与える。当然、水平視差型よりは、垂直方向にも視差を有する水平・垂直視差型の方が好ましい。水平視差型が用いられる理由は、水平・垂直視差型のディスプレイの実現の難易度がかなり高いためで、なおかつ、水平視差のみでも十分な立体感が得られるためである。

裸眼立体ディスプレイを他の切り口で分類すると、「光線再生型」と「波面再生型」に分類できる。前者は光を光線として扱い、後者は光を波として扱う。後者は、後で述べるが、所謂、ホログラフィーである。光線再生型という言葉は、それほど一般的に用いられている訳ではないが、ここでは、波面再生と対になる

用語として用いた。これは、レンズやスリットなどの光学素子による光線の屈折、偏向を利用している。

立体表示技術は、当初は写真技術として研究が開始され、その研究の歴史が長いから、表示方式にさまざまな名称がつけられている。ここでは、上記の水平視差型と水平・垂直視差型、光線再生型と波面再生型に分類した。図1に、それぞれの分類に対応する具体的な表示方式を示す。超多眼表示は最近の表示方式であるが、現状では「光線再生型、水平視差型」に分類するのがふさわしい。また、ホログラフィーには水平視差型と水平・垂直視差型があるが、両方ともホログラフィーと呼ばれる。

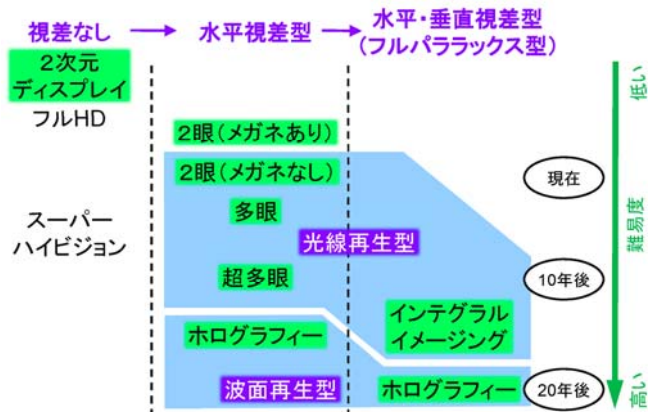


図1 立体表示方式の分類：水平視差型と水平・垂直視差型、光線再生型と波面再生型で分類

3. 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。そのため、立体ディスプレイの開発においては、人間の立体知覚に対する十分な配慮が必要である。ここでは、人間の立体知覚の要因 ① 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。輻輳は、一点を注視したときの左右の目の回転角から3角測量の原理で奥行きを知覚する。両眼視差は、左右の目の網膜像の対応点の水平ずれ量にもとづく奥行き知覚である。調節は、目のピント合わせによる奥行き知覚である。運動視差は、視点移動に伴う網膜像の変化にもとづく奥行き知覚である。輻輳と

両眼視差の違いがわかりにくいかも知れないが、輻輳は絶対的な距離を知覚し、両眼視差は相対的な距離を知覚する。

生理的要因は、人間が意識しなくても機能するため、立体ディスプレイのハードウェアの研究開発では特に重要であり、これらを矛盾なく満たすことが望ましい。

心理的要因としてはさまざまな要因が知られているが、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。これらを、図3に示す。

心理的要因は、人間が経験的に獲得した後天的な立体視機能で、2次元映像に対しても機能する。そのため、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。

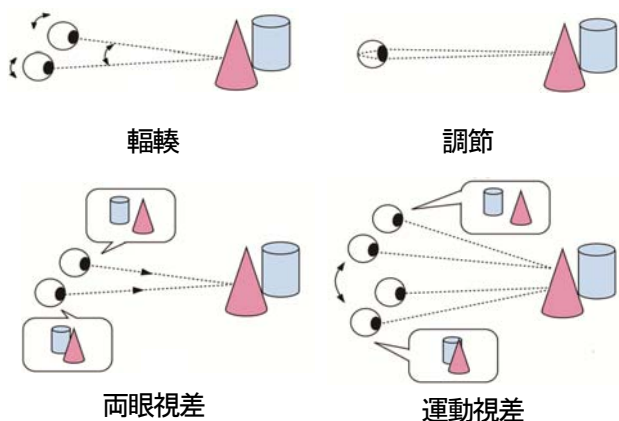


図2 立体知覚の生理的要因：人間の視覚の生理現象にもとづくもので、4つの要因がある。立体ディスプレイの研究開発では、これらを矛盾なく満たすことが重要である。



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制作が可能になる。

4. 光線再生型・水平視差型ディスプレイ

最初に、光線再生型の水平視差型立体ディスプレイについて説明する。これは、「多眼式」と呼ばれている。

光線再生型の水平視差型立体ディスプレイの代表的な構成²⁾を、図4に示す。フラットパネルディスプレイとレンチキュラレンズを組み合わせた構成である。レンチキュラレンズとは、円筒レンズであるシリンダリカルレンズを水平方向に並べたものである。レンズ中心軸からピクセルまでの水平距離で、ピクセルから発せられた光線がレンズ通過後に進む水平方向が決まる。すなわち、水平位置が異なるピクセルは、異なる水平方向に進む光線を発する。

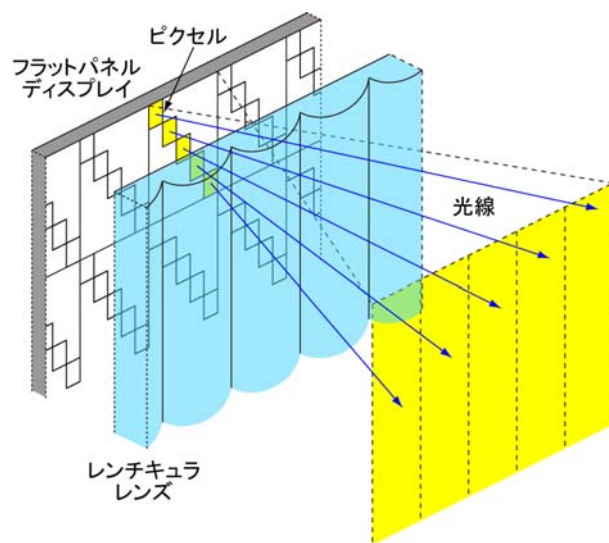


図4 光線再生型・水平視差型立体ディスプレイの構成 (フラットパネル型)：多眼式と呼ばれる。

図5に示すように、各シリンダリカルレンズに複数のピクセル (ピクセル群) を対応させ、レンズ間隔をピクセル群の間隔以下にする。そうすると、特定の距離で、すべてのピクセル群内の同じ位置にあるピクセルから発せられた光線が一点に集光する。この集光位置を視点と呼ぶ。すなわち、視点位置に目を置いて見ると、各レンズを通して、特定のピクセルが見える。これらのピクセルを用いて、その視点位置から見た視差画像を表示する。視差画像とは、3次元物体を、ある視点位置から見た2次元画像である。

実際にはピクセルは幅をもつから、ピクセルから発せられた光線の重なりは、図6に示すように、点ではなく、広がりをもつ。この広がりの中に目を置けば、

対応する視差画像が見える。

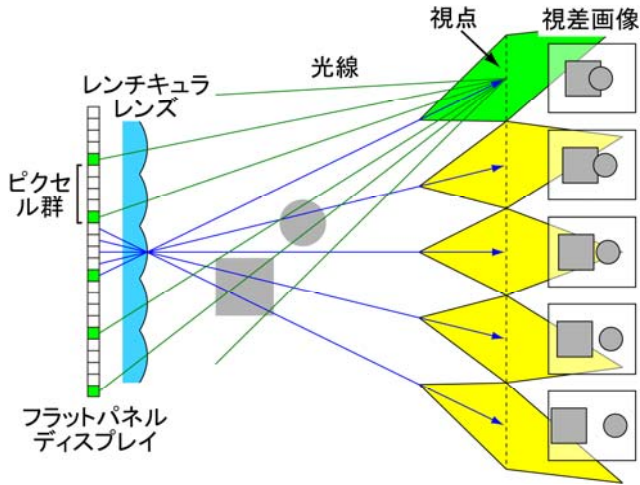


図5 裸眼立体表示を実現する視点の形成 (水平断面図) :各レンズにピクセル群を対応させて、視点群を形成する。

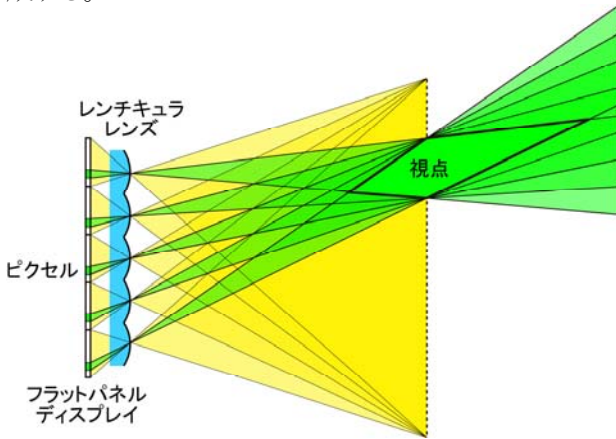


図6 視点の広がり (水平断面図) :視点は、点ではなく、実際にはダイヤモンド状の広がりをもつ。

5. メガネなし2眼式立体表示

最も基本的な光線再生型・水平視差型立体表示が、「メガネなし2眼式」である。

メガネなし2眼式立体表示では、図7に示すように、レンチキュラレンズの各レンズに2個のピクセルを対応させ、右目用と左目用の2個の視点を発生する。これらの視点位置に、右目と左目から見た視差画像を表示する。2つの視点位置に左右の目を置けば、メガネなしの立体表示が実現できる。ただし、立体像を見ることができる観察位置は視点の広がり限定される。

メガネなし2眼式立体表示では、右目用と左目用の2つの映像しか表示しないため、立体知覚の4つの生理的要因のうち、両眼による立体知覚要因である輻輳

と両眼視差しか機能しない。

後述するが、実際の表示システムでは、図6に示すように、視点が空間的に繰り返し発生する。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、正しい視点位置に目があるかどうかは観察者にはわからないので、左右の目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。

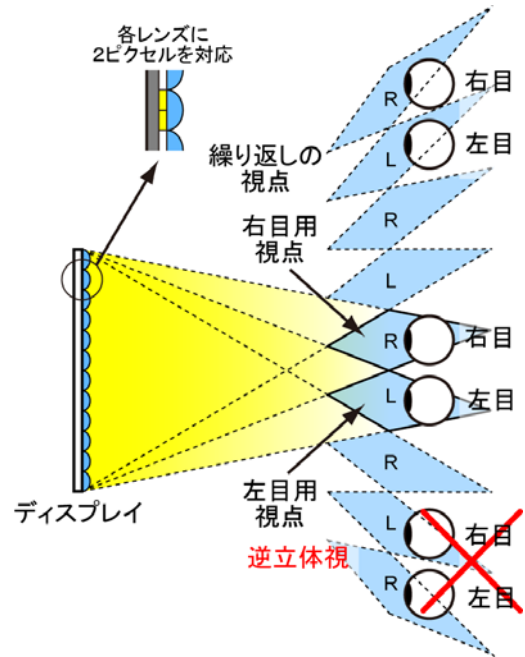


図7 メガネなし2眼式立体表示 :左右の眼に対応する2つの視点を発生することで、メガネなし立体表示を実現。ただし、観察位置の制限が大きい。

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、逆立体視は大きな問題になる。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、目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は対応できない。

モバイル用途などで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場合が多い。そのため、携帯電話や携帯ゲーム機などでは、メガネなし2眼式立体ディスプレイが使用されることが多い。

レンチキュラレンズを用いた実現方法以外に、図8に示すように、特殊なバックライトを用いた実現方法

も用いられている。バックライトには右目用と左目用の LED が付いていて、それぞれから発せられた光は対応した目の方向にだけ進むように設計されている。LED を交互に発光させ、これに同期して液晶パネルに左右の画像を時分割表示する。ただし、液晶パネルは倍速駆動する必要がある。立体化に伴う解像度低下がなく、逆立体視が生じないのが特徴である。

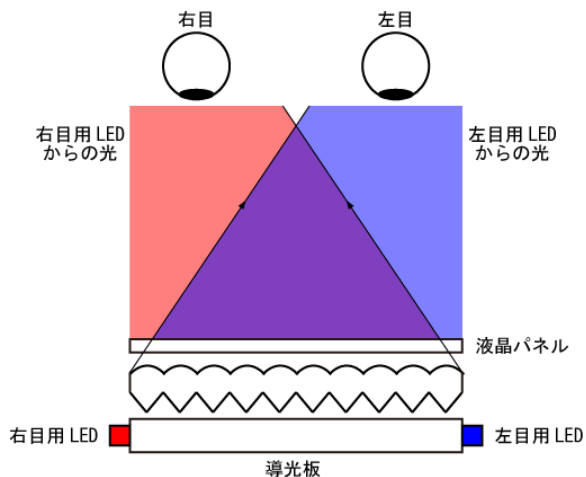


図8 特殊なバックライトを用いた2眼式立体表示の実現方法：パネルを倍速駆動する必要があるが、立体化による解像度低下はない。

7. 多眼式立体表示

以上のように、メガネなし2眼式立体ディスプレイは、観察位置に対する制限が大きく、家庭のリビング等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、レンチキュラレンズの各レンズに3個以上のピクセルを対応させ、3個以上の視点を発生させる。視点間隔は、平均两眼間隔 65 mm (これを 63 mm とすることもある) 以下、あるいはその半分程度にすることが多い。逆立体視は、視点の繰り返しの境界部分で生じるため、視点数が多いほど逆立体視になる確率が低下する。視点数を n とすると、逆立体視になる確率は $1/n$ に低下する。

多眼式立体表示では、視点が形成される位置以外でも、目の位置に応じて複数の視差画像が合成されて見える。図 10 に、観察位置と視差画像の合成の様子を示す。例えば、A の位置に目を置くと、視域 3 と 4 に進む光線が目に入るので、視域 3 と 4 に対応した視差

画像が合成されて見える。視差合成により、目の位置に応じた網膜像が合成される。多眼式の場合は、視点間のクロストークが比較的大きいため、視差画像の境界は滑らかに合成される。以上のように、多眼式立体表示では、正しく立体視できる範囲は図9と図10に示すように、視点が並ぶ水平方向だけでなく、奥行き方向にも広がる。³⁾

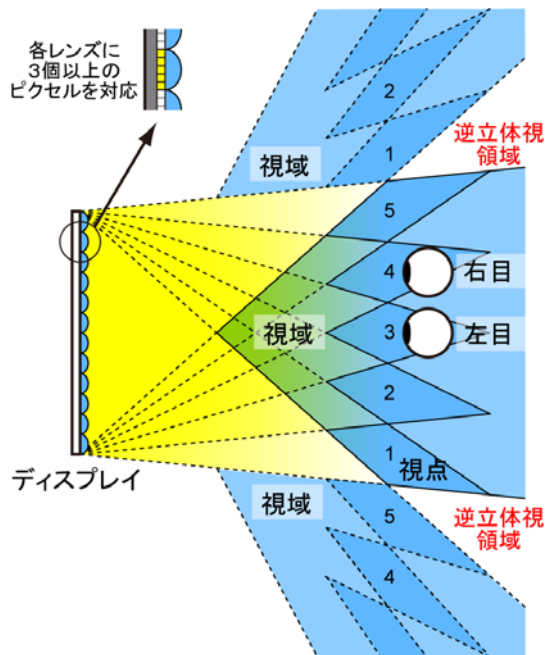


図9 多眼式立体表示：空間に3個以上の視点を設定することで、運動視差が得られ、逆立体視領域が減少する。

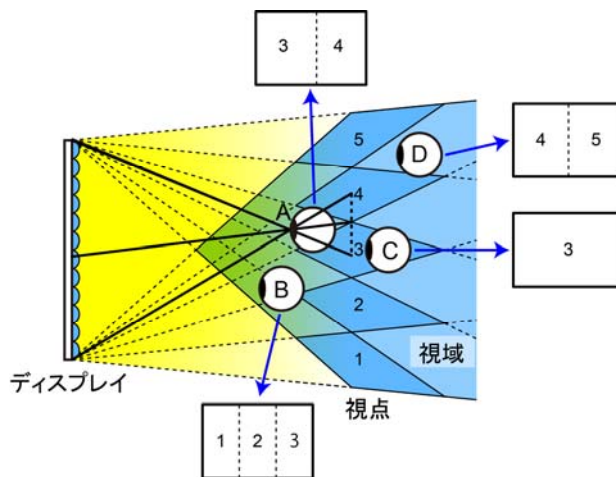


図10 多眼式立体表示での網膜像合成：目の位置に応じて、複数の視差画像が滑らかに合成される。

また、図9や図10からわかるように、視域群の並ぶ幅が画面の幅より大きい場合には、視域は奥行き方向に無限に広がることがわかる。逆に、視点数が少なく

画面幅が大きい場合には、視域は狭くなるので、顔検出等で観察者の位置を検出し、それに応じて表示する視差画像を合成することが必要になる。

多眼式立体表示では、視点位置に応じて見える視差画像が変化するので、運動視差が得られる。立体像の正面だけでなく、側面も見る事ができる。すなわち、4つの生理的要因のうち、輻輳、両眼視差、運動視差の3つが機能することになる。

ただし、視点数が少なく視点間隔が広いと、頭を動かしたときに、不連続な画像の切り替わりや、画像内の不連続な変化が知覚される。これが、観察者の感じる臨場感を低下させるという指摘がある。滑らかな運動視差は臨場感を高める。しかし、不完全な運動視差をもつ多眼立体映像は、高精細・大画面な2眼立体映像より臨場感が低く感じられることがある。

8. 多眼式のハードウェア

多眼式立体ディスプレイのハードウェアの構成方法には、今まで説明してきたフラットパネルディスプレイを用いるフラットパネル型以外にも、複数のプロジェクタを用いるマルチプロジェクション型がある。

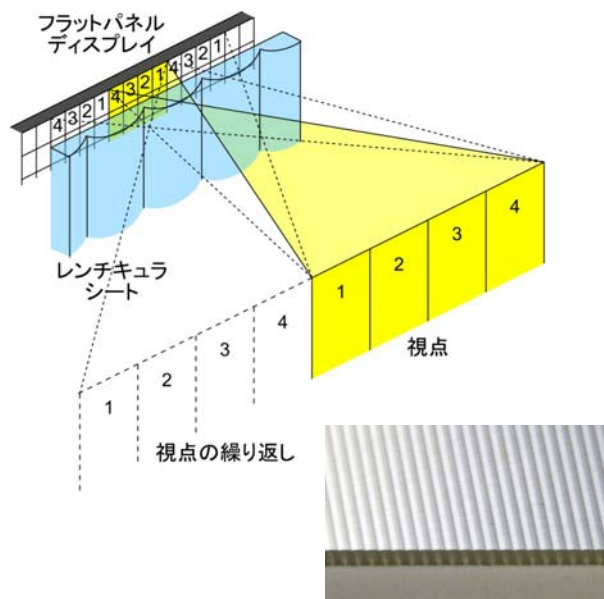
(1) フラットパネル型

フラットパネル型²⁾で用いる偏向光学素子としては、図4に示したレンチキュラレンズ以外に、パララックスバリアが用いられる。両者を、図11に示す。パララックスバリアとは、同図に示すように、垂直スリットを水平方向に並べたスリットアレイである。ピクセルから出た光線の水平進行方向をスリットで制限することで、光線の水平進行方向を制御する。

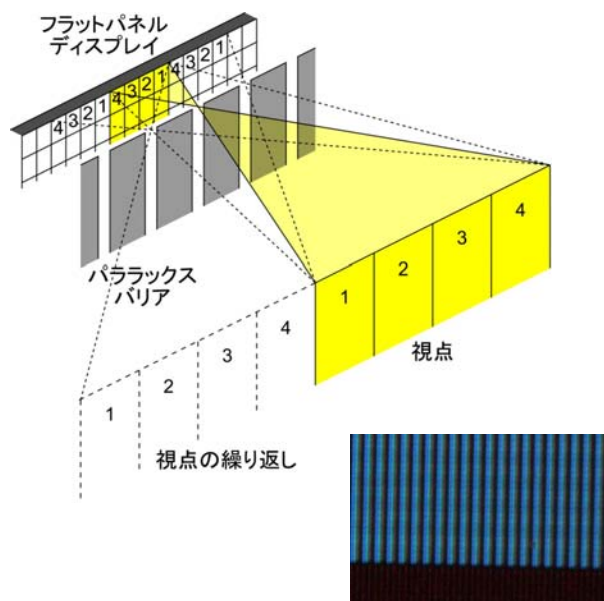
パララックスバリアは、リソグラフィー等で作製されるため作製が容易で作製精度も高いが、マスクで光を遮光するため光の利用効率が低い。レンチキュラレンズは、レンズを用いるため光の利用効率は高いが、樹脂で作製されることが多いため湿度や温度などの環境変化による形状変化が問題となる。視点への光線の集光性は、光の偏向にレンズを用いるレンチキュラレンズの方が優れている。

図11に示すように、レンチキュラレンズ方式でも、パララックスバリア方式でも、ピクセルから発せられる光線は、正面のレンズやスリット以外にも、隣接す

るレンズやスリットにも入射する。そのため、同図に示すように、水平方向に、繰り返しの視点が発生する。



(a) レンチキュラレンズ方式



(b) パララックスバリア方式

図 11 フラットパネル型の多眼式立体ディスプレイの構成：レンチキュラレンズ方式とパララックスバリア方式があり、両者とも繰り返しの視点が発生する。

いずれの方式でも、視点数の増加に伴い、水平解像度が低下する。実際の多眼式立体ディスプレイでは、図12に示す斜めレンチキュラ方式⁴⁾が良く用いられる。これは、Philipsにより提案された技術である。レ

レンチキュラレンズを傾けることで、垂直方向に並ぶ同色の色画素が、レンズ中心軸に対して異なる水平距離をもつようになる。そのため、解像度低下を水平方向と垂直方向にバランスよく割り振ることができる。パララックスバリアについても、スリットを傾けるステップバリア方式⁹⁾が提案されている。

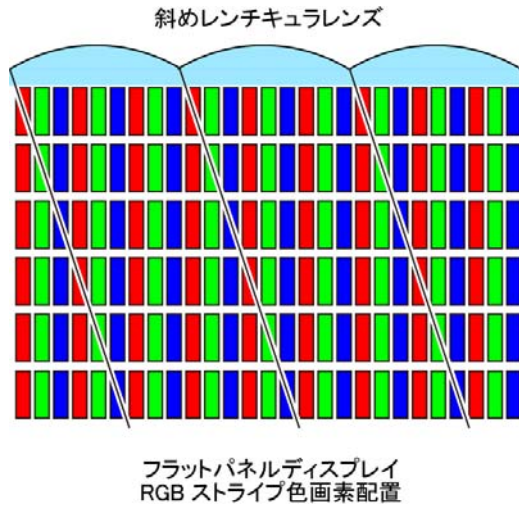


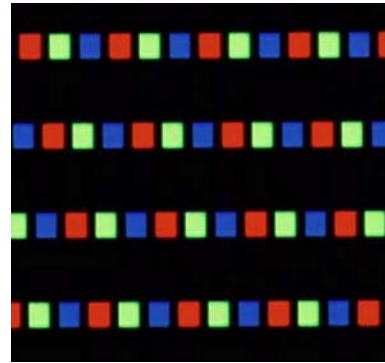
図 12 斜めレンチキュラレンズ方式: 水平解像度と垂直解像度をバランスよく低下させながら、視点数を増やすことができる。

図 13 に、著者の研究室とセイコーエプソンが共同開発した斜め色画素配置を有する液晶パネル¹⁰⁾と、これを用いた 16 眼立体ディスプレイを示す。これは、同色の色画素の配置を斜め方向にすることで、レンズ中心軸に対する同色の色画素の水平距離をすべて異なる値にする。レンチキュラレンズを傾ける必要がないことがメリットである。

フラットパネル型の問題点は、立体解像度と視点数の積がフラットパネルディスプレイの解像度となるため、両者にトレードオフの関係があることである。すなわち、視点数を増やすと立体解像度が低下する。最近では、フラットパネルディスプレイの時分割表示を利用して、表示性能を高める研究も行われている。

レンチキュラレンズやパララックスバリアに、電子的にその機能をオン・オフする機能を付与することで、立体表示と 2 次元表示を切り替えることができる。例えば、図 14(a)に示すように、スリットアレイを表示する液晶パネルをパララックスバリアとして用いれば、スリットアレイ表示時には立体表示になり、非表示時

には 2 次元表示になる⁷⁾。また、図 14(b)に示すように、複屈折物質でレンチキュラレンズを作ると、偏光方向でレンズ作用の有無が変わるので、偏光を回転させる光学素子と組み合わせて、立体表示と 2 次元表示を選択できる⁸⁾。両方法とも、2 次元表示時の解像度はフラットパネルディスプレイの解像度と等しくなる。



(a) LCD パネルの画素構造の顕微鏡写真



(b) 16 眼立体ディスプレイ

図 13 斜め色画素配置を用いた多眼式立体ディスプレイの実現: レンチキュラレンズを傾ける必要がない。

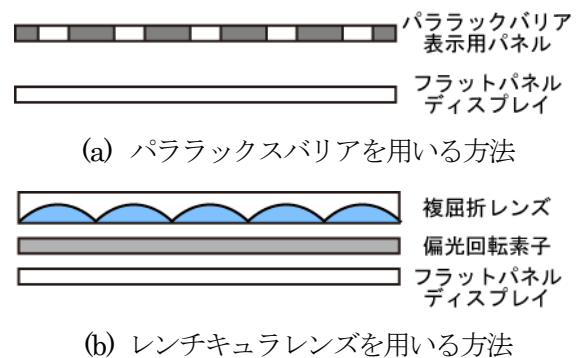


図 14 2D/3D 切り替えの実現方法: 電的に 2 次元表示と立体表示を切り替えることを可能にすることで、2 次元表示時の解像度低下をなくすることができる。

(2) マルチプロジェクション型

これは、図 15 に示すように、プロジェクタアレイと、垂直方向に光を拡散する特殊なスクリーンを組み合わせた構成方法⁹⁾である。複数のプロジェクタを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、異なる水平方向に狭間隔で映像を表示できる。フロントプロジェクション型とリアプロジェクション型の両方の構成が可能であるが、前者の場合はスクリーンに再帰性反射スクリーンを、後者の場合はフレネルレンズなどの集光性スクリーンを組み合わせる。いずれの場合も、水平方向に、プロジェクタのプロジェクションレンズの像が観察者側の空間に結像される。このプロジェクタレンズの像の位置に眼を置くと、そのプロジェクタが表示する映像が見える。すなわち、レンズの像が視点を形成する。

フラットパネル型では立体表示解像度と視点数の間にトレードオフの関係があったが、マルチプロジェクション型では、これらを独立に増やすことができる。プロジェクタ数やプロジェクタの解像度を増やすことで、スケーラブルに性能を向上できる。

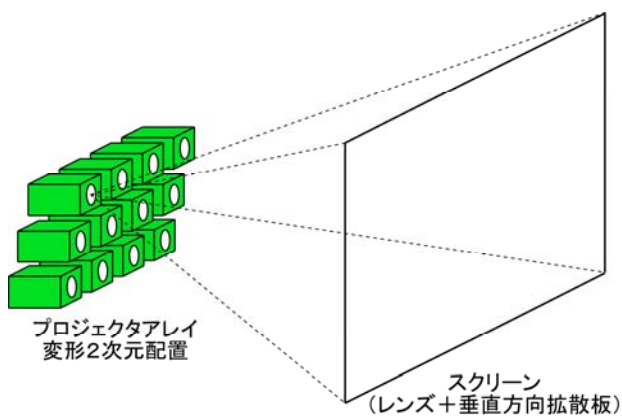


図 15 光線再生型・水平視差型立体ディスプレイの構成 (マルチプロジェクション型) : 多眼式立体表示に用いる。大型で高コストであるが、解像度と視点数を独立に増やすことができる。

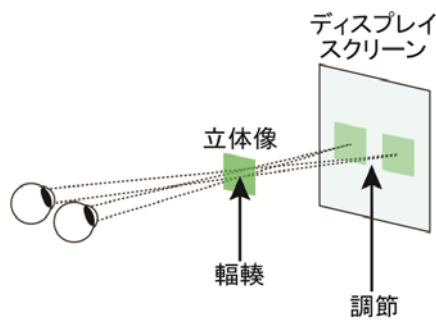
プロジェクタアレイを用いた多眼式立体ディスプレイは、装置が大型で高価であるため、幅広い普及には適さない。コストよりも大画面のメガネなし立体表示を優先する場合や、立体視の研究などに用いられる。ハンガリーの Holografika 社から、72 インチのメガネなし立体ディスプレイ¹⁰⁾が商品化されている。また、

国内でも、NICT でハイビジョン解像度のディスプレイ¹¹⁾が開発されている。

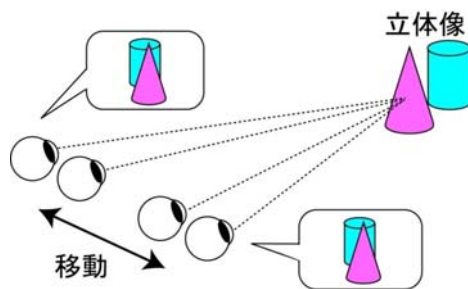
9. 超多眼立体表示

これまでの説明でわかるように、2眼式や多眼式の立体表示では、人間がもつ立体知覚の4つの生理的要因を部分的にしか満たすことができない。そのため、以下に説明する2つの問題が生じる。

第1の問題は、調節と輻輳の不一致^{12,13)}である。従来の立体表示では、図 16(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、立体像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付近に合うため、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。

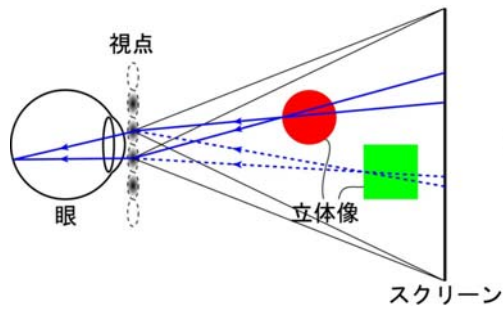


(a) 調節と輻輳の不一致

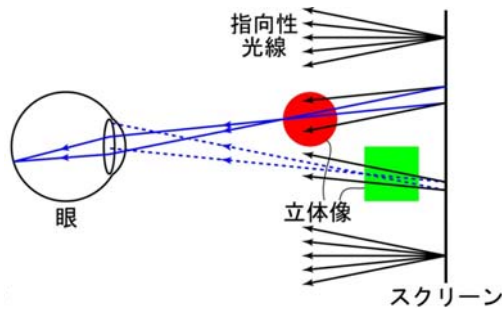


(b) 運動視差の欠如、不完全さ

図 16 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。



(a) 超多眼(SMV)表示



(b) 高密度指向性(HDD)表示

図 17 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。

第 2 の問題は、運動視差の欠如あるいは不完全さである。図 16(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が変化するが、不連続な画像の切り替わりや、画像内に不連続な変化が見える。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。

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」^{14, 15)} (Super Multi-View 表示、以下、SMV 表示と略す) が知られている。これは、図 17(a)に示すように、視点間隔を従来の多眼式立体表示よりも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、高密度に非常に多くの視点を用意する必要がある。

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」^{16, 17)} (High-Density Directional 表示、以下、HDD 表示と略す) である。図 17(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。

10. 超多眼立体ディスプレイのハードウェア

SMV/HDD ディスプレイの研究状況として、著者の研究室での研究成果を紹介する。

SMV/HDD ディスプレイでも、基本的にはプロジェクション型とフラットパネル型の構成方法を用いる。表 1 には、現在までに試作した HDD ディスプレイを示す。

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¹⁶⁻¹⁹⁾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。プロジェクション型では、必要なプロジェクタ数が膨大であることが問題点である。これを解決するために、時間多重表示を導入し、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を削減する構成方法も開発している。²⁰⁾

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。そこで、解像度が 320×400 の 72 指向性ディスプレイ²⁰⁾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²²⁾を試作している。なお、30 指向性ディスプレイ²³⁾は、モバイル用に NTT ドコモと開発したもので、モバイル用では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ある。

さらなる表示画像数の増加を可能にするために、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²⁴⁾を開発している。図 18 に、16 視点フラットパネルディスプレイを 16 台用い、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を示す。

最近では、フラットパネル型の構成でフラットパネルディスプレイに必要な解像度を低下させるために、図 19 に示すように、左右の目の付近にだけ視点形成を行う方法を開発している²⁵⁾。ひとつのレンズに対応する左右の視点群を発生するピクセル群が分離するため、この間に隣のレンズに対応するピクセル群を配置することで、フラットパネルディスプレイに必要なピクセル数を減らすことができる。ただし、アイトラッキングと組み合わせて、目の位置に応じて、ピクセル群の位置を移動させる必要がある。

試作した SMV/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、目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^{26,27)}。

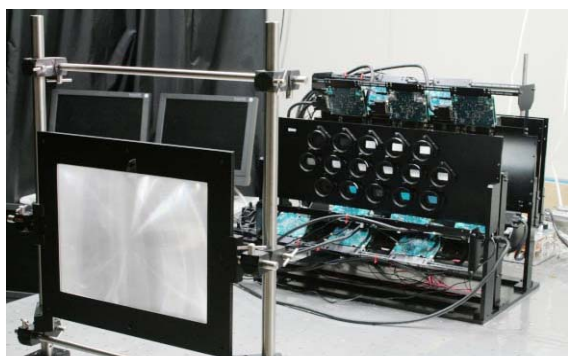


図 18 マルチプロジェクション型とフラットパネル型の構成方法を組み合わせた 256 視点超多眼立体ディスプレイ。

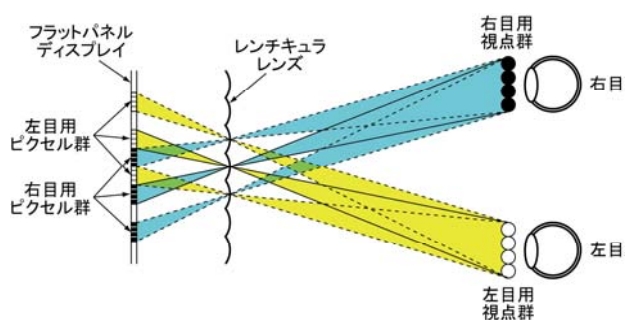


図 19 少数視点超多眼表示：フラットパネルディスプレイに必要なとされる解像度を低下できる。

1.1. 光線再生型・水平垂直視差型ディスプレイ

つぎに、光線再生型の水平・垂直視差型立体ディスプレイについて説明する。これは、「インテグラルイメージ」^{1,2,9)}と呼ばれている。もともとは写真技術として考案されたもので「インテグラルフォトグラフィー」と呼ばれていたが、最近になり、写真技術と区別するためインテグラルイメージと呼ばれるようになった。

インテグラルイメージの代表的な構成を、図 20 に示す。フラットパネルディスプレイとレンズアレイを組み合わせた構成である。ピクセルから発せられた光線が、レンズにより、ピクセルの水平・垂直位置に応じて異なる水平・垂直方向に偏向される。そのため、水平視差と垂直視差が得られる。

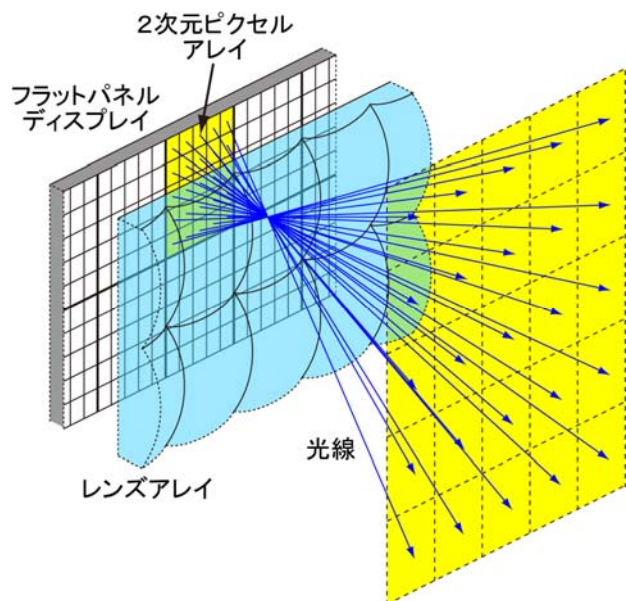


図 20 光線再生型・水平垂直視差型：インテグラルイメージと呼ばれる。水平方向と垂直方向の視差を実現するためにレンズアレイを用いる。

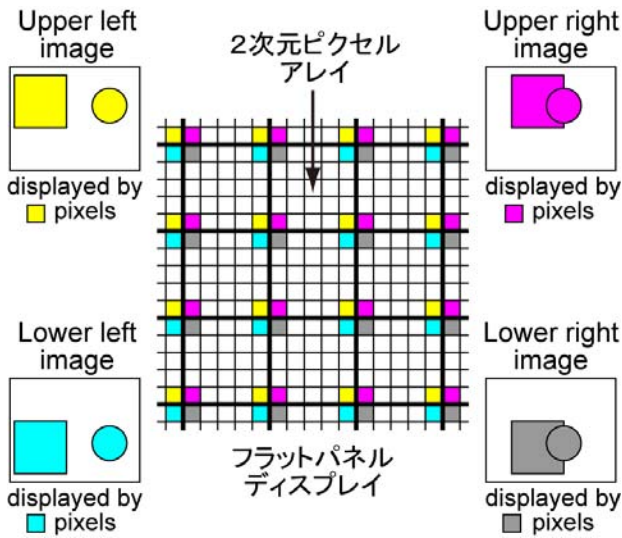


図 21 インテグラルイメージングの原理：異なる水平・垂直方向に進む光線で、その方向から見た 2次元画像を表示する。

各レンズに 2次元ピクセルアレイを対応させると、図 21 に示すように、すべての 2次元ピクセルアレイの同じ位置にあるピクセルから発せられた光線は同じ水平・垂直方向に進む。これらのピクセルで、その水平・垂直方向から 3次元物体を見た 2次元画像を表示する。インテグラルイメージングでは、ひとつのレンズが立体表示の 1ピクセルに対応する。

インテグラルイメージングでは、水平視差と垂直視差の両方を実現するために、水平視差型の 2乗の個数のピクセルを各レンズに対応させる。具体的には、数百から数千のピクセルを各レンズに対応させる。そのため、超高解像度なフラットパネルディスプレイが必要になる。しかし、現在のフラットパネル技術では、このような超高解像度を実現することは難しい。そのため、立体表示の解像度が低いことが問題点である。このように、インテグラルイメージングは実現の難易度が高い立体表示技術である。

インテグラルイメージングでは、立体知覚の 4つの生理的要因のうち、輻輳、両眼視差、運動視差が機能する。ただし、超多眼条件が水平方向と垂直方向の両方向で成り立てば、調節も機能し、滑らかな運動視差が得られる。この場合は、各レンズに約 60^2 以上のピクセルを対応させる必要がある。

なお、インテグラルイメージングの長所として、寝

ころんでも使える点がよく挙げられる。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。

1.1. インテグラルイメージングのハードウェア

インテグラルイメージングの最近の研究状況について説明する。

上述のように、インテグラルイメージングに必要な超高精細なフラットパネルディスプレイが存在しないため、さまざまな実現方法が提案されている。

インテグラルイメージングは、日本では、NHK 技研で次世代のテレビ技術として活発に研究が行われている。スーパーハイビジョン用に開発されたプロジェクタを利用した表示システム²⁸⁾が試作されている。

最近では、超高精細なプロジェクタを使う代わりに、プロジェクタアレイを用いる構成方法²⁹⁾が、日立から提案されている。93 台の小型プロジェクタを用いたシステムが試作されている。

ただし、立体表示解像度に関しては、まだまだ改善の余地が大きい。

1.2. 波面再生型ディスプレイ

ここまで説明した光線再生型の立体表示では、光を光線として扱う。これに対して、光を波として扱うのが波面再生型の立体表示であり、「ホログラフィー」^{1, 2, 9)}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る。光を波として、物理的により正確に取り扱うため、立体知覚の 4つの生理的要因をすべて満足する。

電子的なホログラム表示の原理を、図 22 に示す。ホログラム表示で用いられるフラットパネルディスプレイは、特に、空間光変調器と呼ばれる。空間光変調器は、光の振幅や位相を電子的に変調する。空間光変調器としては、液晶を用いたもの、電気光学効果や磁気光学効果を用いたもの、MEMS を用いたものなどが存在する。このうち、液晶変調素子がよく用いられる。これは、基本的には液晶テレビと同じ動作原理をもつ。

電子的なホログラフィーでは、図 23 に示すように、

再生像である立体像を多数の物体点で構成し、空間光変調器から物体点に集光する多数の球面波を発生することで、立体表示を実現する。

ここで、光の波面の間隔が光の波長であることを考えると、図 22 に示すように、空間光変調器のピクセルピッチは光の波長程度にする必要がある。ピクセルピッチによるサンプリング限界で球面波の広がり角が決まり、球面波の広がりが立体像が見える視域角を決める。ピクセルピッチを p で、光の波長を λ で表すと、視域角は $2 \sin^{-1}(\lambda / 2p)$ で与えられる。可視光の波長は $0.4 \sim 0.8$ ミクロンであるので、実用的なホログラム表示を行うためには、空間光変調器には 1 ミクロン程度のピクセルピッチが必要であると言われている。また、ホログラム表示では、現在の 2 次元ディスプレイのように画面サイズに比例してピクセルピッチを大きくすることができないので、実用的な画面サイズを得るためには、空間光変調器に莫大なピクセル数が必要になる。

このような微細なピクセルピッチと膨大なピクセル数を有する空間光変調器の実現は、現状の技術では極めて難しい。これらの問題点を解決する方法として、水平視差型ホログラフィー (Horizontal-Parallax-Only, HPO ホログラフィーと呼ばれる) が提案されている。これは、視差を水平方向に限定することで、微細なピクセルピッチが必要な方向を水平方向のみにする。垂直方向のピクセル数は、 2 次元表示と同程度にできる。そのため、ホログラム表示に必要なピクセル数を劇的に削減することができる。

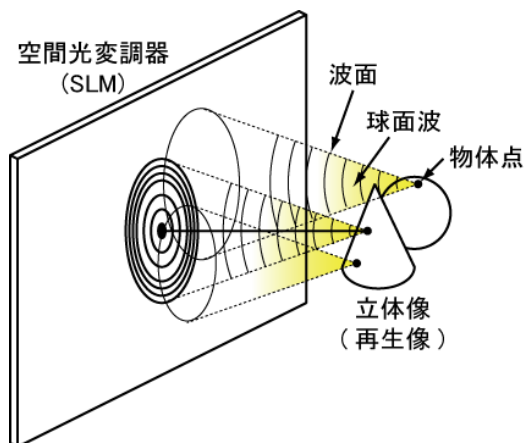


図 22 ホログラフィー：光の波面を再生する理想的な立体表示方式であるが、実現には 1 ミクロン程度の画素ピッチと膨大な画素数を必要とする。

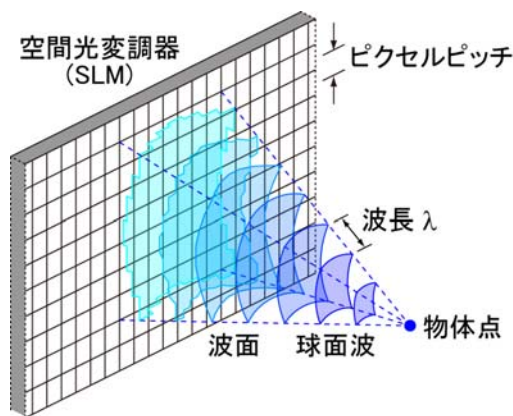


図 23 空間光変調器：光の振幅や位相を 2 次元的に変調する。 1 ミクロン程度のピクセルピッチと膨大な画素数が必要とされる。

1.3. 電子ホログラフィーのハードウェア

ここでは、電子的なホログラフィー表示の最新の研究動向について紹介する。

水平・垂直視差型のホログラム表示に関しては、国内では、情報通信研究機構(NICT)で、活発に研究が行われている。空間光変調器に、スーパーハイビジョンプロジェクト用に開発されたピクセルピッチが 4.8 ミクロンで解像度が $7,680 \times 4,320$ の反射型の液晶表示デバイスを用いたシステム³⁰⁾が開発されている。この場合の視域角は 5.6° で、画面サイズは 1.7 インチである。最近では、空間光変調器を 3 台使用して、視域角を 3 倍に拡大し、約 15° の視域角をもつシステムが実現されている³¹⁾。

つぎに、水平視差型ホログラフィーとして、著者の研究室で行っている研究を紹介する。著者の研究室では、水平走査型の表示システム^{32, 33)}と解像度変換技術を用いる表示システム^{34, 35)}を提案している。

水平走査型の表示システム^{32, 33)}の構成を、図 24 に示す。高フレームレート空間光変調器、アナモルフィック光学系、ガルバノスキャナーで構成される。アナモルフィック光学系とは、直交した 2 つのシリンドリカルレンズで構成される結像系で、水平方向と垂直方向で異なる倍率が実現できる。高フレームレート空間光変調器の表示画像を、アナモルフィック光学系により水平方向に縮小し、垂直方向に拡大し、これを要素ホログラムとしてスクリーンに結像する。水平方向に

は縮小するため、水平ピクセルピッチが縮小され、水平視域角が拡大する。さらに、ガルバノスキャナーで要素ホログラムを水平走査することで、全体の表示画面サイズが拡大する。実際の表示システムでは、高フレームレート空間光変調器として MEMS 型デバイスである Digital Micromirror Device (DMD) を用いている。1 台の DMD を用いて、水平画素ピッチを 2.5 ミクロンまで縮小し、水平視域角 15° で画面サイズ 4.1 インチのホログラム表示を実現している。再生像の例を図 25 に示す。このように、視差を水平方向に限定することで、視域角と画面サイズを拡大できる。

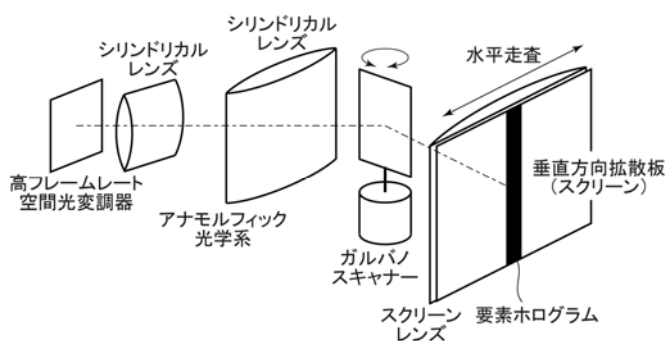


図 24 水平走査型ホログラフィー：水平視差型にすることで、視域角と画面サイズの両方を拡大できる。



図 25 水平視差型ホログラフィーの再生像の例：水平視域角 15°、画面サイズ 4.1 インチのホログラム表示を実現。

つぎに、解像度変換技術を用いる表示システム^{34, 35}について説明する。解像度変換技術とは、フーリエ光学の手法を用いて、空間光変調器の解像度の縦横の比を変更する技術である。これを用いて、空間光変調器の水平解像度を数倍に増加させ、水平視差型ホログラフィーを実現する。図 26 に、本技術を用いて試作したホログラム表示モジュールを示す。解像度 4,096 × 2,400 で画面サイズ 0.9 インチの空間光変調器を用い、水平解像度を 4 倍に向上させることで、画面サイズ 2.0 インチで視域角 11° のホログラム表示を実現

している。ホログラム表示装置は光学定盤の上に多くの光学部品を並べて実現されることが多いが、このモジュールは必要な光学系一式がモジュール内に収まっている。また、枠なしの表示面を実現しているので、縦横にシームレスに並べて、さらなる大画面化が可能である。モジュールの再生像を、図 27 に示す。安価な 3 次元入力デバイスである Kinect と組み合わせて、リアルタイムのホログラム表示を行っている様子を示した。

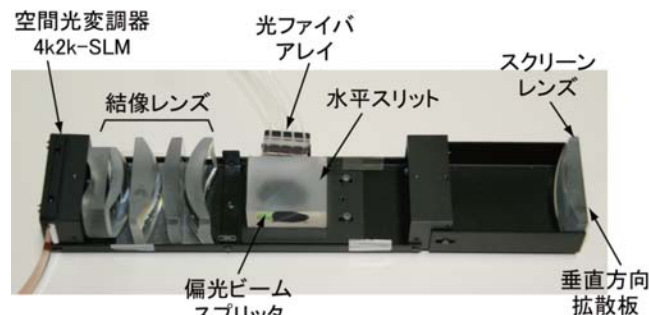


図 26 ホログラム表示モジュール：解像度変換技術を用いて、画面サイズ 2.0 インチで視域角 11° のホログラム表示を実現。必要な光学系が小型モジュール内にすべて収まっている。

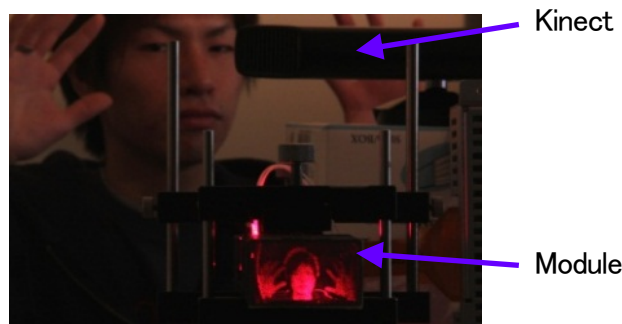


図 27 ホログラム表示モジュールの再生像の例：Kinect と組み合わせて、リアルタイムホログラム表示している。

14. まとめ

本稿では、裸眼立体表示技術として、メガネなし 2

眼式、多眼式、インテグラルイメージング、ホログラフィーについて表示原理、実際の表示システム、および、課題について述べた。それぞれの表示方法には長所と短所があり、それに応じたハードウェアの実現の難易度がある。表示デバイス技術の進歩に応じて、より難易度の高い表示方式の実用化が可能になるが、得られる立体像の品質・効果とシステムの難易度のバランスを考えたシステム開発が重要であると考え。また、立体像は人間に与える影響が大きいため、人間のもつ立体知覚に十分に配慮したシステム開発が大切であると考え。

現在は、家庭で用いる立体テレビとして、メガネなし立体ディスプレイが普及し始めた段階である。しかし、メガネなしの立体テレビに対する人々の期待は大きい。また、ホログラムテレビの実現は人類の長年の夢である。このような次世代の立体テレビの研究開発が、日本の国際競争力の強化、ディスプレイ産業の復権に繋がることを期待している。

参考文献

- 1) 大越孝敬：三次元画像工学，朝倉書店(1991年)
- 2) 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).
- 3) N. A. Dodgson, "Analysis of the viewing zone of the Cambridge autostereoscopic display," *Appl. Opt.* **35**, 1705-1710 (1996).
- 4) C. van Berkel and J. A. Clarke., "Characterization and optimization of 3D-LCD module design," *Proc. SPIE* **3012**, 179-186 (1997).
- 5) K. Mashitani, et al., "Step barrier system multiview glassless 3D display," *Proc. SPIE*, vol. 5291, 265-272 (2004).
- 6) Y. Takaki, "Multi-view 3-D display employing a flat-panel display with slanted pixel arrangement," *J. Soc. Inf. Display*, vol.18, no.7, 476-482 (2010).
- 7) J. Harrold, A. Jacobs, G. J. Woodgate, and D. Ezra: "Performance of a convertible, 2D and 3D parallax barrier autostereoscopic display," in *Proceedings of the Society for Information Display Twentieth International Display Research*

Conference, San Jose, Calif., pp.280-283 (2000)

- 8) J. Harrold, D. Wilke, G. J. Woodgate: "Switchable 2D/3D Display - Solid Phase Liquid Crystal Microlens Array," *Proc. IDW*, 11, pp.1495-1496 (2004)
- 9) 高木康博、「裸眼 3D ディスプレイ(講座 誰にでもわかる 3D 第 5 回)」，映像情報メディア学会誌，vol.65, no.5, p.654-659 (2011).
- 10) T. Balogh, et al., "A Large Scale Interactive Holographic Display," *IEEE VR2006 Conference*, Alexandria, Virginia, USA, p311.
- 11) 岩澤修一郎など、「プロジェクタアレイ方式裸眼立体ディスプレイの試作」，映像情報メディア学会技術報告，vol.34, no.10, p.29-32 (2010).
- 12) 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).
- 13) 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).
- 14) 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).
- 15) T. Honda, et al., "A display system for natural viewing of 3-D images," in *Three-dimensional television, video and display technologies*, B. Javidi, F. Okano ed. (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2002) p.461-487.
- 16) 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).
- 17) Y. Takaki, "Density Directional Display for Generating Natural Three-Dimensional Images," *Proc. IEEE*, vol.94, p.654-663 (2006).
- 18) H. Nakanuma, et al., "Natural 3D display with 128 directional images used for human-engineering evaluation," *Proc. SPIE*, vol. 5664, p.28-35 (2005).
- 19) Kikuta and Y. Takaki: "Development of SVGA resolution 128-directional display", *Proc. SPIE*, vol. 6490, p.U1-8 (2007).
- 20) 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)

- 21) Y. Takaki, "Thin-type natural three-dimensional display with 72 directional images," Proc. SPIE, vol. 5664, p.56-63 (2005).
- 22) Y. Takaki and T. Dairiki, "72-directional display having VGA resolution for high-appearance image generation," Proc. SPIE, vol. 6055, X-1-8 (2006).
- 23) 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).
- 24) Y. Takaki and N. Nago, "Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display," Opt. Express, vol. 18, no. 8, 8824-8825 (2010).
- 25) Y. Takaki, K. Tanaka, and J. Nakamura, "Super multi-view display with a lower resolution flat-panel display," Opt. Express, vol. 19, no. 5, 4129-4139 (2011).
- 26) 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).
- 27) Y. Takaki and H. Kikuta, "3D Images with Enhanced DOF Produced by 128-Directional Display," 13th International Display Workshops, p. 1909-1912 (2006).
- 28) J. Arai, F. Okano, M. Kawakita, M. Okui, Y. Haino, M. Yoshimura, M. Furuya, and M. Sato, "Integral Three-Dimensional Television Using a 33-Megapixel Imaging System," J. Disp. Technol., vol. 6, no. 10, 422-430 (2010).
- 29) M. Yamasaki, et al., "Full-parallax autostereoscopic display with scalable lateral resolution using overlaid multiple projection," J. Soc. Inf. Display, vol. 18, no. 7, 494-500 (2010).
- 30) 三科など、「超高精細液晶パネルを用いた電子ホログラフィーによる立体カラー映像再生」, HODIC (ホログラフィック・ディスプレイ研究会), vol. 30, no. 2, 12-17 (2010).
- 31) T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, R. Oi, and T. Kurihara, "Viewing-zone-angle-expanded color electronic holography system using ultra-high-definition liquid crystal displays with undesirable light elimination," J. Disp. Technol., vol. 7, no. 7, 382-390 (2011).
- 32) 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).
- 33) Y. Takaki and N. Okada: "Reduction of image blurring of horizontally scanning holographic display," Opt. Express, vol. 18, no. 11, 11327-11334 (2010).
- 34) 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).
- 35) Y. Takaki and Y. Tanemoto, "Modified resolution redistribution system for frameless hologram display module," Opt. Express, vol. 18, no. 10, 10294-10300 (2010).

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	プロジェクション	プロジェクション	プロジェクション	フラットパネル	フラットパネル	フラットパネル
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	