講座 誰にでも わかる 3D 第10回

応用5：眼鏡なし3D ディスプレイの 製品開発動向

(正会員) 小池 崇文†

1. ま え が き

2010年、眼鏡方式3D映画や家庭向けのフルHD解像度の3Dテレビが本格的に登場し、眼鏡方式の3D映像は珍しい状況となりつつある。さらに、携帯デバイスなどの特定分野では、2010年末から、3Dの本命技術である眼鏡なし3Dディスプレイの普及も始まりつつある。本連載の中で、すでに眼鏡なし3Dディスプレイの基本的な仕組みについては解説があるので、本稿では実際の製品に用いられている眼鏡なし3Dディスプレイ技術に焦点を当てて解説する。

本解説では、まず眼鏡なし3Dディスプレイ全般にわたる課題について述べる。続いて、製品化されている主な眼鏡なし3Dディスプレイについて解説し、最後に、先に述べた課題を解決する技術を解説する。

2. 眼鏡なし3Dディスプレイの課題

眼鏡なし3Dディスプレイを実装する上では、①表示できる情報量(画素数)の少なさ、②視域の狭さ、③画面の明るさ(暗さ)、④モアレの発生、⑤クロストークといった点に課題がある。それぞれの課題について簡単に説明する。

2.1 表示できる情報量の少なさ

2眼方式であれば、必要な情報量は高々元のディスプレイの2倍で済み、眼鏡方式とほぼ同じである。しかしながら、2眼方式は、後に述べるように視域が狭いため、元々視域が狭くてよい小型のディスプレイ用途以外では現実的な方式ではない。一方で、視域が広い多眼方式になると、視点数に比例して必要な情報量が増えていく。そこで液晶ディスプレイの画素数を増やすのだが、実際には液晶の駆動回路の問題もあり、液晶ディスプレイで表示可能な画素数は、その時の駆動回路技術で、ある程度決まってくる。将来的には、4K2K、

8K4Kとディスプレイの解像度は高くなっていくと予想されているが、3Dディスプレイとして利用した場合に、常に元の2Dディスプレイより解像度が低くなってしまうことを考えると、限られた情報を効率よく利用する技術が必要になる。この情報量に関する課題は、液晶ディスプレイを用いたものだけでなく、他方式のフラットパネルディスプレイを用いた場合にも共通している。

2.2 視域の狭さ

視域の狭さは、眼鏡方式3Dディスプレイでも課題の一つであるが、眼鏡なし3Dディスプレイでは、より大きな課題の一つである。なぜならば、人の両眼間の距離は、成人で60~65mm程度と一定であり、単純に考えて、2眼方式では、観察者の目の位置を60~65mm左右にずらすと逆の目で見ると見えてしまう課題がある。この左右逆の映像が見えてしまうことを逆視と言い、その領域を逆視領域と呼ぶ。後に述べるように、目を検出する技術を用いることで、逆視領域はある程度回避可能であるが、元々の視域がある程度広くないと有効な方法ではない。また、ディスプレイが大きくなってくると、視域の課題はより大きくなってくる。一般に、3Dディスプレイの視域は、ディスプレイ中心からの角度で表される。しかしながら、通常は大きなディスプレイほど離れて用いるため、大きくするほど、1視点あたりの視域を狭くする必要がある。つまり、1視点あたりの映像の角度分解能を上げる必要がある。例えば、視距離を400mm、眼間距離を65mmとする。この時、近距離では1視点あたり約9°の角度分解能で良かったものが、倍の視距離では1視点あたり約4.5°の分解能が必要となるという訳である。このことは、画面が大きいほど、必要な情報量が多くなり、かつ、製造が難しくなることを示している。

2.3 画面の明るさ

画面の明るさも眼鏡なし3Dディスプレイでは課題の一つである。大部分の液晶ディスプレイを用いた眼鏡なし3Dディスプレイでは、通常の2Dディスプレイの前か後にバリアなどの光学素子を挿入する実装を行う。バリアは、

† 株式会社日立製作所 横浜研究所

"3D That Everyone Understands (10): Development Trend in Autostereoscopic Display Products" by Takafumi Koike (Yokohama Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Yokohama)

光を部分的に遮蔽する光学素子であるので、これを挿入した場合には、元の2Dディスプレイ輝度よりも当然低くなる。レンズなどの場合でも、開口率や透過率などが原因で、一般に画面が暗くなってしまう課題がある。

2.4 モアレ

液晶パネルとレンチキュラなどを用いた眼鏡なし3Dディスプレイでは、さまざまなモアレが観察されてしまう課題がある。例えば、画面内の輝度や色ムラや、視点を移動した時の輝度ムラなどである。

モアレは、次の原因で発生する。液晶ディスプレイを用いる場合、まず、液晶ディスプレイが離散的な画素形状を持ち、その上にバリアやレンチキュラを置くが、これらも離散的な構造を持っている。したがって、実質、離散信号（液晶の画素）の（バリア等による）再サンプリングが起きており、これが原因となってさまざまなモアレが発生する。

モアレは、輝度ムラや視点移動の輝度変化、または、液晶パネルでは各画素が単色であることに起因する色ムラなどとして観察され、3D映像の大幅な画質低下を招いてしまう。

2.5 クロストーク

クロストークとは、信号の漏れのこと、3Dディスプレイにおけるクロストークとは、左目用の映像信号が右目用の映像に、右目用の映像信号が左目用の映像に漏れることと、その割合を意味する。それぞれの目に逆の視点の絵が混じって見えてしまうため、映像にも依存するが、ある程度以上のクロストークが存在すると、立体視しづらくなったり、立体視がまったくできなくなってしまう課題がある。

ただし、本稿で述べるクロストークは、2眼方式におけるものに限定する。多眼方式などでは、両眼間にも複数の視点が存在するため、クロストークの定義が難しくさまざまな議論が行われている。

以上で述べた課題のうち一部（視域や明るさなど）は、今までの2Dディスプレイ製品でも重要な課題であって、現在までにさまざまな技術改良が行われてきている。これらの課題は、もちろん3Dディスプレイでも重要な課題である。加えて、3Dディスプレイではモアレやクロストークなど、3Dならではの新たな課題も出てきており、3Dディスプレイにおける製品化技術とは、このような課題を解決することである。

3. 製品化されている眼鏡なし3Dディスプレイ方式

すでに連載を通して、眼鏡なし3Dディスプレイについてさまざまな方式が紹介されている¹⁾。

現在、製品化されている眼鏡なし3Dディスプレイで主に用いられている方式は、2眼方式や多眼方式と呼ばれている方式がほとんどである。主にレンチキュラやバリアと液晶ディスプレイなどのフラットパネルディスプレイと組

合せて実現している。一方で、インテグラルイメージングや体積走査方式も一部製品化されている。

この中で、体積走査方式は、本連載でもあまり取り上げられていないので、少し詳しく説明する。一般に機械的、電氣的に空間を走査し3D映像を表示する方式を、体積走査方式という。機械的に空間を走査する方式としては、例えば、旧Actuality Systems（現Optics for Hire）のPerspectaが製品として有名である。Perspectaは、球状の透明外枠の中で、円形スクリーンを機械的に回転させ、スクリーン位置に同期してプロジェクタから映像を投影し、3D映像を表示する方式である²⁾。ちょうど、水晶玉の中に3D映像が浮かんでいるような見え方をする。

電氣的に空間を走査する方式としては、DepthCubeがある³⁾。20枚の液晶スクリーンとDLPプロジェクタを用いている。ある時点ではそのうちの1枚のみを拡散状態にし、残りの19枚を透過状態にする。この時に、その奥行きでの断面映像を表示することで3D映像を表示する。

この電氣的に空間を走査する方式を最も単純化した方式として、DFD（Depth Fused 3D）がある。DFDは、当時NTT（現、徳島大学）の須山らが発見した原理に基づいている⁴⁾。具体的には、図1のように、2枚のスクリーンや液晶ディスプレイを用いる。手前のディスプレイを半透明（透過型）にし、前面と後面のディスプレイの両者がユーザから見られるように設置する。ディスプレイに出る映像を図1のようにすることにより、2枚のディスプレイ間に立体映像を表示することが可能になる。実際に、2枚の小型液晶ディスプレイを用いたDFDは製品化されている⁵⁾。液晶を2枚用いているため、明るさの対策やモアレ対策を行っている。

4. 眼鏡なし3Dディスプレイの技術開発動向

本章では、2章で挙げた五つの課題に対して、それぞれ、どのような技術を用いて解決しているかを解説する。なお、モアレとクロストークはそれぞれ密接に関連しているため、まとめて解説する。

4.1 限られた情報を有効利用するための技術

4.1.1 斜めレンチキュラを用いた画素有効利用

2D用途のパネルは、解像度は徐々に上がりつつあるが、それでも3D利用の観点からは解像度がまだ不足、限られていると言える。そのため、限られた情報を有効利用する技術が必要である。液晶パネルは、縦長の画素構造を持つため、左右方向に視差を持つようにレンチキュラ等を縦方向に並べると、3Dの画素が縦長形状になってしまい、画素密度のバランスが悪くなってしまう。そこで、斜めにレンチキュラを載せて、多眼方式の3Dディスプレイを実現する方法が提案されている⁶⁾。すでに連載第7回目¹⁾で解説されているが、具体的には、レンチキュラと画素が

図1 DFD (Depth Fused 3D) 方式

$$\arctan(1/6)=9.46^{\circ}$$

の角度をなすようにする。液晶パネルの画素は通常、縦横比が3:1であり、横1画素に対して縦2画素で斜めにすることによって、9視点の多眼方式が実現可能である。

通常の液晶パネルは、画素形状が縦長であり、かつ、赤、青、緑と3色が別の画素として構成されている。したがって、このようにレンチキュラとディスプレイのなす角度が一意に決定される。

本来であれば、眼鏡なし3Dディスプレイ専用の液晶パネルを新規に開発するのが良いが、液晶パネルを新規に開発するコストは非常に高いため、現実的ではない。そこで、本方式のような、既存の液晶パネルを用いて、効率よく眼鏡なし3Dディスプレイを実現する技術が開発され、製品化されている。

4.1.2 時分割バックライトを用いた情報量の増加技術

時分割で情報量を増やす方法として、バリアやレンチキュラの代わりに、プリズムとレンチキュラを組合せた形状の光学フィルムと時分割制御可能なバックライトを組合せた2眼方式の眼鏡なし3D方式が提案されている⁷⁾⁸⁾。この方式は、図2のような構造を持つバックライトを交互に点灯させることによって、時分割で光の方向を制御し、左右の目には異なる光を変更する方式である。この方式は、一般にはスキャンバックライト方式と呼ばれている。原理的には、液晶パネル自体に手を入れる必要がないため、生産コスト面で有利である。しかしながら、クロストークが多くなりやすく、現在もさまざまな改良が続いている。

4.1.3 部分的な3D表示を可能にする技術

先に述べたように、2眼方式の3Dディスプレイでは、元の2Dディスプレイに比べて、1視点に表示できる情報が半分に減ってしまうので、一般に、3D映像は、2D映像に比べて解像度が低くなってしまう。一方で、映画などの一部のコンテンツを除いて、すべての状況、画面内のすべての領域内で3D映像が必要とはいえない。例えばPCでは、画面上の一部のウィンドウ内に表示される3Dモデルデータの表示のみが3D映像で、残りの文字情報などを表示するウィンドウでは、高画質な2D映像の方が適している場合もある。また、レンチキュラの角度や画素配置によっては、

図2 スキャンバックライト方式の原理

エイリアシングの影響で文字が読みにくくなるという課題もある。そのため、パソコンの画面などでの利用を考えた場合に、画面全体が3D映像になるのではなく、部分的に3D映像になる方が良い。

このような部分3D切替え技術は、実際にノートPCに搭載されて、製品が発売されている⁹⁾。現在の液晶バリアでは、画面全体でバリアを切替える物が一般的であるが、まさに液晶ディスプレイそのものと同じように、部分的にバリアを制御する液晶バリアを用いることによって、実現している。必要ない部分の情報量を落とさない技術と言える。

4.2 視域を広げる技術

4.2.1 視点追従

前述のように、2眼式や視点数の少ない多眼方式は視域が狭い。視域を広くするには、視点数を増やすのが王道であるが、先の情報量の観点からも簡単ではない。しかしながら現在は、携帯電話だけでなくノートPCや携帯用ゲーム機にもカメラが内蔵されているため、このカメラを利用することができる。具体的には、カメラを用いて、ユーザの顔や目の位置を検出し、視点追従を行う。一般に、2眼方式では、主ローブと呼ばれる正面の視域の他に、途中逆視の領域を挟んで、副ローブと呼ばれる3Dが閲覧可能な領域が存在する。また、逆視の領域では左右の映像を入れ替えてやれば立体視が可能となる。ただし、一般に、副ローブでは画質が低下するため、副ローブでも画質が落ちにくく、副ローブの数をできる限り増やす設計を行う必要がある¹⁰⁾¹¹⁾。

なお、最近では、2Dディスプレイ上で、視点の移動に対して運動視差が表現可能な単眼3D映像技術が実装されている。実際に、iPhoneでi3DやHoloToyといったアプリが登場している^{11)~13)}。デバイスに内蔵されているカメラでユーザの視点位置を検出し、視点位置に応じた映像をレンダリングすることで運動視差を実現している。通常の2Dディスプレイの上で実装されているため、両眼立体視はできないが、運動視差が実現できているため、単眼

3D映像技術も一種の眼鏡なし3Dディスプレイと考えられる。カメラ付きのデバイスは急速に普及しているため、今後、こうした単眼3D映像技術は普及が進むと予想されるし、2眼方式や多眼方式と組合せて運動視差を実現したり、視域を広げたりすることも増えてくるだろう。

4.3 画面を明るくする技術

4.3.1 バリアとレンチキュラの違い

バリアとレンチキュラは、3Dディスプレイの構成要素として考えた場合、光学系としては、ほぼ同じであると言える。カメラにおけるピンホールとレンズと同様の関係であると考ええると良い。しかしながら、実装面では、両者は開口率が大きく異なるため、画面の明るさの観点で大きく違いがある。レンチキュラがほぼ100%の開口率を容易に達成可能なのに対して、バリアは、50%程度以下になってしまう。したがって、バリアでは、縦方向に黒い隙間が入った見え方をすることが多い。しかしながら、バリア方式は液晶などで簡単に電氣的に物が作れるので、液晶バリアを用いて、2D/3D切替えできる物が多い。さらに、クロストークに関しては、バリアの方が調整しやすいのに対して、レンチキュラでは調整が難しい。

4.3.2 光学素子の削減

通常の液晶パネルでは、液晶部の前後に偏光板を2枚用いている。DFD方式や、液晶バリア方式では、複数枚用いる偏光板を減らすことによって明るさを稼いでいる。1枚あたりの偏光板で明るさが半分に落ちてしまうため、1枚でも減らす意義は大きい。

4.4 モアレやクロストークを削減する技術

4.4.1 モアレとクロストークについて

眼鏡なし3Dディスプレイにおいて、クロストークとモアレ対策は、製品化技術の中心であるとも言える。モアレは、ある視点での面内の輝度ムラや、視点移動時の輝度変化として現れる。

モアレとクロストークは互いに深く関係しており、さらにさまざまなパラメータとトレードオフの関係にある。例えば、バリア方式では開口を狭くすればクロストークは減るが、画面も暗くなる。レンチキュラをデフォーカスして貼り合わせれば、モアレを減らすことが可能であるが、クロストークが増えてしまう。

一般にモアレを削減するには、サンプリングピッチを調整するか、拡散板を間に挟んだりする。レンズを用いている場合には、デフォーカスやバックライト等の変更でもモアレを削減可能である。サンプリングピッチを調整するには、画素形状を変更する。

クロストークを削減するには、画素の間隔を広げるなどの方法がある。

なお、先にも述べたが、2眼方式以外のクロストークを議論するには注意が必要である。なぜならば、2眼方式における二つの視点間隔は設計視距離で60～65mmである

図3 2眼方式ディスプレイの画素配置例

のに対して、多眼方式などではこの限りでなく、通常より視点間はより狭い。場合によっては、超多眼のような視点間距離が数mm程度の方式も存在する。したがって、隣り合う視点でのクロストークは、両眼立体視の観点からは意味がない。クロストークとモアレはトレードオフの関係にあるため、逆にクロストークが多い方がモアレが減って良いという考え方もある。これは、2眼方式が、両眼視差を成り立たせることだけに主眼を置いていたのに対して、多眼方式では運動視差も重要になり、滑らかに映像が切替わることも必要とされているためである。

4.4.2 2眼方式のモアレやクロストーク削減方法

ここで、具体的にニンテンドー3DSのパネルを例にとり、具体的に説明する¹⁴⁾。図3に2眼方式の3Dパネルの画素配置例を示す。まず、横方向に同色の画素を並べることで色モアレを防いでいる。視差のある方向に異なる色の画素が並ぶと、面内の異なる場所や、視点移動時にレンズによってサンプリングされる画素が変わるため、色モアレが発生してしまう。さらに、左右方向の画素間隔を広げることで、クロストークを削減している。ただし、開口が狭くなるため明るさとのトレードオフがある。2眼方式の場合は、視域が狭く、実際には視点がそれほど移動しないので、視点移動による輝度モアレはほとんど気にしなくて良い。さらに、上下の画素をなるべく近づけることで、明るさの低下を減少させている。上下方向はモアレの影響が出ないため、このような配置が行える。

4.4.3 1次元インテグラルイメージングのモアレ削減方法

先に述べた斜めレンチキュラは、画素を有効利用する技術であるが、サンプリングの位置をずらしているため、モアレを削減する技術でもある。バリアやレンチキュラを画素に対して斜めにするのではなく、画素自体を斜めにすることで同様の効果が得られる。

1次元インテグラルイメージングは、横方向のみ視差を持つ眼鏡なし3Dディスプレイとして提案されているが¹⁵⁾、図4のように画素形状を斜めにし、サンプリングを少しず

図4 1次元インテグラルイメージングの画素配置例

らすことでモアレを削減する方式で実用化されている¹⁶⁾。図4では、1レンズあたり9方向に光線を再生する場合を示しており、横方向に同一色の画素を並べることで視点移動時の色モアレを防いでいる。

5. 今後の動向・課題

まず、画面の明るさに関してだが、現在は、液晶バリアやレンチキュラが主流であるが、液晶バリアを用いると、暗くなってしまう問題がある。また、レンチキュラを用いると明るくはなるが、2Dモードと3Dモードの切替えができなくなってしまう問題がある。そこで、ここ最近では、液晶レンズの研究開発が盛んになっている。今年のSID '11 (Society for Information Display 2011)でも、3Dディスプレイのための液晶レンズのセッションが設けられており、現在ホットな技術開発テーマの一つである。液晶レンズを実装する上では、いろいろな液晶モードが考えられるし、また、そもそもこうした動的な光学系として、液晶を用いるのが最適かは、まだわからない部分も多いが、扱う情報量を増やしていくという観点からは、ただのバリアやレンチキュラではなく、液晶レンズのようなアクティブな光学系を用いた3Dディスプレイが、今後の主流になると予想できる。

視点数を増加させることは、視域を広げるだけでなく、なめらかな運動視差を実現することにも効果がある。

情報量の少なさは、年々解決しているが、抜本的に解決する方法として、例えば、マルチプロジェクション方式が挙げられる¹⁷⁾。プロセッサの演算ユニットを並列化して増やすように、プロジェクタも並列化して台数を増やすアーキテクチャを採用することで、情報量を大幅に増やすことが可能となる。プロジェクタは明るさや画面大きさに対して、効率が良いデバイスであるので、フラットパネルベ-

スのものだけでなく、プロジェクタベースの3D技術も今後大きく進化していくであろう。

2眼方式におけるクロストークなどの数値比較が行いやすい課題については、各パネルメーカーによる急速な改良が続いており、非常に近い将来に大きく改善されるであろう。

6. お す び

本稿では、すでに製品化されている眼鏡なし3Dディスプレイの課題と、その課題を解決するための技術について整理して解説した。それぞれの課題に対してさまざまな解決技術が開発されており、こうした技術が製品化に大きく貢献していることが理解できたと思う。(2011年7月26日受付)

〔文 献〕

- 1) 高木：“講座：多眼式・超多眼式3D技術”，映情学誌，65，7，pp.933-939 (2011)
- 2) G.E. Favalora et al.: "100 Million-voxel volumetric display", Proc. SPIE 4712, 300 (2002)
- 3) Alan Sullivan: "A Solid-state Multi-planar Volumetric Display", SID'03 Digest, 58.3 (2003)
- 4) S. Suyama et al.: "A Direct-Vision 3-D Display Using a New Depth-fusing Perceptual Phenomenon in 2-D Displays with Different Depths", IEICE Trans. On Elec., E85-C, 11, pp.1911- 1915 (2002)
- 5) 日立ディスプレイズ：“目にやさしい，人にやさしい3D液晶”，技術情報，http://www.hitachi-displays.com/technology/2038132_17271.html
- 6) C. Berkel et al.: "Characterisation and Optimisation of 3D-LCD Module Design", Proc. SPIE, 3012, pp.179 - 186 (1997)
- 7) A. Yuuki et al.: "A New Field Sequential Stereoscopic LCDs by use of Dual-Directional-Backlight", IMID '04 Digest, 14.5 (2004)
- 8) J.C. Schultz et al.: "Full Resolution Autostereoscopic 3D Display for Mobile Applications", SID '09 Digest, 11.5L (2009)
- 9) 東芝：“世界初，画面上で3Dと2Dのコンテンツを同時にウィンドウ表示できるガラスレス3DノートPC「dynabook Qosmio T851/D8CR」の発売について”，プレスリリース (2011)，http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_04/pr_j2005.htm
- 10) R. de la Barré: "Adapting of Electronic Image Content for Autostereoscopic Presentation", 3D@Home white paper (2010)
- 11) i3D, <http://iihm.imag.fr/en/demo/hcpmobile/>
- 12) J. Francone et al.: "Using the User's Point of View for Interaction on Mobile Devices", in Proc. of ACM IHM'11 (2011)
- 13) HoloToy, <http://kode80.com/iphone/holotoy/>
- 14) “「ニンテンドー3DS」を分解”，日経エレクトロニクス2011年3月21日号，pp.81-86 (2011)
- 15) Y. Hirayama et al.: "Flatbed-Type 3-D Display Systems Using Integral Imaging Method", Proc. SPIE, 6392, 639209 (2006)
- 16) 東芝：“世界初，専用メガネなしで3D映像を視聴できる液晶テレビ「ガラスレス3Dレグザ（REGZA）GL1シリーズ」の発売について”，プレスリリース (2010)，http://www.toshiba.co.jp/about/press/2010_10/pr_j0402.htm
- 17) H. Sakai et al.: "Autostereoscopic Display Based on Enhanced Integral Photography Using Overlaid Multiple Projectors", SID'09, 41.2 (2009)

小池 崇文 1995年，東京工業大学理学部卒業。1997年，東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年，(株)日立製作所入社。2009年，東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。現在，日立製作所横浜研究所主任研究員。コンピュータグラフィックス，バーチャルリアリティ，立体映像の研究開発に従事。博士(情報理工学)，正会員。