

講座
全12回

誰にでもわかる3D

開講にあたって

(編集幹事) 大井隆太郎

3D技術は、ここ1~2年の映像メディアを取り巻くトレンドの中心となっている。その理由として、国内外の大手家電メーカー各社が3Dテレビを市場に投入したこと、米国ハリウッドにおいて制作された3D映画が興行面で大きな成功を取めたことなどが挙げられる。

一方で、立体映像技術を実用化(商用化)しようという試みは、過去に幾度か繰り返されては消えていった歴史がある。しかし今回のブームでは過去とは状況が異なり、その主な理由がかなり解消されつつある。すなわち、過去に極端な飛び出し画像を用いたコンテンツが一部に存在したというソフト面の問題の解消と、アナログ技術の時代には複数画像の同期や分離が完全でないケースが存在したというハード面の問題の解消である。

では逆に、『人間が物を立体的に見るのは眼が二つ付いているからであり、眼鏡をかける立体テレビさえあれば、自然界の3D情報がすべて伝達できるのか?』とい

うと、話はそう単純でもない。3Dの基本となる原理には、19世紀末から20世紀前半にかけて、写真技術として発見・提案されたものが数多く併存しており、実は奥が深い。

本講座では、映像技術にとって、この古くて新しいテーマである3D技術の各論を全12回にわたって取り上げる予定である。特に、教科書的な内容から現実のサービスに近いレベルまでを幅広く取り扱うため、基礎的な内容を奇数月に、製品の技術など応用的な内容を偶数月に扱う。

本講座が、3Dが専門でない読者諸氏にとっても、表面的なものに留まらない3D技術をより深く理解していただくための一助となれば幸いである。

本講座は、佐藤宏介、近藤敏志、高木康博、山田邦男、横井健司各編集幹事と私 大井が担当しました。

- | | | | |
|-------------------------------------|----------------|---------------------------|-----------|
| 《1》 基礎1：空間立体視の手がかりとは? ~2D映像から3D映像へ~ | 畑田豊彦(東京眼鏡専門学校) | 《7》 基礎4：多眼式・超多眼式3D技術 | 高木康博(農工大) |
| 《2》 応用1：3DTV ~フレームシーケンシャル方式~ | 末次圭介(パナソニック) | 《8》 応用4：3Dカメラ(2眼) | 未定 |
| 《3》 基礎2：3D映像における疲労を避けるには | 水科晴樹(ATR) | 《9》 基礎5：インテグラル式立体映像 | 未定 |
| 《4》 応用2：偏光方式3Dディスプレイ | 大田原一成(日本ビクター) | 《10》 応用5：眼鏡なし3Dディスプレイ製品 | 洗井 淳(NHK) |
| 《5》 基礎3：裸眼3Dディスプレイ | 高木康博(農工大) | 《11》 基礎6：ホログラフィ技術 | 小池崇文(日立) |
| 《6》 応用3：ブルーレイ3D™規格 | 矢羽田 洋(パナソニック) | 《12》 応用6：未来の3Dとインタラクション技術 | 吉川 浩(日大) |
| | | | 未定 |

基礎1：空間立体視の手がかりとは？

～2D映像から3D映像へ～

(正会員) 畑田豊彦†

1. ま え が き

平面に映し出される2D映像技術は、「…を見たい」という要望に応じて、その表示性能を向上させてきた。静止画から動画(映像)へと時間変化を再現し、濃淡から色彩がある映像、より実物感のある高精細映像、さらに、臨場感溢れる大画面映像へと展開してきている。その時々、見たい要望に関わる視機能(視力や明暗・色弁別など)を満足させることで、新しい魅力を提供してきた。しかし、高画質で臨場感のある2D映像が実現されても、奥行き方向の空間、特に表示面から飛び出す空間を再現することは難しく、両眼情報を提示する3D映像技術*¹を利用しようとする動きが出てきた。

このような3D映像は、大画面表示を実現する以前から、幾度となくチャレンジされてきた。しかし、初期のものは極端に飛び出すビックリ効果を強調した映像が多く、2D映像から3D映像への向上による魅力を定着できなかった。それに加えて、両眼視差による2眼式3D映像では、実空間を見ている状態と比べて、特定方向からの空間しか見えないことによる不自然さ、視機能のうち調節・輻輳間のアンバランスや再現立体効果の不安定さによる視覚への負荷が問題視されていた。そのため、長時間制約の少ない状態で見たい映画、テレビではしばらく忘れられた技術であった。

ところが、映像技術の急速な進歩により、人間の空間立体視に関わる映像情報を無理なく提示できるようになり、理想的な空間再現への各種方式(図1)も示されて、より自然な3D映像を提供するための再スタートがきられたのが

*1 3D映像：両眼視差による立体映像と、調節・多方向観察などの立体視要因も再現できる3次元映像は区別してきたが、この度の2眼式立体映像ブームでは、3D映像という総称的な表現が用いられている。厳密な空間再現状態を定義している訳ではないので、今後、新方式の実用化が進むと、形容詞付きの3D映像が出現することになる。

† 東京眼鏡専門学校

"3D That Everyone Understands (1): Cues of Stereoscopic Vision and Space Perception?; from 2D-image to 3D-display" by Toyohiko Hatada (Tokyo Optometric College, Tokyo)

現状である^{1)~3)}。

本講座では、図1に示した各種方式の特徴に関して詳説されることになるが、初回では、2D映像から3D映像への拡張による空間再現効果と人間の空間立体視の機能との関係を示し、自然な3D映像表示技術と魅力ある映像表現内容を導き出す要求条件を整理してみる。

2. 生活行動から生まれる空間立体視

多くの動物は、視覚・聴覚・触覚などの感覚系から得た複合情報で、外界の状況を判断して生活している。高度な生活行動を行う動物では、視覚情報は重要で、ほとんどが両眼を備えている。その両眼による空間立体視は、左右眼の位置(瞳孔間距離)、両眼にできる微妙な物体像の違い(網膜像差)、両眼で同時に見える範囲(両眼共通視野)と眼の動き(注視運動と輻輳・開散運動)が主な機能である。しかし、空間立体視は両眼視だけに留まらず、身体の動き(観察位置移動)、手などによる操作動作と関連して発達するのが通常である。

さて、このうち両眼位置と視野について、ウサギとネコを例に比べてみると、図2のように、生活行動により空間情報の利用状況が大きく異なっていることがわかる⁴⁾。ウサギのように、生活行動が守備型の(草食)動物は見える範囲をパノラマ的に拡げて外敵から身を守っている。ネコのように、動の対象を獲得する積極的な動作を伴う攻撃型の(肉食)動物では、両眼立体視が効果的に利用できるように、両眼共通視野が広くなり、対象を注視する両眼運動や注視点前後の奥行き検出機構(注視位置の決定や両眼視差成分を検出する両眼性細胞)も形成される。

人間の場合は、さらに高度な手作業を行うために、手足などの行動器を巧妙に作動させる大脳(認識系)と小脳(運動系)による中枢制御機構も大型・高性能化しているが、生活行動は緩やかな動きで、手の届く近距離から歩行移動の範囲を中心に空間立体視が機能している。ただ、強い好奇心と素晴らしい創造力を持つ人間は、スピードのあるスポーツを楽しみ、鳥のように高速で地上から脱出できる乗

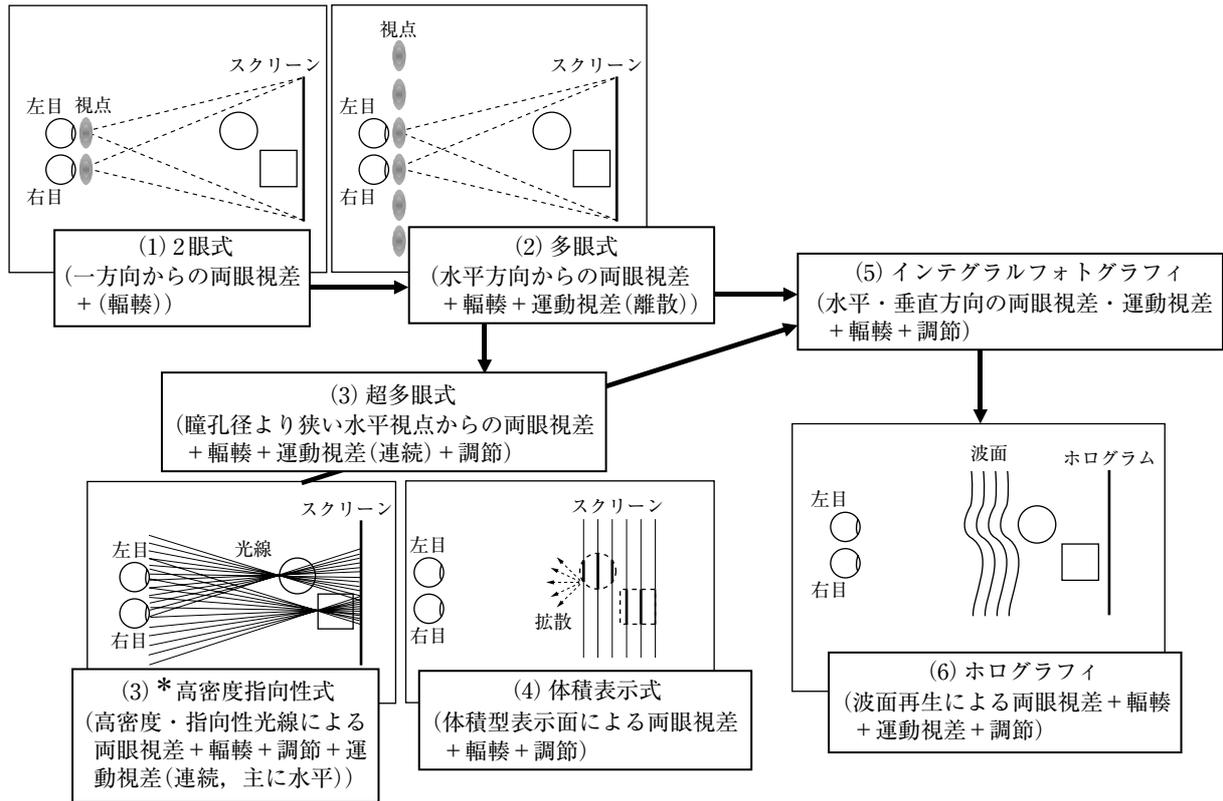


図1 空間立体視要因から見た3D映像の各種表示方式

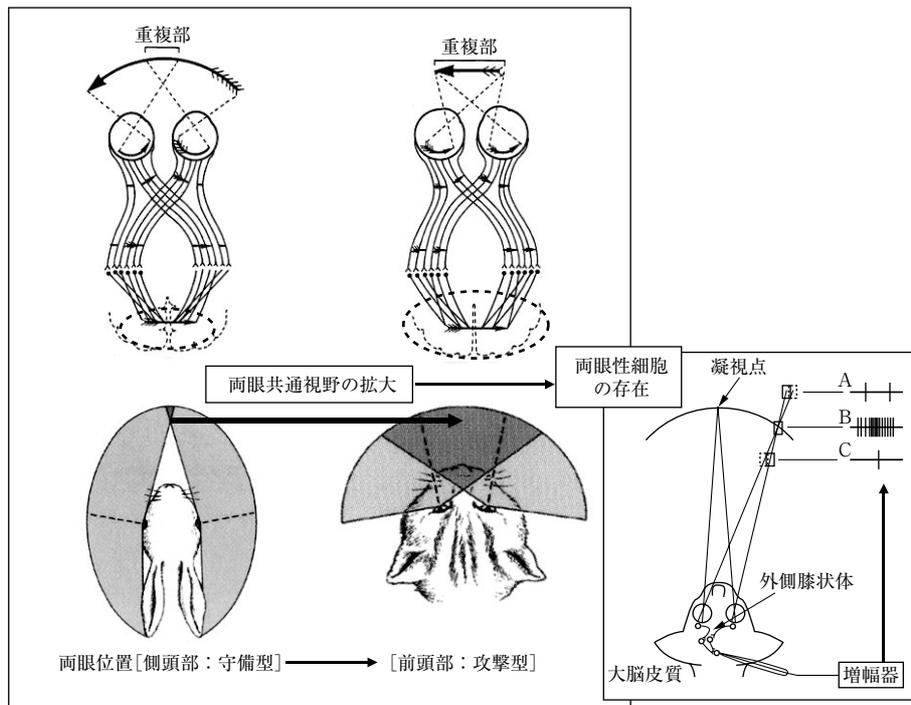


図2 両眼立体視と生活行動

両眼立体視は、両眼位置+中枢構造+生活行動(守備・攻撃型)によって変化し、両眼共通視野が広い動物では、両眼からの情報を処理する両眼性細胞(図右側)も多くなり、注視動作(眼球運動)・注視点前後分別・視差量検出を分担処理し、精度良い空間知覚を実現している。

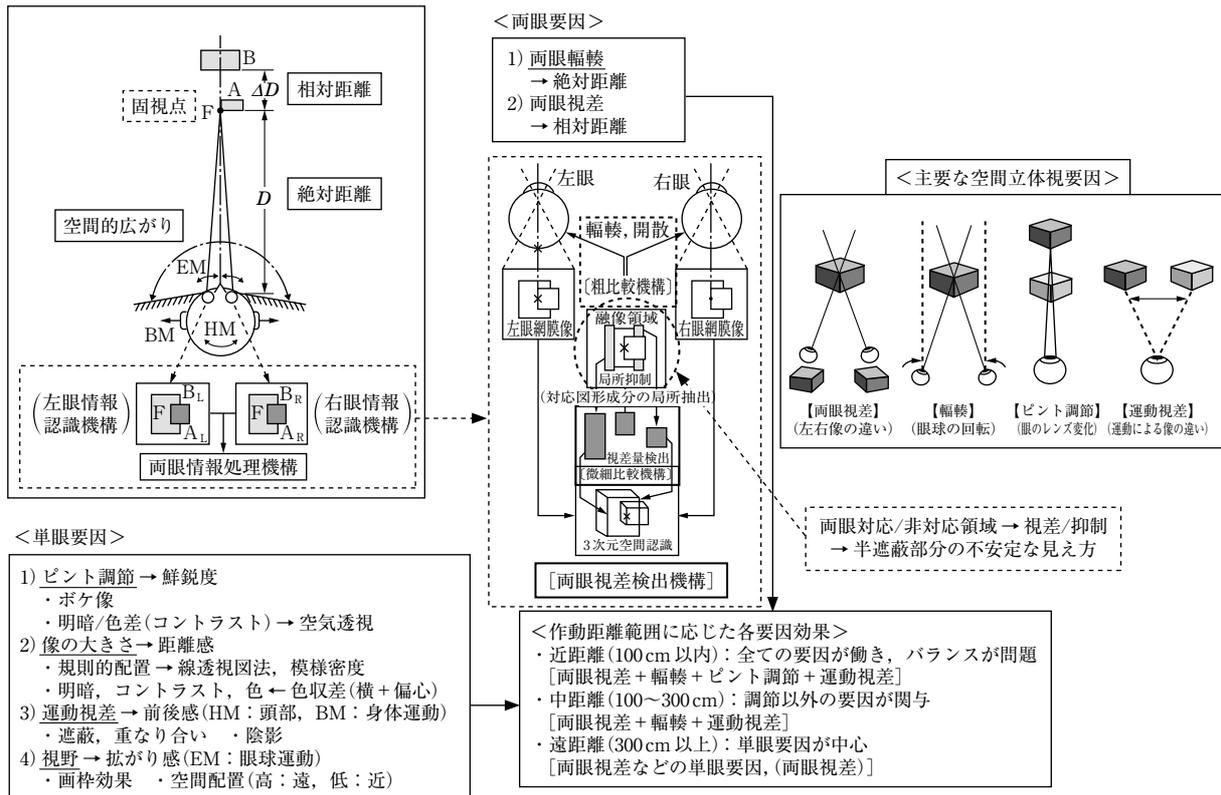


図3 人間の空間知覚機構と空間立体視要因

空間知覚に関わる単眼・両眼要因，両眼に生じる視差情報の検出処理機構モデルと視差発生部近傍での情報処理，主要な空間立体視要因とその作用距離範囲を示す。

り物を作り出して、生活行動範囲を拡張してきた。これら早い動きや遠い距離の対象にも、訓練によって、視機能が対応できるようになることが知られている。

このような訓練や慣れによって、新しい空間立体視を形成して行く過程は、これまでの2D映像を楽しんでいた状態から、映像空間に入り込んだ印象を受ける大画面映像や、飛び出し効果のある3D映像空間を見るようになる過程とも関係してくる。

例えば、2D映像では対応できていた高速移動の映像表現が、3D映像では奥行き方向の動きに対する慣れが成立せず、違和感や不自然な印象を引き起こすことになる。自然で見易い3D映像を作り出すためには、映像を観察する構えが受動的か能動的か、安定して見える奥行き空間の歪み許容条件、動刺激に適応できる時間特性などを考慮して、人間の空間立体視に含まれる単眼・両眼要因の作用範囲、要因間の優位性や相互作用などを調べておくことが重要である。

3. 人間の空間立体視における各種要因

人間の空間立体視に寄与する要因(図3)には、片眼だけの視覚情報でも空間状態を知覚できる単眼要因と、両眼からの情報を必要とする両眼要因に分類される。ただ、ここでは、視覚情報の入口である眼球から空間知覚が成立する

中枢レベルまでの情報伝達路の概略を示し、高次中枢における空間情報処理機構(網膜から中枢視覚野への情報投射後に、特定情報の抽出処理、他感覚情報との統合、行動系への指令処理など)^{5), 6)}に関しては省略してある。

3.1 単眼による空間知覚要因

単眼要因には、次のような要因がある。映画やテレビなどの2D映像では、これらの要因を巧みに組合せて、奥行き感のあるシーンを作り出している。

- (1) 明るさ、大きさ・パターン(特徴点)密度→線透視
- (2) コントラスト・ボケ(調節変化)→鮮鋭度→空気透視
- (3) 色→見掛けの大きさ、収差による見掛けの視差
- (4) 重なり合い→遮蔽による前後判別→半遮蔽部分発生
- (5) 陰影→照明光源位置の習慣性
- (6) 画面構成(視野)→空間の異方性(上下位置と遠近感)
- (7) 動き→運動視差(時系列視差, 対象の動きと観察位置移動)→移動状態の2D映像から視差成分を抽出して3D映像が作成できる条件

これらの要因のうち、調節、視野と注視動作、観察位置移動に伴う像変化(運動視差)には生体機能が関与するが、他の要因は視機能が発達する過程での体験などから形成されるため、各要因間の優位性は再現空間距離によって変わる。調節を除く単眼要因は、100m以上の遠距離範囲でも

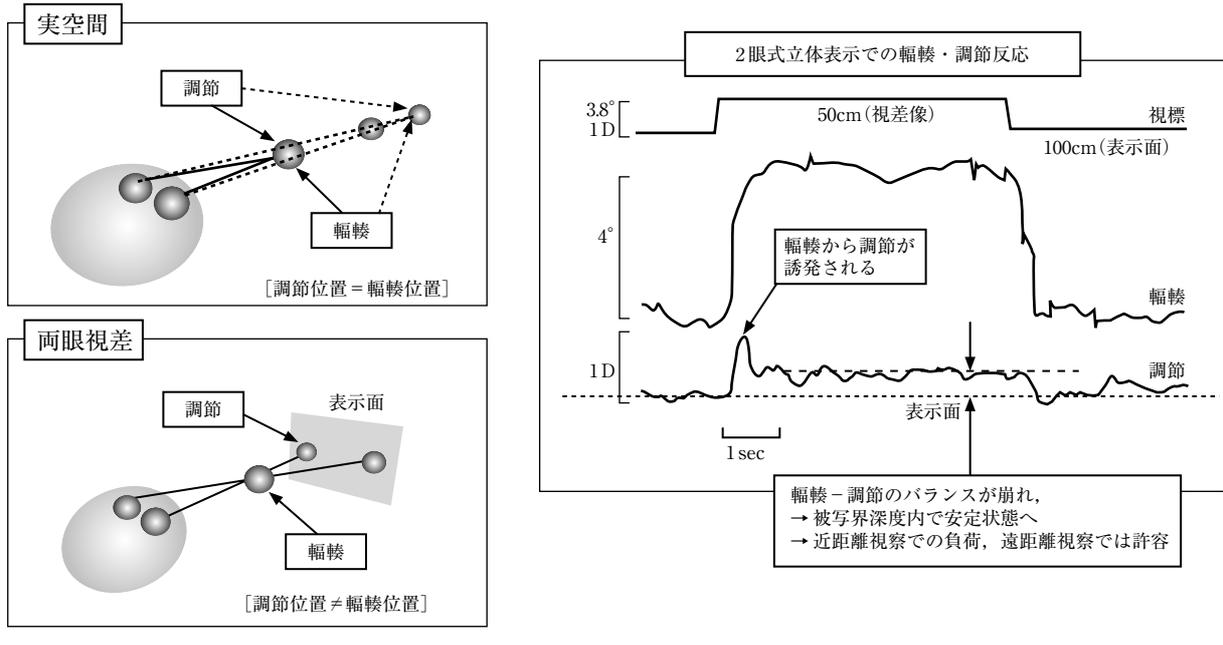


図4 2眼式立体表示観察時での輻輳-調節応答

視差に応じて輻輳が発生し、調節も誘発される。時間経過により、調節位置は表示面の被写界深度内に戻すが、実空間観察時の輻輳-調節反応より、不安定な状態が続く。

効果的に働くが、単眼による近距離の立体感は、両眼視の再現空間と比べると、1/10程度しか得ることができない。

3.2 両眼による空間知覚要因

両眼立体視の要因は、前後配置された物体を注視する際に見られる眼球運動成分(輻輳/開散)と、両眼の網膜上にできる像の差成分(視差)で、このうち、左右眼から見る方向の差(parallax)と左右眼の網膜像の差(disparity)は、共に(両眼)視差として表現される場合が多い。両眼要因は単眼要因に比べ、数10m以内の中距離範囲で効果的に働き、前後差弁別も優れている。

(1) 輻輳/開散

両眼で物を注視する際、左右眼が連動して、内向き(輻輳)・外向き(開散)に動く状態から、対象までの絶対距離を知る要因となる。単眼要因の(2)を引き起こすピント調節と関係し、近くを見る時の輻輳によって調節を誘起する作用は強く、遠くを見る場合には少なくなる。一般に、調節と輻輳の相互作用は輻輳が優位で、反応も輻輳の方が調節よりも先行して生じる。実空間では、両機能は同じ距離を見るように作動するが、2眼式3D映像では、視差によって、輻輳と同時に、調節も誘発されて表示面から離れた位置にピント調節する。ただ、しばらくすると、網膜像のぼけが気にならない領域(被写界深度内)に調節が戻る様子⁷⁾(図4)が計測されており、輻輳-調節の不安定な状態が続くと、眼への負荷を生じさせることになる⁸⁾。

近見時の輻輳-調節の作動状態から20cm以内の近距離では眼への負荷が大きくなる。一方、遠見時には両眼間距離(日本人の平均は63mm、分布範囲は50~70mm)よ

りも大きな視差量を提示すると、開散運動では両眼情報が融合できない状態になる。大画面での2眼式3D映像観察時や両眼間距離が狭い幼児や女性では注意する必要がある。

(2) 両眼視差

左右眼の網膜にできる像のズレ(網膜像差)が物体相互の前後間距離を知る情報になる。この網膜像のズレを検出する場合、安定して知覚できる範囲が存在する(図5)。微妙な前後差を検出する立体視力は最小視差検出能力を示し、2D映像の適正観視距離を決める視力(1分視角)よりも、約1/50の高精度で両眼網膜像のズレを検出している。前後に離れた物体を同時に安定して見えるためには、両眼情報を融合して単一の像として見える両眼融像領域がある。網膜中心部では1°以下と狭く、周辺部になると数度に拡がり、脳でも、網膜からの像情報が投射される視覚野(V1)では±1度程度の範囲であるが、行動中枢系へ伝達する連合野(MT)では5°に拡がり、広い実空間での安定した空間立体視が確保できる機構⁹⁾になっている。この融像領域は、静止刺激より急激に変化する刺激では1/3~1/8に狭くなることから、3D映像では動きの早い奥行き変動は、2Dの場合よりも緩やかに変化させることが要求される。

この両眼視差に関連して、実空間を両眼で見る時、前方の物体で後方の物体を遮蔽(単眼要因の(4))する部分には、左右片眼だけから見える半遮蔽部分(図6(a))が発生する。また、物体間の視差の勾配が急になると、不安定な見え(図6(b))が生じる。このように、両眼視差発生部分近傍の非対応部分では、不安定な見え方^{10)~12)}が生じる筈であるが、実際には余り目立つことはなく、これは部分的な

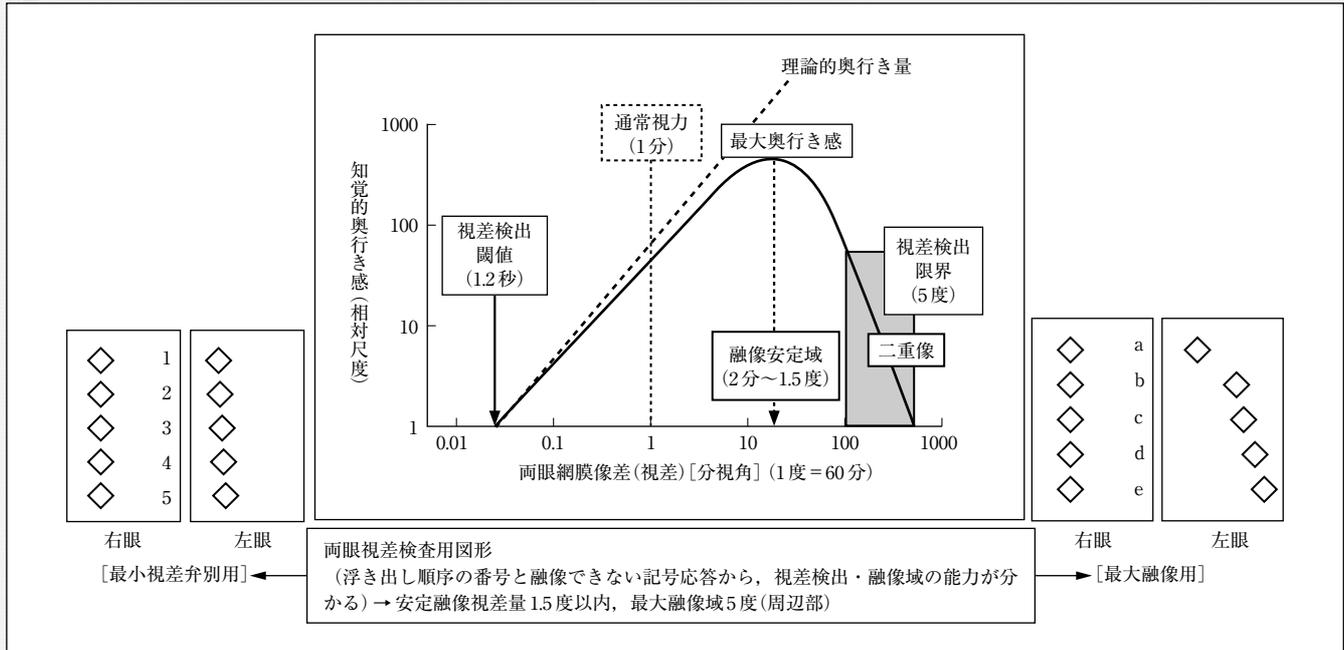


図5 両眼網膜像差（視差）の検出・融像域と検査図形

両眼立体視が成立する条件として、微妙な視差検出（立体視力）と、単一立体像として融像できる視差量（融像域）を調べる必要がある。検査図形例を示すが、実際には複数図形内から浮き沈みを判別させ、その視差量から立体視機能を調べる。

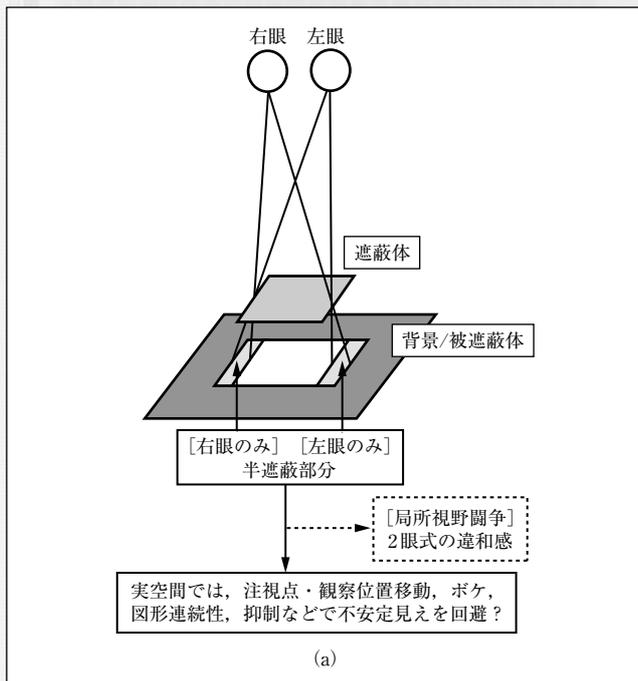


図6(a) 半遮蔽部分の見え

背景の半遮蔽部分に、周囲と異なった強い刺激があると、不安定に見える。実空間では、微妙な視点移動、前後位置によるボケや抑制などで目立たなくしている。

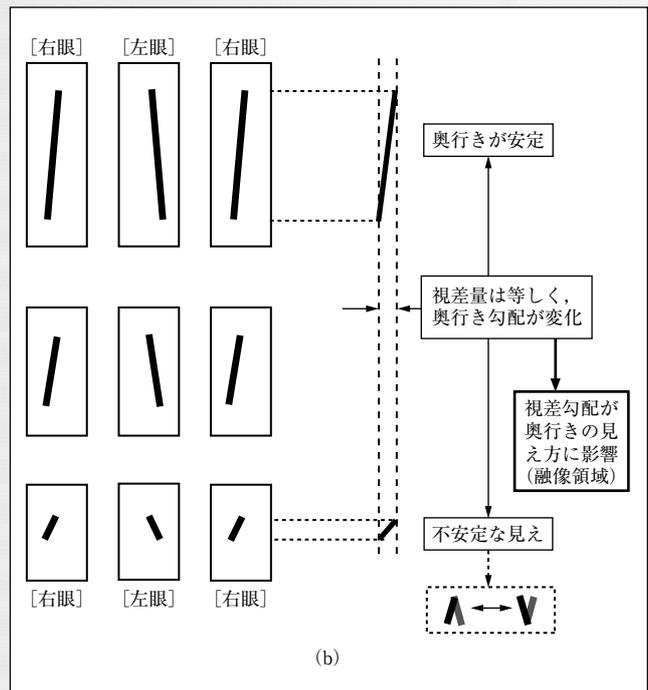


図6(b) 視差勾配による奥行き見え方

図左側の3枚の組図形は、平行・交差で裸眼立体視する図形で、視差分布状態が急激に変化する最下図（視差特徴点が近接する場合）では、両眼立体視が不安定になる。

抑制作用や観察位置移動による平滑化などで説明されている。ただ、2眼式3D映像では、半遮蔽部分に大きな情報差が存在する場合や急激な視差勾配部での不安定な見え方を防ぐ映像処理や、単眼要因と両眼視差とのバランスにも注意する必要がある

3.3 両眼立体視機能の発達と検査法

空間立体視の中心になる両眼視機能は、生後3ヵ月頃から発生し始め、対象を注視する動作や這い回りなどの移動動作から、触覚・体性感覚（皮膚感覚や運動・位置感覚など）と連動して、1歳中頃から5歳位までの間に完成される。

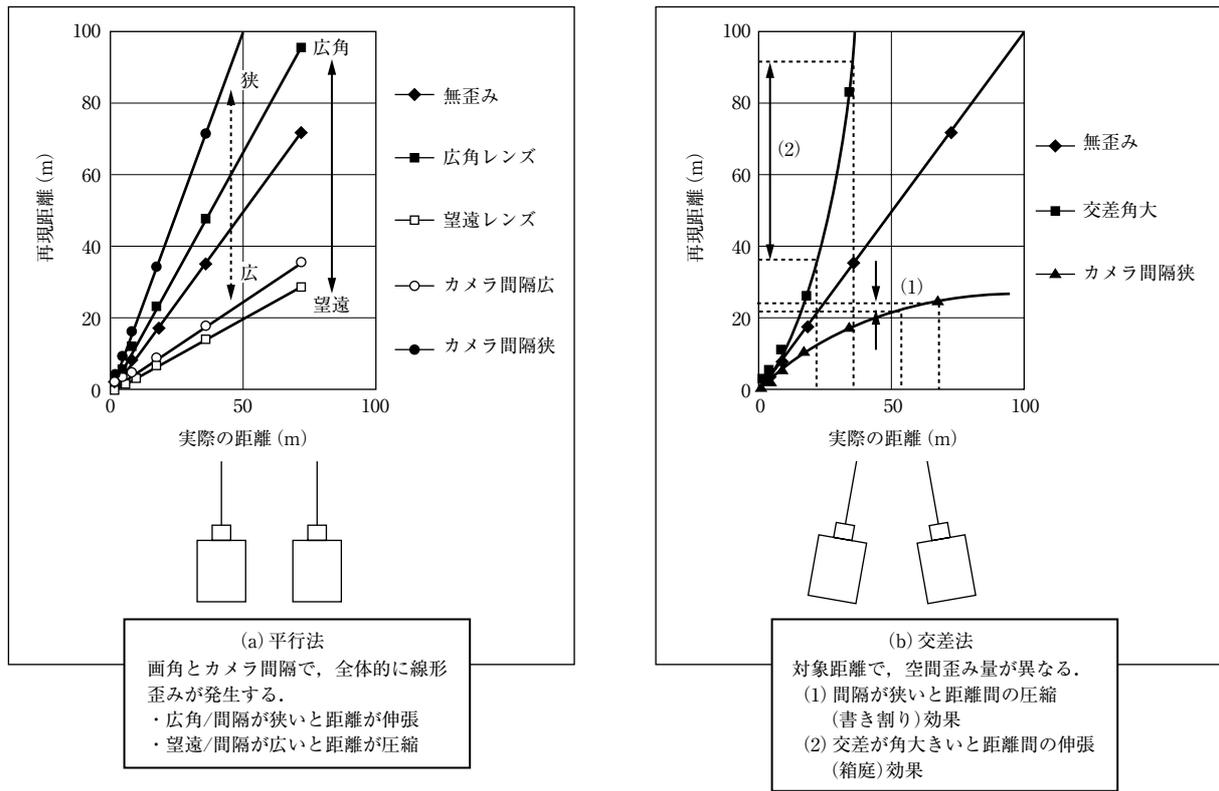


図7 2眼式立体表示での書き割り、箱庭効果の撮影時の発生条件

撮影時のカメラ方向が平行状態では空間非線形歪みは生じないが、カメラ間隔や画角の変化で再現空間が伸長/圧縮して見える。交差状態では、映像自体に台形歪みが生じるとともに、カメラ条件により、ある距離以上では距離が圧縮して再現される書き割り効果、背景と前景間が伸長して前景の大きさが小さく感じる箱庭効果が発生する。

この発達過程で、両眼の視力差や注視動作に異常が発生すると、斜位・斜視^{*2}になり易く、視線ズレが5度以上になると、両眼立体視も充分に働かなくなる場合が出てくる。

このように、両眼視差による立体視機能が正常に発達しないこともあり、2~4%の人が奥行きを弁別ができない。さらに、ランダムドットステレオグラム^{*3}では10~15%の人が凹凸を知覚できず、20%近い人が見難いと訴える。ただ、両眼視機能の発達後も、単眼情報だけで空間配置や距離知覚能力が形成されるため、日常行動では気付かない人も多い。

しかし、主に両眼視差だけで立体を感じさせる2眼式3D映像では、空間立体視が充分に働かない人もいることに留意する必要がある。実際、自分の両眼立体視機能に関しては、普段チェックする機会が少ないため、両眼で同時・単一像に見えることを確認し、両眼視差の検出能力、両眼位置のバランス(眼位)を調べるテスト図形や立体映像効果が

*2 斜位・斜視：注視時には正常であるが、片眼遮蔽時には左右眼の方向がずれる状態を斜位、注視時でも左右眼の方向がずれている状態を斜視と言い、ズレ角が大きいとプリズム補正か手術が必要になる。

*3 ランダムドットステレオグラム：図形成分が知覚できないランダムなドットパターン内に両眼視差情報が含まれた領域を作り、両眼情報の相関だけから視差成分が検出できる機能を調べる。

比較できる標準立体映像を準備することは、3D映像に対する誤った印象を与えないためにも大切である。

4. 2D映像と3D映像(2眼式)による空間再現効果

映像を楽しむテレビ・映画では、これまで単眼情報だけで奥行き空間を感じさせる「2D映像の空間効果」から、両眼情報による「3D映像の空間効果」に向けて、高忠実映像技術の開発が進められている。

4.1 2D映像による空間再現効果と今後

視機能の弁別特性を満足させることで、「実物感」、「距離・奥行き感」、「拡がり感」を感じさせる空間再現効果を実現してきた2D映像は、これまでの通常視力の分離閾(1分視角)の5~10倍以上にもなる細かなズレも識別する副尺視力を満足させる超高精細映像、触感をも感じさせる質感のある高品質映像、ちらつきもなく自然で滑らかな動きが再現できる安定映像、より強い臨場感を感じさせる大画面映像の実現に向かって、更なる性能向上を目指している。これらの効果を高めるために共通している表示条件としては、映像の表示面を感じさせない状態を作り出すことであり、3D映像表示に際しても充分検討すべき条件である。

4.2 3D映像(2眼式)による空間再現効果と改善策

現在の3D映像ブームでの主要な表示システムである2眼式3D映像では、これまで繰り返された苦い経験から、3D映像の魅力を引き起こす表示内容だけでなく、次に示すマイナス面に対する改善策が検討されている。

- (1) 箱庭効果(再現される対象の見かけの大きさが矮小化して見え、箱庭・盆栽、人形劇のように感じる効果)
- (2) 書き割り効果(再現空間内の物体の立体感が扁平化して見え、舞台背景などの書き割りやトランプカードのように見えることから、カードボード効果とも言う)

(1)、(2)の効果は、2眼式撮影(カメラ間隔、画角、カメラ方向平行-交差)や表示拡大率条件等によって、再現空間の距離歪みが発生すること(図7)¹³⁾が報告されている。平行法での撮影では、空間全体に距離の伸長-圧縮が生じるが、交差法では対象距離によって歪みの状態が変化することから違和感のある見え方になる。ただ、微妙な視差再現(解像度)不足や前後物体の相互作用(視差勾配)による書き割り効果の発生や、観察位置移動による歪み補正効果¹⁴⁾なども検討する必要がある。

- (3) 回り込み効果の欠落(対象物を移動しながら観察する時、実際空間では移動方向に応じた部分が見えるが、2眼式3D映像では特定位置からの映像しか再現できないため、観察者の移動方向に追従して逆向きの動きや不自然な揺れを感じる)

立体観察できる領域を拡張するために、多方向からの映像情報を提示する多眼方式が要求される。

- (4) 張り付き効果(額縁効果とも言われ、立体再現される対象が画枠などで見切られると、左右眼への映像に違う部分(半遮蔽状態)が生じ、不安定な見え方(視野闘争)や、対象が画枠に張り付いて立体感が抑えられて変形したように見える効果)

画枠と立体再現空間を分離した状態や表示面を感じさせない状態にするために、仮想画枠(表示面と画面制限枠を異なった位置に見せる状態)の設定、大画面表示(枠の存在を弱め、表示面位置を不確定な状態にする)、空中像(表示像を空中に形成させ、再現空間が表示面に固定されなくなる)や体積表示方式(多層表示面や像面移動などで実像空間を形成する)などによって改善される。

- (5) 調節-輻輳矛盾(両眼視差量を大きくして、表示面位置より極端に離れた奥行き位置に立体像を表示すると、図4のように、輻輳とそれに誘発されたピント調節の位置が表示面位置よりずれ、実際空間を観察する場合の輻輳-調節位置と比べると、両機能のバランスが不安定で、長時間の観察では眼への負荷が生じる)

この不安定さを解決するためには、表示面からの奥行き表示位置を被写界深度内になる視差量に調整するか、微妙

な観察位置移動や眼のピント調節にも対応できる超多眼方式(瞳孔径内に微小視差の複数映像)、空中像方式が効果的である。

- (6) クロストーク+左右映像の差(両眼への映像提示の分離度が良くなく、薄い二重像が見える場合と、撮影条件・表示性能などで左右映像に差が生じる部分が不安定な立体に見える状態)

映像差が大きい部分では、両眼映像が入れ替わって見える視野闘争が発生するが、その状態に至らない提示条件の許容値が調べられて、安定した3D映像製作条件の目標値(ガイドライン)¹⁵⁾になっている。ただ、この目標値は表示条件で変動するため、適用条件に注意する必要がある。

5. 3D映像(2眼式)による生体への影響

2眼式3D映像技術は、人間の持つ空間知覚要因のごく一部しか再現できていない上に、その立体空間効果を強調し過ぎた映像内容が過去において多用されたため、「不自然さ」や「違和感」、「眼への負荷(眼精疲労)」というマイナス面が目立ち、3D映像による「活動・積極性」や「体感・理解度」などの教育・訓練・創造分野でのプラス面を十分に引き出すことができなかった。

2眼式3D映像による生体への影響は、主観評価¹⁶⁾¹⁷⁾と客観評価(生体反応)により調べられている。2D映像に比べて3D映像による迫力や立体感、臨場感などの心理効果は強く、客観評価でも、頭部中枢レベルでの血流状態を測定する光トポグラフィにおいて、3D映像観察時の脳内血流状態が、2D映像より増加する傾向が見られる。ただ、不適切なシーン構成の3D映像観察時の視覚反応から、視覚系への負荷を示す眼(精)疲労が引き起こされることも報告されている¹⁸⁾。

このように、生体への影響が強い3D映像のプラス効果を活かすためには、2眼式から多眼式3D映像への展開によって、マイナス面を改良するとともに、人間本来の行動特性と整合した双方向性情報システムによる、育成・訓練分野や、創造性を高める分野での実用化が今後期待される。

6. おすび

次回以降の講座で紹介される各種3D映像方式では、表示映像性能や微細加工技術の向上で、以前とは比べものにならない程、見やすい3D映像が再現できるようになった。ただ、2D映像にない3D映像特有の表現内容や手法を生み出すことはかなり難しい課題ではある。

現状では、高画質・大画面が実現可能な2眼式3D映像により、これまで過大視され過ぎたマイナス面をソフト・ハード面から改善し、身近で体験できる情報端末を利用して、プラス面への展開が期待されている。

さらに、人間の生活活動を拡張させる環境参加型の映像

利用が進み、人間の空間立体視要因を可能な限り提供できる新しい「3D映像」方式によって、実空間では経験できなかった生活行動空間が再現できるのも、それ程遠い夢物語ではないように思われる。

(2010年9月30日受付)

〔文 献〕

- 1) 高木康博：“将来の3次元ディスプレイと人のビジョン”，映情学誌，60，10，pp.1566-1573 (2006)
- 2) B. Javidi, F. Okano ed.: "Three-dimensional television, video and display technology", Springer (2002)
- 3) 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 (2009)
- 4) 山内昭雄，鯉川武二：“感覚の地図帳”，講談社 (2001)
- 5) 日本視覚学会編：“視覚情報処理ハンドブック”，朝倉書店 (2000)
- 6) G.F.Poggio, T. Poggio: "The analysis of stereopsis, Ann. Rev. Neurosci., 7, pp.379-412 (1984)
- 7) 渡部 毅，吉田辰夫：“立体表示視標に対する輻輳および調節応答”，NHK技術研究，23，pp.378-396 (1971)
- 8) 水科晴樹，根岸一平，安藤広志，河内山隆紀，正木信夫：“実視標と二眼式立体ディスプレイで呈示された視標を観察した場合の調節・輻輳測定”，映情学技報，34，12，pp.35-38 (2010)
- 9) Y. Liu, A.C. Bovik, L.K. Cormack: "Disparity statistics in natural scenes", J. Vision, 8, 11, 19, pp.1-14 (2008)
- 10) P. Burt, B. Julesz: "Modification of the classical notion of Panum's fusional area", Perception, 9, pp.671-682 (1980)
- 11) L. Liu, S.B. Stevenson, C.M. Schor: "Quantitative stereoscopic depth without binocular correspondence", Nature, 367, pp.66-69 (1994)
- 12) 鈴木雅洋：“両眼視における半遮蔽部分の消失と奥行き知覚の関係”，心理学研究，71-6，pp.486-492 (2001)
- 13) 山之上裕一，奥井誠人，岡野文男，湯山一郎：“2眼式立体像における箱庭・書き割り効果の幾何学的考察”，映情学誌，56，4，pp.575-582 (2002)
- 14) 名手久貴，須佐見憲史，畑田豊彦：“多視点画像が提示可能な立体ディスプレイにおける運動視差の効果－運動視差による書き割り効果の改善－”，映情学誌，57，pp.270-286 (2003)
- 15) 3Dコンソーシアム安全ガイドライン部会編：“3DC安全ガイドライン” (2010.4.20)
- 16) 矢野澄男，江本正喜，三橋哲雄：“両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因”，映情学誌，57，9，pp.1187-1193 (2003)
- 17) 江本正喜，正岡顕一郎，山之上裕一，菅原正幸，野尻裕司：“ステレオディスプレイ観視時の水平両眼視差と視覚疲労”，VISION，17，2，pp.101-112 (2005)
- 18) 不二門尚：“眼精疲労に対する対処法”，あたらしい眼科，27，6，pp.763-769 (2010)



畑田 豊彦 1970年，早稲田大学大学院理工学研究科応用物理学専攻修了後，同大助手。1971年，NHK放送科学基礎研究所にて，ハイビジョンによる臨場感効果の研究。1981年より，東京工芸大学工学部教授に移り，眼光学系の像特性や両眼視機能の研究に従事。現在，東京眼鏡専門学校長，博士(工学)，正会員。

講座 誰にでもわかる3D 第2回

応用1：3Dテレビ

～フレームシーケンシャル方式～

未次圭介†

1. ま え が き

近年、ハリウッドを中心とする3D映画の制作・上映が活発化していることが起爆剤となり、民生分野でも3D方式の標準化が進んだ。そして2010年春以降、各社より3Dテレビと3D対応ブルーレイ再生機器が発売されるようになった。HDMI規格とブルーレイ規格の3D拡張は、いずれもハリウッド映画の品位を家庭で実現するという視点から、映画館と同様のフレームシーケンシャル方式により標準化が行われた。

3D映像技術は長きにわたり、多くの研究者によって取組まれており、一言で3Dといっても、専用メガネの有無、視点を変えたときの見せ方の違いなどにより、数多くの方式が存在している。そのような状況の中で、構造が最もシンプルで技術の成熟度が高い3D専用メガネを使った2チャンネルステレオ3D方式を採用することにより、現状の技術に若干の改善を加えるだけで、最高画質での3D映像を楽しむことができるようになった。当然のことながら、標準化の当初の議論の中では、3D表示の究極形であるメガネなし裸眼3Dを検討すべきという声もあったが、現状では残念ながら、その品位はメガネ式の3Dと比較できるレベルに達していない。また、メガネなし裸眼3Dでは、5年から10年といった近い将来を含めて、家庭用テレビに求められる高画質と安全性を両立できるような表示デバイスを実現することは困難であるとの結論に達した。テレビの非連続的な進化ともいえる3Dテレビを確実に市場へ浸透させるには、過去からの失敗の歴史を鑑みて、高品位な3Dが家庭用としても実現できることの認知を得ることが最重要と考え、そのためにはメガネ式からスタートすることが最も適切であると考えてのことである。

本解説では、2章においてフレームシーケンシャル方式

が選ばれた理由について説明した後、3章においてメガネ式フレームシーケンシャル方式の3Dテレビを実現するに当たって必要となる技術(プラズマテレビ、液晶テレビ、アクティブシャッタメガネ)について解説する。

2. フレームシーケンシャル方式が選ばれた理由

本節では、現在各社から発売されている3Dテレビにおいて二眼式フレームシーケンシャル方式が選ばれた理由を3D映画方式の比較、3Dテレビとして満たすべき条件、アクティブメガネ方式の比較を通して解説する。

2.1 3D映画方式

2009年に米国で公開された3D映画は、19本で、2010年にはさらに増加している。3Dテレビの普及のためには、良質なコンテンツが供給されることが重要であり、この3D映画の急速な立ち上がりは、3Dテレビの導入を後押ししたと言える。ここでは、3D映画において採用されている3D方式を比較しながら概観する。

映画館で使われる3D方式は、メジャーなものとしては、REALD、XpanD、Dolby 3Dの三つの方式がある。

REALDは円偏光方式を採用している。円偏光は首をかき上げても3次元効果が保たれるという利点がある。映写機は1秒あたり144回、左目用と右目用のコマを交互に出力するが、その際にコマの切替えに同期した左右の円偏光フィルタをかけて投影する。観客は、左右の目が反対回りに偏光しているレンズをはめたパッシブ式メガネを着用して視聴する。メガネは偏向板であるため比較的安価であるが、偏光を維持するためにシルバースクリーンを使用しなければならず、劇場導入時のコストが高くなるというデメリットがある。

XpanDは、液晶シャッタ方式を採用している。映写機は右目用と左目用の画像を交互に144Hzでスクリーンへ表示する。観客は液晶レンズを搭載したアクティブシャッタメガネを着用して視聴する。映像とシャッタの同期を取るための信号を受け取るため、赤外線受信器がメガネに内蔵

† パナソニック株式会社 AVCネットワークス社
 "3D That Everyone Understands (2): 3DTV; Frame sequential method"
 by Keisuke Suetsugi (AVC Networks Company, Panasonic Corporation, Osaka)

されており、メガネの単価は若干高くなるが、劇場側としての追加装置は赤外線送受信機のみであるため、スクリーンを変更する必要がなく、導入コストが安くなるというメリットがある。

Dolby 3Dは、干渉フィルタ方式を採用している。投影機の前に交互カラーホイールが設置され、6色のチャンネルを左右に振り分けて投影する。観客は、レンズ内にダイクロイックフィルタが付いたパッシブ式メガネを着用し、異なる3色の組合せが左右の目に入る。メガネで使用されるダイクロイックフィルタは、レンズ面への多重メッキ工程が高コストのため、メガネの単価が高くなる。

三つの方式に共通な部分は、TI社が提供しているDLPプロジェクタの高速表示性能をうまく利用し、フレームシーケンシャル投影をベースにしている点である。民生分野においても、ハリウッド映画の品位を家庭で実現するという視点から、映画館と同様のフレームシーケンシャル方式により標準化が行われたが、これは後述するように、フラットパネルディスプレイの高速描画性能を利用してフレームシーケンシャル方式が実現可能であったためといえる。

2.2 3Dテレビとしての条件

現在、民生用3Dテレビとして二眼式フレームシーケンシャル方式が広く採用されているのには、次の理由が上げられる。

- (1)メガネ方式であるため、家庭用として十分に広い視聴範囲が確保できる
- (2)フレームシーケンシャル表示のため、現行テレビジョンと同等の解像度での3D表示を実現できる
- (3)特殊な光学デバイスが不要で、2D表示における画質劣化が抑えられる
- (4)ディスプレイとして少ないコストアップで実現できる

家族で視聴するには、複数人が同時に3Dを楽しめる広い視聴範囲が必要である。メガネ式のステレオ3D方式であれば、左右映像の分離は、メガネの左右の物理特性あるいは動作状態によって決まるので、どのような場所から見ても左右映像が反転することがなく、3D視聴できる範囲が限定されない。次に、二眼式のフレームシーケンシャル方式は、時分割で左右の映像を切替えるので、左右それぞれの対応タイミングでは、ディスプレイの持つフルの解像度がそのまま表示される。つまり3D表示においても、解像度の低下がなく、フルハイビジョン解像度での表示を実現することができる。また、従来のディスプレイの駆動を倍速化することで、特別な光学フィルタデバイスを付加することなく実現できる。このように、2D映像表示における画質劣化が最小限に抑えられ、かつ、最小のコストアップで高品位な3D映像を実現することができることが、導入の初期においては大きなメリットであるといえる。

一方、3Dディスプレイとして、メガネなし裸眼3Dによる方式、例えば、レンチキュラレンズや視差バリアを利用

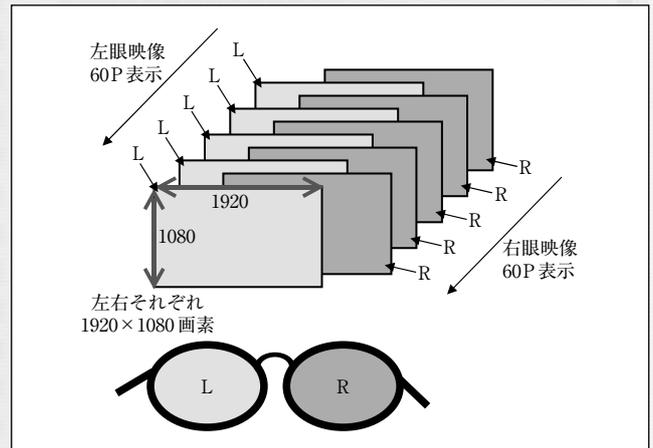


図1 フレームシーケンシャル方式（時分割方式）

したディスプレイがあるが、モアレ(干渉縞)の発生や見る位置によって逆視(左右反転して見える現象)が起こるなど、視野範囲が制限される。また、2D/3D表示互換の困難さなど、ディスプレイデバイス技術に起因する課題もある。

さらに、多眼式のインテグラルフォトグラフィ方式、あるいは究極の3D映像技術と言われるホログラフィ方式などもあるが、立体視できる視点数が増えるとその分、解像度が低下するため、現行フルHDレベルの十分な解像度を実現するには、原理的なブレークスルー技術が必要で、家庭用の品位を実現するにはまだ時間がかかりそうである。

2.3 アクティブメガネ方式

二眼式フレームシーケンシャル方式は、図1に示すように、左右の映像が2次元映像の解像度でそのまま交互に高速に表示される。このため、例えば、フルHDの左右映像であれば、そのまま解像度の劣化なしにフルHDの3D映像を楽しむことができる。また、左右の映像のうち一方の映像、例えば、左眼用の映像だけを表示させるようにすれば、これまでの2D映像として表示できるため、ユーザは2D/3D表示を容易に切替え、選択することもできる。

これに対して、同じく二眼式ステレオ映像方式として、図2に示すように、ディスプレイ画面の偶数/奇数の水平走査線毎に異なる偏光方向を割当てる、マイクロポールと呼ばれる3Dディスプレイ方式がある。これは、水平走査線毎に左回り、右回りの円偏光フィルタ、マクロポールを貼り付けたものである。この3Dディスプレイにはメガネとして、左回り、右回りの円偏光フィルムを貼ったパッシブ方式のメガネが使われる。

マイクロポール方式は、メガネがパッシブ方式のため軽量で安価であるが、空間的に左右の映像が走査線毎に配列されるため、垂直方向の解像度が半分になる。また、偏光フィルム貼り付け工程での歩留まりから、価格が高くなることも課題といえる。

また、アクティブリタダーと呼ばれる3Dディスプレイでは、フレームシーケンシャルのディスプレイの前面に、

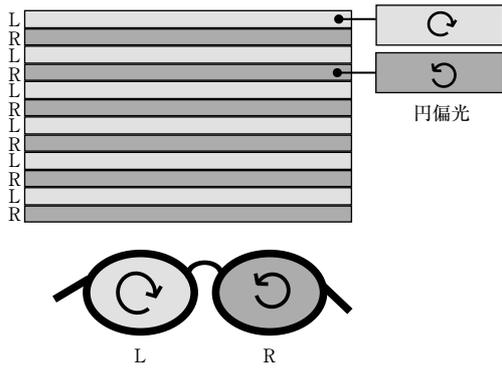


図2 マイクロボール方式（空間分割方式）

左右の映像の切替えと同期して、映像の偏光軸を時間的に切替える円偏光液晶シャッタを組合せている。アクティブリタダのディスプレイは、解像度の低下がなく、また、円偏光のパッシブメガネで3D映像を見ることができる。しかしながら、フレームシーケンシャルのディスプレイに加え、そのディスプレイと同じサイズのアクティブリタダの液晶が必要で、構成が複雑になりコストアップとなる課題がある。

以上の比較から、アクティブメガネ方式としても、フレームシーケンシャル方式が最良であったといえる。

3. 二眼式フレームシーケンシャル方式のテレビ実現技術

ハリウッドの最高品位の3D映画体験を家庭で再現する3Dテレビを実現するにあたり、現代の3D映像の特徴を整理した。従来は、過度な飛び出し映像で驚かすような立体効果が特徴といえる。しかしながら現代の3D映像では、スクリーンからさらに奥行き方向への空間の広がりを重視し、あたかも観客をそこへ引き込むような立体効果で映画のストーリーを体感させる、まさに臨場感溢れる立体空間を作り出すことが特徴であるといえる。

また、デジタルディスプレイによる正確な映像表示技術により、実物のもつリアルな質感表現が可能になっていた。したがって、

- (1) 高臨場感
- (2) 劇場本来の奥行き感、
- (3) 実物の質感・リアリティ

の3点が、高画質3Dを実現する上でのポイントとなる感性要件と位置づけした。次にこれをテレビで実現するための技術要件になるポイントをそれぞれ、

- (a) 大画面
- (b) 黒の深さと高コントラスト性能
- (c) 低クロストーク性能

であると考え、3Dテレビにおける3D高画質化に取り組んだ。高い臨場感を得るために大画面ディスプレイが効果的で

あることは、2Dまたは3Dいずれでも疑いのないところである。視差を利用して奥行きを感じさせる3D映像においては、少し離れたところからでも視野を大きくカバーでき、無理なく奥行きを感じさせることのできる大画面においてこそ、より自然な立体映像表現を実現できるといえる。また、3Dの重要な画質指標として、クロストーク性能がある。クロストークは左右に完全分離されるべき2チャンネルの3D映像が、なんらかの理由で相互にもれこんでしまうことで、3D視聴時に二重像が見えてしまう現象である。これは、立体視ができるかどうか、という3Dテレビの基本機能として重要な要件であると同時に、高品位な質感表現を実現する上では、これをできる限り最小化することが重要である。

3.1 プラズマテレビ

プラズマテレビは、映画館での3D上映に広く使われているDLPプロジェクタと同じく、表示の高速応答性に優れるという特長があるので、これを活かしてフレームシーケンシャル表示の3Dテレビが開発されている。通常の2D表示では、1秒間に60フレームの映像を表示するところ、3D表示では表示枚数を2倍の秒120フレームとして左右の映像を交互に表示し、これを映像に同期したアクティブシャッタメガネで左右の目に振り分けている。これにより、片目当たり、1,920×1,080画素のフル解像度を60フレーム/秒表示できるフリッカレスの3D表示を実現している。

3Dテレビ開発の初期においては、103インチのプラズマディスプレイの3D対応試作機を構築し、各地でのデモや啓蒙活動を通じ、ハリウッド映画やスポーツ映像など高品位な3D映像をより自然にご覧いただくことができた。

フレームシーケンシャル方式において、クロストーク性能を上げるには、左右の映像の切替えができるだけ短時間で行われることが望ましいといえる。この点で、プラズマテレビには二つの利点がある。一つ目は、動画表示性能に代表されるように、連続表示されるフレーム間での映像の残像が少ないことである。これは、蛍光体の残光特性で決まるものであるが、今回の3D化に際しては、蛍光体のさらなる短残光化を図ることで、高いクロストーク性能を実現している。二つ目は、プラズマが面発光ディスプレイであることである。左右映像の切替わる時に、画面内すべての画素が同じタイミングで発光(左)、消灯(左)、発光(右)、消灯(右)と切替わるため、同時刻で左右の映像が画面内で混じり合うことがなく、これにより、アクティブシャッタメガネの切替えが単純であるというメリットが生まれる。

さらには、プラズマは自発光デバイスであり、黒の深さと高いコントラスト性能を得やすく、かつ見る角度によっても色が変わらない、輝度むらがほとんどない、など大画面ディスプレイとしての基本性能が高いといえる。したがって、ハリウッド3D映画本来の臨場感と奥行き感の表現

に加え、実物の持つ質感・リアリティが求められる3Dテレビとしては最適であると考えられる。

3.2 液晶テレビ

液晶テレビは、画面の左上から走査線に沿ってラスタ上に画素を順次書替えていくため、画面全体でいっせいに映像の切替えをするプラズマテレビに比べると、フレームシーケンシャル3D方式の実現は複雑な処理が必要となる。近年、液晶の動きボケを改善するために、倍速駆動技術が開発されているが、これを上手く利用し、4倍速駆動(240Hz)で、片目あたり60Hzのフレームシーケンシャル3D表示を実現している。

2倍速駆動(120Hz)でフレームシーケンシャルを実現しようとしても、左目のスキャンが終了するとまもなく右目のスキャンが始まることになり、約8.3ms(1/120秒)の1フレーム期間中の大部分で画面上の画素が書替えられている途中の状態のため、メガネのシャッタを開いて片目の映像だけを取り出せる期間は限定的になる。そしてシャッタの開閉時間が短くなると、極端な輝度の低下などが発生する。これを解決するために、液晶パネルをさらに高速な4倍速(240Hz)で駆動している。例えば、右目から左目へ切替えをしている最初の1/240秒の期間ではメガネのシャッタを閉じておき、左目の映像を再描画する次の1/240秒の期間でシャッタを開けることで、混じりのない左目映像のみを取り出すことができる。右目映像に対しても同様の動作をすることで、片目あたり60Hzのフレームシーケンシャル方式を実現できる。ただし実際には、液晶そのものの応答遅れがあるため、より混じりの少ない左右映像を得るためには、シャッタを開く時間をさらに短くするか、あるいは、バックライトの消灯制御を行うなどの手法が必要となり、これらの技術が開発されている。

液晶テレビにおけるフレームシーケンシャル方式の実現で最も課題になるのは、クロストーク量の抑制である。液晶はその名の通り、液体の中で高分子結晶を動かすことでそこを通る光の状態を変化させるデバイスである。したがって、画面内の位置や周囲の温度の影響、または映像信号のDCレベルや振幅により、その動的特性が大きく変化する。クロストークを発生させている主要因は、液晶の動きが遅いことである。それが上記のような条件で時々刻々とさまざまに変化するため、クロストークが、画面のある特定の位置や特定の入力信号レベルにおいて増加するなどの現象が指摘されている。したがって、より精密な動作制御をすることで、クロストーク抑制を行う必要がある。

3.3 3Dアクティブメガネ

一般的に、フレームシーケンシャル方式に対応するアクティブシャッタメガネとテレビ間の同期を取るために、赤外線伝送によるメガネシャッタプロトコルが使用されている。

フレームシーケンシャル方式と一言でいっても、1フレーム時間(120Hzのフレームシーケンシャルであれば約

8.3ms)内での画面内の光り方は、テレビ方式によってさまざまである。したがって、十分な3D画質を得るためには、それぞれの表示方法にメガネのシャッタ動作を最適化する必要がある。3.1節と3.2節で説明したように、プラズマテレビの場合は、画面全体が同一タイミングで切替えを行えるが、液晶テレビの場合はホールド表示で、画面の端からのスキミングで順次映像の切替えをする。このため、ディスプレイのタイプによって、駆動表示方式とメガネの開閉タイミングの調整が必要となる。以下で、液晶シャッタの性能と開閉制御、メガネの軽量化について順に説明する。

3.3.1 液晶シャッタの性能

3Dアクティブシャッタメガネは、メガネの液晶シャッタを3Dディスプレイの表示画面と同期させて開閉させる。構造的にはシンプルであるが、3D映像はすべてこの液晶シャッタを通して見るため、その性能は画質に直接影響を及ぼす。液晶シャッタの画質にかかわる性能については、以下のものがある。

(1)コントラスト

液晶シャッタのコントラストは、液晶シャッタを開いたとき(透過モード)と、閉じたとき(遮蔽モード)それぞれの光の透過量の比で定義される。この液晶シャッタのコントラストが低いと、それぞれ反対側映像(左眼へ右映像、右眼へ左映像)からの光の漏れが多くなるため、クロストークが増える。したがって、コントラストは高い方が望ましいといえる。また、映像のコントラストにも影響するため、液晶シャッタにも高いコントラスト性能が必要である。

(2)透過率

液晶シャッタの透過率は、液晶シャッタがない(メガネを途中に介さない)場合の光の透過量を基準として、液晶シャッタを透過モードにしたとき(メガネを介したとき)の光の透過量を百分率で表したものである。すなわち、3Dメガネを装着したときに感じられる映像の明るさに対応する。なお、液晶シャッタには偏光板が用いられ、光の向きに応じてシャッタの開閉膜のような機能をしている。3Dディスプレイの偏光板の有無と液晶シャッタの偏光板との組合せ、偏光板が直線偏光の場合は、ディスプレイの偏光軸とメガネの偏光軸とのズレによって、透過率も変わってくる。高い透過率が望ましいが、一般的にコントラストとトレードオフの関係がある。

(3)応答性

液晶シャッタの応答性は、**図3**に示すように、液晶シャッタの立ち上がり立ち下がりについて、それぞれ光透過率が10%から90%になる時間、逆に90%から10%になる時間で表される。ディスプレイの発光時間に応じてメガネの開閉時間を精度よく制御するためには、液晶シャッタの応答特性も速い方が良く、最近では、立ち上り時間が2ms以下の高速応答の液晶が多く使われている。なお、液

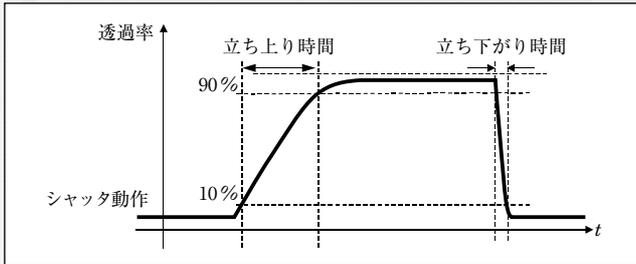


図3 液晶シャッタの応答時間

晶シャッタの応答が遅いと、左右の映像の分離が不十分になるためクロストークが増える原因にもなる。

(4)色バランス

メガネ越しの色バランスは、本来の映像の色再現にとって重要である。映像の光がメガネの液晶シャッタを透過する際、赤色、緑色、青色の3原色光の透過率のバランス(色バランス)が崩れると、白色が色づいたり、鮮やかな色がくすんだりする原因となる。液晶シャッタの設計において透過率を高める設計にすると、視感度の高い緑色付近の波長の透過率が上がる一方、相対的に青色と赤色に対する透過率が下がることになる。また、液晶シャッタは、一般的に波長の短い青色に対する応答は速く、逆に波長の短い赤色に対する応答は遅くなる。したがって、フレーム周期で開閉する液晶シャッタの実効的な色別の透過率は、液晶シャッタの色別の透過率とその応答特性によって左右される。

(5)視野角

メガネ越しに視線をディスプレイの中央部と周辺部に向けるとき、または、メガネをかけた顔の向きが正面を向くときと傾くときで、メガネ液晶に入る光線の角度が変化する。液晶シャッタの視野角は、通過する光線の角度によって、コントラストおよび応答性は影響を受ける。このため、液晶シャッタの中央コントラストだけでなく周辺コントラストも、大画面の3D映像では大事な性能となる。

3.3.2 液晶シャッタの開閉制御

従来、3Dメガネとディスプレイの同期方法は、図4に示すように、VESA規格に規定されている、Stereo Sync信号を何らかの規則によって符号化し、赤外線パルスによって伝送するという方式が利用されていた。しかしながら、VESA規格のStereo Sync信号は、左右の映像を区別するタイミングを示す信号で、実際の3Dメガネの液晶シャッタが開閉するタイミングは、3Dメガネの実装に委ねられている。このため、3Dメガネの互換性の確保が難しく、現在、組合せて使用できるディスプレイと3Dメガネは、各社独自の仕様が使われている状況である。

本来、3Dメガネの制御プロトコルは、ディスプレイの特性に合わせて、最適なタイミングで3Dメガネの液晶シャッタの開閉動作を、ディスプレイ側から精密に制御できるものが望ましいといえる。そこで、ディスプレイの駆動

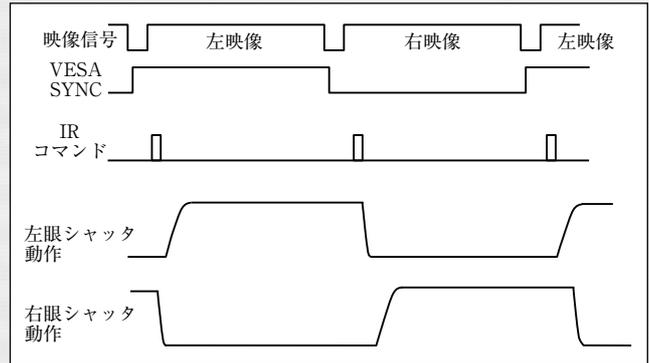


図4 従来の3Dメガネとディスプレイの同期方法



図5 重量38gの軽量アクティブシャッタメガネ(パナソニック)

特性に応じて、効率良くメガネの液晶シャッタ開閉のタイミングを独立制御できる伝送プロトコルが用いられるようになってきている。

3.3.3 メガネの軽量化

3Dメガネは、3D映像を見る上で欠かせないため、長時間かけても疲れないものが求められる。アクティブシャッタ方式の3Dメガネは、液晶シャッタ、シャッタタイミングを受信するセンサ(例えば赤外受光センサ)、受信した信号を検出しシャッタを駆動させる電子基板、ボタン電池ないしは充電式2次電池、そしてメガネのフレームから構成されている。このため、偏光フィルタとメガネフレームのみからなるパッシブ方式のメガネに比べ、重くなりがちである。しかし最近では、メガネとしての掛け心地も考慮したメガネの軽量化が進められている。ここでは、液晶シャッタレンズ部分の薄型化、電子基板のコンパクト化、フレーム材料の軽量化やデザインの工夫などがなされている。例えば、図5のメガネは、従来品メガネと比べて約40%減の軽量化を実現し、アクティブシャッタ方式の充電式3Dグラスとして38gという軽さを実現している。今後もメガネの軽量化は進むと見られ、パッシブメガネとさほど変わらない重さの軽量メガネが出てくると期待されている。

4. お す び

本稿では、ハリウッド映画の3D対応が急速に進む中、家庭用の大画面テレビにおいて、その高品位3D映像を実現するためには、劇場で主流となっている二眼式フレームシー

ケンシャル方式を採用することが得策であったこと、さらに、二眼式フレームシーケンシャル方式の3Dテレビを実現するに当たって必要となる技術(プラズマテレビ、液晶テレビ、アクティブシャッターメガネ)について解説した。

2010年は、各社より3Dテレビが発売され、「3D元年」と呼ばれている。過去の3D映像に関する多くのチャレンジと苦渋の歴史を鑑み、ハリウッド映画の3D化に同期したタイミングで3Dテレビを家庭に導入することは、事業的観点からも、3Dテレビの将来に向けたさらなる進化への道筋をつける意味でも、ラストチャンスと思われた。デジタル技術を駆使したフラットパネルディスプレイの基礎技術の充実があり、それに若干の改善を加えるだけで最高画質での3D映像を楽しむことができる二眼式フレームシーケンシャル方式は、このタイミングで3Dテレビを実現し世の中に

広く普及させるに当たり、最良の選択であったと言える。将来振り返った時に、この2010年という年は、カラー放送開始、ハイビジョン放送開始、デジタル放送開始などに匹敵する、テレビにとっての重要な転換期に当たる年であったと思ひ起こされるのではないであろうか。

(2010年12月14日受付)



すえつぎ けいすけ
末次 圭介 1989年、九州芸術工科大学芸術学部音響設計学科卒業。同年、松下電器産業(株)(現 パナソニック(株))に入社。ハイビジョンカメラ開発に従事。1995年より、ハリウッドでのDVD制作事業において、MPEG画像圧縮を担当。2004年、パナソニックハリウッド研究所所長に就任。ハリウッド映画制作業界との連携を推進。2006年より、同社AVCネットワークス社技術統括センター高臨場感AV開発センターにて、新規AV技術開発に従事。

2011年3月号予定目次

- 【ふぉーかす】----- 電通大 金子正秀
 【名誉会員からのメッセージ～次代を担う若者に向けて～】デジタル放送を夢見しころ～夢を夢見て～----- 名誉会員 吉野武彦
 【小特集】「時代の最先端を行くデジタルカメラ技術」
 1. デジタルカメラ技術の現在・過去・未来 ----- 京都産業大 蚊野 浩
 2. 小型・高画質・高機能を実現するミラーレス一眼カメラ ----- パナソニック 岡本充義
 3. ネットワーク親和性の高い新世代カメラに見られる技術 ----- 三洋電機 中村史朗・西出 果
 4. デジタルカメラ内蔵型プロジェクタの光学技術 ----- ニコン 相川敏哉
 5. ユニット交換式カメラシステム----- リコー 牧 隆史・清水隆好・吉田和弘・加賀良太
 6. デジカメにも3Dがやってきた～3Dデジカメの開発～----- 富士フイルム 鶴川雅章・田中康一・四方大介
 7. 「位相差画素内蔵撮像センサ」による高速オートフォーカス----- 富士フイルム 遠藤 宏
 8. RAW現像で拡がる写真と撮影の可能性 ----- 市川ソフトラボラトリー 市川芳邦・本郷義太加
 【研究動向】HEVC/H.265 ----- 三菱電機 浅井光太郎・関口俊一
 【講座】「誰にでもわかる3D」
 (第3回)基礎2；3D映像における疲労を避けるには----- ATR 水科晴樹
 【知っておきたいキーワード】(第62回)チャンネルリパック----- TBS 山形幸紀
 【番組制作ノート】(第12回)ステディカムで撮る「世界ふれあい街歩き」----- NHK-MT 地主浩二
 【メディアアート紀行】(第12回) ----- 東大 池上高志
 【私の研究開発ツール】After Effects----- 早大 松山洋一
 【大学発のベンチャービジネス】サイエンスとエンジニアリングの掛け算で世界に挑むサイジニア株式会社
 ----- サイジニア 吉井伸一郎
 【報告】2010年映像情報メディア学会冬季大会 ----- 調査担当理事 鉄尾直司
 【論文小特集】「イメージセンシング技術とその応用」
 【特別寄稿】イメージセンサの世界における日本～日本が果たしてきた役割と歴史から学ぶこと～----- パナソニック 黒田隆男
 【小特集論文】
 6バンドカメラシステム-近赤外3可視光3バンドカメラ- ----- 豊田中研 木村好克・寒澤佑介・城殿清澄・内藤貴志・二宮芳樹
 LED Traffic Light Detection Using High-speed-camera Image Processing for Visible Light Communication
 --- Nagoya Univ. Halpage Chinthaka Nuwandika Premachandra・Tomohiro Yendo・Mehrddad Panahpour Tehrani・
 ----- Hiraku Okada・Masayuki Tanimoto, Tokyo Inst. of Tech Toshiyuki Fujii
 【小特集研究速報】
 色恒常性をもつカラーシリコン網膜システムの検討----- 立命館大 下ノ村和弘
 標準プロセスによる偏光分析CMOSイメージセンサの機能向上
 ----- 奈良先端大 徳田 崇・藤岡侑司・宍戸三四郎・野田俊彦・笹川清隆・垣内喜代三・太田 淳
 【論文】
 正弦波パターンに対する最適な重み係数を用いたオプティカルフローの効率的な推定法 ----- NTT 境野英朋
 単一のレンズ系からの多様なボケ味の生成----- 国立情報学研 児玉和也, 中大 久保田彰
 【フィールド論文(起業工学)】
 大学発ベンチャー育成のためのメンター・プラットフォームにおける同窓会ネットワーク活用に関する研究
 ----- 慶大 牧 兼充・宮地恵美・樺澤 哲
 【研究速報】
 位相変調液晶ディスプレイを用いた電子ホログラフィ
 ----- 千葉大 上原寛樹・平井大智・加賀城宏毅・市橋保之・中山弘敬・下馬場朋緑・増田信之・伊藤智義

講座 誰にでもわかる3D 第3回

基礎2：3D映像における疲労を避けるには？

(正会員) 水科晴樹†

1. ま え が き

近年、3D映像の表示方式や機器の進歩により、一般の生活を営む私たちも3D映像に触れる機会が多くなってきた。3D映画の上映に対応したシアターの数や、公開される3D作品の数は急激に増加している。また、電器メーカーから発売されている家庭用の3Dテレビによって、家庭での視聴も可能になった。簡単に3D映像を楽しむことができる環境が整ってきたことで、よりリアルで臨場感ある映像が身近なものになったといえるだろう。

一方で、3D映像の視聴により「目が疲れる」、「頭が痛くなる」、「気持ちが悪くなる」といった症状を経験したという話もよく聞かれる。3D映像による疲労や不快感は今に始まった話ではないが、3D映像のどのような側面が疲労を引き起こすのか、どうすれば疲労を避けることができるのかについて知られていないことが多い。そこで本稿では、現時点で疲労や不快感の原因と考えられているものについて「3D映像の原理」、「機器の特性」、「視聴条件」のそれぞれに由来するものに分けて概説し、疲労や不快感を避けるための方法について述べる。また、3D映像による映像酔いについても簡単に述べる。

2. 3D映像の原理に由来する疲労

2.1 調節と輻輳の不一致

現在市販されている3Dテレビや3Dディスプレイの多くは、立体感を生み出すための情報として、両眼視差(Binocular Parallax)を利用している。両眼視差とは、右眼と左眼という空間上の異なる二点からの対象物の見かけの位置の違いのことを指し、人間が奥行きを知覚する際の主要な手がかりの一つである¹⁾。実際の3D映像では、さまざまな方式によって、左眼と右眼にそれぞれの位置から見

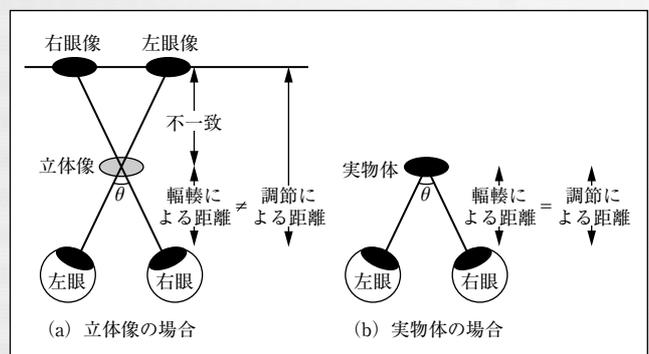


図1 調節と輻輳の不一致

た映像を別々に見せ、両眼視差を与えることで立体視を実現している。

両眼視差は、対象物と左右の眼の幾何学的な位置関係から決まる。3D映像においては、左右の眼に映る像を画面上で水平にずらすことで視差を表示し、奥行きを表現している。図1(a)にその一例を示す。画面上の異なる位置に対象の左眼像と右眼像を表示し、それぞれの眼に別々に見せ、それらを融像(両眼融合)することで、対象物が画面から飛び出して見える。逆方向の視差を与えれば、画面の奥にあるようにも表示できる。本稿では、このように両眼視差によって画面と異なる奥行きに見える像を立体像と呼ぶことにする。

図1(a)の例では、両眼視差は物体が画面の手前にある状況をシミュレートしている。しかし、対象物を見ようと手前に浮き出た立体像に視線を向けると不都合が生じる。図1(a)と図1(b)を見比べていただきたい。左右の眼の視線(視軸)がなす角度を輻輳角と呼ぶが、図1(a)立体像を見ている場合と、図1(b)実物体を見ている場合とで輻輳角 θ は変わらない。しかし、立体像を構成する左右眼の像はもともと画面上に表示されているため、立体像をはっきり見ようとすると、眼の調節(Accommodation: 焦点を合わせること)は画面上に合わせることになる。一方、実物体を見ている場合、調節は実物体の距離に合う。つまり、調節と輻輳の示す距離情報が実物体を見ている場合は一致

† ATRメディア情報科学研究所

"3D That Everyone Understands (3): Avoiding Visual Fatigue Caused by Viewing 3D Images" by Haruki Mizushima (ATR Media Information Science Laboratories, Kyoto)

するのに対し、立体像を見ている場合は一致しない。この立体像における調節・輻輳の不一致が、3Dによる疲労の原因の一つと考えられている^{2)~6)}。

では、なぜ調節と輻輳が一致しないと疲れるのだろうか。原因の一つとして、調節と輻輳の制御系の連動がある。図2は調節と輻輳の制御系のモデルである⁷⁾⁸⁾。調節と輻輳は、いずれも対象までの距離を入力信号とし、それぞれ網膜上のぼけをゼロにし、両眼の網膜像を融合するように動作する制御系であるが、それに加えて、調節制御系から輻輳制御系、またその逆に向かうクロスリンクが存在する。これは調節と輻輳が相互に影響し合うことを意味し、輻輳の変化に誘導される調節の変化を輻輳性調節、調節の変化に誘導される輻輳の変化を調節性輻輳と呼ぶ。

3D映像を見ているときに、この相互作用はどう機能するのだろうか。例として、図3(a)のような場合を考える。立体像の位置に両眼の視線を向けるとき、輻輳性調節は、調節距離が画面上から立体像の距離にシフトする方向に働く。しかし、このシフト量が大きくなると、画面上に焦点が合わなくなるため、画像のぼけを減ずる方向である画面の距離に調節が再度シフトしようとする。すると今度は、調節性輻輳が、輻輳距離が画面の方向にシフトする方向に働く。このように、相反する方向に調節・輻輳を誘導する機構が同時に機能し、調節・輻輳機能が不安定な状態になる。この時の、両眼の融合状態を保持するための融像努力が疲労の原因であると言われている⁶⁾⁹⁾¹⁰⁾。

しかし実際には、調節が画面上から多少ずれても、焦点

が合った状態は保持される。この範囲を被写界深度と呼び、通常の条件下では対象の位置から $\pm 0.2 \sim 0.3$ [D] (Diopter, 距離 [m] の逆数) 程度と言われている¹¹⁾¹²⁾。図3(b)に示すように、立体像の奥行きが被写界深度の範囲内であれば、網膜像のぼけが生じないため調節の応答は輻輳性調節のみに依存する。この場合、輻輳の変化に誘導されて調節も変化するため、調節と輻輳の応答の不一致はなくなり不快感も抑えられる⁸⁾¹³⁾。しかし、被写界深度の範囲内であっても、視差の時間的変化があると疲労が起こることが報告されている¹⁴⁾¹⁵⁾。そのため、コンテンツ作成の際には、シーンの切替わりにおける視差の時間的変化をなるべく小さくする、奥行き方向に運動する対象を含むシーンを多用しないなどの配慮が必要である。

2.2 過大な視差の影響

3D映像の効果を強調するために、視差を大きくして大きな奥行きを表現することがしばしば行われる。しかし、視差が大きくなり過ぎると、左右眼の像の両眼融合が困難になり、視覚疲労を引き起こす。

まず、両眼融合には二つのタイプがあることを覚えておく必要がある。実空間における具体的な例を挙げる。図4の点F(注視点)で、左右眼の視線(視軸)が交差している。この点Fと異なる奥行きに点Aがある場合、この点Aと点Fの相対的な位置関係は左右の網膜像で異なり、この差を両眼網膜像差(Binocular Retinal Disparity)と呼ぶ。しかし、点Aが図中のグレーの領域内にある場合には、両眼網膜像差があっても両眼の網膜像は融像して単一の点として知覚される。このように、一点を注視しているときの両眼融合は、感覚性融像あるいは網膜性融像と呼ばれ、図中のグレーの領域をパナム(Panum)の融合領域と呼ぶ。融合領域の広がり方は測定条件により異なり、視野の中心部では視角で数分程度と非常に狭いが、視野の周辺部に行くにしたがって広がる¹⁶⁾。また、視覚刺激の空間周波数が低いほど融合領域は広がる¹⁷⁾。ところで、点Bはパナムの融合領域外にあるので、網膜上における点Bの像は融像せずに二重像が知覚される。なお、融合領域内であっても、視差量の異なる複数の対象が近接している(視差勾配が大き

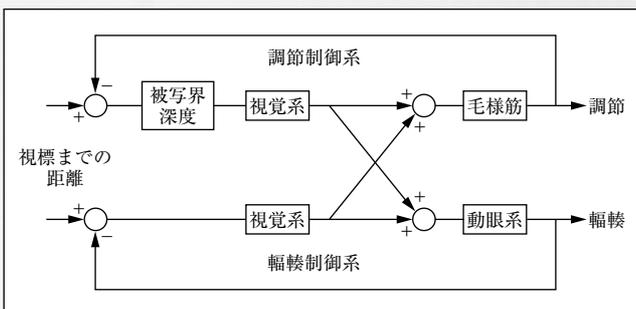


図2 調節と輻輳の制御系のモデル (比留間・福田(1990)より改変)

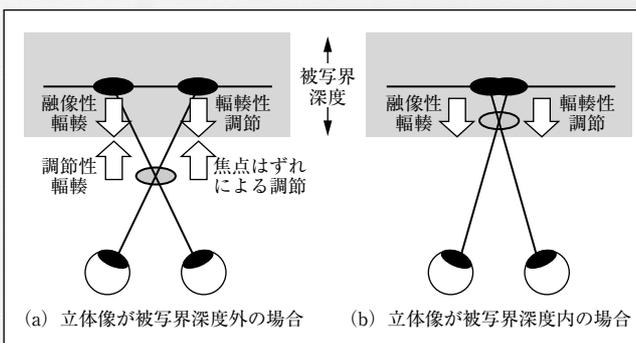


図3 立体像観視時の調節・輻輳と被写界深度

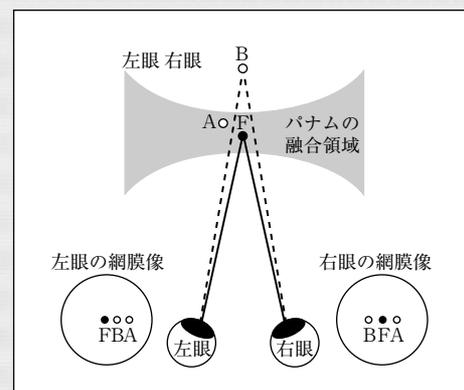


図4 両眼網膜像差とパナムの融合領域

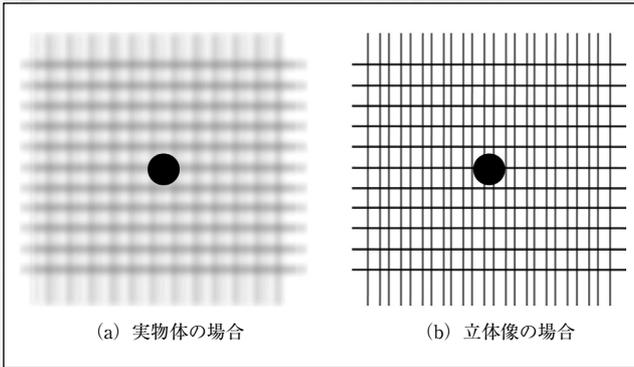


図5 実物体と立体像に対する背景のぼけと二重像

い) 場合、融像できなくなることがある¹⁸⁾。

融合領域外の点Bを両眼融合するには、開散(Divergence)運動を行って、左右眼の視線を点Bに向けて融像することができる(図中の点線)。開散運動は左右の眼が互いに外側に回転することにより、輻輳角を小さくする方向に行われる眼球運動である。逆に、輻輳角を大きくする方向に行われるものを輻輳(Convergence)運動と呼び、開散運動と輻輳運動を合わせてパーゼンス(Vergence)と呼ぶ。このタイプの両眼融合は、運動性融像あるいは輻輳性融像と呼ばれる。3D映像の視差の場合、パナムの融合領域を超える視差が与えられた場合でも、映像の呈示時間が充分長ければ、パーゼンスによって対象物の網膜像は融像できる。運動性融像による融合範囲は個人差が大きいが、平均すると開散方向に 3.5° 程度、輻輳方向に $5^\circ \sim 6.5^\circ$ 程度である¹⁹⁾²⁰⁾。しかし、両眼網膜像差は運動性融像によってキャンセルされることはない。

では、過大な視差を与えることで、なぜ疲労が生じるのだろうか。運動性融像の可能な範囲を超えるような非常に大きな視差の場合、無理なパーゼンスによる融像努力が大きなストレスになることは想像に難くない。では、運動性融像は可能だが、感覚性融像ができないような視差を含む場合はどうだろうか。図5に具体的な例を挙げる。前景の円を注視しているときは前景が融像して一つに見えるが、背景の格子は融像されずに二重に見える。これは実空間でも3D映像でも同じであるが、一つ大きな違いがある。実空間の場合、前景を見ているときはその距離に調節が合っているため、背景には焦点が合わない。背景がぼけると二重になっていても意識されにくく、さらに、ぼけにより背景の像が低空間周波数成分のみで構成されることになるため、パナムの融合領域が拡大し背景が融像されやすくなる。しかし、3D映像の場合は、実際に像が表示されているのは前景も背景も同じ画面上のため、前景に調節が合っていれば背景も鮮明に見えてしまう。これは実空間ではあり得ない状況であるため、その違和感から疲労を引き起こすと考えられる。立体像に対する背景の空間周波数をさまざまに変化させたとき、背景の空間周波数が高い場合は立体像

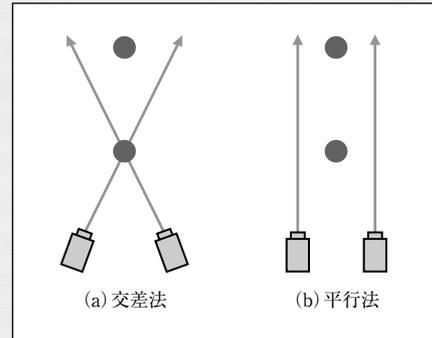


図6 3D実写映像撮影におけるカメラ配置

の視差が $70'$ 以上で不快感が生じるが、背景の空間周波数が低い場合は、視差が大きくなってほとんど不快感はないことが報告されている²¹⁾。このことから、前景と背景の両方が鮮明に見えることが疲労につながるといえるだろう。

過大な視差による疲労を避けるためには、コンテンツの作成段階で、視差が大きくなり過ぎないように注意することが重要である。一般に、視差を 1° 以下にすることが目安であると言われるが、先述の $70'$ 以上で不快感が生じることを考えると、 1° は妥当な値と言えるだろう。一方、カメラを用いた実写映像の場合、図6(a)の交差法(左右のカメラの光軸を交差させる撮影法)を用いると、対象と背景との間の視差が大きくなり過ぎる傾向があるため注意が必要である。なお、図6(b)の平行法(左右のカメラの光軸を平行に保つ撮影法)を用いた場合には、そのような問題は発生しないため、目的に応じて撮影法を使い分けると良い²²⁾。

2.3 快適視域

2.2節で述べたパナムの融合領域は、輻輳を固定した状態で両眼融合が可能な範囲であった。では、輻輳の変化を許容する場合はどうなるだろうか。図7は調節と輻輳の関係を簡略化して示したものである。なお、縦軸は調節[D]、横軸は輻輳[MA(Meter Angle)]であるが、単位はいずれも距離[m]の逆数と定義されている。原点を通る傾き1の直線は、調節と輻輳が一致した状態を示す。実物体に対しては、調節と輻輳の距離が一致するためこの線上の値をとり、調節と輻輳がこの線から大きく外れるほど、視覚系に負担がかかることになる。3D映像の場合、原理的に調節・輻輳はこの線から逸脱するため、どの程度の逸脱まで許容できるかが問題となる。ほぼ輻輳一定で調節を変化させることのできる調節範囲を相対調節、ほぼ調節一定で輻輳を変化させることのできる輻輳範囲を相対輻輳と呼び、図7にその範囲を示す。この領域ではピント合わせと両眼融合の両方が可能であり、両眼単一明視域(Zone of Clear, Single Binocular Vision)と呼ばれる¹⁶⁾。さらに、この領域の中央の $1/3$ はパーシバル(Percival)の快適視域

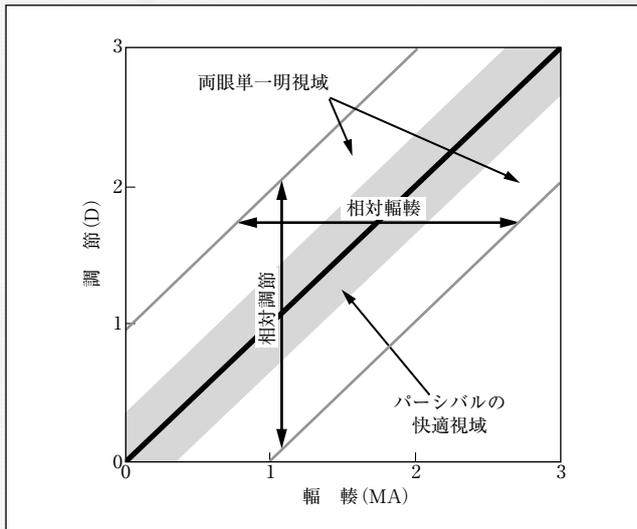


図7 相対調節、相対輻輳とパーシバルの快適視域

と呼ばれ(図中のグレーの領域)、この範囲内では不快感の度合いが低いとされる⁴⁾⁶⁾。前述の視差 1° と併せて、3D映像の視差を統制する上で目安となるだろう。

3. 機器の特性に由来する疲労

3D映像機器としては、ディスプレイやプロジェクタ、専用のメガネなどが含まれるが、これらの特性によってもたらされる視覚疲労もある。代表的なものとしてクロストークが挙げられる。クロストークとは、片方の眼に他の視点の像が同時に見えてしまう状態であり、視差のある映像の場合は二重像あるいはぼけとして知覚される。一般に、クロストークの量が大きいほど生じる不快感も大きい²³⁾。クロストークは片方の眼に二重の像が投影された状態であるため、視聴者側の努力、すなわち輻輳・調節の状態を変えても解決できないことが負担になると思われる。

クロストークは、一般に機器の性能や調整不足に起因することが多い。現在市販されている3Dテレビで主流になっているフレームシーケンシャル方式(左右眼の像を時間的に交互に見せる方式)では、液晶シャッターの時間特性を向上させ、映像と液晶シャッターの同期を確実にとる必要がある。偏光メガネを用いて左右眼の映像を分離する方式では、偏光フィルタの特性によっては、所定の位置で視聴しないと本来の偏光特性が得られないことが多いため注意が必要である。なお、裸眼での視聴が可能なパララックスバリアやレンチキュラレンズを用いた方式の場合、頭を動かしたときに生じる運動視差の切替わりを滑らかにするために、意図的にクロストークを混入させる場合もある。クロストークによる不快感と運動視差の切替わりの不連続性を同時に解決することは難しいが、どこかに妥協点を見つけてクロストークの最適値を決定する必要がある。

機器の特性に関連する疲労の原因としては、ほかに左右眼の像の輝度差や幾何学的な不一致(回転や歪み等)がある。

一般に、左右眼の像の差異が大きくなるほど不快感が大きくなる²³⁾。対策として、カメラを用いたコンテンツ作成においては、左右のカメラの特性をできる限り等しくし、位置を厳密に調整する必要がある。なお、交差法で撮影する場合、キーストーン歪み(パースペクティブの歪み)が発生するので注意を要する。また、映像呈示の際に複数台のプロジェクタを用いる場合、プロジェクタの輝度やコントラストをできる限り一致させ、また像が歪まないように注意して設置する必要がある。

4. 視聴条件に由来する疲労

3D映像による疲労や不快感を避けるうえで、視聴者はどのような点に注意すべきだろうか。まずは適正な位置から、適正な姿勢で視聴することが重要である。標準観視距離は画面の高さの3倍(3H)と言われているが、画面に近付きすぎると視差が過大になるため注意が必要である。画面を斜めから見ると台形歪みが大きくなり、立体像が歪んでしまうために疲労の原因となりやすい。また、3D映像は左右の眼が水平方向に離れていることを前提に作られているため、頭を傾けて視聴すると視差が上下方向のずれになってしまう。上下方向のずれに対しては不快感が生じやすい²³⁾。よって家庭で視聴する場合には、ソファ等に寝転がって視聴することは避けるべきである。

映像の迫力や臨場感を高めるために、大画面での視聴を行うこともあるが、視距離が一定であれば画面サイズの拡大とともに視差も大きくなるので、視差が過大にならないよう注意が必要である。特に、画面後方に立体像が表示される場合、大画面で視差が大きくなりすぎると眼球が開散方向に回転する場合もある。実空間では、無限遠のものを見る場合であっても、両眼の視線は平行よりも開くことはないので、開散方向に眼球が向くような視差を与えることは避けるべきである。

3D映像の視聴時間については、個人差などもあり今のところ明確な基準は存在しない。しかし、視聴中に疲労や不快感を感じたら視聴を中止し、休憩をとることが望ましい。融像性輻輳限界(融像幅)は視覚疲労の客観的な指標と考えられているが、3D映像の長時間の視聴によって減少する。しかし、5~10分程度の短時間の休憩を挟むだけでも視聴前のレベルに回復することから、疲労の解消のために休憩をとることは有効であるといえる²⁴⁾。

5. 3D映像による映像酔い

映像酔いとは、シーンの動きが多く含まれる映像を視聴した時に、めまいや発汗、吐き気、嘔吐などの症状が現れる症状である。特に、大画面でダイナミックな動きのある映像の視聴により生じやすいと言われる²⁵⁾。元来、映像酔いは3Dに限らず2Dの映像でも起こるもので、発生機序の有効な説としては感覚不一致説がある²⁶⁾。通常、視覚・前

庭感覚・体性感覚などの複数の感覚入力は一貫するが、これらの入力が一貫しない場合には、予測した感覚との矛盾が生じ、これを異変ととらえて酔いの症状が発生するというものである。

3D映像特有の効果として、仮説としては、これらの感覚入力の不一致に、さらに調節・輻輳の不一致が加わるために、映像酔いのリスクが高まると言われる。また、3D映像の視環境に順応してしまうと、逆に実環境に戻ったときに不適応を起こして、酔いが発生するとも言われている。しかし、3Dと2Dの映像酔いを比較して、3D特有の効果を明らかにしたような実験的研究は、本稿の執筆時点では見あたらない。上記の仮説の検証も含め、今後の研究が待たれる。

6. お す び

本稿では、3D映像による疲労や不快感の原因と考えられている主な要因について概説し、それらを防ぐ方法を述べた。一般家庭にも3D映像が普及し始めた昨今、視聴者が安全かつ快適に3D映像を楽しむための方策が必要である。具体的な動きとしては、2010年4月に3Dコンソーシアムから安全ガイドラインの最新版が公表されており、3D映像を安全に視聴するために視聴者、コンテンツ制作者、機器製造業者のそれぞれが考慮すべき項目が示されている²⁷⁾。紙面の都合上、本稿で取り上げていない項目もあるので、それらも併せて一度安全ガイドラインに目を通されることをお勧めする。しかし、現時点で3D映像の視聴による疲労や不快感の原因や対策がすべて明らかになっているわけではなく、疲労の感じ方の個人差などについても原因はよくわかっていない。今後の3D映像の普及のためにも、生体影響に関する更なる研究が必要である。また同時に、より疲れにくい立体映像方式や撮影法の開発も期待される。

本稿の執筆にあたり、3Dの映像酔いに関してご助言いただいた新潟大学名誉教授(現：科学技術振興機構さきがけ「脳情報の解釈と制御」技術参事)の板東武彦先生に深謝する。また、本稿の執筆は(独)情報通信研究機構(NICT)の補助を受けて行った。(2010年11月30日受付)

〔文 献〕

- 1) 日本視覚学会編：“視覚情報処理ハンドブック”，朝倉書店（2000）
- 2) S. Yano, S. Ide, T. Mitsuhashi, H. Thwaites: "A Study of Visual Fatigue and Visual Comfort for 3D HDTV/HDTV Images", *Displays*, 23, pp.191-201 (2002)
- 3) Y. Okada, K. Ukai, J.S. Wolfsohn, B. Gilmartin, A. Iijima, T. Bando: "Target Spatial Frequency Determines the Response to Conflicting Defocus- and Convergence-Driven Accommodative Stimuli", *Vision Res.*, 46, pp.475-484 (2006)
- 4) D.M. Hoffman, A.R. Girshick, K. Akeley, M.S. Banks: "Vergence-Accommodation Conflicts Hinder Visual Performance and Cause Visual Fatigue", *J. Vision*, 8, pp.1-30 (2008)
- 5) K. Ukai, P.A. Howarth: "Visual Fatigue Caused by Viewing

- Stereoscopic Motion Images: Background, Theories and Observations", *Displays*, 29, pp.106-116 (2008)
- 6) M. Lambooi, W. IJsselstein, M. Fortuin, I. Heynderickx: "Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review", *J. Imag. Sci. Tech.* 53, pp.030201-1-030201-14 (2009)
- 7) C.M. Schor: "A Dynamic Model of Cross-Coupling Between Accommodation and Convergence: Simulations of Step and Frequency Responses", *Optometry and Vision Science*, 69, pp.258-269 (1992)
- 8) 比留間伸行, 福田忠彦: “調節応答から見た両眼融合式立体画像の観視条件”, *信学論D-II, J73-D-II*, pp.2047-2054 (1990)
- 9) 江本正喜, 正岡顕一郎, 山之上裕一, 菅原正幸, 野尻裕司: “ステレオディスプレイ観視時の水平両眼視差と視覚疲労”, *VISION*, 17, 2, pp.101-112 (2005)
- 10) K. Ukai, P.A. Howarth: "Visual Fatigue Caused by Viewing Stereoscopic Motion Images: Background, Theories and Observations", *Displays*, 29, pp.106-116 (2008)
- 11) F.W. Campbell: "The Depth of Field of the Human Eye", *Journal of Modern Optics*, 4, pp.157-164 (1957)
- 12) W.N. Charman, H. Whitefoot: "Pupil Diameter and Depth-of-Field of Human Eye as Measured by Laser Speckle", *Optica Acta*, 24, pp.1211-1216 (1977)
- 13) Y. Nojiri, H. Yamanoue, A. Hanazato, F. Okano: "Measurement of Parallax Distribution and Its Application to the Analysis of Visual Comfort for Stereoscopic HDTV", *Proc. SPIE*, 5006, pp.195-205 (2003)
- 14) S. Yano, M. Emoto, T. Mitsuhashi: "Two Factors in Visual Fatigue Caused by Stereoscopic HDTV Images", *Displays*, 25, pp.141-150 (2004)
- 15) F. Speranza, W.J. Tam, R. Renaud, N. Hur: "Effect of Disparity and Motion on Visual Comfort of Stereoscopic Images", *Proc. SPIE*, 6055, pp.60550B-1-10 (2006)
- 16) I.P. Howard: "Seeing in Depth, Vol.1, Basic Mechanisms", *I Porteous* (2002)
- 17) C.M. Schor, I.C. Wood, J. Ogawa: "Binocular Sensory Fusion is Limited by Spatial Resolution", *Vision Res.* 24, pp.661-665 (1984)
- 18) P. Burt, B. Julesz: "A Disparity Gradient Limit for Binocular Fusion", *Science*, 208, pp.615-617 (1980)
- 19) R. Jones, G.L. Stephens: "Horizontal Fusional Amplitudes. Evidence for Disparity Tuning", *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 30, pp.1638-1642 (1989)
- 20) 江本正喜, 矢野澄男, 長田昌次郎: “立体画像システム観視時の融像性輻輳限界の分布”, *映情学誌*, 55, pp.703-710 (2001)
- 21) M. Wöpkling: "Viewing Comfort with Stereoscopic Pictures: An Experimental Study on the Subjective Effects of Disparity Magnitude and Depth of Focus", *J. Int. SID*, 3, 3, pp.101-103 (1995)
- 22) 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)
- 23) F.L. Kooi, A. Toet: "Visual Comfort of Binocular and 3D Displays", *Displays*, 25, pp.99-108 (2004)
- 24) M. Emoto, Y. Nojiri, F. Okano: "Changes in Fusional Vergence Limit and Its Hysteresis after Viewing Stereoscopic TV", *Displays*, 25, pp.67-76 (2004)
- 25) 氏家弘裕: “知っておきたいキーワード 映像酔い”, *映情学誌*, 61, pp.1122-1124 (2007)
- 26) J.T. Reason, J.J. Brand: "Motion Sickness", London, Academic Press (1975)
- 27) 3DC安全ガイドライン, <http://www.3dc.gr.jp/jp/>



みずかみ はるき
水科 晴樹 2003年、東京工業大学大学院博士課程修了。同年、高知工科大学教育講師。2004年、カナダ・ヨーク大学博士研究員。2007年、東京工業大学産学官連携研究員。2009年、ATRメディア情報科学研究所研究員。視覚心理物理学、立体映像の評価に関する研究に従事。博士(工学)。正会員。

応用2：偏光方式3Dディスプレイ

(正会員) 大田原 一成[†]

1. ま え が き

3D映像を表示する方法は、長年にわたりさまざまな仕組みが考えられ進化を遂げてきた¹⁾²⁾。昨今の3Dブームの再来は、3D映画の普及が原動力になっている。3D映画は両眼視差により立体視しており、視差に対応した左右の映像を左目右目に各々分離して導くのに幾つかの異なる表示方式が用いられている。偏光を用いるIMAX方式³⁾、RealD方式⁴⁾、波長フィルタを用いるDolby方式⁵⁾、時分割表示するXpanD方式⁶⁾などがある。

薄型ディスプレイにおいても3D表示技術の開発が進み、液晶ディスプレイでは、後述するパターンリタータを用いる偏光方式⁷⁾や、左右の映像を順次切替えて表示し(フレームシーケンシャル表示)、波長フィルタで分離するIN-FITEC方式⁸⁾が開発された。一方、プラズマディスプレイ⁹⁾や液晶ディスプレイで¹⁰⁾¹¹⁾、フレームシーケンシャル表示し、シャッター眼鏡で3D視するアクティブシャッター方式が開発され、3Dテレビとして販売されている。

本稿では、両眼視差に対応した左右の映像を、偏光を利用して左右の目にそれぞれ導く“偏光方式3Dディスプレイ”について解説する。最初に、偏光方式を理解するため、映像表示技術から少し離れるが、偏光に関する光学的知識の整理を行う。次に、偏光方式3D液晶ディスプレイで、実用的に使われているパターンリタータ方式を中心に説明する。

2. 偏 光

光は電磁波であり、電場が振動した波として進行する。その際、光の電場ベクトルが一定方向に揃っている状態を偏光という。電場の振動が直線的で一つの面に特定される状態を直線偏光、振動方向が回転しながら進み楕円になる

状態を楕円偏光、楕円偏光のうち振動の軌跡がちょうど円になる状態を円偏光という。

2.1 偏光と身近な現象の関わり

偏光の性質を理解するために、偏光を得る方法と身近な現象の関わりについて調べてみよう。偏光を得る方法には、

① 吸収、② 反射、③ 散乱がある。吸収で偏光を得るには、物質の方向により光の吸収状態が異なる二色性を利用する。ポリビニルアルコールをヨウ素で染色して延伸すると、それらは延伸方向に並び、二色性によって延伸方向の光を選択的に吸収する。1932年にE.H. Landが発表した実用的なこの製法で、大面積で作れるようになったシート状の偏光板は、後に社名となるPolaroidという名で普及した。基本構成の同じ偏光板が、現在も液晶ディスプレイに使われている。

2枚の偏光板を重ねると、その方向にしたがって光の強度を制御できる(図1)。偏光子と検光子が平行にある平行ニコルで光強度は大きく明状態となり、検光子を90°回転させた直交ニコルで暗状態となる。2枚の偏光板を透過する光強度は、マリュースの法則にしたがって検光子の回転

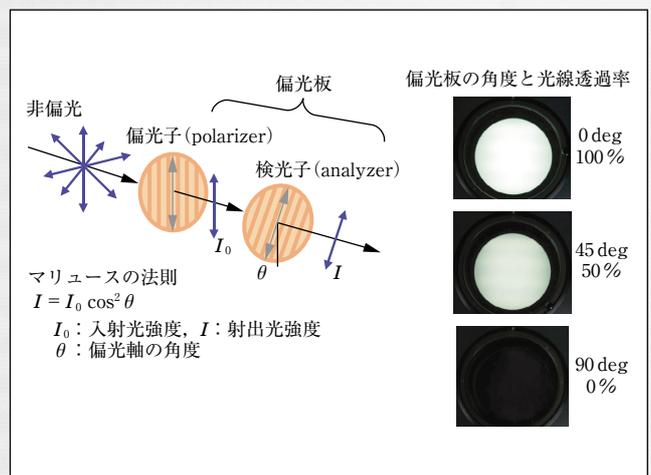


図1 2枚の偏光板による光強度の制御

[†] 日本ビクター株式会社 ビジネスソリューション事業部 プレゼンテーションシステム部

"3D That Everyone Understands (4): Polarized 3D Display" by Kazushige Ohtawara (Presentation System Business Unit, Business Solution Division, Victor Company of Japan Ltd., Yokohama)

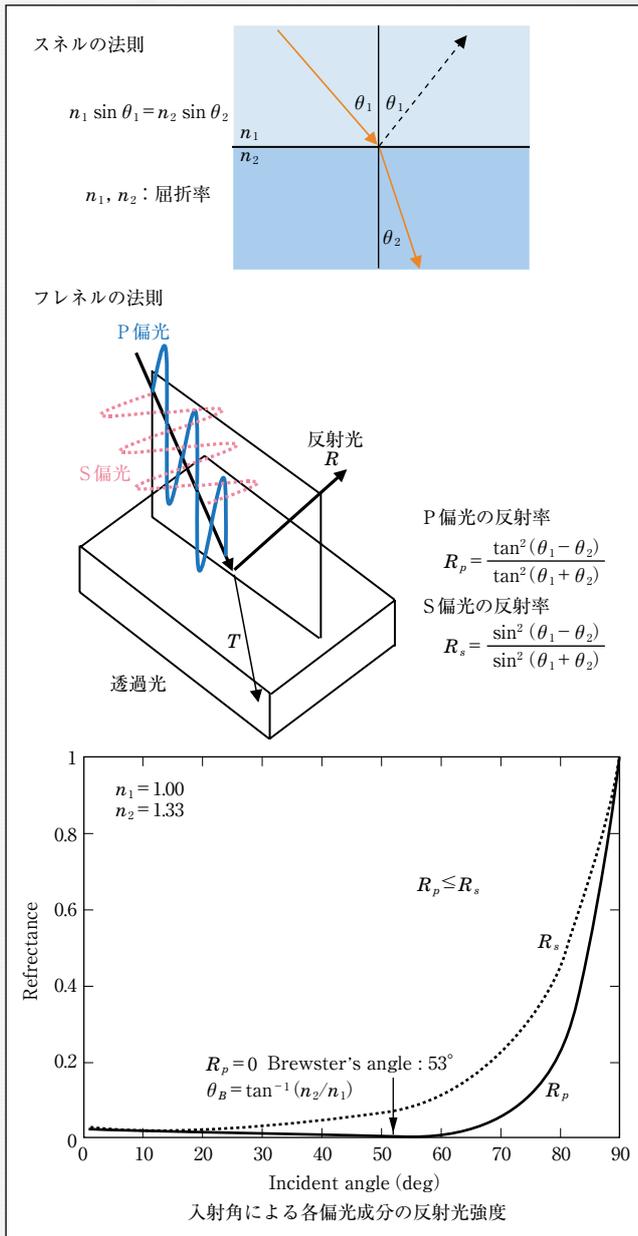


図2 反射による偏光

とともに変化する。偏光を用いた映像表示方式で、画像の白黒に対応した明暗を出すのにこの原理が用いられる。

次に反射で偏光を得る方法を見てみよう。ある面に光が入射する時、入射光と反射光が作る面に対し電場の振動方向が平行な時、P (Parallel) 偏光といい、垂直な時、S (Senkrecht) 偏光という。異なる屈折率の媒体の中における光の進行方向は、スネルの法則で導かれ、偏光が屈折率の異なる界面で透過、反射する割合は、入射角との関係からフレネルの法則で与えられる(図2)。入射角を変化させた時、P偏光の反射率がゼロになる角度をブリュースタ角という。空気中からの光が水で反射する場合、ブリュースタ角は 53° となる。車の運転や魚釣りに使われている偏光サングラスは、ブリュースタ角でP偏光が反射しないことを利用している(図3)。P、S両成分を含む非偏光な自然

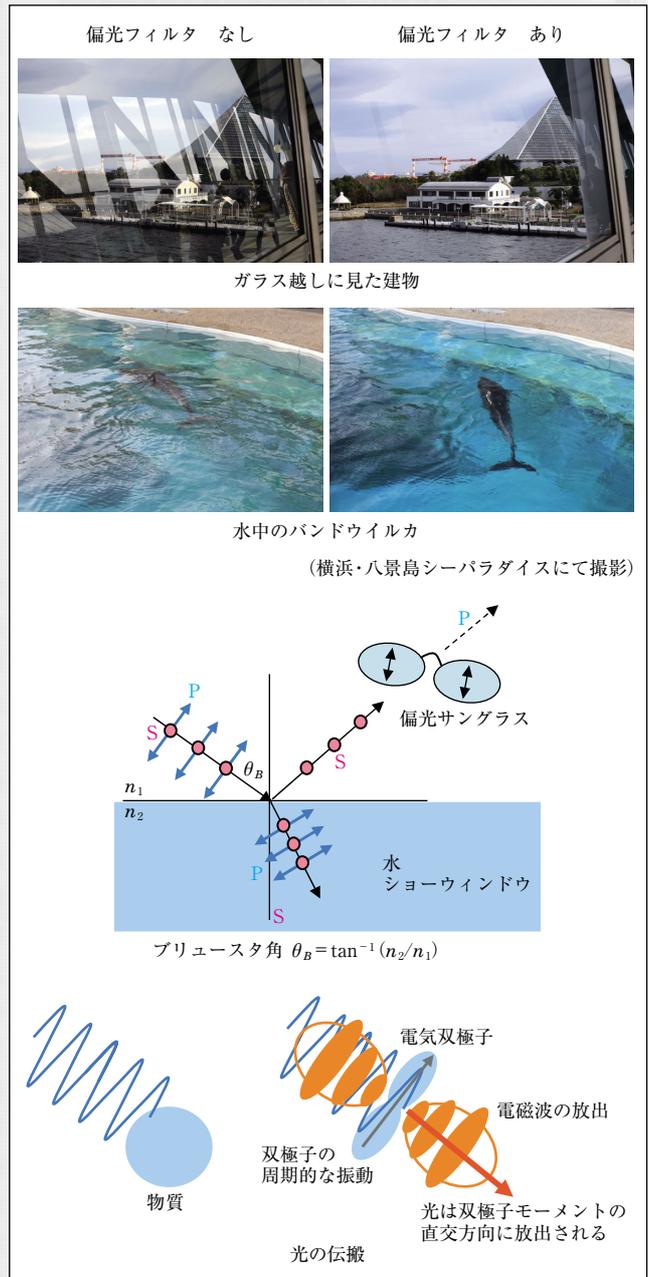


図3 ブリュースタ角の利用

光は、路面、水面やショーウィンドウのガラスなどで反射するが、ブリュースタ角ではS偏光のみが反射される。観察者は、P偏光のみを通す縦に偏光透過軸を持つ偏光フィルタでできたサングラスをかけることで、界面からの反射光を見ることなく眩しさを防ぎ、水中を見たり、ガラス越しに中の様子を見ることが出来る。光は、電場により物質を分極して電気双極子の振動を誘起し、双極子の振動によって電磁波を放出するのを繰り返すことで伝搬している。そのため、電場の振動と平行な方向に電磁波が放出されない(図3)。P偏光が反射しないのは、ブリュースタ角で透過光と反射光のなす角が 90° となり、透過光の双極子の振動方向は反射光の進行方向と平行になって、反射光の進む方向に光を放出しないためである。

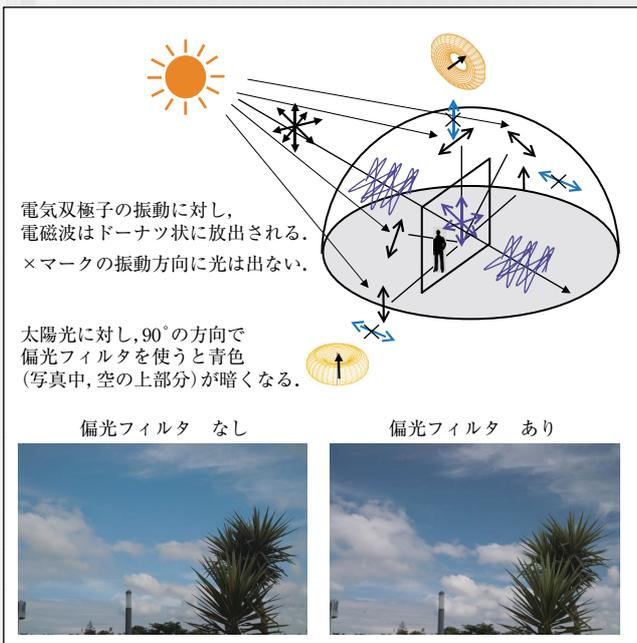


図4 散乱による偏光

次に、散乱で偏光を得る方法を見てみよう。太陽からの光は地球上で細かな塵などの粒子により散乱する。この時、光の波長に対して小さい粒子による散乱は、レイリー散乱理論に従う。レイリー散乱の度合は波長の4乗に反比例するので、短い波長ほど散乱が強く、可視光では青色の散乱が大きい。ここで、太陽光が進む方向の断面における挙動を考える。光の電場は断面の面内で振動し、そこから誘起されて放出される電磁波は、面の端面と平行な振動だけが放出される結果、断面方向から見ると偏光した光が見える。この様子を図4に示す。太陽を横にして立つと、正面から届く光には偏光が多いことになる。これは、風景写真の撮影に利用される。太陽を横にして、青空のある風景を撮影すると、レイリー散乱された青色の空は偏光成分が多いので、カメラレンズに付けた偏光フィルタで吸収されて、暗く深い青として写り、対照的に白い雲が引き立って、コントラストが高く、見栄えの良い写真が撮影できる(図4)。

蜜蜂は、眼に偏光を感知する構造を持ち、偏光でわかる太陽の位置から方角を知るとされている。他にも目的が明らかになっていないものの、黄金虫のように表皮が円偏光を反射したり、偏光を感知する生物が知られている。人間も、網膜中心部にある黄斑付近の色素が二色性を持つことから、僅かに偏光を感知できる。

2.2 偏光の記述

波としての光は、図5に示した基本式で表される。光は進行方向に横波であるから、z方向を進行方向として光の電場ベクトルをx, y成分に分けて考える。偏光状態の違いは、各成分の振幅と位相差によって生じ、振幅や位相差が異なる波の合成からなる電場ベクトルの軌跡が、直線、円、楕円となる時、それぞれが直線偏光、円偏光、楕円偏光に

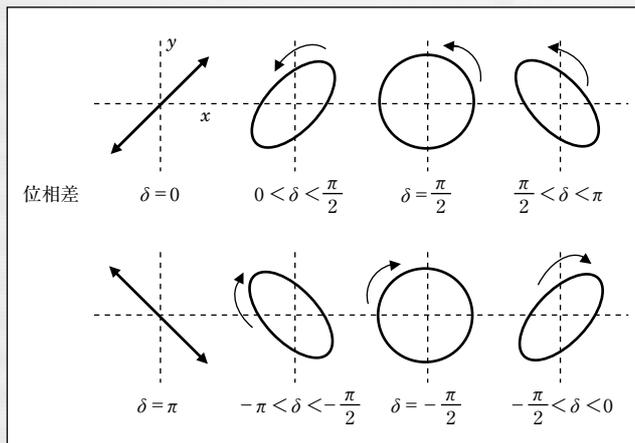


図6 位相差の違いによる楕円偏光の変化

なる。電場ベクトルのx, y成分に位相差を与えて式を纏めると、各偏光状態は図5に示すように記述される。x成分とy成分の位相差が π の整数倍である時は、直線偏光となる。この時、振幅が異なっても直線偏光になる。また、x, yの振幅が同じで、位相差が $(2m+1)\pi/2$ の時(m は整数)、円偏光になる。二つの光波の位相を合わせられるなら、振幅が同じで位相が $\pi/2$ ずれ、互いに直交した直線偏光を重ねると円偏光になる。また、振幅が同じ右円偏光と左円偏光を位相を合わせて重ねると直線偏光になる。振幅と位相差が上記の特定値でない時は、楕円偏光になる。楕円偏光の特殊な場合が、円偏光であり、直線偏光である。位相差にしたがって偏光状態が変わる様子を図6に示す。ここで、光学と電磁気学では、円偏光と楕円偏光の回転方向に対する決め方の慣習に違いがあることに注意しなければならない¹²⁾。多くの光学の教科書は、光の進行方向から-z方向を眺めて(受光側から光源側を見て)時計回りを右回りとしている。

2.3 位相差板の機能

光は物質と相互作用し、電子分極を引きつりながら進むため、光の速度は遅くなる。物質中の光速に対する真空中の光速の比をその物質の屈折率という。物質の構造により誘電異方性があると電子分極が異なり、物質の向きによって屈折率の異なる複屈折が生じる。

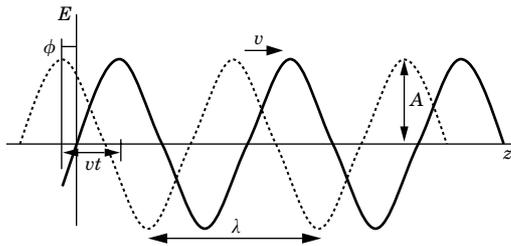
位相差板は、複屈折性を利用して偏光状態を制御するために用いられ、高分子フィルムを延伸させることや液晶ポリマを配向させることで得られる。配向方向に屈折率が大きい分子の場合は、延伸した方向に分子が並んで屈折率が大きくなり、光の進行が遅くなる。その方向を遅相軸といい、直交方向を進相軸という。工業的に一軸だけでなく二軸延伸も行われ、多様な複屈折を持つ位相差板が作られる。位相差板の機能を見るために、1/4波長板に直線偏光を入射する場合を考えよう(図7)。光は遅相軸であるy方向で進行が遅れ、位相差板の出口でx方向に対しちょうど $\pi/2$ 位相がずれる。そのため、射出した光の振動は円の軌跡を

光の基本式(平面波, 単色光)

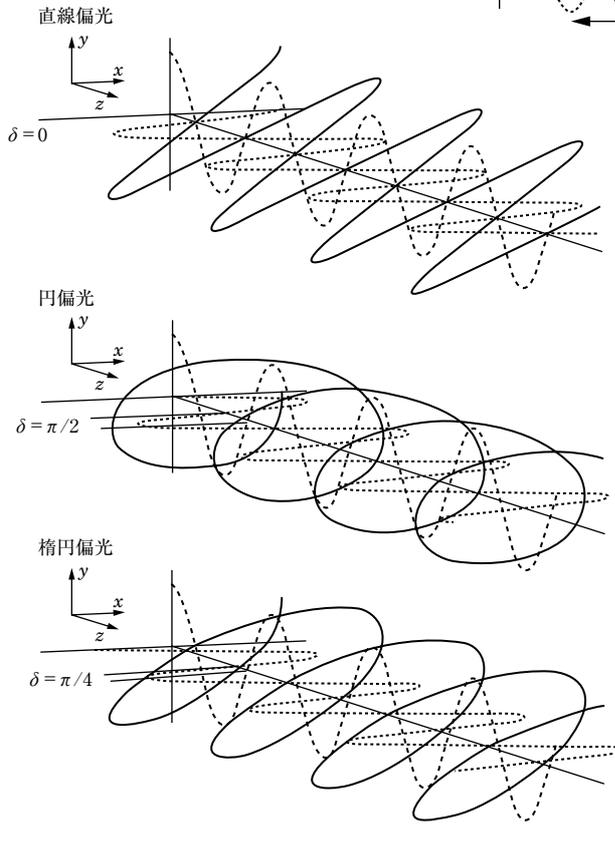
$$E(z, t) = A \cos \left[\frac{2\pi(z-vt)}{\lambda} + \phi \right]$$

$$= A \cos(kz - \omega t + \phi)$$

$$E = A \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)$$



A: 振幅
 λ: 波長[m]
 φ: 位相
 v: 速度[ms⁻¹]
 t: 時間[sec]
 k: 波数(k=2π/λ)
 ω: 角振動数[rad s⁻¹]



$$E_x = A_x \cos(kz - \omega t + \delta_x)$$

$$E_y = A_y \cos(kz - \omega t + \delta_y)$$

$$\delta = \delta_y - \delta_x \text{ (位相差)}$$

$$\delta = m\pi \quad (m: \text{整数})$$

$$\frac{E_y}{E_x} = \frac{A_y}{A_x}$$

$$\delta = \frac{2m+1}{2} \pi \quad (m: \text{整数})$$

$$E_x^2 + E_y^2 = A^2$$

振幅, 位相差(δ)が特定の値でない場合

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{A_x}\right)\left(\frac{E_y}{A_y}\right) \cos \delta = \sin^2 \delta$$

図5 光の基本式と偏光の記述

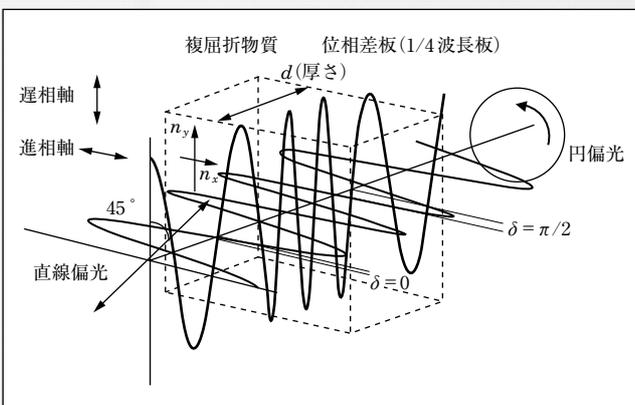


図7 位相差板の機能

このように位相差板は、偏光状態を制御することができ、1/4波長板は位相差がπ/2なので、直線偏光を円偏光に変換し、反対に円偏光を直線偏光に変換する。また、1/2波長板は位相差がπなので、円偏光や楕円偏光に対して偏光の回転方向を反転させ、直線偏光に対して偏光軸を90°回転させる。なお、市販されているセロファンテープは、1/2波長板になることが知られており、位相差板の機能を簡単に試すのに都合が良い。

3. 偏光方式3Dディスプレイ

偏光を利用する3Dディスプレイは、直視型では、液晶ディスプレイ¹³⁾、有機ELディスプレイ¹⁴⁾、LEDディスプレイ¹⁵⁾が開発されており、投射型では、表示デバイスにDMD(Digital Micromirror Device)を用いたリアプロジェクションディスプレイや¹⁶⁾¹⁷⁾、LCOS(Liquid Crystal

描き、円偏光となる。これは前節で説明した直線偏光と円偏光の記述からも確認できる。

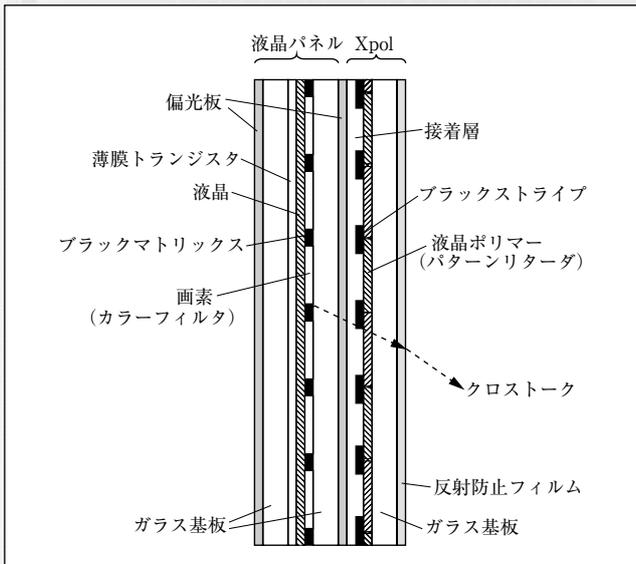


図8 Xpol®方式3D液晶ディスプレイの構造

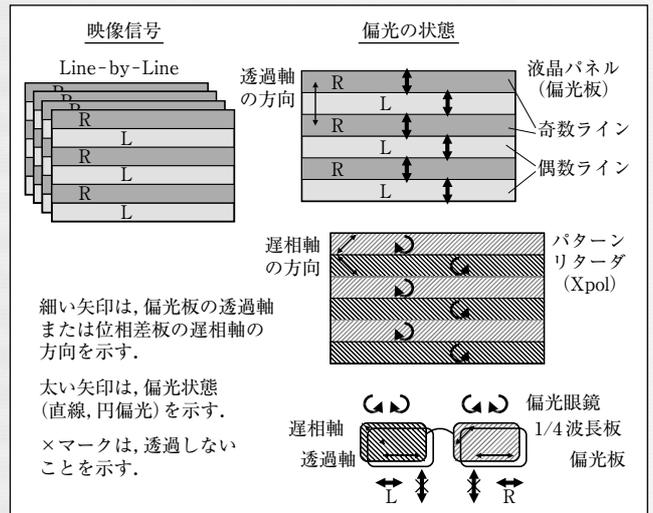


図9 Xpol®方式による3D視の原理

on Silicon)¹⁸⁾を用いた4K2Kの高解像度な3D映像を表示するプロジェクタ¹⁹⁾が開発されている。ここで、液晶ディスプレイに絞り、業務用3DモニターやノートPCなどに最も使われているパターンリターダ方式について説明する。

3.1 パターンリターダ方式

3D表示する左右の映像に対応した液晶パネルの画素に対して、パターンを形成した位相差板（パターンリターダ）を設けて光の偏光状態を変え、偏光フィルタでできた眼鏡で左右の映像光を各々の目に分離して導く方式をパターンリターダ方式という。現在、製品化されている偏光方式3D液晶ディスプレイの多くで採用されているパターンリターダは、有沢製作所により開発実用化された位相差値の制御性と量産性の高いXpol®方式²⁰⁾²¹⁾である。図8にXpol®の構造と3D液晶ディスプレイの構成を示す。Xpol®は次のように光配向法で作製される²²⁾。ガラス基板上に形成した光配向膜に、液晶パネルの画素に対応したストライプパターンを、偏光した光で各々露光し、互いに配向方向を直交させた配向膜を形成する。この膜上に、複屈折性を持ち紫外線で硬化する液晶ポリマーを形成してストライプ毎に配向させた後、紫外線硬化する。このように、設計した位相差値を持つパターンリターダを形成する。最後に、液晶パネルの画素とパターンリターダを高精度にアライメントして貼り合わせて3D液晶ディスプレイを構成する。

Xpol®方式による3D視の原理を図9に示す。液晶パネルの奇数ラインに右の映像、偶数ラインに左の映像を表示し（ラインバイライン表示）、パターンリターダによって左右映像光の偏光状態を変え、偏光眼鏡で左右の映像を分離して3D視する。パターンリターダの位相差は1/4波長とし、液晶パネルの奇数ラインと偶数ラインに対してリターダの遅相軸を直交させている。液晶パネルの奇数ラインからの直線偏光は、対応するパターンリターダで右円偏光と

なって射出する。同様に偶数ラインからは、左円偏光が射出する。観察するための眼鏡は、左右で遅相軸が互いに直交した1/4波長の位相差板と偏光板を重ねた円偏光フィルタで作られている。

眼鏡の位相差板の遅相軸をXpol®のリターダと同じ向きに配置すると、Xpol®から射出した円偏光は、位相差板でさらに1/4波長分の位相が遅れ、液晶パネルから考えると1/2波長分遅れたことになる。一方、Xpol®のリターダと直交する向きに配置すると、位相が1/4波長分だけ戻り、液晶パネルの射出時と同じになる。直線偏光は、1/2波長の位相差板を通ると振動方向が90°回転し、偏光軸は垂直方向から水平方向になることから、続いて眼鏡に重ねた偏光板（水平方向を透過軸とする）では、Xpol®のリターダと眼鏡の位相差板で、合わせて1/2波長遅れた光だけが透過し、位相が戻った光は透過しない（液晶パネルの偏光透過軸が垂直方向である場合）。このように構成することで、右の眼鏡では、右の映像を表示した奇数ラインからの右円偏光が水平の直線偏光になって光が透過し、左の映像からの左円偏光は垂直の直線偏光になって透過しない。反対に左の眼鏡では、左の映像を表示した偶数ラインからの左円偏光だけが水平の直線偏光になって光を透過する。このようにして、左右の映像を光学的に分離し、各々の目に導いて3D視する。

パターンリターダの位相差を1/2波長とし、3D液晶ディスプレイからの射出光を直線偏光とする場合は、偏光眼鏡は直線偏光フィルタとするが、顔を左右に傾けると眼鏡が回転し、左目に右（右目に左）の映像光が漏れて入るクロストークが大きくなり3D視が困難になる。パターンリターダの位相差が1/4波長で、円偏光として射出する3D液晶ディスプレイでは、顔を傾き3D液晶ディスプレイと偏光眼鏡のなす角度が変化しても、その影響を最小限にでき

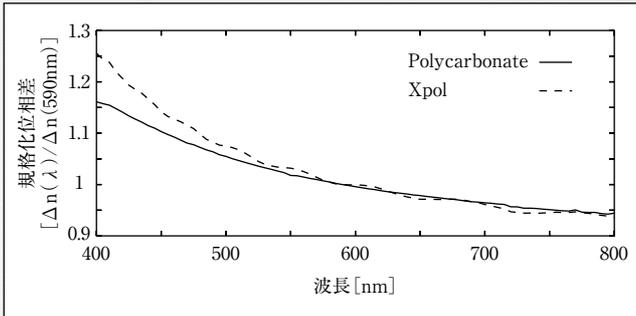


図10 リターダの波長分散

る利点がある。

3.2 パターンリターダの設計と3D特性

パターンリターダとして、最も実用的に使われているXpol®の設計と、Xpol®を用いた3D液晶ディスプレイの特性について述べる。液晶ポリマの屈折率と膜厚で決まるXpol®の位相差値は、通常、波長500nmの光に対し、1/4波長である125nmに精密に制御されて形成されている。液晶ポリマの屈折率には波長分散があり、波長により位相差が1/4波長からずれる。そのため、眼鏡に用いる1/4波長の位相差板は、液晶ポリマの屈折率の波長分散に近いポリカーボネート樹脂から作られる。図10にXpol®で使われるパターンリターダとポリカーボネートで作られた位相差板の波長分散を示す*。

ここで、他のパターンリターダ方式の例を図11に示す²³⁾。ガラス基板全面に1/4波長のリターダを形成した後、液晶パネルの奇数ラインのみに対し1/2波長のパターンリターダを設けて、左右の円偏光を得る構成としている。この場合、Xpol®と同様にディスプレイから左右の円偏光を射出するが、偶数ライン側の光は1/4波長のリターダを通るのに対し、奇数ライン側は3/4波長となるので、波長分散の影響がさらに加算される。そのため、眼鏡に用いる位相差板は左右同じ1/4波長板にできず、パターンリターダと同様に波長分散を補償するよう左右で異なるものが必要になる。

* 本データは、有沢製作所の提供による。

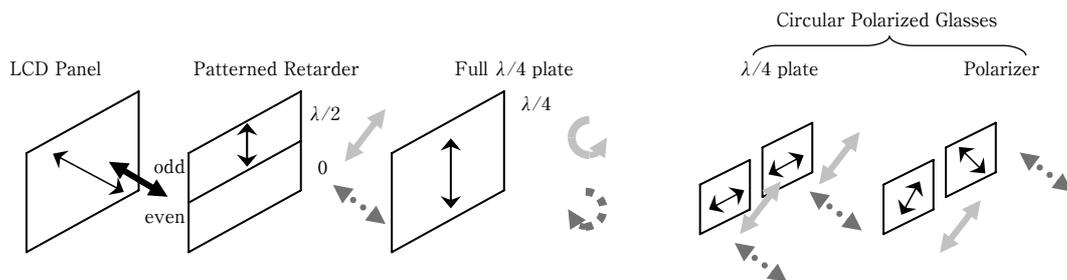
液晶ディスプレイの偏光透過軸の角度や、パターンリターダの位相差設計値、リターダ材料の屈折率の波長分散、パターンリターダの構造などにより、偏光眼鏡はリターダに対応した光学設計がなされる。このため、偏光方式の3D液晶ディスプレイと観察するための偏光眼鏡は、設計が互いに適合したものでなければならず、光学設計が異なるシステムでは、左右の映像がクロストークしたり色が変わって見えることが起きる。眼鏡は持ち運びでき、個人で偏光眼鏡を持つ場合が増えていることから、混在して使用されることが起こり得るので注意が必要である。なお、3D映画館のシステムと光学設計が同じ3D液晶ディスプレイの眼鏡には、互換性のあるものがあり、明示されている。

図8に示す構造でわかるように、Xpol®は液晶パネルに貼り合わせるため、液晶パネルのガラス基板の厚さにより、液晶の画素とパターンリターダに距離が生じる。そのため、観察者の適正な視点から見た時に、画素とパターンリターダの位置を一致させるよう、視点から求めたリターダのパターンピッチを設計する。液晶の画素とリターダのパターンピッチは、画面中心で同じとし、画面上下に向かうに従いピッチを狭める。

隣接画素からのクロストーク光の様子を図8に点線で示す。このクロストーク光を遮るために、パターンリターダ間にブラックストライプを設けると、3Dクロストークが低い状態のまま垂直視野角を広げることができる。ブラックストライプ幅を画素ピッチの50%として形成した時の46インチ3D液晶ディスプレイのクロストークを図12に示す。ここで、クロストークは、全画面を白画像表示した時の輝度に対し、左右の白黒画像を各々表示し、偏光眼鏡越しに測定した輝度比として測定しているが²⁴⁾、現在、3Dクロストーク測定および算出法の標準化が進行中であり²⁵⁾、次式で求める。

$$C_R = \frac{Y_{RBLW}^R - Y_{RBLB}^R}{Y_{RWLB}^R - Y_{RBLB}^R}, C_L = \frac{Y_{RWLB}^L - Y_{RBLB}^L}{Y_{RBLW}^L - Y_{RBLB}^L}$$

ここで、 C_R は右目における左画像のクロストーク、 C_L は左目における右画像のクロストーク、 Y^R 、 Y^L は右目側、左



面内の矢印は、偏光板の透過軸または位相差板の遅相軸の方向を示す。
空間の矢印は、偏光状態(直線偏光,円偏光)を示し、実線は奇数ライン、点線は偶数ラインからの光を示す。

図11 1/2波長板と1/4波長板を用いるパターンリターダ方式

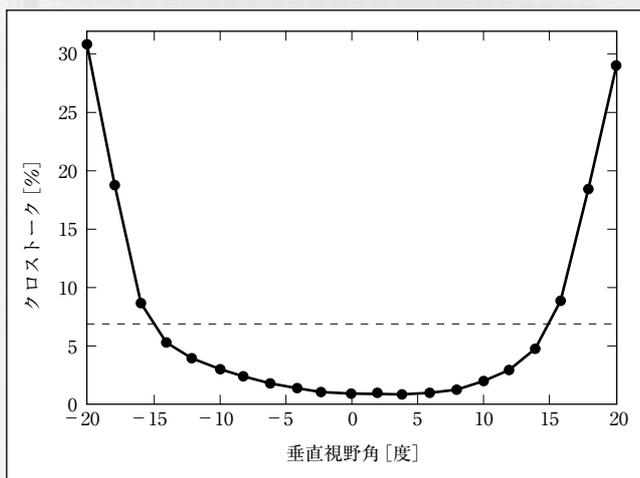


図12 3D液晶ディスプレイのクロストーク

目側の偏光眼鏡を通した輝度測定値、添字**RBLW**、**RWLB**、**RBLB**は左目用と右目用の映像信号の状態を表し、各々右黒左白、右白左黒、右黒左黒(全黒)を示す。正面近傍の角度では1%以下であったクロストークは、垂直視野角が15°を超えると急増し、3D視できる限界とされる7%を超える。しかしながら、表示画面高さの3倍の距離に置く適正な視点では、15°の垂直視野角があれば、画面の上下端まで視点を動かしても3D視できる範囲に入り、実使用上ほぼ問題がなくなる²¹⁾。

ブラックストライブの幅は、クロストークと垂直視野角から決められるが、実用的に十分な3D画像を得るために画素ピッチの50%程度とすると、トレードオフとして輝度の低下が起こる。3D視をする際は、偏光方式はアクティブシャッタ方式に比べ、開口率50%のブラックストライブを設けても、システム全体の光線透過率が高く明るい。2D表示時には、シャッタ方式に比べ3D表示にのみ必要な遮光部により、輝度が低下することになる。

3.3 進化するパターンリターダ方式

パターンリターダ方式は、左右の映像を分離するのに映像ライン毎に形成したパターンで空間分割する構造のため、垂直解像度が半分になる。これを回避し垂直解像度を向上する方法が開発されている。

図13にHR-Xpol[®]の概要を示す²⁶⁾。この液晶ディスプレイの光学構造は通常のXpol[®]方式と同じであるが、120Hz(倍速)駆動の液晶パネルを用いて60Hz毎に映像ラインの表示を左右で反転させ、それに同期して、1/2波長の位相差を動的に切替えるアクティブ偏光眼鏡で映像を見る。最初のフレームで(1/60秒)、右の映像を表示する奇数ラインから射出される右円偏光は、右の眼鏡で見ることができる。次のフレームで、右の映像を偶数ラインに切替えて表示し、射出される左円偏光が、右の眼鏡で見られるようアクティブ偏光眼鏡で位相差を切替え、円偏光の回転方向を反転させる。

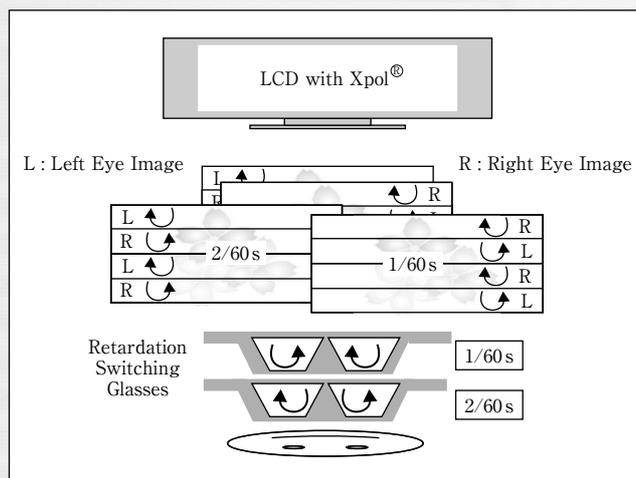


図13 HR-Xpol[®]方式

これにより、パターンリターダで空間分割された映像を順次表示し、空間分割前にあたる元の垂直解像度を実現している。アクティブシャッタ方式やアクティブリターダ方式²⁷⁾の場合は、左右の映像を時分割で表示するため、左右を同時視できないが、HR-Xpol[®]方式は、時分割で半分の解像度の映像を補完しながら表示し、左右の映像を同時視するため、高速に動く映像の動画飛びが少なく感じられるとともに、両目で同時にディスプレイの明るさを感じるため、視刺激による人体への影響が少なくなることも期待される。倍速駆動の液晶パネルは、応答速度改善のため市場に普及しており、大規模な液晶パネル開発を行わずに構成できるのも利点である。

前節で述べたブラックストライブについては、液晶パネル画素のサブピクセル駆動により、3D表示時に画素の一部をブラックストライブとして表示する方法が開発され²⁸⁾、2D表示時の輝度低下の課題を克服している。さらに、3D液晶ディスプレイ向けに液晶パネルのセル構造を設計し、パターンリターダをインセル化した液晶パネルが開発されている²⁹⁾。3D表示用に液晶パネル設計と製造が行われることは、性能面から見て理想的である。

これまで述べてきたように、パターンリターダと液晶パネルの構造は関わりが深く、適切な液晶パネルの設計や選択とそれに対応したパターンリターダの設計を行うことで、より高品位な偏光方式3D液晶ディスプレイを得ることができる。

4. おすび

現在、3D表示方式が技術競争をしている過渡期と考えられるが、相次ぐ3D製品のリリースで民生映像機器として使われる機会が増し、従来にない活用方法が発掘されることで、各方式の特長が活かされ3D応用の裾野が広がっていくものと考えている。

今後、表示に纏わる技術開発のみならず、撮像技術や

2D-3D変換³⁰⁾³¹⁾, AR (Augmented Reality)³²⁾と
いった情報処理技術との融合や、信号、伝送、記録の技術
開発と規格標準化、人体に対する影響の研究が並行して進
むことで、3Dアプリケーションの更なる拡大と産業創生
の可能性が期待できる³³⁾。ディスプレイの原点であるその
場で見るかのような“超臨場感”を達成するために、3D技
術がさらに進化してその一翼を担わなければならない。

(2011年1月20日受付)

〔文 献〕

- 1) 尾上, 池内, 羽倉編集: “3次元映像ハンドブック”, 朝倉書店 (2006)
- 2) 増田: “3次元ディスプレイ”, 産業図書 (1990)
- 3) <http://www.imax.com/>
- 4) <http://www.reald.com/>
- 5) <http://www.dolby.com/consumer/understand/cinema/dolby-3d.html>
- 6) <http://www.xpandcinema.com/>
- 7) C.H. Tsai, W.L. Chen and W.L. Hsu: "The Pursuit of High-Definition 3D Display Technology", SID 08 Digest, pp.456-459 (2008)
- 8) A. Simon, M.G. Prager, S. Schwarz, M. Fritz and H. Jorke: "Recent Progress in Interference-filter-based Stereoscopic 3D LCD", SID 10 Digest, pp.867-869 (2010)
- 9) M. Ishizuka, H. Tachibana, T. Kawase, M. Kimura, Y. Shiozaki, T. Origuchi, H. Shoji, S. Kigo and Y. Muto: "Development of High-Performance Panel and High-Speed 3D Driving Technology for World's First Full HD 3D Plasma Displays", SID 10 Digest, pp.599-602 (2010)
- 10) S.S. Kim, B.H. You, H. Choi, B.H. Berkeley, D.G. Kim and N.D. Kim: "World's First 240Hz TFT-LCD Technology for Full-HD LCD-TV and Its Application to 3D Display", SID 09 Digest, pp.424-427 (2009)
- 11) D. Suzuki, T. Fukami, E. Higano, N. Kubota, T. Higano, S. Kawaguchi, Y. Nishimoto, K. Nishiyama, K. Nakao, T. Tsukamoto and H. Kato: "Crosstalk-Free 3D Display with Time-Sequential OCB LCD", SID 09 Digest, pp.428-431 (2009)
- 12) 小林: “液晶ディスプレイの光学 基礎編 (その10)”, 月刊ディスプレイ, 11, 12, pp.98-101 (2005)
- 13) 日本ビクター: “3D LCD Monitor”, <http://www.jvc-victor.co.jp/pro/monitor/3d/>
- 14) B.W. Lee, I.H. Ji, S.M. Han, S.D. Sung, K.S. Shin, J.D. Lee, B.H. Kim, B.H. Berkeley and S.S. Kim: "Novel Simultaneous Emission Driving Scheme for Crosstalk-free 3D AMOLED TV", SID 10 Digest, pp.758-761 (2010)
- 15) Sony: “高さ10.8m, 幅19.2mの偏光式LED 3Dパブリックディスプレイの展示”, CEATEC (2010)
- 16) 三菱電機: “Laser TV”, <http://www.mitsubishielectric.co.jp/laservue/>
- 17) C.H. Tsai, H.Y. Lin and C.H. Tsai: "A Minimum Dispersion Stereoscopic Rear Projection Display", SID 06 Digest, pp.85-88 (2006)
- 18) S. Shimizu, Y. Ochi, A. Nakano and M. Bone: "Fully digital LCoS device for consumer applications", Journal of the SID, 13/1, pp.3-8 (2005)
- 19) JVC-Kenwood HD: "SIGGRAPH Asia 2009における展示", http://www.jvc-victor.co.jp/pro/video/4k2k_videocamera.html
- 20) 有沢製作所: “Xpol®”, <http://www.arisawa.co.jp/en/product/3d.html>
- 21) 松廣: “Xpol®とその3D-TVへの応用”, 日本液晶学会誌, 14, 4, pp.219-232 (2010)
- 22) 浦: “光配向技術の実用化とアプリケーション”, 光配向テクノロジーの開発動向, 第7章, pp.274-287, シーエムシー出版 (2010)
- 23) Y.J. Wu, Y.S. Jeng, P.C. Yeh, C.J. Hu and W.M. Huang: "Stereoscopic 3D Display Using Patterned Retarder", SID 08 Digest, pp.260-263 (2008)
- 24) Y. Yoshihara, H. Ujiike and T. Tanabe: "Crosstalk of Stereoscopic Display Using Patterned Retarder and Corresponding Glasses", Proc. 15th Int. Display Workshops (IDW' 08), pp.1135-1138 (2008)
- 25) 川島: “メガネ式3Dディスプレイの技術動向と今後の展開”, NEアカデミー発表資料 (Jan. 2010)
- 26) Y. Tamura, M. Oyamada, A. Yoshida, H. Aiba and K. Ohtawara: "Full HD 3D Display Using Stripe-patterned Quarter-wave Retarder Array and Retardation-switching Glasses", SID10 Digest, pp.874-877 (2010)
- 27) S.M. Jung, J.U. Park, S.C. Lee, W.S. Kim, M.S. Yang, I.B. Kang and I.J. Chung: "A Novel Polarizer Glasses-type 3D Displays with an Active Retarder", SID 09 Digest, pp.348-351 (2009)
- 28) H. Kang, S.D. Roh, I.S. Baik, H.J. Jung, W.N. Jeong, J.K. Shin and I.J. Chung: "A Novel Polarizer Glasses-type 3D Displays with a Patterned Retarder", SID 10 Digest, pp.1-4 (2010)
- 29) C.T. Lee, H.Y. Lin and C.H. Tsai: "Design and Fabrication of Wide-view In-cell Microretarder & Polarizer for Stereoscopic LCD", SID 10 Digest, pp.448-451 (2010)
- 30) K. Yamada, K. Suehiro and H. Nakamura: "Pseudo 3D image generation with simple depth models", 2005 Digest of Tech. Papers Int. Conf. Consumer Electronics (ICCE 2005), pp.277-278 (2005)
- 31) K. Yamada and Y. Suzuki: "Real-Time 2D-to-3D Conversion: Basic Concepts and Practical Use", Proc. 17th Int. Display Workshops (IDW' 10), pp.1273-1276 (2010)
- 32) 椎尾, 安村, 福本, 伊賀, 増井: “モバイル&ユビキタスイインタフェース”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 15, 3, pp.1-10 (2003)
- 33) 日本機械工業連合会: “平成16年度立体映像表示に関する調査研究報告書”, pp.177-178 (2004)



おおたわらかずしげ

大田原一成

1985年, 千葉大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, 日本ビクター(株)入社。LCOSデバイス開発に従事。1992~1995年, ATR光電波通信研究所。1999~2004年, ATR環境適応通信研究所, ATR適応コミュニケーション研究所。有機非線形光学材料, 計算化学による物質設計, 機能デザイン論, 高次元アルゴリズム応用の研究に従事。2004年, 日本ビクター(株), 液晶ディスプレイの光学要素開発に従事。

講座 誰にでもわかる3D 第5回

基礎 3：裸眼3Dディスプレイ

(正会員) 高木康博†

1. ま え が き

ハイビジョンテレビに立体表示機能が搭載され、家庭で立体映像が楽しめる時代になってきた。最近では、立体表示機能をもつ携帯型ゲーム機が発売され、話題になっている。立体表示方式には、専用のメガネを用いるものと、メガネを用いないものがある。本稿では、メガネなしの立体表示を実現する裸眼立体表示技術^{1)~3)}について解説する。

本稿では、最初に裸眼立体表示方式の分類について述べる。その後、それぞれの方式について説明する。ただし、多眼式、インテグラルイメージング、ホログラフィについては本連載の後の回で詳しい解説があるので、ここでは、基本的な表示原理について説明する。メガネなしの2眼式については他の回で解説がないので、やや詳しく述べる。

2. 裸眼立体表示の分類

裸眼立体ディスプレイは、「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、レンズやスリットなどの光学素子による光線の屈折、偏向を利用する。後者は、光を波として扱う、いわゆる、ホログラフィである。

また、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」に分類することもできる。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立体知覚で支配的であることから、水平視差のみを与える。水平垂直視差型は、水平視差に加えて、人体の垂直方向の移動に伴う見え方の変化である垂直視差も与える。当然、水平視差型よりは、水平垂直視差型の方が優れている。しかし、水平垂直視差型のディスプレイは実現の難易度が高く、また、通常の利用では水平視差のみでも十分な立体感が得られるため、水平視差型がよく用いら

表1 裸眼立体表示方式の分類

	水平視差型	水平垂直視差型
光線再生型	メガネなし2眼式, 多眼式	インテグラルイメージング (インテグラルフォトグラフィ)
波面再生型	ホログラフィ	

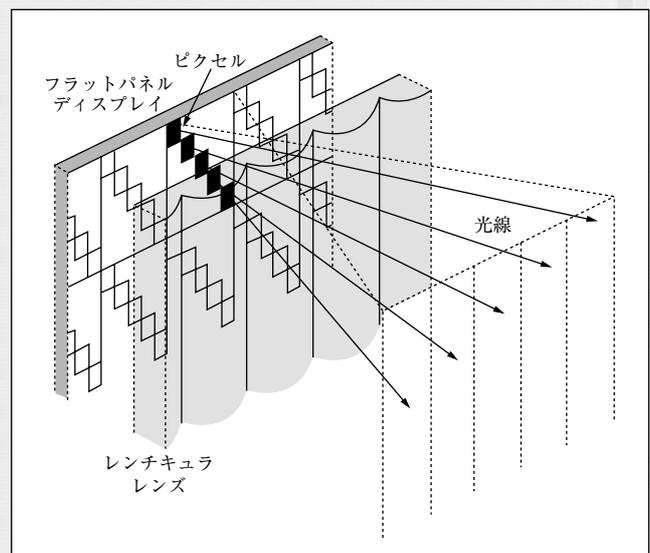


図1 光線再生型・水平視差型の立体表示の原理

れる。

表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。以下に、それぞれの表示方式について説明する。

3. 光線再生型・水平視差型

最初に、光線再生型・水平視差型の立体ディスプレイについて説明する。

水平視差型・光線再生型立体ディスプレイの代表的な構成を、図1に示す。代表的な構成方法として、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合せた構成を示している。レンチキュラレンズとは、円筒レンズである

† 東京農工大学 大学院工学研究院

"3D That Everyone Understands (5): Glasses-free Autostereoscopic Displays" by Yasuhiro Takaki (Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo)

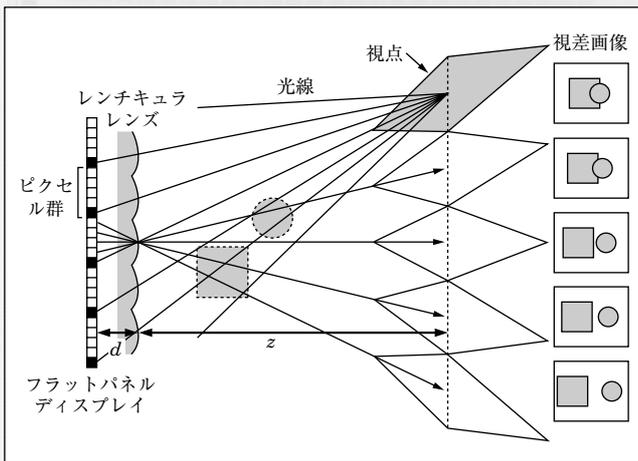


図2 光線再生型・水平視差型での視点形成

シリンドリカルレンズを一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る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2に示すように、各シリンド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 z 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る光線が、一点に集光するようになる。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。

視点が形成される距離を z で、ピクセルとレンズの間隔を d で表すと、レンズ間隔はピクセル群の間隔の d/z 倍だけ小さくする。通常、 d/z は小さな値になる。レンズ間隔とピクセル群の間隔を等しくすると、視点は無限遠に形成される。

4. メガネなし2眼式

最も基本的な光線再生型・水平視差型の立体表示が「メガネなし2眼式」である。なお、専用のメガネを用いる立体表示も2眼式と呼ばれるので、ここでは「メガネなし2眼式」と呼ぶことにした。

メガネなし2眼式立体表示では、図3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つの視点を発生する。

カラー表示の場合は、2個の色ピクセルを対にして用いる。そのため、RGBストライプ配列のフラットパネルディスプレイを用いる場合は、図4(a)に示すように、(RG)、(BR)、(GB)、・・・のように色ピクセルを対にして用いる。そのため、左右の目には各レンズが異なる色に見える。

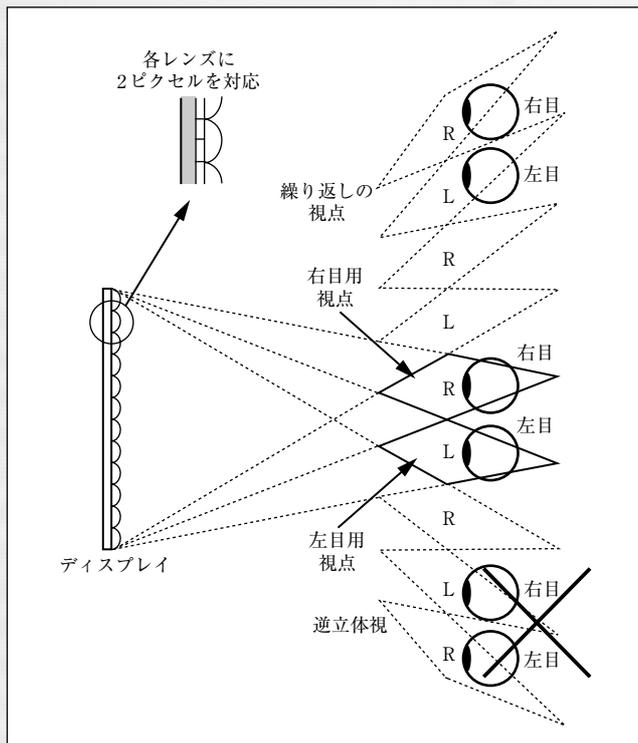


図3 メガネなし2眼式の立体表示の原理

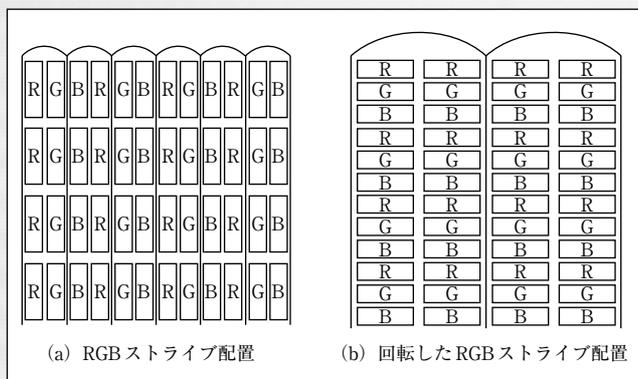


図4 メガネなし2眼式でのピクセル群の構成

また、図4(b)に示すように、RGBストライプ配列のパネルを90°回転させて、同色の色ピクセルを対にして用いる場合もある。

メガネなし2眼式立体ディスプレイの構成方法としては、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の構成がよく用いられる。フラットパネルディスプレイと組合せる偏向光学素子としては、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5に示す。パララックスバリアとは、図5(b)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。

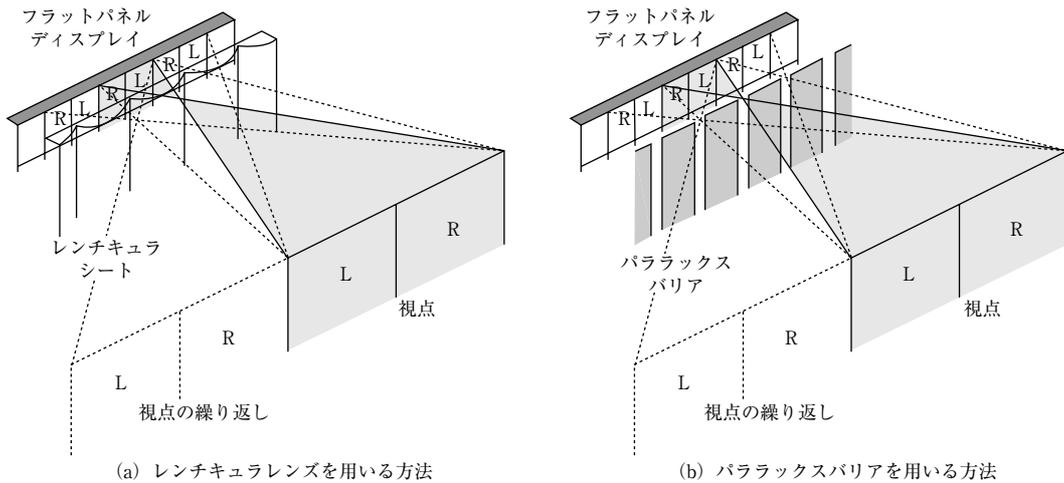


図5 フラットパネル型のメガネなし2眼式立体表示の構成方法

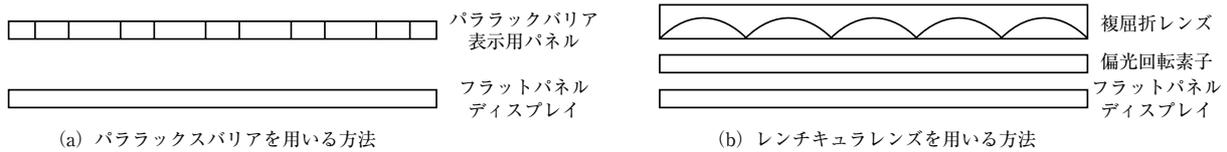


図6 立体表示と2次元表示の切替え（水平断面図）

いずれの場合も、立体表示の解像度は、フラットパネルディスプレイの解像度の半分になる。

パララックスバリアは、リソグラフィ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特性は、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5に示すように、レンチキュラレンズを用いる場合でも、パララックスバリアを用いる場合でも、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、図5に示すように、水平方向に、繰り返しの視点が発生する。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。

家庭のリビングのように、多人数が不特定の場所でディスプレイを観察する利用環境では、逆立体視が問題になる。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あるが、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次元表示を切替えることができる。例えば、図6(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⁴⁾。また、図6(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、光の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合せて、立体表示と2次元表示を選択できる⁵⁾。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。

他のフラットパネル型の構成方法として、図7に示すように、特殊なバックライトを用いる方法⁶⁾が提案されている。導光板の左右に取り付けたLEDが発する光が、プリズ

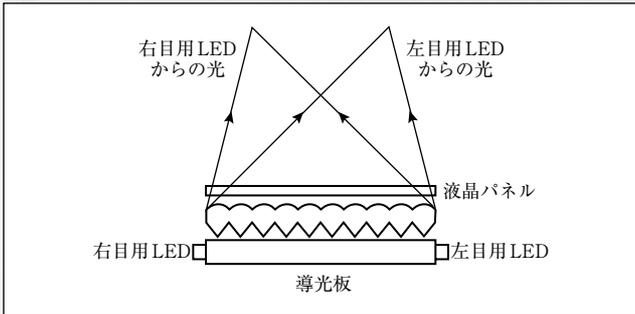


図7 特殊なバックライトを用いたフラットパネル型のメガネなし2眼式立体表示の構成方法

ム状の導光板で左右方向に出射される。左右のLEDを交互に発光し、これに合わせて左目用と右目用の画像を交互に表示する。フラットパネルディスプレイを倍速駆動する必要があるが、立体表示時の解像度低下はない。また、フラットパネル型以外の構成方法としては、2台のプロジェクタと結像機能を有する特殊なスクリーンを用いるプロジェクション型の構成方法もある。上記二つの構成方法では、繰り返しの視点は発生しない。

5. 多眼式

多眼式立体表示では、図1および図2で、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つ以上の視点を発生させる。パララックスバリアを用いて、同様に実現することもできる。視点間隔は、両眼間隔(平均65mm)程度、あるいはその半分程度とする。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 $1/n$ となる。

図8に示すように、多眼式立体表示では、逆立体視状態にならずに正しく立体視できる範囲が、視点が並ぶ水平方向に広がる。また、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ため、正しく立体視できる範囲は、奥行き方向にも広がる⁷⁾。

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。

多眼式立体表示では、フラットパネルディスプレイの解像度を視点数で割った値が、立体表示の解像度になる。このため、多視点化は解像度の低下を引き起こす。

6. 光線再生型・水平垂直視差型

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ング」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」と呼ばれていたが、最近では、写真技術と区別するためにインテグラルイメージング

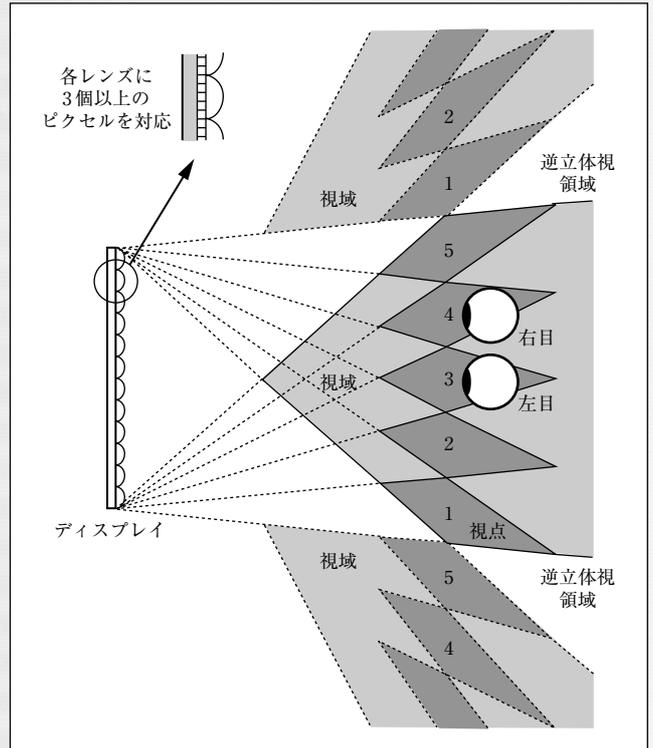


図8 多眼式立体表示の視域

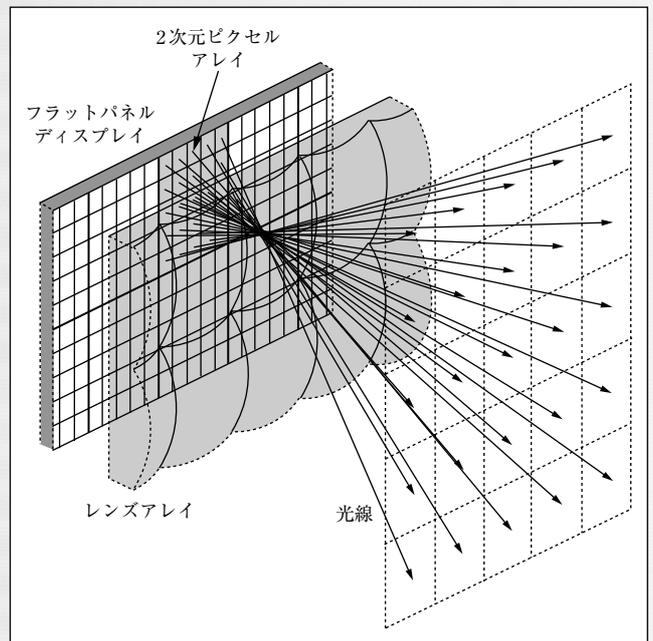


図9 光線再生型・水平垂直視差型の立体表示（インテグラルイメージング）の原理

という言葉が使われるようになってきた。

インテグラルイメージングの代表的な構成を、図9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合せた構成である。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

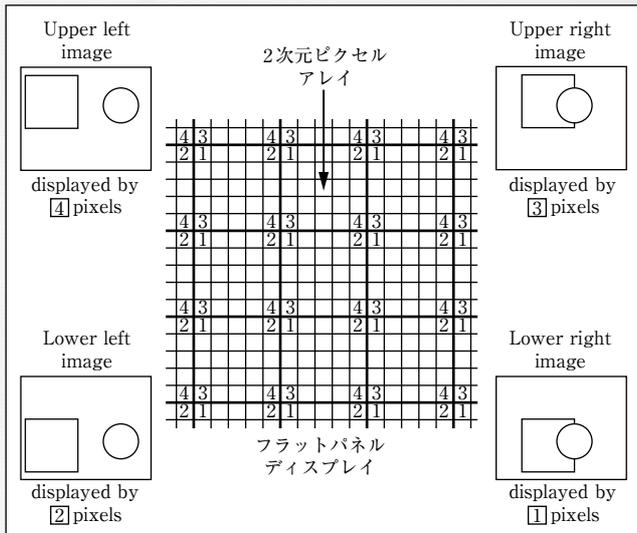


図10 光線再生型・水平垂直視差型の立体表示（インテグラルイメージング）の表示画像

れる。そのため、水平視差と垂直視差が得られる。

各レンズに2次元ピクセルアレイを対応させると、図10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、一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。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。したがって、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。

7. 波面再生型

光を波として扱う波面再生型の立体表示方式が、ホログラフィである。ホログラフィは、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。

電子的なホログラム表示の原理を、図11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、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、液晶を用いるもの、電気光学効果を用いるもの、磁気光学効果を用いるもの、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) を用いるものなどが存在する。このうち、液晶変調素子がよく使われる。

電子的なホログラフィでは、図11に示すように、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

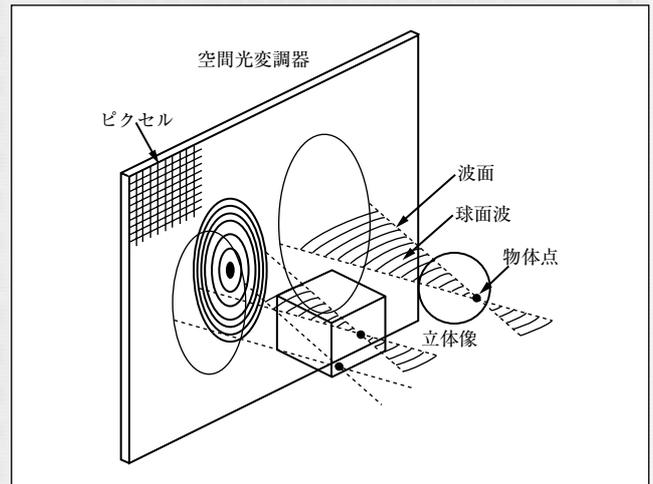


図11 波面再生型の立体表示（ホログラフィー）の原理

と、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。可視光の波長は $0.4\sim 0.8\mu\text{m}$ 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 $1\mu\text{m}$ 以下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、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、現状の技術では難しい。そこで、視差を水平方向に限定して、微細なピクセルピッチが必要な方向を水平方向にのみ限定する水平視差型のホログラフィが開発されている。この場合、垂直方向のピクセル数は、2次元表示と同程度にできる。このように、ホログラフィには水平垂直視差型と水平視差型の両方が存在する。

8. 光線再生型と波面再生型の比較

光線再生型と比べた場合の、波面再生型のメリットについて説明する。図12に、光線再生による立体像と波面再生による立体像を拡大した様子を示す。光線再生型の立体像に近づいて細部を観察すると、レンズ構造が見えてくる。これに対して、波面再生型では、物体の細部が見えてくる。これは、波面再生型が、空間に集光する球面波で空間にシャープな物体点を再現しているからである。ただし、図11に示した波面再生型の再生像は、光学的に記録再生したホログラム、すなわちホログラム写真の再生像で、電子的なホログラムの再生像ではない。

ただし、ホログラフィにも問題点があり、再生像にスペckルノイズと呼ばれるランダムな微細パターンが生じる。これは、記録と再生にコヒーレント光を用いるホログラフィの表示原理に起因するもので、本質的な問題点である。

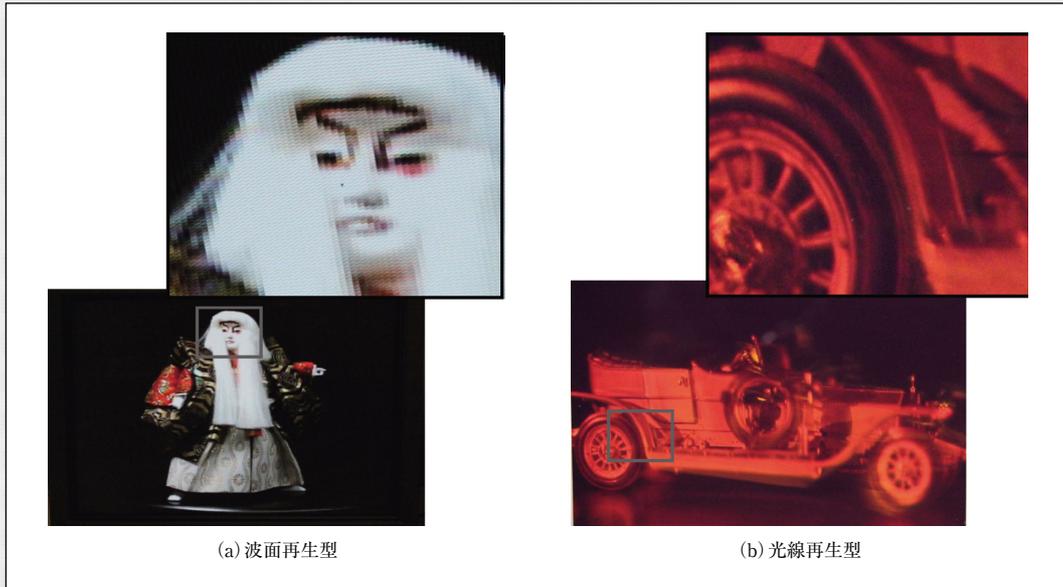


図12 波面再生型と光線再生型の立体像の違い

9. おすび

裸眼立体表示技術を光線再生型と波面再生型、水平視差型と水平垂直視差型に分類して解説した。具体的には、メガネなし2眼式、多眼式、インテグラルイメージング、および、ホログラフィについて説明し、これらの表示方式の関係について述べた。
(2011年3月9日受付)

〔文献〕

- 1) 大越孝敬：“3次元画像工学”，朝倉書店（1991）
- 2) 高木康博：“将来の3次元ディスプレイと人のビジョン”，映情学誌，50，10，p.1566-1573（Oct. 2006）
- 3) 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，35，8，pp.400-409（Aug. 2006）
- 4) 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）

- 5) J. Harrold, D. Wilke, G.J. Woodgate: "Switchable 2D/3D Display - Solid Phase Liquid Crystal Microlens Array", Proc. IDW, 11, pp.1495-1496（2004）
- 6) 結城昭正：“スキャンバックライト方式3D液晶ディスプレイ”，月刊ディスプレイ2005年4月号，pp.94-98（2005）
- 7) N.A. Dodgson: "Analysis of the viewing zone of the Cambridge autostereoscopic display", Appl. Opt. 35, p.1705-1710（1996）



高木 康博 たかき やすひこ 1986年，早稲田大学理工学部卒業。1988年，早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。1992年，同研究科博士後期課程修了。1991年，同大学助手。1994年，日本大学文理学部専任講師。1998年，同助教授。2000年，東京農工大学工学部助教授（現在，准教授）。主に，立体映像技術に関する研究に従事。博士（工学），正会員。

応用3: ブルーレイ3D™規格

矢羽田 洋†

1. ま え が き

2010年は「3D元年」とも呼ばれ、北米映画館で始まった3Dブームが一気に世界中に広がり、電機メーカー各社から家庭用3Dテレビや Blu-ray 3D™ プレーヤ、また、ハリウッドスタジオから Blu-ray 3D™ ソフトが販売開始された年である。第6回目の本講座では、その Blu-ray 3D™ の規格化背景から3Dを実現する規格技術の中核部分について紹介する。

2. Blu-ray 3D™ 規格を構成する三つの新技術

Blu-ray Disc™ とは、DVDに比べて6倍の画素数を持つ 1920×1080の高解像度映像(以下、フルHD)を、MPEG-4 AVC/H.264により高効率に圧縮することで、長編映画でも1枚(2層で50GB)のディスクに収めることができるコンテンツ提供メディアである。

北米では2008年頃から3D映画の興業収入が好調で、続々と3D対応の映画館が増えていく中、家庭においても、3D劇場体験を Blu-ray Disc™ にて再現できないかという期待が一部で高まっていた。しかし、当時3D映像を扱うには、Side-by-Sideのように解像度を半分に落として、左目、右目の映像を一つの2D映像の中で分割して扱う以外に方法がなくタイトル数も極めて限られていたため、これまでの3Dブームが、コンテンツの質と量が不足したことで普及しなかったのと同じ課題を抱えていた。

さらに、3Dを難しくした要因として、Blu-ray Disc™ では字幕やメニューをビデオ映像に重畳して表示しているが、Side-by-Sideのような手法では、字幕やメニューも

Side-by-Side で作る必要があり、2Dタイトル向けと3Dタイトル向けに二重に字幕とメニューを製作する必要があった。さらに、それらを3Dビデオ上の適切な深度に重畳することができなければ、3D視聴時に眼精疲労を引き起こすことが広く知られており、一般家庭での3D視聴は先の話だと思われていた。

しかしながら、2008年のCEATEC® JAPAN (Combined Exhibition of Advanced Technologies)にて状況は一転する。この年、CEATEC JAPANでは、両眼ともにフルHDの解像度で3D再生するテレビシステムを、パナソニックが展示することで、これまでの3Dとは大きく異なり、一般家庭においても高画質な3Dの実現性が広く認知されることとなった。これを契機に業界全体が動き出し、翌2009年にはBlu-ray Disc Association (以下、BDA)にて、フルHDの2眼式3Dの規格化が開始された。この時点でフルHD 3Dを提供しているメディアはなかった。

Blu-ray 3D™ の規格では、3D拡張にあたり三つの新技術を採用している¹⁾。一つ目は、50GBというディスク容量の制限下で両眼ともにフルHDの3D映像を2時間以上記録することができる新しい映像圧縮方式であるMPEG-4 Multiview Video Coding (以下 MPEG-4 MVC) とその多重化技術、二つ目は、1枚のディスクで2D/3D再生互換を実現するストリーム配置技術、三つ目の技術は、3D再生時に2D字幕や2Dメニューを3D化し、3Dビデオ上の特定深度に重畳する技術である。以降の章では、この三つの新技術に対して、当時の背景を踏まえつつ Blu-ray 3D™ 規格の概要を紹介していく。

3. MPEG-4 MVC 圧縮技術および多重化技術

この章では、3D化に伴うビデオストリーム、および、多重化に関する課題とそれに対する Blu-ray 3D™ 規格技術について紹介する。

† パナソニック株式会社 本社R&D部門 デジタル・ネットワーク開発センター

"3D That Everyone Understands (6): Blu-ray 3D™ Specifications" by Hiroshi Yahata (Digital & Network Technology Development Center, Corporate R&D Division, Panasonic Corporation, Osaka)

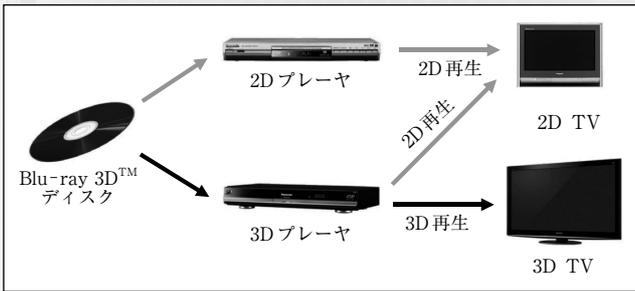


図1 3Dディスクの2Dプレーヤ、3Dプレーヤでの再生

3.1 ビデオを3D化する際の課題

これまでのBlu-ray Disc™規格では、最大40Mbpsの2Dビデオストリームが、オーディオストリーム、字幕ストリーム、メニューストリームなどと多重化され、最大48MbpsのMPEG-2 TSとしてディスクに記録されている。

2眼式の3Dの表示方式において、2Dと同等の画質を維持するためには、2Dと同じビットレート制限下で左目用のビデオストリームと、右目用のビデオストリームを各々エンコードすれば良い。しかしながら、この方法では3Dビデオのビットレートの合計が最大で80Mbpsとなるため、1枚のディスクに2時間の映画を記録できなかった。つまり、Blu-ray Disc™の3D化には、より高効率なビデオエンコード技術が必要であった。

また、3Dディスクが2Dプレーヤでも2D再生可能(図1)であることを保障するために、左目、右目に対応した2本のビデオストリームのどちらかは、2Dプレーヤと互換のある形式にて記録されていなければならない。2D再生で

使用されるビデオストリームは、前述の48Mbps以下のMPEG-2 TSに多重化される必要があるため、同じ1本のMPEG-2 TSに3Dビデオストリームも加えて多重化することは、ビットレート制約から3Dへの画質懸念があった。

3.2 MPEG-4 MVCによる圧縮効率改善

2時間以上の映画を記録するには、3Dビデオの圧縮効率を上げる必要がある。そこで、図2に示すフローにより、フルHD画質の高画質な3Dビデオストリームを作成する。

図2に示すように、左目用原画(L)と右目用原画(R)は、フレーム単位で交互に3Dビデオエンコーダへ入力され、1本のビットストリームとして出力される。原画のフルHDの解像度は、エンコード時にも維持され、ペアとなるLとRの間で同期が確保されたMPEG-4 MVCビデオストリームが生成される。

Blu-ray 3D™規格でのMPEG-4 MVCにおいては、左目用あるいは右目用のビデオストリームのどちらか片方は、2Dプレーヤとも再生互換のあるベースビューストリームとして、MPEG-4 AVC/H.264準拠にてエンコードが行われる。同時に、もう片方のビデオストリームは、ディペンデントビューストリームとして、ディペンデントビュー内の時間軸方向の参照に加えて、同一表示時刻を持つベースビューピクチャへの参照(ビュー間参照)も利用することができる。これにより、Blu-ray 3D™が扱うMPEG-4 MVCでは、ディペンデントビューの圧縮効率を大幅に改善することができる。

例えば、PHL-AC(Panasonic Hollywood Laboratory Advanced Authoring Center)が開発しているMPEG-4 MVCビデオエンコーダでは、左右のビデオストリームを独

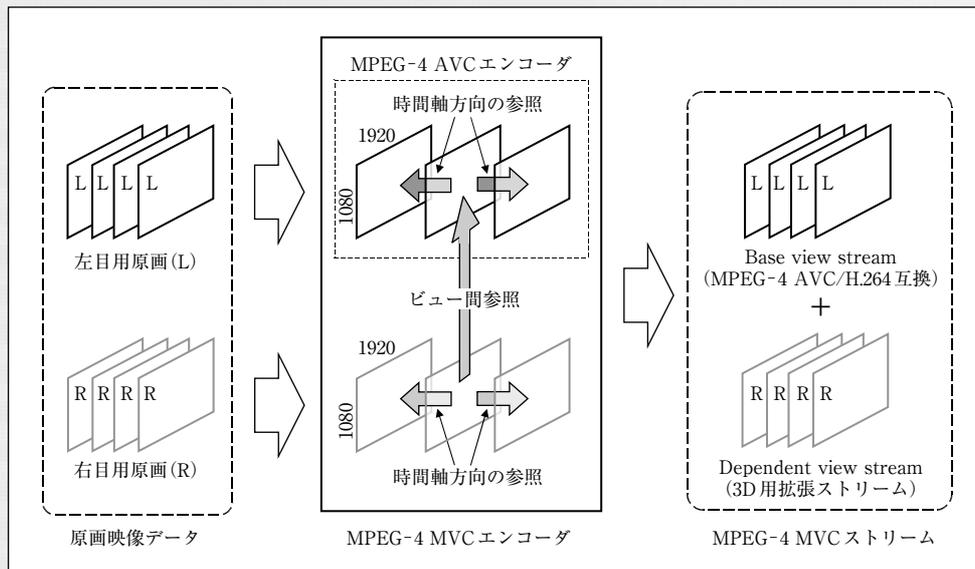


図2 MPEG-4 MVCによる2眼式3D映像の符号化

立して MPEG-4 AVC/H.264 にて圧縮した場合 (200%) と比較して、主観評価での画質を確保したまま、平均して 150%以下のビットレートに抑えこむことができている²⁾。これによって、ディスク1枚に2時間以上の高精細なフル HD 3D映像を記録することが可能となった。

3.3 2D/3D 互換を実現するための多重化方法

次に MPEG-2 TS のビットレート制約による3D画質懸念に対する Blu-ray 3D™ 規格での解決方法について紹介する。

Blu-ray 3D™ では、最大48Mbpsの MPEG-2 TS では多重化できない場合に備え、ベースビューストリームを格納する MPEG-2 TS (以下、メインTS)と、ディペンデントビューストリームを格納する MPEG-2 TS (以下、サブTS)とを別々の MPEG-2 TS として多重化することもできる。

これによって、メインTS(2Dプレーヤにて2D再生可能)は、これまでの2Dタイトルと同様、ビデオストリームに最大40Mbpsが確保され、MPEG-2 TS のシステムレートは最大48Mbpsとできるため、2Dプレーヤとの互換性を保ちつつ、2Dでの再生品位を確保することが可能である。また一方で、3D再生時には、メインTSとサブTSの2本の MPEG-2 TS を同時に再生するデコーダモデルを導入することにより、合計で最大64Mbpsとなる2本の MPEG-2 TS からの3D再生を実現している。

4. 2D/3D 再生互換を実現するストリーム配置技術

この章では、3D化に伴うディスク上のストリーム配置に関する課題と、それに対する Blu-ray 3D™ 規格技術について紹介する。

4.1 2D/3D 互換ディスクの課題

メインTSとサブTSを、ディスク上に配置して2Dプレーヤ、3Dプレーヤでそれぞれ適切に2D/3D再生させるためには、次の二つの要求を同時に満たす必要がある。

一つは、2Dプレーヤが再生するメインTSは、2D映像として途切れなく連続して再生できるよう、これまでの2D規格に準拠してディスク上に配置されなければならない。もう一つは、3DプレーヤがメインTSだけ再生した際には2D再生を行え、メインTSとサブTSを再生した際には、メモリー、ドライブへの少ない追加コストで3D再生を行えなければならない。

一般に、2本以上のストリームを同時に一つの光ディスクから読出す場合には、ドライブが頻繁にシークするため、実効の読み込み速度がドライブの読み込み速度より大きく下回ってしまう。さらに、インタラクティブなタイトルなどでよく使われる異なるストリームを、途切れなく繋いで再生していく機能(シームレス接続)が必須であるが、メイ

ンTSとサブTSの両方のストリームを同時にシームレス接続するために、大容量の追加バッファと高速なシーク速度を持つドライブを要求事項とすることは、コストの大幅な上昇につながり、3Dプレーヤ普及の妨げになる。

4.2 メインTSとサブTSのインタリーブ配置

上記課題をクリアするには、まず同時に再生する2本のストリームを読み込む際にシークを発生させないことが最も重要である。

そこでメインTSとサブTSの2本のストリームは、同じ MPEG-2 TS デコーダへの入力時間を持ち、ディスク上に連続して記録される部分区間(以下、エクステントと呼ぶ)ごとにペアとなり、ディスク上に交互に配置されるようにした。このように異なるストリームをディスク上交互に配置することをインタリーブ配置と呼ぶ。

図3は、インタリーブ配置されているエクステントを示している。インタリーブ配置がディスク上で連続する区間をインタリーブ連続区間と呼ぶことにする。

図3では、2Dプレーヤと3Dプレーヤの再生経路をそれぞれ示している。2Dプレーヤは、途切れ途切れに記録されたメインTSのエクステントだけを読み込みデコードすることで、2D映像を再生する。一方、3Dプレーヤは、より高速な読み込み速度を持つドライブを使って、メインTSのエクステントと、サブTSのエクステントを、途切れずに交互に連続して読出すことで、高ビットレートな3D映像の再生を実現する。メインTSは2Dプレーヤ、3Dプレーヤが再生するそれぞれのストリームファイル内で共有されており、ディスク容量上の無駄はない。

なお、3Dの映像品位を確保するため、メインTSとサブTSはそれぞれ最大48Mbpsまで利用でき、その合計ビットレートは最大64Mbpsである。Blu-ray Disc™ で使う MPEG-2 TS は、TS/パケットごとにデコーダへの入力時刻を指定された可変ビットレートであるため³⁾、左目、右目の映像の複雑さに応じて適切にビットレートを調節しながらエンコードしていくことができる仕組みとなっている。

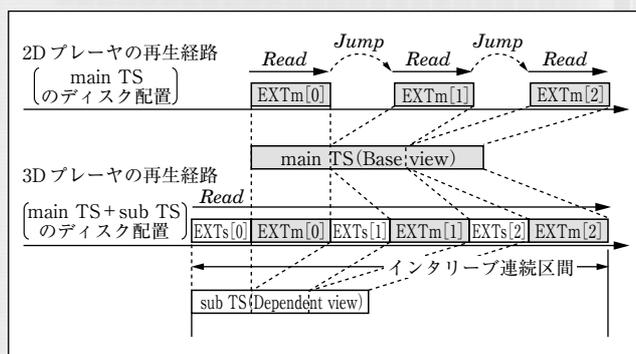


図3 インタリーブ配置と2D/3Dプレーヤの再生経路

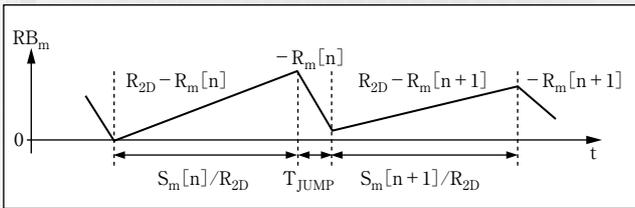


図4 2Dプレーヤのリードバッファ (RB_m) 遷移

4.2.1 2Dプレーヤの連続再生保証

図3の再生経路に示すように、2Dプレーヤがインタリーブ連続区内に格納される2D映像を再生するには、メインTSのエクステントをリードバッファに読み込み、サブTSのエクステントをジャンプしながら再生を行うことになる。

図4は、2Dプレーヤのリードバッファ（ドライブからストリームを読み出し MPEG-2 TS デコーダへ出力する間のバッファ）のデータ蓄積量の時間遷移を示している。

R_{2D}は、2Dプレーヤのディスクからの読み込みレート、
S_m[n]は、メインTSのn番目のエクステントのデータサイズ、

R_m[n]は、メインTSのn番目のエクステントに格納される MPEG-2 TS の平均ビットレート、

T_{JUMP}は、続くサブTSのエクステントをジャンプするのにかかる時間

を示す。

2Dプレーヤでの再生を保証するためには、メインTSのエクステントを読み込み、続くサブTSのエクステントをジャンプする間に、メインTS用のリードバッファ (RB_m) が空にならないようにすれば良い。したがって、メインTSの各エクステントのサイズを、式(1)で求められるサイズ以上に設定することで、インタリーブ連続区間での2Dプレーヤの連続再生を保証している。

$$S_B[n] \geq \frac{R_{2D}}{R_{2D} - R_m} \times R_m \times T_{JUMP} \quad (1)$$

4.2.2 3Dプレーヤの連続再生保証

一方で、3Dプレーヤがインタリーブ連続区間を3D映像として途切れなく再生するためには、図3の再生経路に示すように、サブTSのエクステントとメインTSのエクステントをそれぞれ交互に読み込みながら、メインTSとサブTSのそれぞれのリードバッファRB_m、RB_sが空にならないようにすれば良い。

図5は、3DプレーヤのRB_mとRB_sのデータ蓄積量の時間遷移を示している。

R_{3D}は、3Dプレーヤのディスクからの読み込みレート、

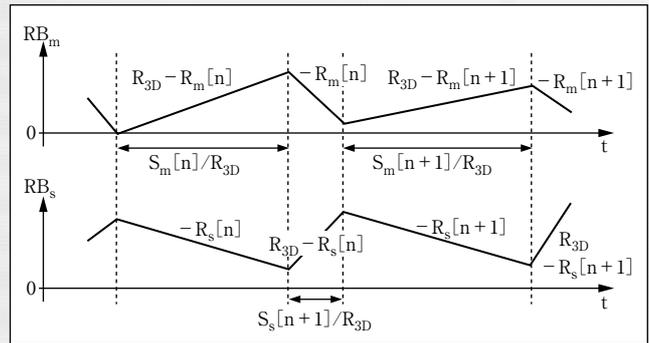


図5 3Dプレーヤのリードバッファ (RB_m, RB_s) 遷移

S_s[n]は、サブTSのn番目のエクステントのデータサイズ、
R_s[n]は、サブTSのn番目のエクステントに格納される MPEG-2 TS の平均ビットレート

を示す。

3Dプレーヤによる3D映像の連続再生を保証するためには、それぞれのエクステントを交互に読み込みしている間、どちらのリードバッファも空にならないようなインタリーブ配置が必要である。したがって、次の式(2)、式(3)で示されるサイズ以上に各エクステントのデータサイズを設定することで、インタリーブ連続区間での3Dプレーヤの連続3D再生を保証している。

$$S_m[n] \geq \frac{R_m[n]}{R_{3D} - R_m[n]} \times S_s[n+1] \quad (2)$$

$$S_s[n] \geq \frac{R_s[n]}{R_{3D} - R_s[n]} \times S_m[n] \quad (3)$$

4.3 3Dでのシームレス接続

式(1)～(3)をすべて満たすエクステントサイズでインタリーブ配置することにより、2Dプレーヤでの2D再生と3Dプレーヤでの3D再生を保証することができた。

ただし、式(1)～(3)はエクステントサイズの下限値を制約するものであり、上限値は定義されていない。3Dプレーヤでは、エクステントのサイズが大きくなればなるほど、一時的にその大きなエクステントをリードバッファに蓄えておくため、大容量のリードバッファを搭載しておくかなければならずコストアップに繋がる。

さらに、シームレス接続などで長い距離のジャンプを伴う場合には(図6)、2Dプレーヤのリードバッファ (RB_m) が空にならないために、大きなサイズのエクステント (EXT_m[2]) をジャンプ前に用意しておく必要がある。しかし、エクステントのサイズ上限値を、これに合わせれば、3Dプレーヤのリードバッファサイズは大きく増加せざるを得なかった。

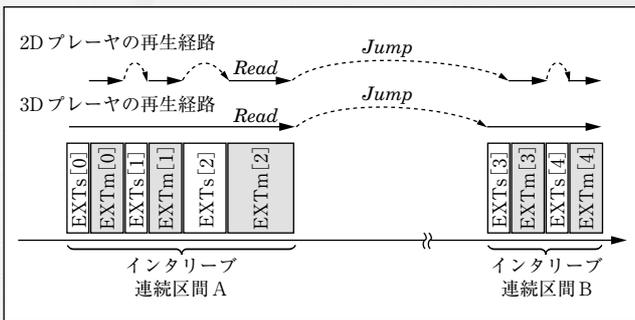


図6 3Dでのシームレス接続

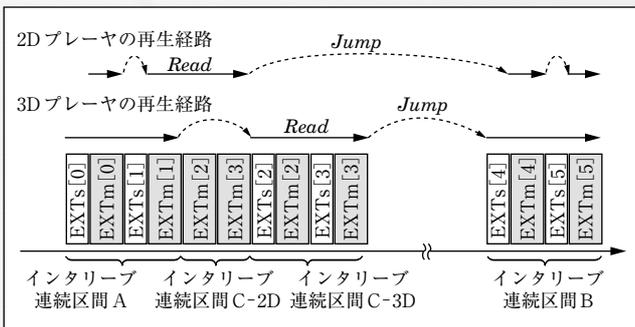


図7 3Dでのシームレス接続（分岐あり）

4.3.1 リードバッファ増加を抑制する配置

そのため、シームレス接続時に長い読み込み停止期間が発生するようなケース（層切替えやロングジャンプなど）では、図7のようにその直前で、2Dプレーヤの再生経路と3Dプレーヤの再生経路を分岐するよう規定した。

図7の例のように、インタリーブ連続区間Aとインタリーブ連続区間Bは、2Dプレーヤと3Dプレーヤが共に再生する経路であり、インタリーブ連続区間C-2Dは2Dプレーヤのみが再生し、インタリーブ連続区間C-3Dは3Dプレーヤのみが再生するように構成する。そして、インタリーブ連続区間C-2Dとインタリーブ連続区間C-3DのメインTSが同じになるように、データを重複して配置する。

この構成により、3Dプレーヤは、2Dプレーヤのシームレス接続に必要な大きなサイズのエクステント（図6でのEXT_s[2]、EXT_m[2]）を読まずに、それと同じ内容のメインTSを別領域（インタリーブ連続区間C-3D）から読み込み再生することができるようになる。この配置方法を導入することにより、エクステントサイズの上限值を、2Dプレーヤの条件を考慮せずに小さく設定することが可能となり、3Dプレーヤでのメモリー量増加やドライブパフォーマンスの向上を十分に抑制しながら、2Dプレーヤとの互換再生を1枚のディスクにて確保できるようになっている。

5. グラフィックス（字幕、メニュー）の3D化

ビデオの3D化に伴い、2D表示しかなかったグラフィックスを3D表示するための拡張も、Blu-ray 3D™では必要である。この章では、3Dビデオと3Dグラフィックスの重畳に関する課題とそれに対するBlu-ray 3D™規格技術について紹介する。

5.1 グラフィックスの3D化での課題

Blu-ray Disc™では、ビデオプレーンの上（視聴者から見て手前側）に字幕プレーン、さらにその上にメニュープレーンが重畳されることにより、ビデオへのグラフィックス重畳が実現されている。しかしながら、3Dビデオの上に単に2Dのグラフィックスを重畳するだけでは、奥行き方向の表示に矛盾が生じ易く（奥の字幕が手前のビデオを遮り見えるなど）、3D視覚上の違和感を与え眼精疲労を引き起こす課題が知られている。

字幕付きで視聴されることも多いBlu-ray Disc™では、字幕を表示する領域近辺の3Dビデオの奥行きに合わせて字幕の奥行きを調節する必要がある上、3Dビデオの奥行きは字幕が表示されている間も刻々と変化するため、字幕の奥行きは3Dビデオの奥行きに追従する必要がある。

また一方で、3Dタイトル製作のハードルを軽減させるためには、2Dタイトル製作時に作成したグラフィックス素材を3Dタイトル再生時でも流用できる仕組みが望ましい。

5.2 グラフィックスの3D重畳方式

これらの課題を解決するために、グラフィックスの3D拡張では、既存2Dプレーヤ向けのグラフィックス素材を流用できる方式として1プレーン+オフセット方式、さらに、左目、右目用に異なるグラフィックスプレーンを持たせ、立体感ある3Dグラフィックス表現が可能な2プレーン+オフセット方式を採用した。

1プレーン+オフセット方式（図8）とは、2Dグラフィックスの描画プレーンを左右にシフトさせて左目用グラフィックス画像と右目用グラフィックス画像を生成し、対応する左目、右目用のビデオプレーンと重ね合わせることで、グラフィックスプレーンの奥行きを調節する方式である。

対象物の飛び出し量は、左右描画プレーンのオフセット量を変化させることで調節できる。また、1プレーン+オフセット方式では、平面的な字幕やメニューを浮かび上がらせることしかできないが、2プレーン+オフセット方式では描画対象物自体を立体化させることが可能である（図9）。

5.3 オフセットシーケンスによる奥行き調節

グラフィックスを3Dビデオに重畳する際に、前述の眼精疲労の弊害を回避するには、重畳されるグラフィックスが、3Dビデオに対して若干手前に位置するように奥行き

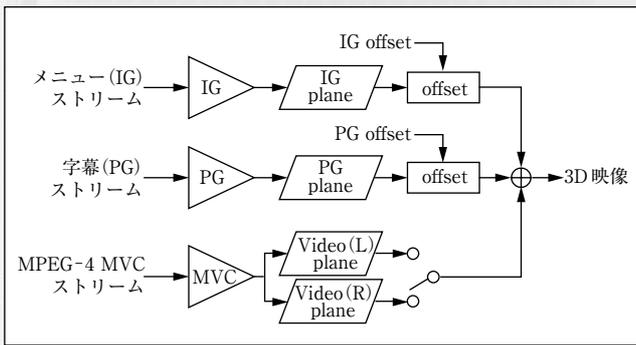


図8 1プレーン+オフセットでの重畳モデル

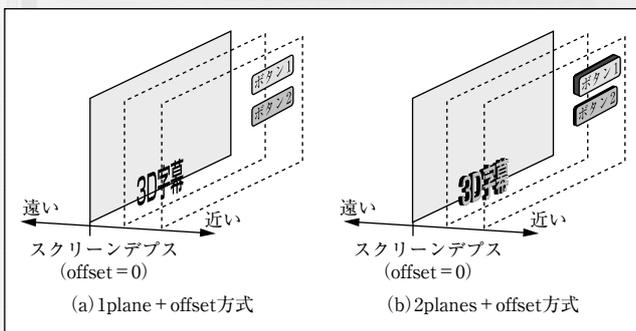


図9 二つの3Dグラフィックス重畳方式

を適切に制御することが一般的である。

ビデオとの干渉を回避し、3D視聴時の負担を軽減するためには、ビデオとグラフィックスの奥行きをフレーム精度で制御できることが重要である。このため Blu-ray 3D™ 規格では、動的に変化するビデオが持つ奥行きに応じて、ビデオの表示フレームごとに重畳するグラフィックスプレーンのオフセット量を記述した、オフセットシーケンスをディペンデントビューストリームに格納している。

オフセットシーケンスは、ランダムアクセス性を保つため、ベースビュー側でSPS(Sequence Parameter Set)を持つ1ピクチャとペアになる、ディペンデントビュー側のピクチャごとにまとめて格納され、そのオフセット量は、描画プレーンに製作者の意図通りの奥行きを与えるため、左目用画像と右目用画像の水平方向の1画素単位のシフト量として表示フレーム順に定義される。

Blu-ray Disc™ タイトルの中には、複数の言語に対応するために、字幕やメニューが複数言語分含まれていることがある。各言語用の字幕やメニューは、それぞれ対応する

言語に合わせて表示位置と表示時間を個別に調整していることが多いため、ディペンデントビューには、字幕やメニュー用に複数のオフセットシーケンスを定義することができる。

このように、個々のグラフィックスの表示位置に合わせたオフセットシーケンスを予め用意しておくことで、ビデオとの3D重畳を製作者の意図通りに正確に再現できる自由度と、2D用のグラフィックス素材を3D時にも使用できる流用性を兼ね備えた重畳モデル(1プレーン+オフセット方式)を策定することで、3Dタイトルの制作負担を抑えている。

6. お す び

Blu-ray 3D™ 規格は、高効率3D映像圧縮を実現する MPEG-4 MVC 符号化技術と多重化技術、2D/3D互換ディスクを実現するインタリーブ配置技術、3D視聴をより安全性に実現する3Dグラフィックス重畳技術を柱に策定された。

ここに紹介した新規技術は、高画質かつ高機能な Blu-ray 3D™ によるプレミアムな3D映像体験を、安全かつ確実にユーザーに届けるためであったとも言える。

今後は、Blu-ray Disc™ 以外のメディアも、フルHD 3D化が進んでいくものと思われる。Blu-ray 3D™ にて培った技術を各種3D機器、応用分野に適用することにより、高画質かつ安全な3Dワールドをさらに広げることにより貢献していきたい。

(2011年3月15日受付)

〔文 献〕

- 1) Blu-ray Disc Association: "White paper Blu-ray Disc™ Read-Only Format Audio Visual Application Format Specifications for BD-ROM Version 2.4" (2010)
- 2) T. Chen and Y. Kashiwagi: "Subjective Picture Quality Evaluation of MVC Stereo High Profile for Full-Resolution Stereoscopic High-Definition 3D Video Applications", the IASTED International Conference on Signal and Image Processing (SIP), Maui, Hawaii (Aug. 2010)
- 3) Blu-ray Disc Association: "White paper Blu-ray Disc™ Rewritable Format Audio Visual Application Format Specifications for BD-RE Version 2.1" (2010)



やばた ひろし
矢羽田 洋 1998年、東北大学大学院理学研究科物理学専攻修了。同年、松下電器産業(株)(現 パナソニック(株))に入社。Blu-ray Disc™を中心にAVのアプリケーション規格化に従事。BDAのAVアプリケーション規格化委員会(TEG2)の副議長、兼チーフエディタ。

基礎4: 多眼式・超多眼式3D技術

(正会員) 高木 康博†

1. ま え が き

現在の立体テレビでは、メガネありの立体表示が主流であるが、やはり利用者の利便性を考えると、メガネなし立体表示の実現が望まれる。メガネなし立体表示は、小画面の2眼式立体ディスプレイとしてすでに実用化されている。実は、これを単純に大画面化することは難しい。これを可能にするのが、多眼式立体表示である。また、メガネありでも、メガネなし2眼式でも、多眼式でも、インテグラルイメージングでも、人間の立体視機能に対する問題点があり、人体に与える影響が懸念されている。このような問題点を解決する、人に優しい立体表示方式として、超多眼立体表示が研究されている。

本稿では、メガネなし2眼式立体表示の問題点を解決する多眼式立体表示と、さらに、多眼式立体表示の問題点を解決する表示方式として研究が進められている超多眼立体表示について解説する。

2. 視点の形成

メガネを用いた立体表示では、同一のスクリーンに左右の画像を表示し、メガネに取り付けた液晶シャッター、偏光フィルタ、波長フィルタなどの光学フィルタで分離して、左右の目に表示する。これに対して、メガネなし立体表示では、画像分離に光学フィルタを用いることができない。そこで、空間に視点を設定する。二つ以上の視点を空間に設定し、スクリーン各点からそれぞれの視点に集光する光線を用いて、対応する画像を表示する。視点に目を置くと、対応する画像が見える。左右の目に対応して2個の視点をを用いるのが2眼式立体表示で、3個以上の視点をを用いるのが多眼式立体表示である。

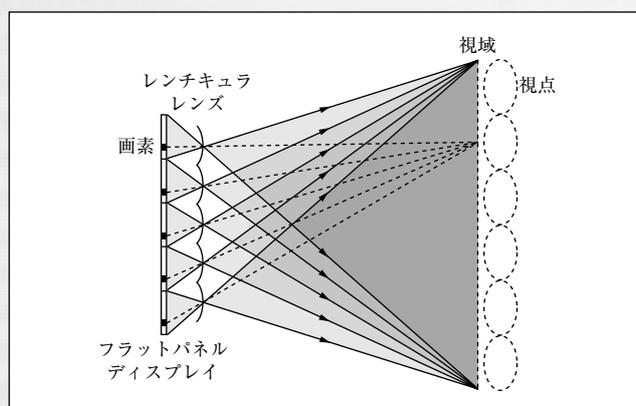


図1 裸眼立体表示の視域と視点の形成(レンチキュラ方式)

視点の形成方法について説明する。ここでは、図1に示す、レンチキュラ方式の構成を用いて説明する。フラットパネルディスプレイにレンチキュラレンズを組合せた構成である。レンチキュラレンズとは、1次元のレンズであるシリンドリカルレンズを水平方向に並べたレンズアレイである。各レンズが、フラットパネル上の対応する領域を、特定の距離の同一位置に多重結像する。多重結像は、フラットパネル上の対応領域のピッチより、レンズピッチを若干小さくすることで実現される。この多重結像領域が視域となり、ここに複数の視点が並び、視点から出て各レンズの中心を通る直線が、フラットパネル表示面と交わる交点を考える。これらの交点にある画素を用いて、表示した画像が、対応する視点位置から見えることになる。フラットパネル上の各領域に2画素存在する場合が2眼式となり、3画素以上存在する場合が多眼式となる。

つぎに、視点の空間形状を考える。図2に示すように、フラットパネル上のすべての領域内の1画素から発せられた光線が重なる位置が視点を形成する。そのため視点は、実際には点ではなく、ダイヤモンド形状の領域をもつ。

† 東京農工大学 大学院工学研究院
"3D That Everyone Understands (7): Multi-View and Super Multi-View Displays" by Yasuhiro Takaki (Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo)

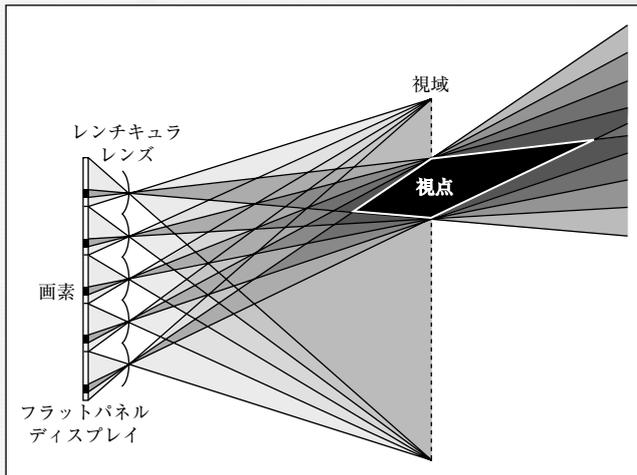


図2 視点の形成

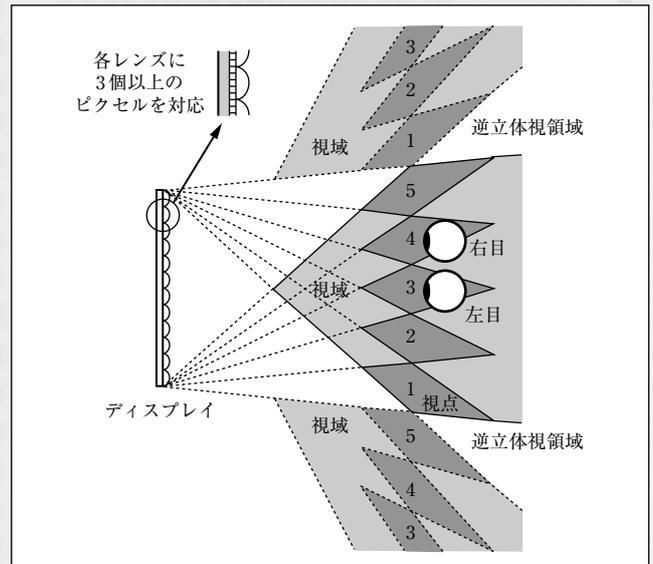


図3 多眼式の視域

3. 2眼式立体表示の問題点

2眼式立体表示では、左右の目に対応する2個の視点を発生するので、左右の目に対応する視点に入る位置が観察位置になる。このように、メガネなし2眼式立体表示では、観察位置を限定することで、メガネなし表示を実現している。そのため、観察範囲が狭いことが、2眼式立体表示の問題点である。

レンチキュラレンズの各レンズには、フラットパネルディスプレイ上の対応領域の周辺にある画素から発せられる光線も入射する。そのため、左右の視点の両側に、繰り返して左右の視点が発生する。このように左右の視点が繰り返し存在するため、左右の目が間違った視点に入り、左右の目に反対側の画像が見える可能性がある。この場合、立体像の奥行きが逆に知覚される逆立体視と言われる状態になる。このような逆立体視状態の存在も、2眼式立体表示の問題点である。

ここで、視域の幅がスクリーンの幅より大きい場合には、各視点の領域は後方に無限に広がる。また、小画面のディスプレイを手を持って見る場合には、特に指示しなくても人間は両眼の中心にディスプレイをもってくるので、逆立体視は生じ難い。以上のことから、メガネなし2眼式立体表示は、携帯電話や携帯型ゲーム機などで用いられている。

4. 多眼式立体表示の原理

メガネなし2眼式立体表示は、観察位置に対する制限が大きいことから、家庭のリビング等で利用することは難しい。この問題点を解決するのが、多眼式立体表示である。

多眼式立体表示では、図3に示すように、空間に3個以上の視点を発生する。視点間隔は、通常は、両眼間隔(平均

65mm)、あるいはその半分程度にする。各視点には、その位置から物体を見た視差を有する視差画像を表示する。

逆立体視は、視点の繰り返し位置で生じるため、視点数が増えると逆立体視になる確率は低下する。視点数を n とすると、逆立体視になる確率は $1/n$ となる。

多眼式立体表示では、正しく立体視できる領域は、視点が並ぶ水平方向以外にも、奥行き方向にも広がる¹⁾。逆立体視領域でなければ、視点位置以外でも、複数の視差画像が網膜上で合成され、目の位置に応じた視差をもつ画像が見える。図3からわかるように、視域の幅が画面の幅よりも大きいと、視域は後方に無限に広がる。

多眼式立体表示では、観察位置によって見える画像が変化するので、運動視差が得られる。ただし、視点数が少なく視点間隔が大きいと、不連続な画像の切替わりや、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ことが指摘されている。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式立体映像は、高精細・大画面な2眼立体映像よりも臨場感が低く感じられることがある。多眼式の不連続な運動視差を抑えるには、立体像の飛び出し量を抑える必要がある。

5. 多眼式立体ディスプレイ

多眼式立体ディスプレイの代表的な構成方法には、これまでの説明に用い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²⁾と、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。それぞれを、以下で説明する。

(1) フラットパネル型

フラットパネル型には、レンチキュラ方式以外に、パラ

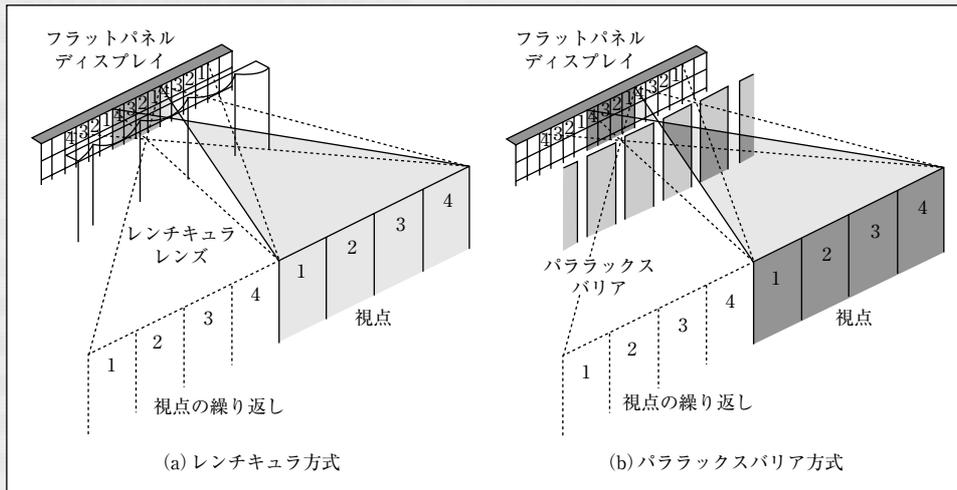


図4 フラットパネル型の構成方法

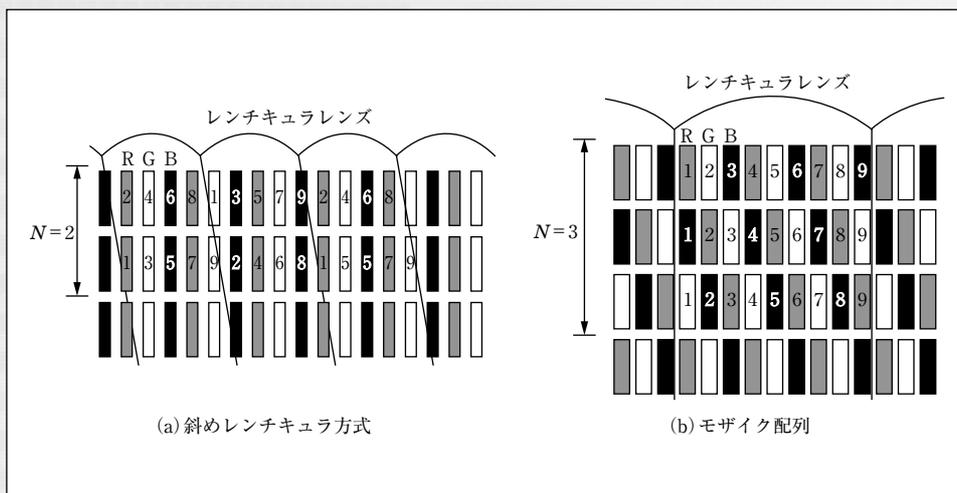


図6 RGBストライプ配列を利用した多眼式立体表示の実現

ラックスバリア方式が存在する。両者を、**図4**に示す。パララックスバリアとは、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。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。いずれの方式でも、一つの画素から発せられる光線が複数のレンズやスリットに入射するため、繰り返しの視点が発生する。

パララックスバリアは、リソグラフィ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、プラスチック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生じる。視点の形成精度は、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。

つぎに、フラットパネルディスプレイの画素配置について説明する。**図5** (61ページ参照)に、多眼式立体表示用に開発された斜め色画素配置³⁾を示す。レンチキュラ方式

でもパララックスバリア方式でも、画素の水平位置によって光線の水平進行方向が決まる。したがって、同色の色画素が異なる水平位置をもつように斜め方向に並べると、水平方向と垂直方向の画素密度のバランスが良くなる。また、従来のRGBストライプ配列のフラットパネルディスプレイを利用可能にするために、**図6** (a)に示すように、画素構造を傾ける代わりにレンチキュラレンズやパララックスバリアを傾ける方法⁴⁾⁵⁾が提案されている。また、**図6** (b)に示すように、色フィルタの並べ方を変える方法⁶⁾も提案されている。

フラットパネル型は、構成が単純である点で優れている。しかし、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になるため、両者にトレードオフの関係がある。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、立体表示性能を高める方法も開発されている。

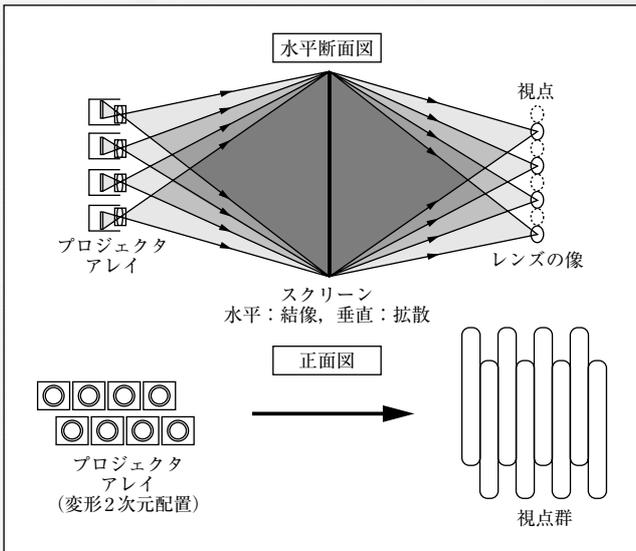


図7 マルチプロジェクション型の構成方法

(2) マルチプロジェクション型

図7に示すように、プロジェクタアレイと共通スクリーンを組合せた構成である。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次元配置すると、異なる水平方向に狭間隔で画像を表示できる。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用いる。いずれの場合も、プロジェクタのレンズの像が観察者側の空間に結像される。この結像レンズの像の位置に目を置くと、そのプロジェクタの表示画像が見える。すなわち、レンズの像が視点を形成する。スクリーンは垂直方向拡散板の機能も有していて、垂直方向に視域を拡大し、垂直方向の視点位置の違いを解消する。

マルチプロジェクション型は、立体表示解像度と視点を独立に増やすことができる。しかし、構成が複雑であることが問題点である。

6. 従来の立体表示の問題点

2眼式や多眼式の立体表示は、人間がもつ立体視機能に対して、以下に示す二つの問題点がある。

第1の問題点は、図8(a)に示す、調節と輻輳の不一致である。輻輳は、左右の目の回転角の情報をもとに三角測量の原理で奥行きを知覚する立体視機能である。左右の目に正しい視差画像が表示されれば、輻輳は正しく奥行きを知覚する。調節は、目のピント合わせ情報に基づく奥行き知覚機能である。従来の立体表示では、目のピントは画像を表示しているディスプレイ画面付近に合うため、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作用が

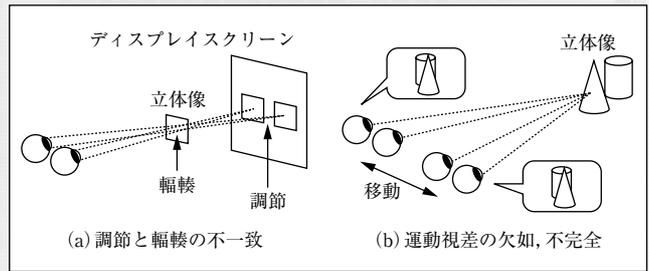


図8 従来の立体表示の課題

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1~2m以内であるので、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8(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、視点数が少ない場合には、不連続な画像の切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無意識のうち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。

7. 超多眼立体表示の原理

将来の立体ディスプレイでは、前章で述べた問題点が解決された人に優しい立体表示が実現されることが望まれる。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⁷⁾⁸⁾(Super Multi-View表示、以下、SMV表示と略す)が知られている。これは、図9(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、瞳に二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、この点に対して目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2~8mm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。

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群を再現する立体表示方式も用いられるようになってきている。このような光線再生型の立体表示を用いて、SMV表示と

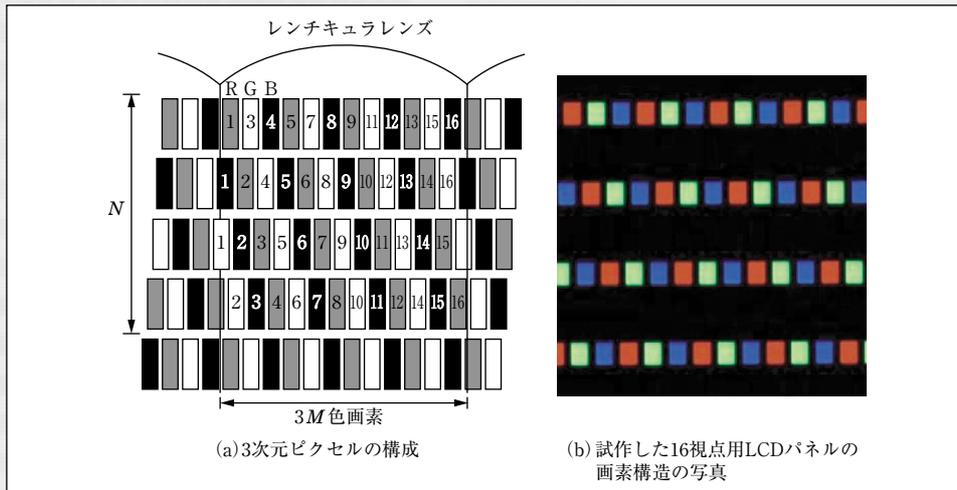


図5 斜め色画素配置

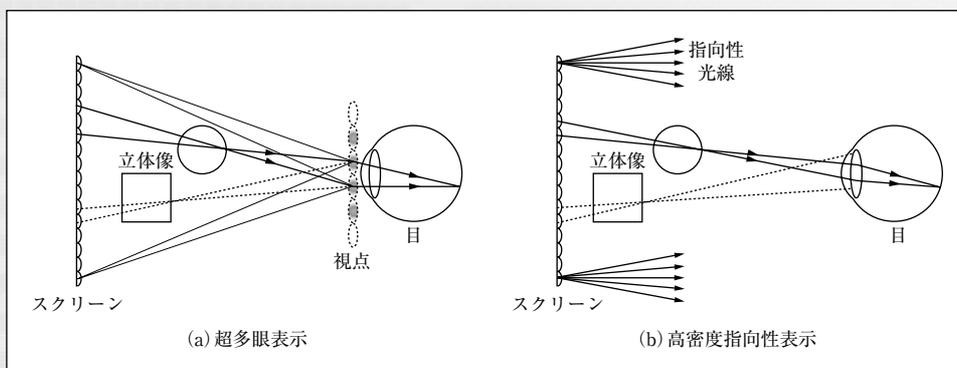


図9 自然な立体表示

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^{9) 10)} (High-Density Directional表示, 以下, HDD表示と略す)である。図9 (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、調節と輻輳の不一致が問題になる約1~2m以内の観察距離で、最短観察距離を600mmとして瞳孔径を5mm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。

8. 超多眼立体ディスプレイ

SMV/HDDディスプレイの研究状況として、ここでは、著者の研究を紹介する。

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、過去に開発したHDDディスプレイを示している。

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^{9)~12)}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。

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。そこで、解像度が320×400の72指向性ディスプレイ¹³⁾を試作し、これを二つ組合せた解像度がVGA相当(640×400)のディスプレイ¹⁴⁾を試作している。なお、30指向性ディスプレイ¹⁵⁾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。

また、時間多重表示技術を導入して、一つのプロジェクタで複数の画像表示を可能にし、マルチプロジェクション型に必要なプロジェクタ数の削減を実現した¹⁶⁾。図10 (a)に15枚の画像を表示できる時間多重表示モジュールを、図10 (b)に4台のモジュールを組合せて実現した60枚の画像表示が可能な光学エンジンを示す。

表1 高密度指向性ディスプレイの試作システム

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°
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						

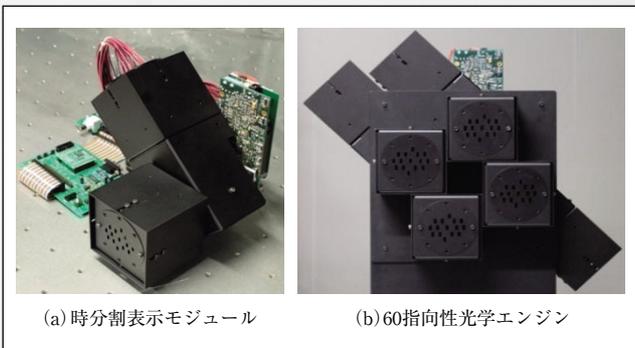


図10 時分割表示モジュールによる高密度指向性表示

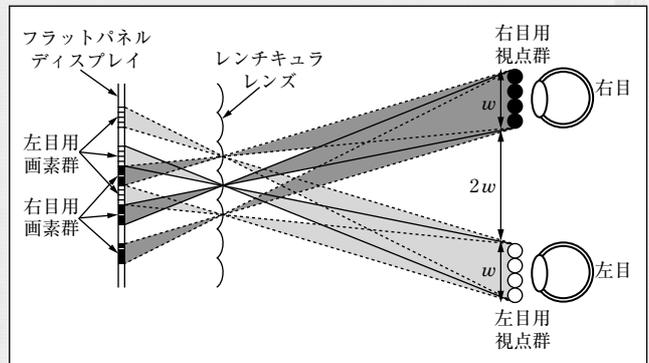


図12 フラットパネルディスプレイに必要なピクセル数を低下させる超多眼立体ディスプレイの構成方法

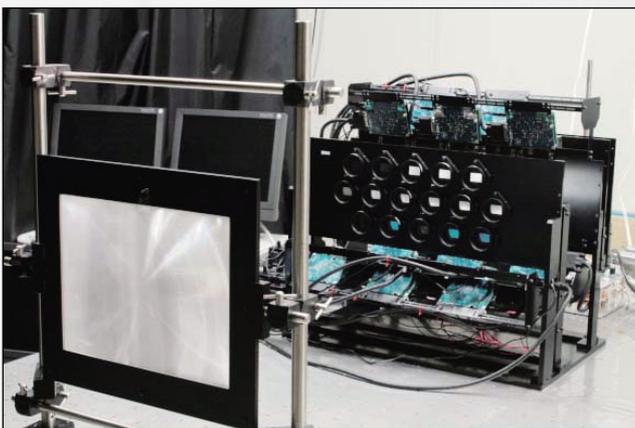


図11 フラットパネル型とマルチプロジェクション型のハイブリッドな構成法を用いた256視点超多眼立体ディスプレイ

さらなる表示画像数の増加を可能にするために、フラットパネル型とマルチプロジェクション型を組合せたハイブリッド型の超多眼立体ディスプレイの構成方法¹⁷⁾を提案している。図11に、フラットパネル型の16視点ディス

プレイを16台用いて、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において、フラットパネルディスプレイに必要なピクセル数を低下させる方法¹⁸⁾も提案している。これは、図12に示すように、左右の目の付近のみに視点群を形成する。通常は、左右の目の間の視点も含めた連続した視点群を形成するため、レンチキュラレンズの各レンズに、連続した多数の画素を対応させる。視点群を左右に分離することで、各レンズに二つの分離した画素群を対応させる。分離した画素群の間に、周囲のレンズに対応した二つの画素群を入れ込むことで、フラットパネルディスプレイに必要な画素数を減少させている。アイトラッキングを用いて、目の位置に合わせて視点形成位置を移動することで、観察位置の自由度を拡大できる。

試作した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¹⁹⁾²⁰⁾。

9. お す び

多眼式立体表示の原理と、代表的なディスプレイの構成方法について説明した。さらに、将来の立体表示方式として研究が進められている超多眼立体表示の原理と、それを実現するディスプレイの研究開発状況について述べた。

(2011年5月6日受付)

〔文 献〕

- 1) N.A. Dodgson: "Analysis of the viewing zone of the Cambridge autostereoscopic display", Appl. Opt., **35**, pp.1705-1710 (1996)
- 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, **35**, 8, pp.400-409 (2006)
- 3) Y. Takaki: "Multi-view 3-D display employing a flat-panel display with slanted pixel arrangement", J. Soc. Inf. Display, **18**, pp.476-482 (2010)
- 4) C. van Berkel and J.A. Clarke: "Characterization and optimization of 3D-LCD module design", Proc. SPIE **3012**, pp.179-186 (1997)
- 5) K. Mashitani, G. Hamagishi, M. Higashino, T. Ando and S. Takemoto: "Step barrier system multiview glassless 3D display", Proc. SPIE, **5291**, pp.265-272 (2004)
- 6) 平山雄三: "平置型立体ディスプレイ", 光学, **35**, 8, pp.416-422 (2006)
- 7) 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, **36**, pp.624-631 (1998)
- 8) T. Honda, Y. Kajiki, S. Susami, T. Hamaguchi, T. Endo, T. Hatada and T. Fujii: "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) pp.461-487
- 9) 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", 映情学誌, **57**, 2, pp.293-300 (2003)
- 10) Y. Takaki: "High-Density Directional Display for Generating Natural

Three-Dimensional Images", Proc. IEEE, **94**, pp.654-663 (2006)

- 11) H. Nakanuma, H. Kamei and Y. Takaki: "Natural 3D display with 128 directional images used for human-engineering evaluation", Proc.SPIE, **5664**, pp.28-35 (2005)
- 12) K. Kikuta and Y. Takaki: "Development of SVGA resolution 128-directional display", Proc. SPIE, **6490**, pp.U1-8 (2007)
- 13) Y. Takaki: "Thin-type natural three-dimensional display with 72 directional images", Proc. SPIE, **5664**, pp.56-63 (2005)
- 14) Y. Takaki and T. Dairiki: "72-directional display having VGA resolution for high-appearance image generation", Proc. SPIE, **6055**, pp.X-1-8 (2006)
- 15) M. Tsuboi, M. Fujioka, Y. Takaki and T. Horikoshi: "Real Time Rendering for a Full Parallax 3D Display Using High-Density Directional Images", 13th International Display Workshops, pp.1379 (2006)
- 16) 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", 映情学誌, **63**, 8, pp.1133-1138 (2009)
- 17) Y. Takaki and N. Nago: "Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display", Opt. Express, **18**, 8, pp.8824-8825 (2010)
- 18) Y. Takaki, Kosuke Tanaka and Junya Nakamura: "Super multi-view display with a lower resolution flat-panel display", Opt. Express, **19**, 5, pp.4129-4139 (2011)
- 19) 福富武史, 名手久貴, 高木康博: "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", 映情学誌, **58**, 1, pp.69-74 (2004)
- 20) Y. Takaki and H. Kikuta: "3D Images with Enhanced DOF Produced by 128-Directional Display", 13th International Display Workshops, pp.1909-1912 (2006)



高木 康博 1986年, 早稲田大学工学部卒業。1988年, 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。1992年, 同研究科博士後期課程修了。1991年, 同大学助手。1994年, 日本大学文理学部専任講師。1998年, 同助教授。2000年, 東京農工大学工学部助教授(現在, 准教授)。主に, 立体映像技術に関する研究に従事。博士(工学), 正会員。

講座 誰にでもわかる3D 第8回

応用4：二眼式3Dカメラ

(正会員) 和田 学明†

1. ま え が き

近年、3D映像による映画上映の機会が増えてきている。また、衛星放送やブルーレイディスクによるパッケージメディアなどを通じて、家庭で3D映像が視聴される機会も増えてきた。

過去何度かブームが起こってきた3D映像であるが、今回の普及には過去と異なっている点がある。一つは撮影や表示機器がより高精細化され、臨場感が高まっている点である。またもう一つは、3D映像の視聴と疲労や不快感との関係が研究され¹⁾²⁾、快適な3D視聴のための安全ガイドラインが示され³⁾、3D映像の制作で安全性が配慮されるようになってきている点が挙げられる。3Dカメラで撮影した映像をコンピュータで加工・編集することにより、より安全な3D映像に修正することも可能であるが、加工・編集のための時間、費用を省力化したり、画質の劣化を抑えたいという考えから、撮影段階での安全性の配慮が望まれている。

このような中、3Dの撮影機材は進化してきている。カメラとしては、一般的に左眼映像と右眼映像を撮像する二眼式3Dカメラが用いられており、快適な3D映像が撮影できるようさまざまな調整機能を有している。またHD (High Definition) のCCD (Charge Coupled Device) やMOS (Metal Oxide Semiconductor) センサなど、高精細化された撮像素子を用いたカメラが広く使われるようになってきている。

本稿では、上述した二眼式3Dカメラについて、さまざまな調整機能や撮影の際に注意しなければならない点について解説する。

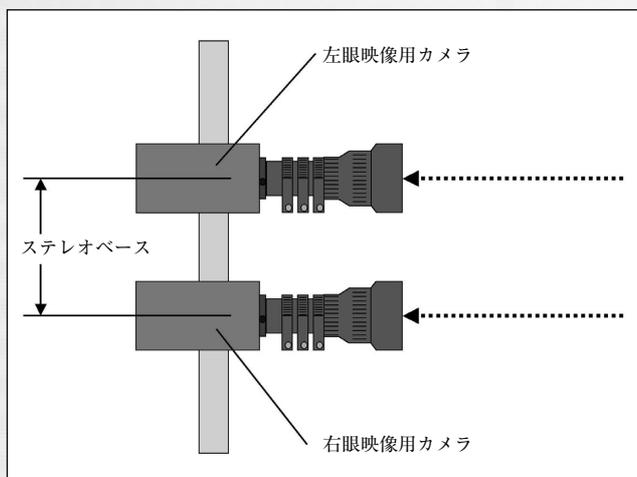


図1 サイド・バイ・サイド式リグカメラ (上面図)

2. 二眼式3Dカメラの概要

二眼式3Dカメラは、左眼映像と右眼映像を撮像するため2台のカメラとレンズを有している。図1はサイド・バイ・サイド式リグカメラを示しており、2台のカメラを距離をおいて配置することにより、人間が二眼で物体を見るように、左眼映像と右眼映像をそれぞれ撮像することができる。この二眼間隔をステレオベースと呼んでいる。

図2はミラー式リグカメラを示しており、到来した光信号をハーフミラーで分割し、左眼映像用カメラと右眼映像用カメラに入力している。ただし、同一光軸の光信号を分割し、2台のカメラに入力したのでは左眼映像と右眼映像が同じになってしまうので、実際のミラー式リグカメラではステレオベースが存在するように、一方のカメラを横方向にずらして配置している。

また最近では、2台のカメラとレンズを一体型にし、ステレオベースを固定にした3Dカメラも登場している⁴⁾。

以上のように、二眼式3Dカメラでは、ステレオベースを設けた2台のカメラにより、異なった視点の二眼映像を撮像

† パナソニック株式会社
"3D That Everyone Understands (8): Binocular 3D Camera" by Noriaki Wada (Panasonic Corporation, Osaka)

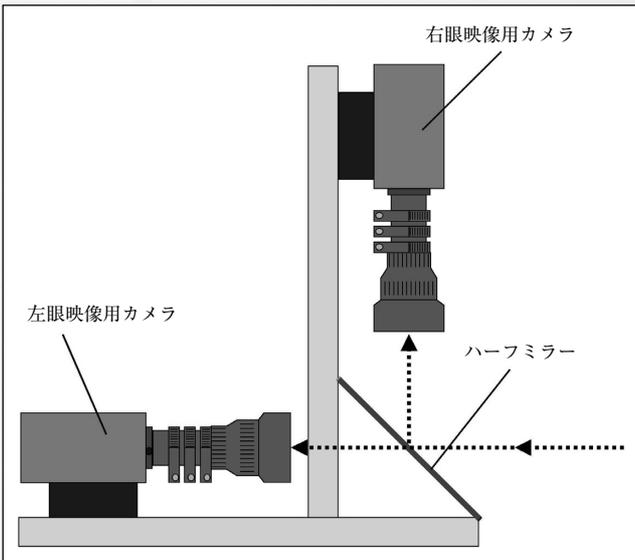


図2 ミラー式リグカメラ (側面図)

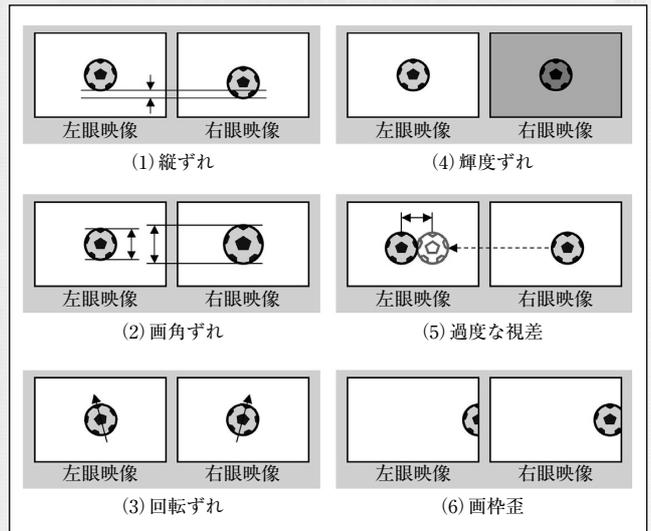


図3 不適切な3D映像の例

している。この二眼映像では、写っている同じ物体でも水平方向の位置のずれ、すなわち視差が存在する。実際の3D視聴では、この視差が奥行き情報に変換され、立体を融像することができる。両眼視差と奥行き/飛び出しの立体感の関係については本講座の第3回で詳しく述べられている⁵⁾ので参考にされたい。

3. 二眼式3Dカメラに必要な機能

二眼式3Dカメラには、従来の2D映像制作用のカメラと異なり、3D映像制作のために必要な機能が存在する。3D映像独特の奥行き/飛び出しを表現したり、より快適に3D映像を視聴するために不適切な二眼映像を排除するためのものである。

図3に、眼精疲労を起す可能性のある不適切な3D映像の例を示す。これら不適切な3D映像を避けるため、3Dカメラで撮像する際にさまざまな調整が必要になる。なお、図3の(5)、(6)については4章で詳しく述べる。

3.1 輻輳角調整

一般的に二眼式3Dカメラでは、2台のカメラの光軸を交差させて撮影する交差法が用いられる。図4は交差法による撮影時に輻輳角を設定して、基準面を調整している様子を示している。2台のカメラの光軸が交差する点をコンバージェンスポイントと呼び、二つの光軸がなす鋭角を輻輳角と呼ぶ。また、コンバージェンスポイントを含む平面を基準面と呼んでいる。

図4において、基準面距離 c は輻輳角 θ とステレオベース d によって決まり、通常輻輳角 θ を変えることにより基準面距離 c を変えている。

図5は、被写体であるボールより手前に基準面を設定した例である。この場合、左眼映像のボールは画面中央より

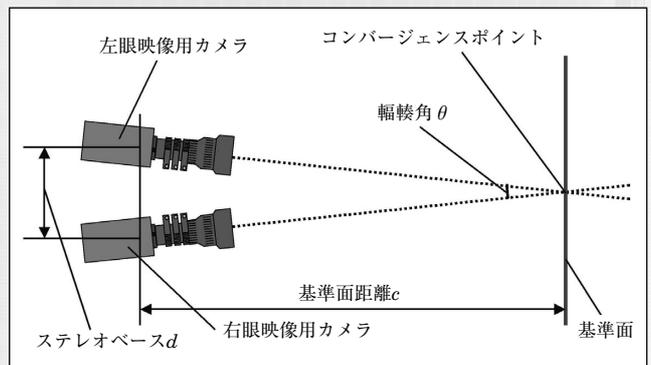


図4 輻輳角による基準面距離の調整

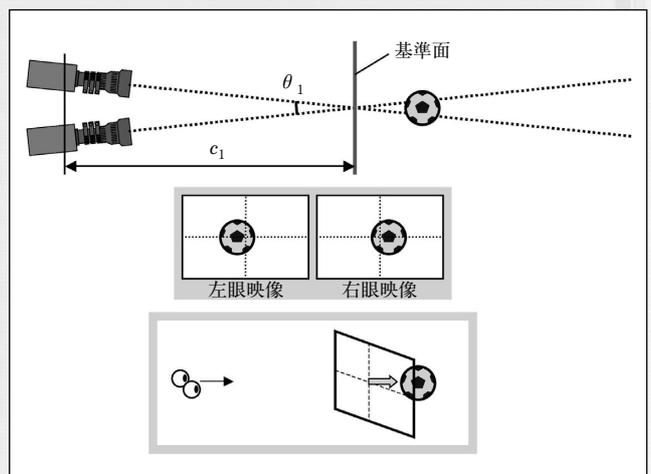


図5 基準面設定による奥行き表現

左側にずれ、右眼映像のボールは右側にずれる。このような3D映像を視るときは、ボールは映像の表示面の奥側に融像し、奥行きを感じる。

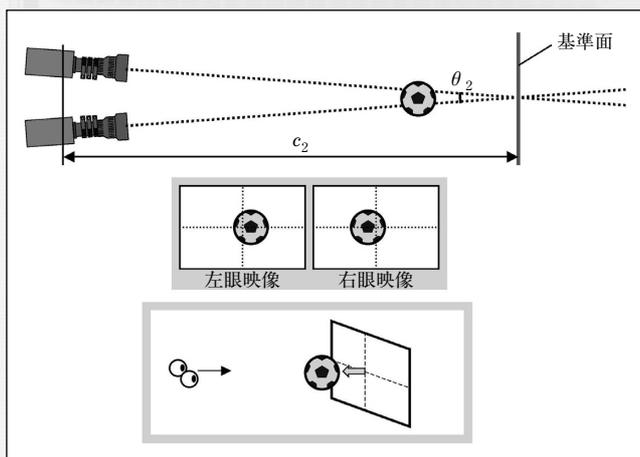


図6 基準面設定による飛び出し表現

一方、図6は被写体であるボールより奥側に基準面を設定した例であり、左眼映像のボールは画面中央より右側にずれ、右眼映像のボールは左側にずれる。このような3D映像を視るときは、ボールは映像の表示面の手前に融像し、飛び出しを感じる。

以上のように、基準面距離を変えることにより目標被写体を奥行き表現にしたり、飛び出し表現にしたりすることができる。3D撮影では、制作者の意図により奥行き/飛び出し表現を決めていくため、基準面距離は自由に設定できるようになっていなくてはならない。このため二眼式カメラでは輻輳角が変えられるようになっている。リグではカメラとレンズ全体を動かし、輻輳角が調整できるメカニズムを有している。レンズ一体型3Dカメラでは、小型レンズにて輻輳角を制御している例もある⁴⁾。

3.2 映像同期

2台のカメラで撮像した左眼映像と右眼映像の撮像タイミングは一致していないといけない。すなわち、2台のカメラは完全に同期していなければならない。電子シャッターを使用するときも露光タイミングは、左眼カメラと右眼カメラで一致していなければならない。

図7は、左眼映像と右眼映像の撮像タイミングが一致していない例を示している。この例は右から左へボールが転がり、このボールを蹴ろうと足が左から右へ動いているシーンである。ここでは、ボールおよび足を基準面に設定して二眼式3Dカメラで撮像している。左眼映像用カメラでは、ちょうどボールと足が接触するタイミングで撮像しているが、右眼映像用カメラの撮像タイミングが左眼より若干早いため、二眼映像間で被写体の位置にずれが生じる。ボールは右眼映像の方が左眼映像より右側にずれるため、3D映像を見ると、表示面より奥にあるように見える。一方、足は右眼映像の方が左眼映像より左側にずれているた



図7 撮像タイミングが一致していない例

め、表示面より飛び出して見える。すなわち、ボールは足に当たらないように見えてしまう。

このような例に限らず、カメラのパンニングや被写体が動いているときなど、映像に横方向の動きがある場合は、左眼と右眼で撮像タイミングがずれると被写体の横方向のずれが発生し、これが奥行き/飛び出し表現となる視差になってしまい、距離感が正しく表現できなくなってしまう。また、カメラのチルティングなど、映像に縦方向の動きがある場合は、二眼映像間に縦ずれが発生し、不快な映像になってしまう。よって、2台のカメラは完全に同期していなければならない。

2台のカメラを搭載するリグでは、ゲンロックと呼ばれる外部同期機能を有するカメラを用いることにより、2台カメラの撮像タイミングを一致させている。一体型二眼カメラの場合は、信号処理クロック、水平・垂直同期信号などを共通化することにより、左眼と右眼の撮像タイミングを一致させている。

3.3 光軸調整

より快適な3D映像のためには、二眼映像間の縦ずれを小さくしなくてはならない。しかしながら、二眼式3Dカメラでは縦ずれが発生する要因を持っている。

- (1) 2台のカメラ・レンズをリグなどに固定する際に、二つの光軸のあおり角に微小なずれが存在すると二眼映像間の縦ずれとなる。特にズームレンズを望遠側で使用すると、この縦ずれが顕著に現れる。
- (2) レンズをカメラに固定する機構的な精度から、レンズ光軸が撮像面中心に一致せず、若干のずれをもっていることが多い。このずれの量、方向が二眼カメラ間で異なっていると、ズーム位置(画角)を変えると被写体が二眼映像で異なった位置に動いてしまい縦ずれを起こしてしまう⁶⁾。

(3)ズームレンズ自体がズーム位置(画角)を変えると光軸が変動してしまう特性を持っている。広角では縦ずれの影響は小さいが、望遠では光軸変動の影響が大きくなり、縦ずれが発生することがある。

これらの要因で発生する縦ずれをなくすために、二眼式3Dカメラでは、2台カメラの光軸のあおり角を調整するメカニズムや、2台カメラの位置(高さ)を調整するメカニズムを持っているものが多い。また、ズームレンズのズーム位置(画角)毎にずれ量を測定し、自動的にあおり角を調整するキャリブレーションシステムを搭載した二眼式3Dカメラも存在する。

3.4 画角調整

二眼映像で同じ物体の大きさが異なっても不快な3D映像となる。これは2台のカメラ画角が異なっているために発生する問題である。二眼式3Dカメラでは、2本のレンズで正確に画角が一致していなかったり、カメラ内のプリズムや撮像素子など、固定するときの精度の問題、あるいは、レンズをカメラ本体に固定するときの精度の問題から、2台のカメラ間で光路長に不均一さが発生することにより画角ずれが発生する。

二眼式3Dカメラでズームレンズを用いるときは、ズーム位置を調整し、画角を一致させることができる。レンズ一体型二眼式3Dカメラでは、予め画角のずれを測定し、自動補正する方式が用いられているものもある⁶⁾。

3.5 回転調整

二眼映像間に回転方向ずれがある場合も不快な3D映像となる。二眼式3Dカメラでは、カメラを固定する部分で回転方向のずれを調整できる機能が必要になる。

3.6 輝度調整

二眼映像で同じ物体の輝度が異なっても不快な3D映像となる。これは、2台のカメラの感度設定が完全には一致していなかったり、レンズ内の絞りの機構的な精度の問題から絞りの開口面積が一致しなかったりすることが原因である。

二眼式3Dカメラでは、波形モニターで二眼映像の信号レベルをチェックし、2台カメラのアイリスを別々に調整して輝度ずれがないように合わせることができる。また、2台カメラの絞りを変化させていったときの輝度レベルのずれを予め測定しておき、一方のカメラのゲインを制御することによって自動補正する方式が用いられているものもある⁶⁾。

4. 3D撮影にあたって注意すべき点

安全性に配慮した3Dカメラにより快適な3D映像が撮影できるようにはなったが、それでもなお注意しなければならない点がある。快適に楽しむ3D映像のためには、図3で示した(5)過度な視差や、(6)画枠歪みも防がなければならない。

4.1 快適な視差

過度な視差は疲労や不快感の原因となる。立体視の融合限界は視差角が2°程度、快適視差は視差角1°以下が目安とされている³⁾。また開散方向の視差制限として、ディスプレイ上の奥行き側視差は、瞳孔間隔を超えないことが望ましい、子供まで考慮すると、50mmを超える視差は避けることが望ましいとされている³⁾。

図8は、視差角と奥行き視差の説明図である。図8中の角度 α 、 β 、 θ を用いると、視差角は $\theta - \alpha$ 、あるいは $\beta - \theta$ で表現される。これらの視差角1°以内が快適な視差範囲となる。アスペクト16:9のディスプレイで画面高さの3倍の視距離で見ると、この視差角1°は画面幅の2.9%の視差に相当する。

一方奥行き視差は図8中ではDで表現され、50mm以下にならなければならない。この50mmが画面幅の何%に

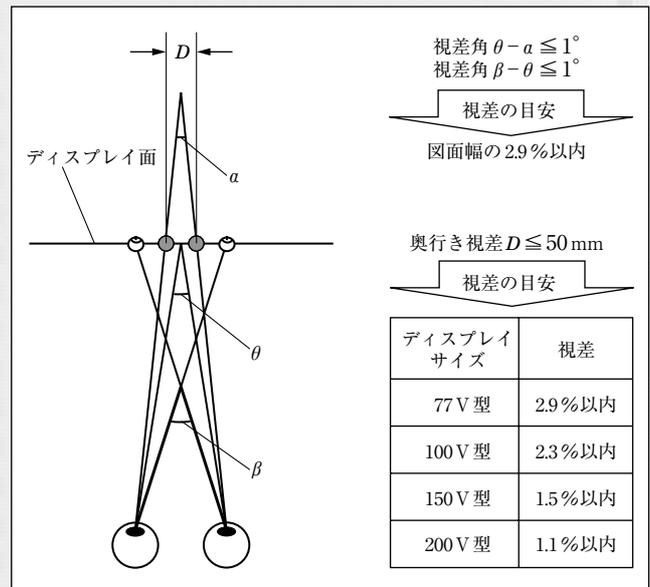


図8 視差角と奥行き視差

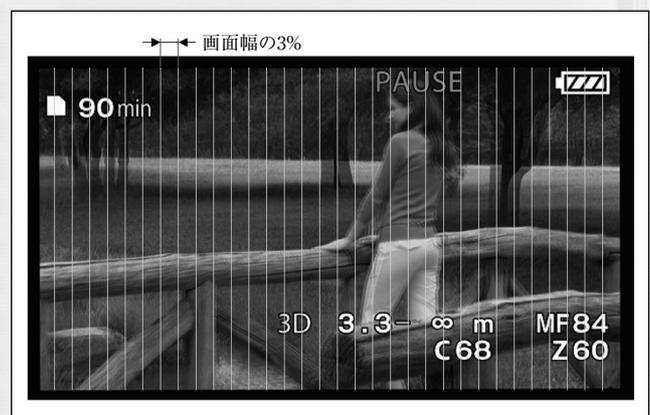


図9 視差を確認するモニター表示の例

相当するかは、表示する画面サイズによって異なる。77V型であれば2.9%であるが、150V型であれば1.5%に相当する。想定するディスプレイサイズを決めた上で奥行き側視差の最大値を決めておく必要がある。

実際の3D撮影の際には、最大視差が画面幅の何%になっているか確認することにより、快適な視差になっているか判断している。

図9は、画面幅の3%ピッチでスリットが入っているモニタ画面に二眼映像を重ね表示している例である。このような映像を見ながら、最大視差が3%に比べ小さくなっているかを確認している。

しかしながら、実際の3D映像の制作では、さらに安全な方向となるように、飛び出し側視差は画面幅の1%以内、奥行き視差は画面幅の2%以内というように取り決めて制作している例もある。

4.2 ズームと快適視差

快適な視差範囲を画面幅の2.9%以下とすると、水平画角とステレオベース、基準面距離から快適な撮影距離範囲が求まる。すなわち、3Dカメラでズームポジション、ステレオベース、輻輳角を設定すると、快適な被写体の距離範囲を求めることができる。

図10は、ステレオベースを65mm、基準面距離を5mとしたとき、水平画角の変化で快適な被写体距離範囲が変化する様子を示している。図10では、視差角1°以内、すなわち、表示画面幅の2.9%以内となる被写体の距離範囲を快適領域とし、視差角2°以上となる被写体の距離範囲を不適領域、その間を注意領域としている。

図10をみてわかるように、水平画角が小さくなれば快適領域は狭くなっていく。すなわち、ズームレンズで望遠にしていくと快適な距離範囲は狭くなり、過度な視差が発生しやすくなることを示している。よって望遠で3D撮影する際は、基準面距離付近の物体しか写らないよう注意す

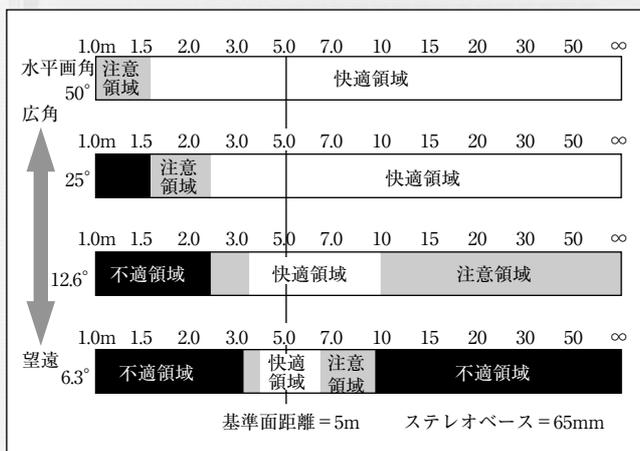


図10 ズームによる快適距離範囲の変化

る必要がある。遠方の背景が写り込まないようにするなど気をつけなければならない。逆に3D撮影する際広角を使うと過度な視差が発生しにくくなる。

4.3 ステレオベースと快適視差

図11は基準面距離を5m、水平画角を6.3°としたとき、ステレオベースの変化で快適な被写体距離範囲が変化する様子を示している。

図11からわかるように、ステレオベースが小さくなるほど快適な被写体距離範囲は広がっている。すなわち、ステレオベースを小さくすれば過度な視差の発生を防ぐことができる。しかしながら、ステレオベースを小さくして視差を小さくするということは、立体効果(奥行き感、飛び出し感)が小さくなってしまいますので、ステレオベースが

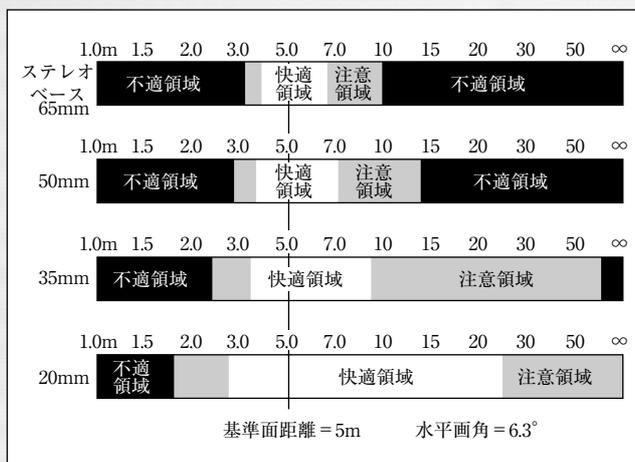


図11 ステレオベースによる快適距離範囲の変化

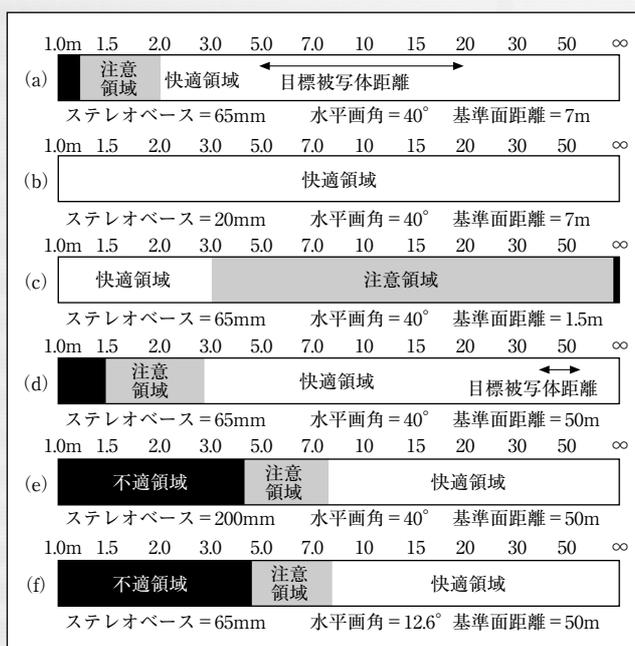


図12 撮影時の設定値の変更例

小さければ良いというものでもない。

実際の3D制作では、ズーム(水平画角)、ステレオベース、主たる目標被写体の距離の設定(3Dカメラの配置)により、程よい立体効果と快適な視差の両立を図っている。

4.4 撮影時の設定例

3D撮影時の具体的な設定例を示す。図12(a)のように、ステレオベース65mm、水平画角40°付近は人間視に近く、基準面距離を7mに設定すると、視差角1°以内の快適視差を確保する被写体距離範囲は2.1mから無限遠となる。このとき5mから20mの範囲の被写体には適度な視差が付き、かつ無限遠の背景が写り込んでも快適な視差範囲内である。ただし、2.1m以内の物体が写り込むと快適な視差範囲を超えるため、注意が必要である。

1mから2mの近距離の被写体を撮り、かつ無限遠の背景が写り込むような場合は、快適視差の被写体距離範囲を広げる必要があるため、図12(b)のように、ステレオベースを65mmより小さくする必要がある。室内撮影のように遠景が写り込まない場合は、図12(c)のように、単に基準面距離を近くに設定するだけでよい。

一方、図12(d)のように、主たる目標被写体の距離が40mを超え、基準面距離を50m付近に設定するような場合は、40mから60mの被写体の距離の違いがあっても視差がほとんど変わらないため、立体効果が小さくなってしまふ。このような場合は、図12(e)のように、ステレオベースを65mmより大きくしたり、図12(f)のように、ズームをより望遠側で使用すればよい。

4.5 画枠歪み

3章の図3(6)に示した例は画枠歪みである。一般的に2D映像視聴で、画面周辺部に物体があり、物体の全形が見えていない場合は、特に違和を感じない。これは、窓越しに物を見るのと同じように、表示面の画枠に隠れて全形が見えていないと脳が理解するからである。しかし図3(6)のような3D映像の場合、表示面より手前に飛び出して見えるため、矛盾、違和を感じる。

こういった画枠歪みを避けるには、画面周辺部の物体は奥にあるように見せるよう、基準面距離を手前に移動設定

することが考えられる。また構図を変え、画面周辺部の物体がなくなるようにズーム、パン、チルトによってフレームアウトさせたり、完全にフレームインさせるなど、対策が考えられる。

5. お す び

二眼式3Dカメラについて、3D映像独特の奥行き/飛び出しを表現するために必要な機能や、快適に3D映像を視聴するために必要な調整機能について説明した。また、撮影の際に注意しなければならない点について説明した。これらの点は、より安全で、快適な3D映像の視聴を実現させるためのものである。

映画などは、3D撮影後のポスト処理により快適3D映像に加工することも可能であるが、スポーツ中継やライブイベントなどでは、3Dカメラで撮影する段階で快適3D映像を配慮しておかなければならない。3D映像の普及には正しい理解と運用が望まれる。

(2011年6月13日受付)

〔文 献〕

- 1) 山之上裕一、永山克、尾藤峯夫、棚田詢、元木紀雄、三橋哲雄、羽鳥光俊：“立体ハイビジョン撮像における左右画像間の幾何学的ひずみの検知限・許容限の検討”，信学論，J80-D-II，9，pp.2522-2531 (1997)
- 2) Self HC: "Critical tolerances for alignment and image differences for binocular helmet-mounted displays", Technical Report, AAMRL-TR-86-019 (1986)
- 3) 3Dコンソーシアム安全ガイドライン部会編：“人に優しい3D普及のための3DC安全ガイドライン”，3Dコンソーシアム (2010)
- 4) 和田学明：“一体型二眼式3Dカメラレコーダと撮影技術”，映情学誌，64，11，pp.1559-1560 (2010)
- 5) 水科晴樹：“3D映像における疲労を避けるには？”，映情学誌，65，3，pp.297-301 (2011)
- 6) 和田学明，坂内達司：“業務用3Dカメラレコーダの簡単操作・小型軽量化技術”，パナソニック技報，65，4，pp.20-24 (2011)



和田 学明 わだ のりあき 1986年、慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。同年、松下電器産業(株)入社。放送用プログレッシブカメラなど放送用カメラの研究開発に従事。現在、パナソニック(株)主幹技師。また、慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程在籍中。正会員。

基礎5:インテグラル式立体映像

(正会員) 洗井 淳†

1. ま え が き

1600年頃に立体視の試みがなされて以降、さまざまな立体映像技術が提案されている¹⁾。本稿では、インテグラル式立体映像を取り上げる。以下、2章では奥行き知覚の要因をもとに立体ディスプレイを分類し、インテグラル式立体映像の位置づけを述べる。続いて、3章でインテグラル式立体映像の基本となるインテグラルフォトグラフィ(以下、IPと表記する)の原理、4章で再生像の性質について解像度と視域の観点から説明する。IPは3次元写真の技術であるため、そのままでは実時間で被写体の撮影と再生像の表示を行うことができない。5章では、実時間で撮影と表示が可能なインテグラルイメージングについて説明する。また6章では、インテグラル式立体映像に関連する技術の動向について紹介する。

2. インテグラル式立体映像の位置づけ

私たちが実世界の奥行きを知覚することができる主な要因として、輻輳、両眼視差、運動視差、焦点調節が挙げられる¹⁾(図1)。

- (1)輻輳(Vergence)：両眼の視線を空間上のある点で交差させること。遠くを注視している状態から近くを注視する場合に、眼球は内側に回転する(輻輳：Convergence)。一方、近くを注視している状態から遠くを注視する場合に、眼球は外側に回転する(開散：Divergence)(日本語では、"Vergence"と"Convergence"を「輻輳」と区別なく表現する場合があります。注意が必要である。本稿では輻輳を"Vergence"の意味で用いる)。
- (2)両眼視差：左右の網膜での結像位置の違い。注視点から奥行き方向への変位が大きくなると、両眼視差は大きくなる。
- (3)運動視差：眼球の位置(視点)の移動により生じる、見え方の違い。視点の移動に伴い、対象物が近くにあるほど大きく移動しているように見え、対象物が遠くにあるほど小さく移動しているように見える。
- (4)焦点調節：毛様体筋による、水晶体の厚さの変化。遠くを見る場合には毛様体筋は弛緩し、水晶体は薄くなる。一方、近くを見る場合には毛様体筋は収縮し、水晶体は厚くなる。

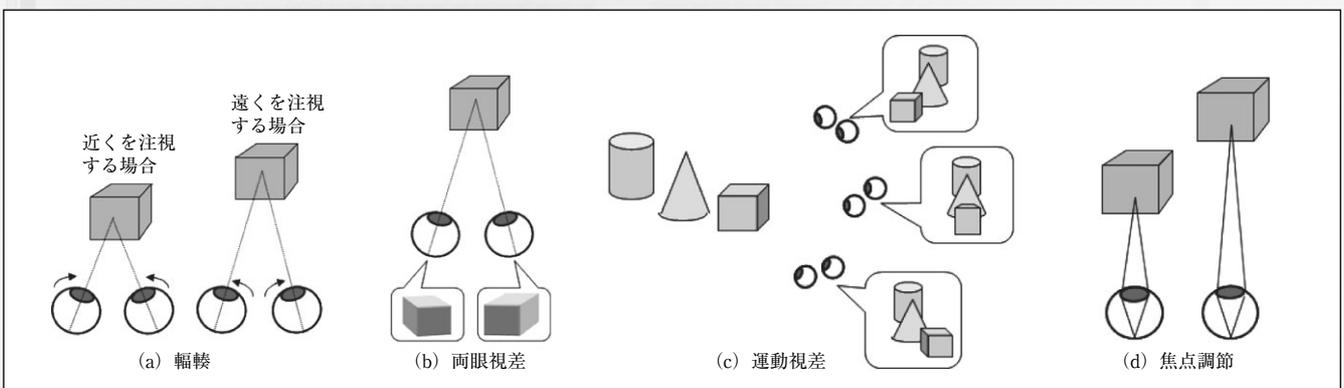


図1 奥行き知覚の要因

† NHK 放送技術研究所

"3D that Everyone Understands (9): Integral Imaging" by Jun Arai (NHK Science and Technical Research Laboratories, Tokyo)

表1 立体ディスプレイの分類

要因 \ 方式	2眼立体視	パララクスパノラマグラム	空間像再生型
輻 輳	✓	✓	✓
両眼視差	✓	✓	✓
運動視差		✓(水平視差型)	✓(全方向視差型)

これらの奥行き知覚の要因をもとに、立体映像を表示する方式は三つに大別できる(表1)。2眼式では、奥行き知覚の要因の中で輻輳と両眼視差を用いている。運動視差を提供することができる立体ディスプレイとして、パララクスパノラマグラムが知られている。しかしながら両者の方式とも、水平方向に異なる画像のみが提示されるため、観察者は両眼を水平に保持しておく必要がある。両眼の位置が水平方向からずれると、立体的な効果が得られない。立体めがねを用いず、観察する際の姿勢に制約がない立体ディスプレイとして、空間像再生型が知られている。インテグラルフォトグラフィやホログラフィは、空間像再生型に分類される²⁾。本稿で扱うインテグラル式立体映像は、インテグラルフォトグラフィを基本原理としている。

一般に、実体視の場合、両眼の輻輳点は焦点調節による被写界深度の中に収まっている。2眼式の立体映像を見る場合は、注視している像が画面よりも手前に飛び出していると、両眼の輻輳点は画面よりも手前に位置する。一方で焦点は、画像の表示面が概ね被写界深度の中に収まるように調節される。2眼式では、輻輳点と焦点を合わせる位置との間に差が生じると、眼精疲労の原因になると指摘されている³⁾。空間像再生型においては、原理的には、輻輳点と焦点を合わせる位置が一致することが期待でき²⁾、2眼式と比べて眼精疲労を抑圧できる可能性がある。

3. インテグラルフォトグラフィの原理

フランスの物理学者であるリップマン(Lippmann)は、立体写真の技術としてインテグラルフォトグラフィ(以下、IPと表記する)を提案した⁴⁾。IPでは図2に示すように、多数の凸レンズからなるレンズ板とフィルムを用いる。レンズ板は凸レンズが二次元状に配列されているが、図2はその断面を表している。撮影の際、図2(a)に示すように、個々の凸レンズにより被写体の像を凸レンズと同じ数だけ生成し、生成された像をフィルムに記録する。ここでは凸レンズを「要素レンズ」、凸レンズにより生成される被写体

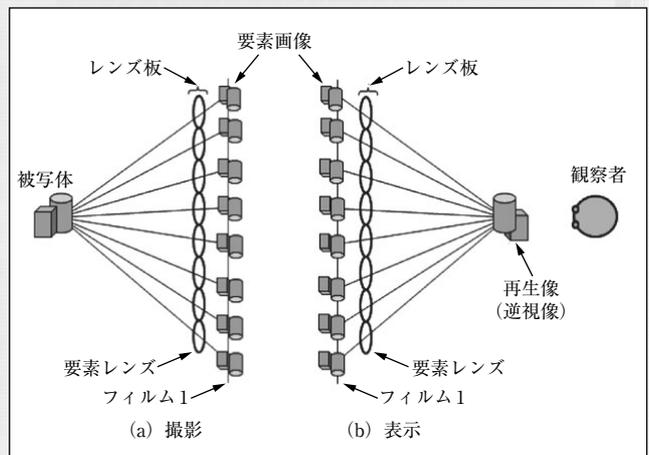


図2 インテグラルフォトグラフィの原理

の像を「要素画像」と呼ぶ。表示の際は、図2(b)に示すように、要素画像が記録されたフィルムの前にレンズ板を配置する。このような状態では、要素画像からの光線は、各要素レンズを通り、撮影時の光線を逆に戻ることになるため、被写体から発せられた光が再現される。結果として、観察者は立体めがねを用いることなく、再生像を見ることができる。被写体の撮影と、再生像の表示には、通常の間接光を用いることができる。

ただし図2に示す構成では、生成された再生像の奥行きが、被写体と比較して反転する逆視像の問題が生じる。例えば、図2(a)ではフィルムから見て円柱が角柱より手前である。一方、図2(b)では見る人に対して円柱は角柱より奥に存在する。逆視像は、個々の要素画像を点対称に反転することで回避できる。この反転処理は、二段階の撮影で実現できる⁵⁾。まず図2(a)に示すように、要素画像をフィルム1に記録する。次に図3に示すように、レンズ板を通して別のフィルム2に要素画像を転写する。二段階の撮影処理を経たフィルムの前にレンズ板を配置すると、図4に示すように正しい奥行き空間像が生成される。

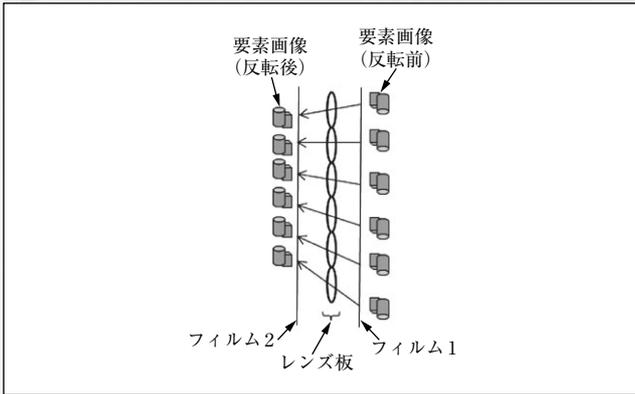


図3 要素画像の反転

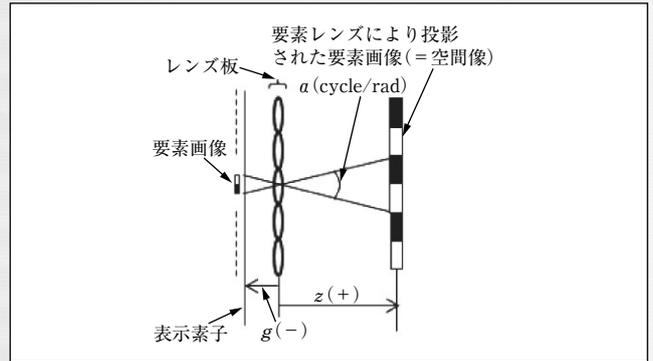


図5 空間像の投影空間周波数

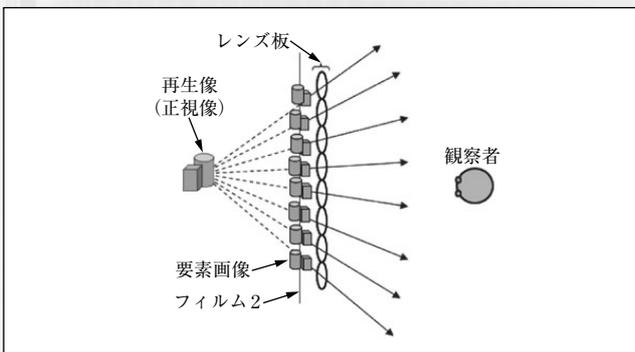


図4 奥行き正しい像の再生

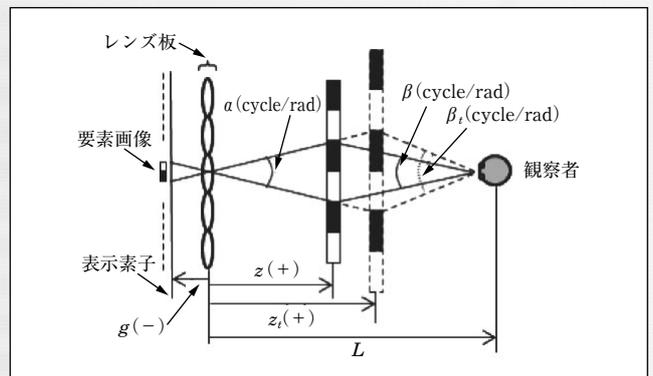


図6 空間像の観視空間周波数

IPを、例えば立体テレビや生体観測システムへ適用する場合、実時間で撮影と表示を実行できることが望ましい。フィルムの使用や、二段階の撮影は、実時間システムを構築する際に問題となるが、これらの問題を回避する手段については、5章で述べる。

4. 再生像の性質

4.1 解像度

以下では、映像を表示する媒体として、離散的な画素構造を有する表示素子を想定して説明することとする。まず図5に示すように、要素レンズによってレンズ板から z の距離に投影された要素画像を考える。ここで、投影された要素画像について1radあたりに含まれる最大の縞の数が α であるとし、これを「投影空間周波数」と呼ぶこととする。この投影空間周波数 α は、表示素子の画素ピッチや要素レンズの回折限界に加えて、要素レンズの焦点外れによる収差の影響を受ける。複数の要素レンズによって投影された要素画像が集積され、レンズ板から z の距離に空間像を形成する。

次に図6に示すように、生成された空間像をレンズ板から L の距離から眺めた場合の1radあたりの最大の縞の数を β とし、これを「観視空間周波数」と呼ぶこととする。レンズ板から離れた位置(例えば z_p)に生成された空間像では、観視空間周波数(例えば β_p)は低くなる。したがって、投

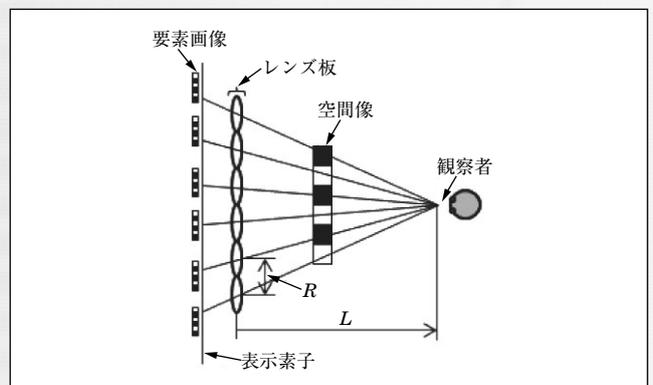


図7 空間像の最大空間周波数

影空間周波数 α が表示素子の画素ピッチに依存する場合、高い空間周波数で観察できる空間像に対して、レンズ板から空間像までの距離が離れるほど、より精細な画素ピッチの表示素子が必要となる。

さらに、IPで空間像を表示する場合、レンズ板を構成する要素レンズのピッチを考慮する必要がある。IPでは要素画像を表示する表示素子とレンズ板までの距離は、要素レンズの焦点距離にほぼ一致した状態で配置される。この状態では、各要素レンズからは概ね平行光線が出射することになり、図7に示すように、空間像を観察者から眺めると、

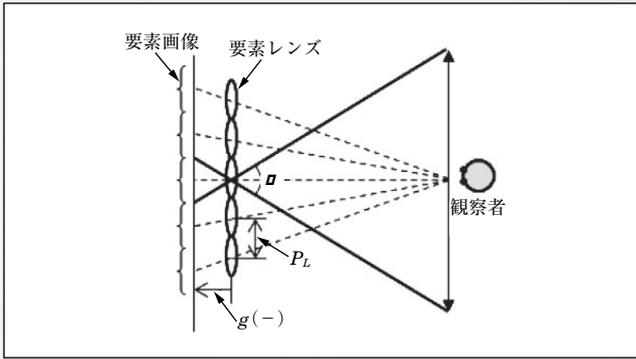


図8 視域

空間像が要素レンズのピッチで標本化されることになる。このことから幾何光学で考えると、空間像の最大の空間周波数は、要素レンズのピッチ P_L で決まるナイキスト周波数 β_n に制限される。この空間周波数 β_n を「最大空間周波数」と呼ぶこととする。

以上のことから、任意の奥行きに生成される空間像の上限となる空間周波数は、要素レンズピッチで決まる最大空間周波数 β_n と、観視空間周波数 β とを比較して低い空間周波数に制限される。

4.2 視域

IPでは、上下左右いずれの方向においても、見る人の位置に応じた空間像を見ることができる。ただし、見る人が移動できる範囲(視域)は、ある一つの要素画像からの光が、それに対応する一つの要素レンズにより放射される領域に限られる。要素画像と要素レンズにより形成される視域の断面を図8に示す。図中、角度 Ω は視域の広がりを示しており、ここでは「視域角」と呼ぶ。レンズ板から表示素子までの距離(- g)を短くすると視域角 Ω は大きくできるが、それに応じて観視空間周波数 β を保持するためには表示素子の画素ピッチを小さくする必要がある。

5. インテグラルイメージング

5.1 実時間化技術

3章で述べたように、実時間で被写体の空間像を撮影および表示するには、逆視像とフィルム使用の回避が課題となる。逆視像を回避する手段としては、以下の二つに大別できる。一つは、被写体の逆視像を光学的に生成し、この逆視像に対して要素画像を取得する手法、もう一つは、要素画像を実時間で反転する手法である。フィルムの使用を回避するために、撮像装置と表示装置において、例えば電荷結合素子を用いたビデオカメラや液晶パネルを用いたディスプレイを用いる点では、何れの手法も同様である。

撮影時に被写体の逆視像を生成する手法として、図9に示すように、透過型指向性スクリーンを用いた逆視像生成光学

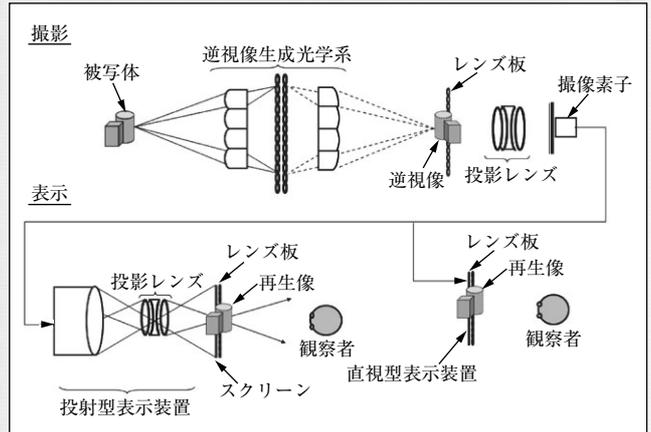


図9 逆視像生成光学系を用いた撮影/表示装置

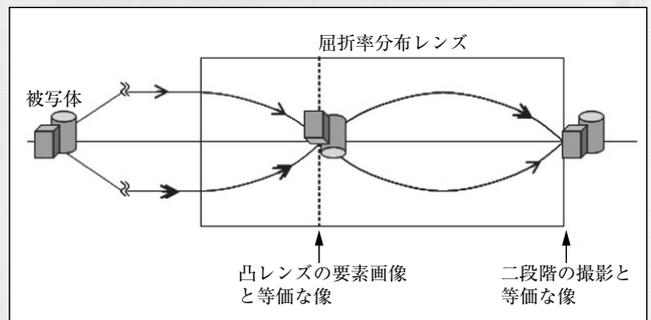


図10 屈折率分布レンズによる結像

系が提案されている⁷⁾。透過型指向性スクリーンは2枚のレンズ板により構成され、入射方向と鏡面对称の方向へ光を曲げることで逆視像を生成する。また、逆視像の倍率を制御する目的で、透過型指向性スクリーンの前後に二つのレンズ板が配置されている。撮影装置では、さらに、別のレンズ板を用いて逆視像の要素画像群を生成する。撮影の際に奥行きを反転した逆視像を生成しているため、取得した要素画像群を投影型あるいは直視型の表示装置へ入力しレンズ板を通すことで奥行き正しい再生像が再生される。

要素画像を反転する手法として、光学的手法と電子的手法が提案されている。光学的手法として、屈折率分布レンズを用いる構成がある⁸⁾。屈折率分布レンズは円筒形状をしており、中心から半径方向に離れるにしたがって屈折率が二乗特性で減少する媒質である。図10に示すように、レンズの長さを蛇行周期の3/4に設定することで、図3に示した二段階の撮影と等価な要素画像を撮影することができる。他に、図11に示すように、表示装置でレンズ板の代わりに凸面鏡アレイを用いる手法も提案されている⁹⁾。電子的手法として、取得した各々の要素画像を計算機により点対称に反転することでも、逆視像を回避することができる¹⁰⁾。

5.2 高画質化技術

表示する要素画像群の画素数を増加させる手段として、

図12に示すように、9台(水平3台×垂直3台)のプロジェクタとレンズ板を用いる構成が提案されている¹¹⁾。投射映像の総画素数は、水平2,868画素、垂直2,150画素であり、要素レンズ数は、水平240個、垂直197個である。所望の位置からずれた場所に複数のプロジェクタから映像が投射されると、生成される再生像の画質が劣化する。そこで提案手法では、レンズ板越しにカメラで投射映像の位置のずれを測定する。測定したずれ量から補正値を算出し、補正値を反映させた映像を投射することで、所望の位置に映像を投射している。

視域を拡大する手法として、図13に示すように、湾曲したスクリーンとレンズ板を用いる構成が提案されている¹²⁾。提案手法では、湾曲スクリーン上の要素画像と要素レンズの相対的な位置関係にずれが生じないように、歪みを補正

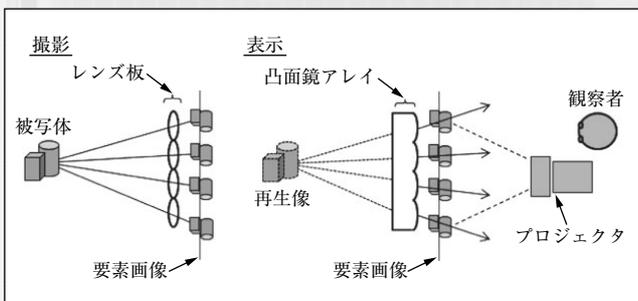


図11 凸面鏡アレイを用いた撮影/表示装置

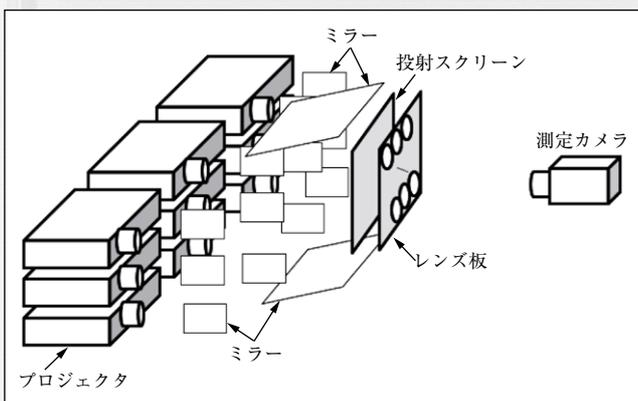


図12 複数プロジェクタによる表示装置

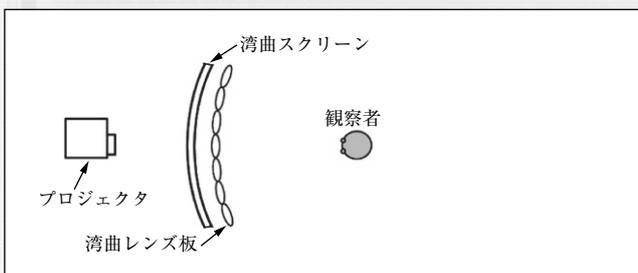


図13 湾曲スクリーン/レンズ板を用いた表示装置

した要素画像群をプロジェクタから投射する。水平方向に66°の視域が得られたことが報告されている。

6. 技術動向

6.1 3次元オブジェクト情報を用いた要素画像生成

インテグラル立体における要素画像群を、3次元オブジェクト情報から生成する手法が提案されている¹³⁾。提案手法では、図14に示すように、3次元オブジェクトを多方向から仮想カメラで撮影し、その画像から要素画像群を再構成する。3次元オブジェクトはコンピュータグラフィックスやマルチカメラで取得した情報から生成できるため、本手法により撮影対象の多様化が期待できる。

6.2 ホログラム変換

一般にホログラムの作成には、レーザ光などのコヒーレントな光源が必要である。そこで図15に示すように、自然光を用いて取得したIPの要素画像群からホログラムを生成する手法が提案されている¹⁴⁾。提案手法では撮影時にレーザ光は不要であるが、ホログラムを作成する際にレーザ光が必要となる。そこで、ホログラムの作成時にレーザ光を不要とするため、図15に示す光の伝搬を計算機上でシ

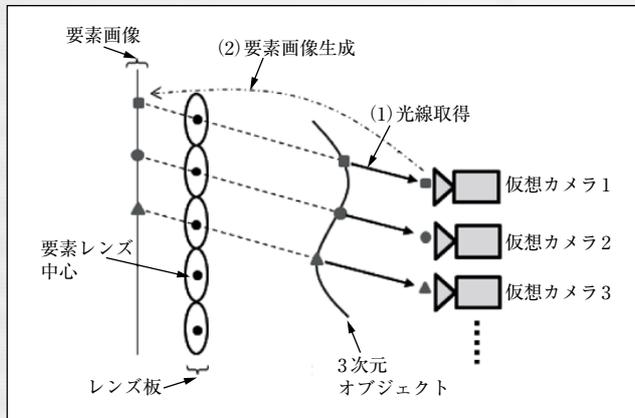


図14 3次元オブジェクト情報を用いた要素画像の生成

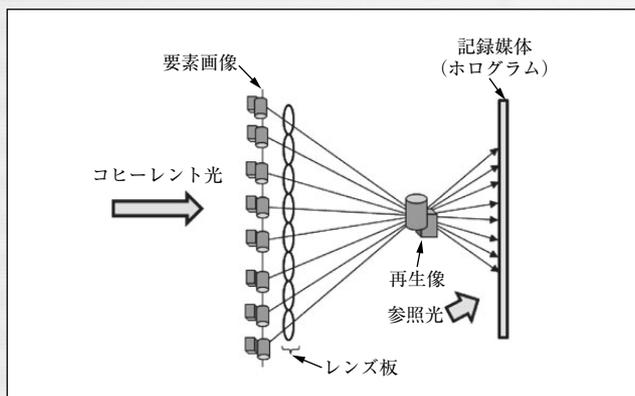


図15 要素画像を用いたホログラムの生成

ミュレートする手法が提案されている¹⁵⁾。

6.3 3次元計測

要素画像群から演算処理により被写体の断層像を生成することが可能である¹⁶⁾。また、複数の断層像間で相関値を算出することで、3次元空間における被写体の動きを抽出する手法も報告されている¹⁷⁾。これらの技術は、対象物の断層像の観察が有用な医療分野や、特定の対象物の追跡が想定される保安分野などへの幅広い応用が考えられる。

7. お す び

本稿では、インテグラル式立体映像の基本となるIPの原理と、生成される再生像の解像度および視域について解説した。また実時間で被写体を撮影し、再生像を表示するための課題と、それを解決する手法についても述べた。

IPが提案されてから100年以上が経過したが、近年の撮像・表示デバイスの高解像度化や精密加工技術の向上、記録媒体の大容量化に伴い、インテグラル式立体映像の高画質化に向けた取組みが行われている。また、計算機によるデジタル信号処理とIPが融合した新しい技術も提案されている。インテグラル式立体映像は、関連する技術分野の裾野が広いことが特徴である。今後も、高品質な空間像の生成に向けた検討のほか、映像情報と関連する多岐にわたる分野において、インテグラル式立体映像技術の応用が予想される。

(2011年6月7日受付)

〔文 献〕

- 1) 大越孝敬：“3次元画像工学”，朝倉書店（1991）
- 2) 岡野文男：“立体映像技術の研究動向”，映情学誌，61，5，pp.612-613（May 2007）
- 3) 大頭仁：“二眼式立体視技術と視覚機能”，精密工学会誌，54，2，pp.255-259（1988）
- 4) M.G. Lippmann: "Épreuves réversibles donnant la sensation du relief", J. de Phys., 4, pp.821-825（1908）

- 5) H. E. Ives: "Optical properties of a Lippmann lenticulated sheet", J. Opt. Soc. Am., 21, pp.171-176（1931）
- 6) H. Hoshino, F. Okano, H. Isono and I. Yuyama: "Analysis of resolution limitation of integral photography", J. Opt. Soc. Am. A, 15, pp.2059-2065（1998）
- 7) M. McCormick: "Integral 3D imaging for broadcast", Proc. of the 2nd International Display Workshops, 3, pp.77-80（1995）
- 8) F. Okano, J. Arai, H. Hoshino and I. Yuyama: "Three-dimensional video system based on integral photography", Opt. Eng., 38, pp.1072-1077（1999）
- 9) J.-S. Jang and B. Javidi: "Three-dimensional projection integral imaging Using micro-convex-mirror arrays", Opt. Express, 12, pp.1077-1083（2004）
- 10) J.-S. Jang and B. Javidi: "Formation of orthoscopic three-dimensional real images in direct pickup one-step integral imaging", Opt. Eng. Lett., 42, pp.1869-1870（2003）
- 11) H. Liao, M. Iwahara, T. Koike, N. Hata, I. Sakuma and T. Dohi: "Scalable high-resolution integral videography autostereoscopic display with a seamless multiprojection system", Appl. Opt., 44, pp.305-315（2005）
- 12) Y. Kim, J.-H. Park, S.-W. Min, S. Jung, H. Choi and B. Lee: "Wide-viewing-angle integral three-dimensional imaging system by curving a screen and a lens array", Appl. Opt., 44, pp.546-552（2005）
- 13) M. Katayama and Y. Iwamoto: "A method for converting three-dimensional models into auto-stereoscopic images based on integral photography", Proc. SPIE, 6805, pp.68050Z1-68050Z8（2008）
- 14) R.V. Pole: "3-D imagery and holograms of objects illuminated in white light", Appl. Phys. Lett., 10, pp.20-22（1967）
- 15) T. Mishina, M. Okui and F. Okano: "Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography", Appl. Opt., 45, pp.4026-4036（2006）
- 16) S.-H. Hong, J.-S. Jan and B. Javidi: "Three-dimensional volumetric object reconstruction Using computational integral imaging", Opt. Express, 12, pp.483-491（2004）
- 17) M. Cho and B. Javidi: "Three-dimensional tracking of occluded objects Using integral imaging", Opt. Lett., 33, pp.2737-2739（2008）



あらい じゅん
洗井 淳 1995年、早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、NHK入局。現在、NHK放送技術研究所にて、立体テレビシステムの研究に従事。博士（工学）。正会員。

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おうことを考えると、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左右にすらすと逆の目で見ると映像が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いく。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いう課題がある。

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。ディスプレイに出す映像を**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係しているため、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ふ。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

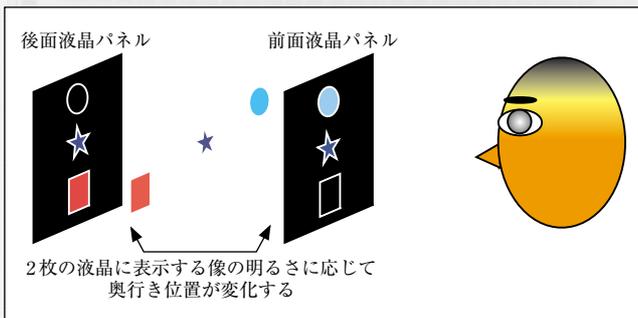


図1 DFD (Depth Fused 3D) 方式

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

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ふ。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、

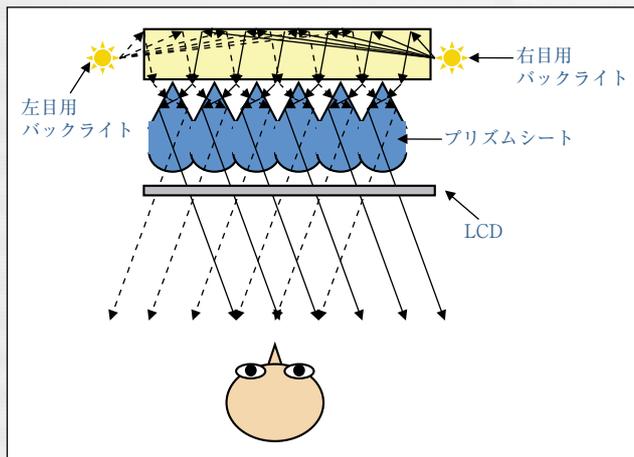


図2 スキャンバックライト方式の原理

エイリアシングの影響で文字が読みにくくなってしまふ課題もある。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られる。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気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以下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

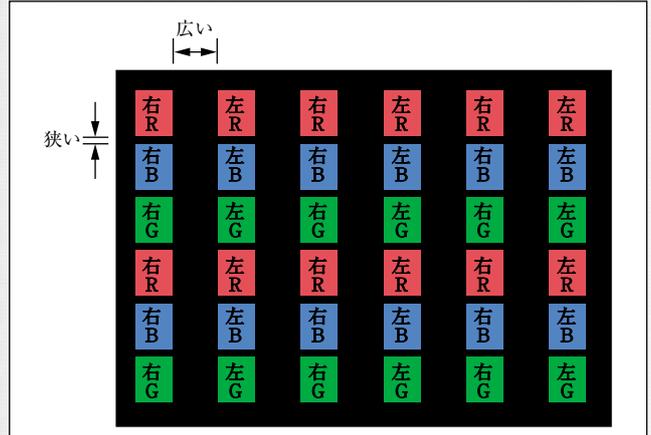


図3 2眼方式ディスプレイの画素配置例

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でも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

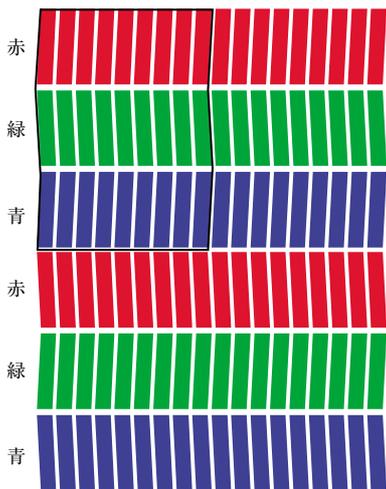


図4 1次元インテグラルイメージングの画素配置例

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。

講座 誰にでもわかる 3D 第11回

基礎6：ホログラフィ技術

(正会員) 吉川 浩†

1. ま え が き

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提案された¹⁾。当時は干渉性の良い光源もなかったためあまり注目されなかったが、1964年にエミット・リースらが発表した論文に、レーザを用いて汽車の模型を記録した写真が掲載され²⁾、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」と呼ばれていたが、のちに「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(holoは英語のwhole)記録という意味で、被写体からの光の「明るさ」と「方向」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、被写体からの光と物理的にまった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ということである。ホログラムは像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。

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³⁾ですでに検討されている。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良いので、原理は単純であるが、可視光の波長程度に高精細でかつ膨大な標本点数が要求されるため、その実用化は容易ではない。しかし、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。ホログラフィックビデオディスプレイの原理や研究動向については、これまで多くの解説^{4)~6)}があるので、本文ではより基本に戻って、光学的なホログラフィの原理⁷⁾⁸⁾からその種類や応用などを中心に解説する。

2. 波面再生法としてのホログラフィの原理

ホログラフィを「波面再生型」と呼ぶのに対して、それ以外の3次元ディスプレイを「光線再生型」と呼ぶことがある。光線とは本来、光学系の寸法が光の波長に対して充分大きい時に、光の波長を無視して近似解析するための概念である。光線再生によるディスプレイでは、再生像が表示面から離れるにしたがい、つまり、奥行きのある像を表示しようとすると、光線による近似が成り立たなくなる。より詳しく言うと、回折の影響により光線が広がって像がぼけてしまう。それに対して、波面再生であるホログラフィを適切な条件のもとで使用すれば、より奥行きのある像でも高い画質を維持できることになる。ここで重要なことは、「適切な条件」で使用しなければ、ホログラフィであっても常に高画質を維持できるわけではないということである。

2.1 波の干渉

2次元画像、例えば普通の写真では、記録するフィルムや撮像素子にあたった光の明るさの分布だけを記録している。ホログラムの撮影に使うフィルムも、普通の写真を撮影するフィルムとほぼ同じもので、光の明るさの分布しか記録できない。光の明るさしか記録できないフィルムに、光の波面を記録できるのは、波の干渉を利用しているからである。ここで、「波面」や「干渉」、「回折」などの光学用語について簡単に説明する。

波のない平らな水面に小石を投げ込むと、小石の落ちた所から波が発生し、1に示すように、同心円状に広がって行く。ここで、ある時刻で波の高さが同じなど、同じ状態にある点を結んでできる面(水面の波では線)を波面と呼ぶ。この波面は、通常は波の進行方向と直角になるので、ある時点での波面の状態がわかると光の進行方向を知ることができる。

次に、小石を同時に2個投げ込むと、それぞれの場所から波が発生し、ふたつの波がぶつかり合う所で干渉が発生する。波の高いところどうしがぶつかりると波はさらに高く

† 日本大学 理工学部

"3D That Everyone Understands (11): Holography" by Hiorshi Yoshikawa (College of Science and Technology, Nihon University, Tokyo)

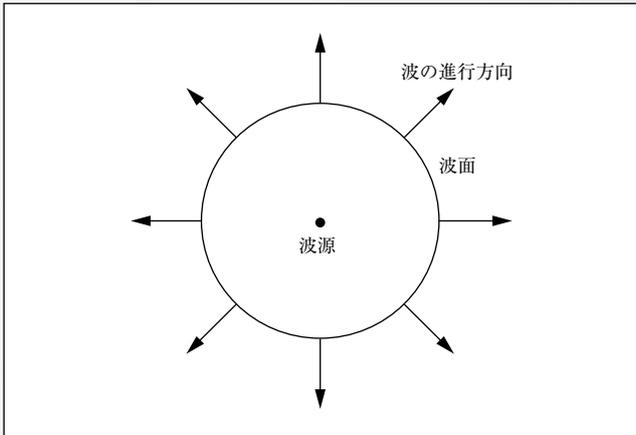


図1 波源と波面および波の進行方向の概念図

波源から発生した波は四方八方に同心円状に伝搬していく。波の状態が同じ点を結んだ面を波面と呼び、通常は波の進行方向と垂直になる。

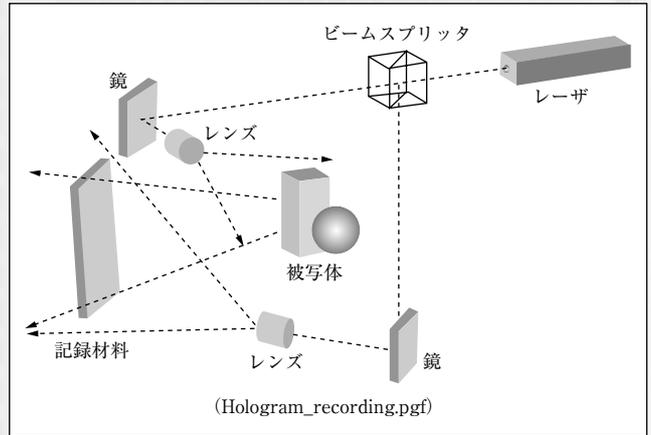


図3 ホログラムの記録光学系

レーザーからの光を二つに分け、一方は被写体を照明し、もう一方は広げて記録材料全体に当てる。被写体からの光とこの光が干渉し、記録材料に干渉縞が記録される。

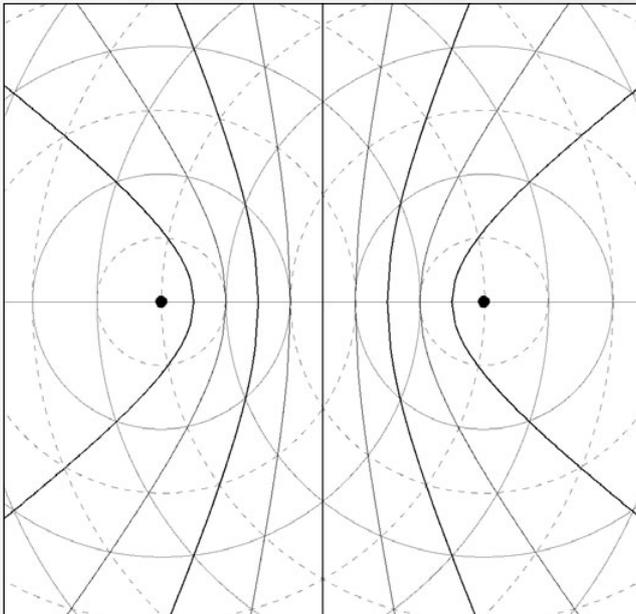


図2 二つの波源から発生した波による干渉の様子

黒い点が波の発生源で、薄い実線が波の高いところ、点線が波の低いところを表している。太い実線は干渉により波の振幅が大きくなった点を結んでいて、その間の細い実線は波が打ち消し合って振幅が小さくなった点を結んでいる。

なり、低いところどうしがぶつかるるとさらに低くなる。すなわち、振幅が大きくなる。また、波の高いところと低いところがぶつかるると、打ち消し合って波の振幅は小さくなる。小石を投げ込んでできた波はすぐに消えてしまうが、一定の周期で持続して波が発生していて、その周波数(または波長)と速度が同じならば、波が強まるところと弱まるところは常に同じ場所になる。その様子を図2に示す。図2の小さい黒丸が波の発生源で、薄い実線が波の高いところ、点線が波の低いところを表している。太い実線は干渉により波の振幅が大きくなった点を結んでいて、その間

の細い実線は波が打ち消し合って振幅が小さくなった点を結んでいる。この図はある瞬間を示しているが、時間が経って波が移動しても、波が強まる場所と弱まる場所は動かない。この、波が強まる場所と波が弱まる場所を結んだ模様を干渉縞と呼ぶ。干渉縞は二つの波面の進行方向の合成方向に形成され、その間隔は波長に比例し、二つの波面のなす角に反比例する。この角度が 60° なら、干渉縞の間隔は波長と等しくなる。

2.2 ホログラムの記録と再生

ホログラムの撮影には光の干渉を利用する。太陽や電球の光では、さまざまな波長の光が混ざっていて、波長ごとに波が強まったり弱まったりする場所が異なるので、はっきりした干渉が現れない。そのため、単一の波長で発振するレーザーを光源として使うホログラムの撮影では、図3に示すように、レーザー光線を二つに分けて、物体にあててはね返った光を一つ目の波面として記録材料にあてる。もう一つの波面として、二つに分けたレーザー光線の一方を記録材料全体に直接あてて、物体からの波面と干渉させてできる干渉縞を記録する。光の明るさは縞模様の濃さ(コントラスト)として記録され、波面分布(光の方向)は縞模様の向きや細かさとして記録される。感光材料に記録した場合は、現像などの処理を行った後に、図4に示すように、記録時と同じ場所に戻し、記録時に記録材料全体に当てていた光のみで照明すると、被写体のあった位置に再生像が現れる。専門書等では、照明光が干渉縞で回折して記録時の波面が再現されると説明しているが、厳密には、干渉縞で回折した波が干渉して波面が再現される。回折の概念について、図5を用いて説明する。穴の開いたスクリーンの左側から光を当てた場合を考える。ここでは、簡単のため平面波がスクリーンに垂直に入射する場合を考える。平面波とは波面が平面となる波であり、光線で考えると、すべての光線が平行に進んでいる場合に相当するので、「平行光」

とも呼ばれる。穴を通った光は、光線で近似できる場合は穴の形のまま直進して行く。実際には、波の性質により穴から離れるに従い影の部分にも広がっていき、遠方では点線のように角度 θ で広がる。角度 θ は光の波長 λ に比例し、穴の大きさに反比例する。このように、光が影の部分にも広がっていく現象を回折という。回折現象は、このような穴に限らず、半平面の縁の部分から影領域に回折する場合もあり、透過率や屈折率、厚みなどの光学的性質が変化する場所でも発生する。ホログラムの干渉縞に光を照射した場合には、干渉縞の細かい変化により回折が生じ、あたかもその場所が波源となったように波が広がっていく。このようにして、ホログラムの各部から発生した2次的な波源からの波が干渉し、その合成として記録した波面が再生さ

れることになる。このように、波面を記録して再生するためには一点での記録ではなく、ある面積で記録している点が、光線再生との違いの一つである。再生時の照明光の角度や波長が記録時と異なると、像の位置が変化だけでなく、再生像に歪が生じる。完全な像を再生するためには、基本的に記録と再生の条件が一致していなければいけない。

2.3 ホログラフィの応用例

ホログラフィは任意の波面を記録・再生することができるので、その応用はディスプレイに限らず計測や光学素子、メモリーなど多岐にわたっている。また、よく目につくものとしてはクレジットカードや紙幣に偽造防止として使われている。光学素子への応用としては、レンズやプリズムなどの複数の光学素子による機能を一枚のホログラムで代用できるので、装置の小型軽量化に役立っている。光学素子としてはこのほかにも拡散スクリーンなど、光線再生型の3Dディスプレイのための光学素子として利用されることもある。そのため、装置の名前にホログラフィが付いていたとしても、波面再生型ではなく光線再生型の場合もあるので注意が必要である。

3. 3Dディスプレイとしてのホログラフィ

3D表示のためのホログラフィには多くの種類があるが、ここでは代表的な方式をいくつか解説する。

3.1 フレネルホログラム

最も基本となる方式は、図3、図4に示したものであり、フレネルホログラムあるいはレーザー再生ホログラムと呼ばれている。このホログラムの記録方法を模式的に示したのが図6である。被写体を照明するレーザー光は省略してあるが、被写体表面で反射した光である物体光と参照光による干渉縞が記録材料に記録される。このホログラムを現像してレーザー光で照明すると、再生像が現れることは前述のとおりである。レーザー光の代わりに、太陽光や白熱電球などの自然光で照明すると、波長ごとに再生像の表れる位置が異なるため、虹色にぼやけた像が再生される。レーザー光で

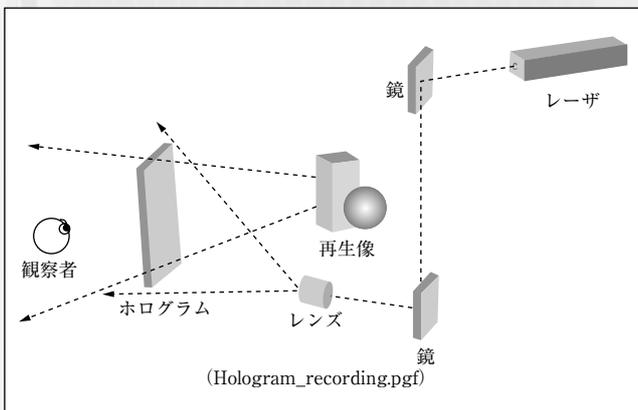


図4 ホログラムの再生光学系

干渉縞を記録した感光材料を現像して元の場所に戻し、撮影時に記録材料全体に当てていた光のみで照明すると、被写体があった場所に再生像が現れる。

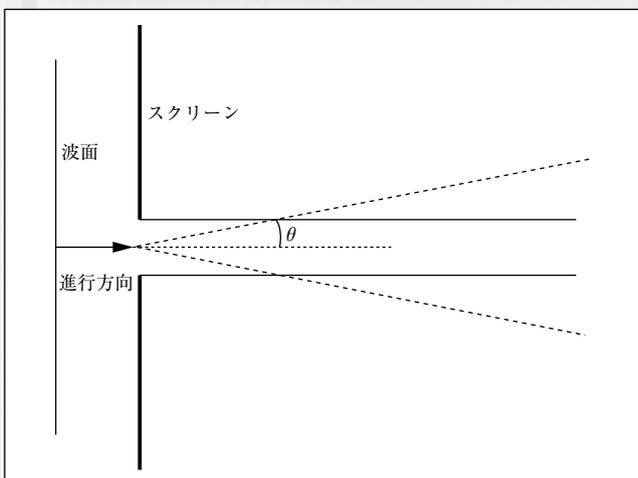


図5 回折現象の概念図

穴が開いたスクリーンの左側から平行光を当てる。光が光線と見なせれば、穴から出た光はその形のまま直進して行く。実際には波の性質により穴から離れるにしたがい影の部分にも広がっていき、遠方では点線のように角度 θ で広がる。この現象を回折という。角度 θ は光の波長 λ に比例し、穴の大きさに反比例する。

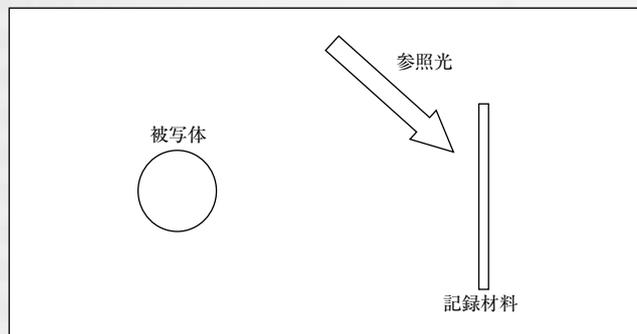


図6 フレネルホログラムの記録
もっとも基本的な記録方式である。

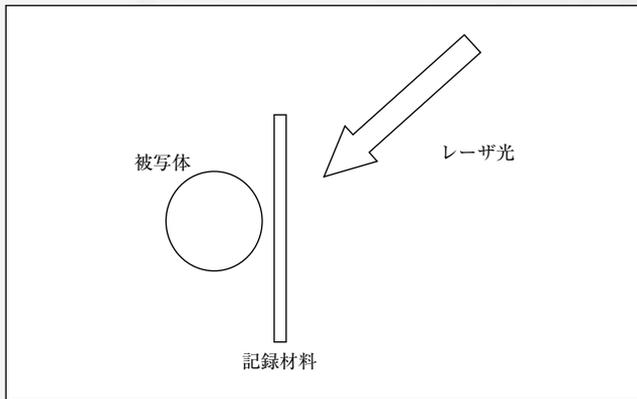


図7 デニシュクホログラムの記録
撮影が簡単で白色光で再生できる。

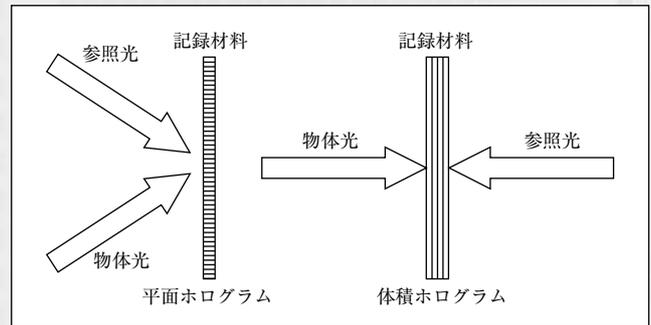


図8 平面ホログラムと体積ホログラム
参照光と物体光を記録材料に対して同じか、反対側から入れるかによって干渉縞の空間的構造が変わる。

ないと正しく再生できないことが、レーザ再生ホログラムの名前の由来である。これに対して、白色光で再生可能なホログラムはディスプレイとしても有用であり、いくつかの方式が知られている。

3.2 デニシュクホログラム

発明者の名前にちなんでデニシュクホログラム⁹⁾と呼ばれる方式を図7に示す。記録材料の近くに被写体を置き、反対側からレーザ光を照射する。記録材料に直接当たった光が参照光となり、被写体で反射した光が物体光となって干渉縞を生じる。ホログラムを現像して白色光で照明すると、記録時のレーザの波長と同じ光のみが反射して、ボケの少ない像が観察できる。

3.3 干渉縞の空間的構造による分類

図6のフレネルホログラムと、図7のデニシュクホログラムの違いを、干渉縞の空間的構造の違いとして説明したものを図8に示す。図6のフレネルホログラムのように、参照光と物体光が記録材料の同じ側から入射した場合、干渉縞は記録材料と垂直に形成されるので、薄い材料でも記録が可能である。そのため、平面ホログラムまたは薄いホログラムと呼ばれる。記録材料を液晶などの平面型の電子デバイスに置き換えることも容易である。図7のデニシュクホログラムでは、参照光と物体光が記録材料の反対側から入射する。この時の干渉縞は、図8の右の図に示すように、記録材料と平行に形成されるので、記録材料の厚さを干渉縞の間隔よりも充分大きくしなければならない。そのため、体積ホログラムまたは厚いホログラムと呼ばれる。このホログラムは、前述のように、白色光で照明しても、記録時のレーザ波長のみ選択的に反射するので、白色光再生ホログラムとして使える。ただし、干渉縞が体積的に形成されるため、電子デバイスへの置き換えは困難である。

3.4 イメージホログラム

平面ホログラムとして白色光再生が可能なホログラムには、イメージ型とレインボウ型がある。図9は、被写体の像をレンズにより記録材料上に形成して記録するホログラ

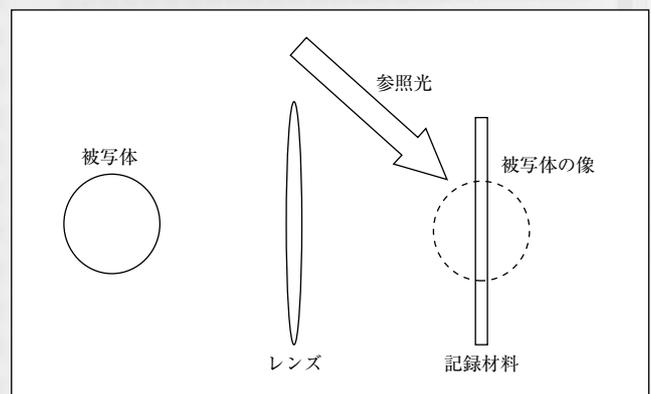


図9 イメージホログラムの記録
奥行きが浅い像ならば白色光でも再生できる。

ムで、イメージホログラム¹⁰⁾と呼ばれる。平面ホログラムを白色光で照明すると、前述のように、波長ごとに再生像の位置が異なるが、そのずれは、ホログラムからの距離に比例する。すなわち、像がホログラム上かホログラムに近い時は、波長の違いによるボケは小さくなるので、白色光でも像を観察することが可能である。

3.5 レインボウホログラム

イメージホログラムでは、奥行きが深い像を白色光で再生するとボケが大きくなるので、そのような時は、図10に示すレインボウホログラム¹¹⁾にするとよい。レインボウホログラムの記録では、イメージホログラムの撮影において、被写体とレンズの間に水平方向に開口を持つスリットを入れる。このスリットのレンズによる像は、記録材料より離れたところに形成される。このホログラムを白色光で再生すると、スリットの開口の像は、図11のように、波長ごとに異なる位置に形成される。視点をこの像の位置に置くと、位置に応じた色(波長)で像が再生される。単色の像のため波長の違いによる像のボケは発生せず、奥行きが深い像でも鮮明に再生できる。ただし、水平のスリットを置いたため、上下方向の視差(視点の移動による像の見え方の変化)はなく、色が虹色に変化する。

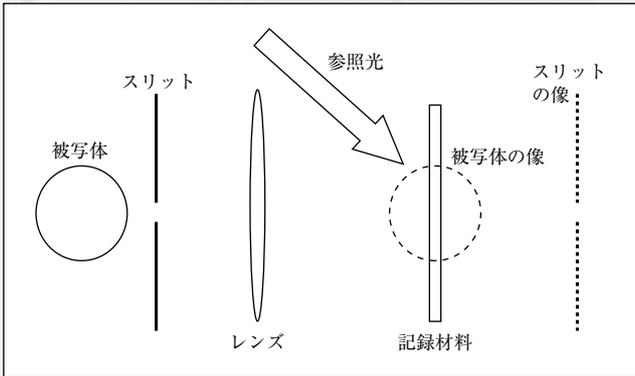


図10 レインボウホログラムの記録

水平なスリットを入れているため、上下方向の視差は記録されない。

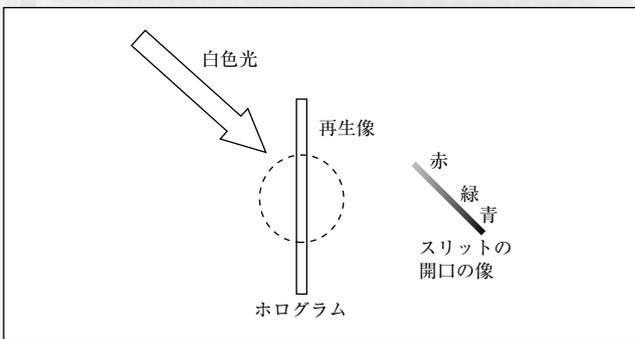


図11 レインボウホログラムの再生

奥行き深い像でも白色光で再生できる。視点をスリットの開口の位置に置くと、単色の像が観察でき、視点を上下に動かすと、像の色が虹色に変化する。

3.6 ホログラフィックステレオグラム

ホログラムは「波面再生」であるのが特徴だが、「光線再生」によるホログラムも、ホログラフィックステレオグラム¹²⁾として実用化されている。ホログラフィックステレオグラムは、光線再生型の多眼画像と同様に、多数の視点からの2次元像を1枚のホログラムとして記録することで得られる。ホログラムでは、視点数を100以上とすることも容易で、上下方向の視差を加えることも難しくはないので、レーザー光での撮影が難しい被写体や、コンピュータグラフィックスをもとにしたホログラムの作成に利用される。なお、多視点の2次元画像に奥行情報を位相として加えてホログラフィックステレオグラムを生成することで、本来の波面再生型のホログラムに匹敵する画質が得られる「位相を付加したステレオグラム¹³⁾」も提案されている。

3.7 ビデオディスプレイへの挑戦

ホログラムの記録材料を、液晶などの電氣的に書換え可能な素子に置き換えれば、ホログラフィの原理に基づくビデオディスプレイが実現できる。原理は簡単だが、可視光の波長程度、すなわち、 $1\mu\text{m}$ 程度の画素サイズが必要であり、画素数もハイビジョンの数倍から数万倍必要となる。そのため、これらの要求を緩和する研究なども行われている。実用化にはまだ時間がかかりそうだが、究極の夢の3

次元テレビとして研究が進められている。詳しくは解説記事等^{4)~6)}をご覧ください。

4. おすび

自然な3次元画像の記録と再生が可能なホログラフィ技術について、波面再生の観点から原理を解説した。適切に記録されたホログラムでは、被写体からの波面と物理的にまったく同じ波面を再生することができるので、見ているだけでは実物と区別できない3次元画像も、レーザーで記録材料に記録する静止画像では実現できている。記録材料を電子デバイスに置き換えて、実時間で表示するホログラフィックビデオディスプレイの研究も盛んになりつつある。奥行き深い像を鮮明に表示できる点で、原理的に光線再生方式より優位であるが、現在入手可能な電子デバイスでは、その高い性能を十分に引き出せているとはいえない。より性能の高いデバイスを開発するか、現在あるデバイスでも高い性能を出せるような工夫をするか、今後も引き続き研究が必要である。

(2011年7月29日受付)

【文献】

- 1) D. Gabor: "A new microscopic principle", Nature, 161, 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, 54, pp.1295-1301 (1964)
- 3) E.N. Leith, J. Upatnieks, B.P. Hildebrand and K. Haines: "Requirements for a wavefront reconstruction television facsimile system", J. Soc. Motion Picture and Television Engineers, 74, pp.893-896 (1965)
- 4) 吉川浩: "4-2-5ホログラフィ方式 (特集 高臨場感映像・音響システム)", 映像学誌, 61, pp.622-623 (2007)
- 5) 三科智之: "立体電子ホログラフィー技術", 信学誌, 93, 6, pp.492-498 (2010)
- 6) 吉川浩: "レーザーホログラフィック立体ビデオディスプレイ", レーザ研究, 39, pp.421-426 (2011)
- 7) 久保田敏弘: "新版ホログラフィ入門-原理と実際-", 朝倉書店 (2010)
- 8) P. Hariharan: "ホログラフィの原理", オプトロニクス (2004)
- 9) 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)
- 10) L. Rosen: "Focused-Image Holography with Extended Sources", Applied Physics Letters, 9, pp.337-339 (1966)
- 11) S.A. Benton: "Hologram Reconstructions with Extended Incoherent Sources", J. of Opt. Soc. of America, 59, p.1545A (1969)
- 12) J.T. McCrickerd and N. George: "Holographic Stereogram from Sequential Component Photographs", Applied Physics Letters, 12, pp.10-12 (1968)
- 13) 山口, 大山, 本田: "ホログラフィックステレオグラムによる像再生特性に関する考察", 光学, 22, 11, pp.714-720 (1993)



よしかわ ひろし
吉川 浩 1985年、日本大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年、同大学助手。現在、同大学理工学部電子情報工学科教授。1988年～1990年、マサチューセッツ工科大学メディアラボ客員研究員。計算機合成ホログラム、電子ホログラフィックディスプレイ、フリンジプリンタ、コンピュータグラフィックスなどの研究に従事。工学博士。正会員(フェロー)。

講座 誰にでもわかる3D 最終回

応用6：未来の3Dとインタラクシヨ技術

(正会員) 岩井大輔[†], 佐藤宏介[†]

1. ま え が き

本連載でこれまで紹介されてきたように、多種多様な3D表示技術が提案・商品化され、今や一般家庭に3Dテレビが普及するなど、人々が3D表示された映像コンテンツを楽しむライフスタイルが社会的に広く受け入れられてきている。3Dディスプレイを鑑賞する人には、しばしば映像に触れようとする挙動が認められると言われる¹⁾。これは従来の2D映像を鑑賞する人には見られない行動であり、3D映像が本質的にユーザのインタラクシヨを誘発すると考えることができる。このことから、今後、ユーザが3Dコンテンツをただ観るだけでなく、それとインタラクシヨすることを可能とするようなシステムへの拡張が、より豊かな3D閲覧環境を実現するための重要な技術的課題であると考えられる。

本稿では、インタラクティブな3D閲覧環境を実現するようなディスプレイ技術およびインタラクシヨ技法について、最新の研究例も交えながら紹介する。なお、バーチャルリアリティの研究分野においては、すでに大型の没入型環境を用いたインタラクティブな3D表示技術に関する研究が数多くなされているが、本稿ではこのような特殊な環境における技術については扱わないこととする。本稿では、家庭やオフィスといった日常的生活空間での3Dディスプレイを介するインタラクシヨに着目する。具体的には、ユーザと3Dコンテンツとのインタラクシヨ、および、表示されている3Dコンテンツを介してユーザ同士が協調作業するような、ユーザ間のインタラクシヨについて、研究例を取り上げて解説する。

2. テーブルトップ型インタラクティブ3Dディスプレイ

家庭やオフィスのような生活空間に日常的に置かれているテーブルを、インタラクティブな3Dディスプレイとすることで、① 3Dコンテンツを、テーブル上に置いた実オブジェクトと同じ視点で観察できる、② 複数人が囲んで共有することができる等、従来の縦置き型の3Dディスプレイにはない特徴があり、これがさまざまなインタラクシヨを誘引する。本章では、このようなテーブルトップ型の3Dディスプレイ技術と、その上で実現されるインタラクシヨについて述べる。

福島らは、鑑賞距離を縮めることで、提示される3Dコンテンツの立体感をより大きく感じさせることを狙い、1次元インテグラルイメージング方式を用いた裸眼立体ディスプレイを、平置きにすることを提案している¹⁾。杉田らは、このディスプレイシステム上で、透明なカップを、表示されている3Dコンテンツにかぶせることでインタラクシヨを行う、エンタテインメントアプリケーションを提案している²⁾。このシステムでは、ユーザは3D表示されているペンギンを覆うように、透明アクリル製の半球面をディスプレイ上に置く。このペンギンが発射するトマトの弾(仮想立体像)が透明カップに衝突すると、トマトの弾がはじけてその壁面を滴り落ちる様子を鑑賞できる。このように、テーブルトップ型の3Dディスプレイでは、その上に置かれた実オブジェクトと3Dコンテンツとのインタラクシヨが可能となる。

テーブルトップ型の3Dディスプレイでは、複数ユーザがそれを囲んで、表示される3Dコンテンツを共有することができる。しかしながら、従来の3Dディスプレイでは、水平方向の視差のみを考慮しているため、そのまま使用すると、テーブルの周囲にいるユーザの一部しか、3Dコンテンツを正しく閲覧することができない。この問題を解決するシステムとして、北村らはIllusionHoleを提案している³⁾。このシステムでは、平置きにした時分割方式の3Dディスプレイ

[†] 大阪大学

"3D That Everyone Understands (The Last Chapter): The Future Directions of 3D and Interaction Techniques" by Daisuke Iwai and Kosuke Sato (Osaka University, Osaka)

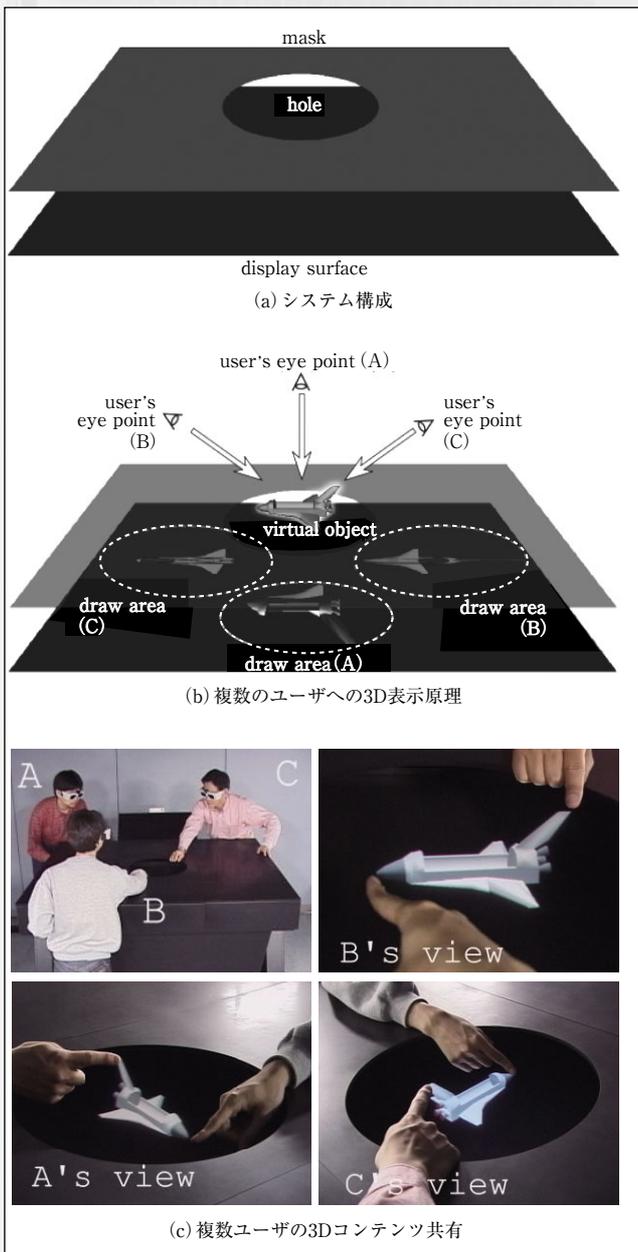


図1 テーブルトップ型インタラクティブ3Dディスプレイ IllusionHole (東北大学北村研究室提供)

の上部に、中央部が円形にくり抜かれたマスクを設置する。これにより、各ユーザの位置に応じて、それぞれに提示する個別の立体像をディスプレイ上で重畳することなく表示することができるため、複数人が同時に3Dコンテンツを観察することができる(図1)。さらに、それぞれが3Dコンテンツ上の同一点を指差した場合に、実空間にて指差し位置が一致するよう表示することができるため、3Dコンテンツを介したユーザ間の自然なインタラクションが実現できる。IllusionHoleのマスク部分に、平面映像を上部から投影表示することで、2次元と3次元の映像コンテンツを同時に共有できるように拡張した研究も行われている⁴⁾。最近では、平置きされた2Dディスプレイ上にランダムに穴あけされた

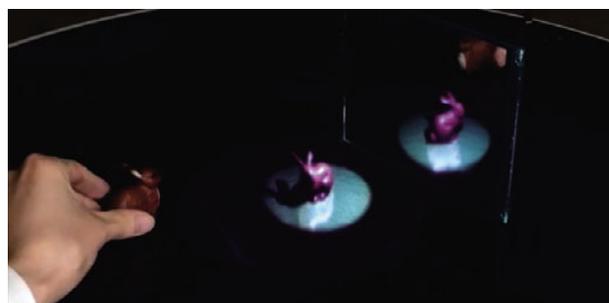
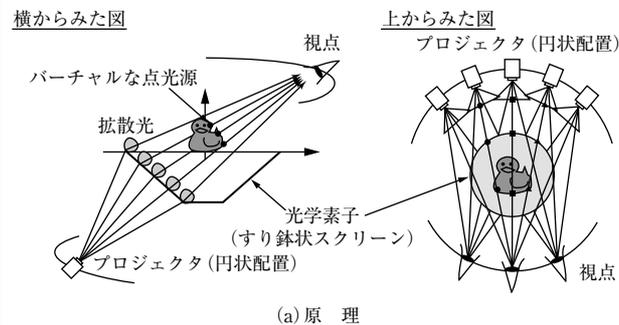


図2 光線像再生方式3Dディスプレイ (情報通信研究機構提供)

マスクを置くことで、複数人に同時に異なる3D像を提示するテーブルトップ型ディスプレイが提案されている⁵⁾。この手法では、ユーザの視点位置とランダムな穴を通る直線が交差するディスプレイ上の各ピクセルに、そのユーザに提示すべき画像を構成する光を表示させる。本段落で紹介したテーブルトップ型3Dディスプレイ^{3)~5)}では、テーブルの周囲にいる複数ユーザが同時に3Dコンテンツを共有することができるが、それぞれのユーザ視点をトラッキングする必要があり、ユーザの頭部にトラッカを付けて拘束する点が大きな問題となる。

これに対して、レンズによるアフォーカル系を用いて、テーブルトップ上で複数の空間立像を、異なる方向(4方向)から見えるように提示するシステムが提案されている⁶⁾。このシステムでは、ユーザはトラッカや立体視メガネを装着する必要がなく、テーブルの周りを回ると、その位置に応じた空間立像を観測することができる。さらに、テーブル上に置いた実オブジェクトを用いて表示映像を操作することが可能となっている。また、インテグラルイメージングを基にした、周囲360°より観察可能なテーブル型裸眼立体ディスプレイも提案されている⁷⁾。この手法では、テ

1. テクスチャの計算

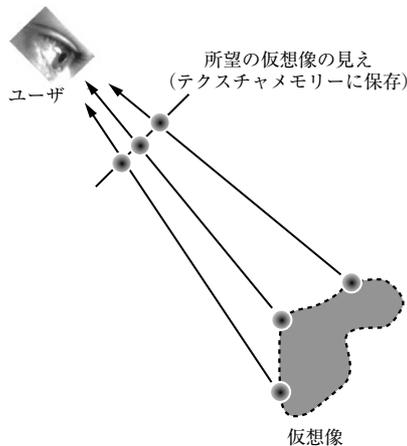
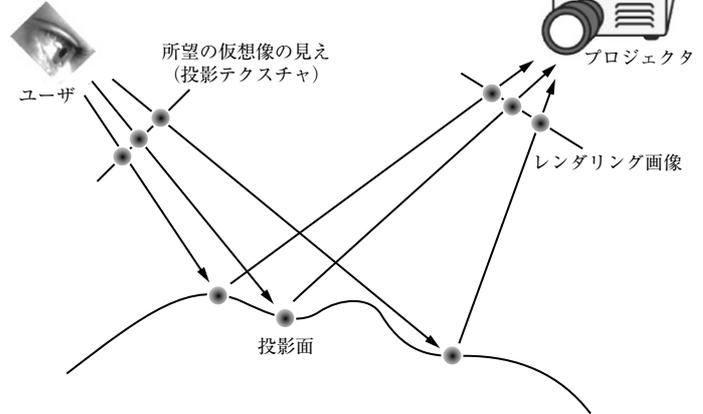
2. 投影テクスチャマッピングと
プロジェクタ視点からのレンダリング

図3 実物体上で立体像を表示する原理

ーブルトップ下部に設置された複数台のプロジェクタと、特殊な光学特性をもつ錐体形状のスクリーンとを組み合わせることで、テーブルトップ上に物体を置いたときの、物体から放出される光線を再現することを実現している。提案システムのデモ表示では、テーブルトップ上に置いた鏡に、表示している3Dコンテンツの背後が映っている様子が確認でき、テーブルの周囲に着座した複数人のユーザが同時に、3Dコンテンツを閲覧可能であることが示されている(図2)。

本章では、テーブルトップ型の3Dディスプレイについて紹介した。われわれの生活・オフィス空間への導入を考慮した場合、ユーザ非拘束という点が重要である。この点において、最後に紹介した光線像再生方式の3Dディスプレイは有望な選択肢の一つであり、今後の小型化および表示画質向上が期待される。さらに、非拘束にユーザの3Dコンテンツ操作入力を計測することのできるセンサ技術や、自然でわかりやすい入力インターフェースに関する研究開発が、今後、インタラクティブ性を備えたテーブルトップ型3Dディスプレイの普及には必要であると考えられる。

3. 身の回りの実物体上でのインタラクティブ3Dディスプレイ

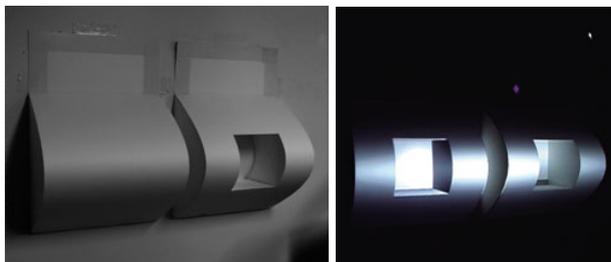
2次元の3Dディスプレイ上だけでなく、身の回りの実物体(立体)上でも、ステレオプロジェクタを用いることで立体像を観察することができる。これにより、実物体の形を変形させたり、その内部の立体構造を、透視するように可視化することができるようになる。本節では、身の回りの実物体上での3D表示技術の原理を簡単に説明した後、その技術を用いて実物体上に表示された3Dコンテンツとインタラクションする応用システムを紹介する。

対象の形状およびプロジェクタとユーザの位置姿勢関係

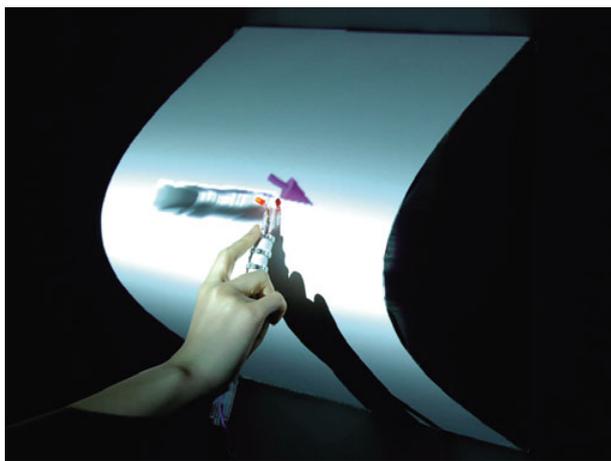
が既知であれば、実物体上で所望の立体像を投影表示できる⁹⁾。この手法は、以下に示す二段階の事前処理によって投影像を生成する(図3)。この手法では、予めプロジェクタ・視点・対象物体を仮想空間上に配置する。そして1-パス目で、視点から観測したい立体像を計算し、テクスチャメモリーに保存する。2-パス目では、仮想空間にて、このテクスチャを先ほどの視点位置から投影スクリーンとなる実対象の3次元形状モデル上に投影テクスチャマッピングし、これを、実世界のプロジェクタ位置にあたる場所から観察した光学情報(レンダリング画像)を取得する。この事前処理後、実世界では、この光学情報を重畳画像として、プロジェクタより実物体表面上に投影する。これにより、ユーザは所望の歪みのない立体像を実物体上で観察することができる。

この2-パスレンダリング法を用いることで、実対象の形状を視覚的に変更することが可能となる。著者の研究室では、プロダクトデザインの過程で作成されるクレイモデルを用いて行われる、デザイン評価を支援するシステムを提案している⁹⁾。図4(a)左は、環境光下での実物体の見えを示している。これにプロジェクタから映像を投影し、左側の物体の形状を視覚的に変形させたものを同図右に示す。このシステムでは、クレイモデル上に陰影情報を投影して形状の視覚的変更を行い、デザイナーの形状変形の要求を即座に反映させることができる。ユーザは手に持ったペン型入力インターフェースで、直接実物体を視覚的に変形させることができる(図4(b))。また、白色の人体のマネキン上で、その骨格等の内部構造を透けてみせる医療応用に関する研究も行われている¹⁰⁾。

本章で紹介した技術は、現在はまだ特殊なアプリケーションでのインタラクション応用にとどまっている。しかし



(a) 投影前後の実物体



(b) ユーザ入力による変形操作

図4 実物体形状の視覚的変形

ながら、同技術は身の回りにあるさまざまな実物体に適用可能であることから、よりカジュアルな応用が、今後さまざまな提案されて行くものと考えられる。ここでも、ユーザ非拘束という点が重要であり、今後は立体メガネやヘッドトラッカを必要としない手法の研究開発が必要である。

4. 拡張現実感によるインタラクティブ3D

拡張現実感(AR: Augmented Reality)は、現実世界の中に仮想情報をシームレスに重畳する技術である。現在、多くのARのアプリケーションでは、2次元のビジュアルマーカを現実空間に配置し、それをカメラで撮影することで、実シーン中に重畳する仮想情報の幾何学的整合性を保っている¹¹⁾。ARで重畳された仮想立体像を観察するインタラクティブシステムとしては、ヘッドマウントディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)を用いるものと、3Dディスプレイを用いるものが、それぞれ提案されている。

HMDを用いたアプリケーション例としては、ARマーカが印字されたページを開くと、立体の仮想キャラクターが飛び出してくる絵本¹²⁾や、ARマーカが敷き詰められたテーブル上に都市景観を表すCGが表示され、都市計画を支援するものがある¹³⁾(図5)。後者のアプリケーションは、



(a) ARマーカが貼りつけられたテーブル



(b) テーブルトップに重畳された立体化想像

図5 ARによる都市計画支援システム
(奈良先端科学技術大学院大学加藤研究室提供)

HMDを装着した複数人のユーザがテーブルを囲んで、都市計画を議論する用途で設計されており、2章で述べたテーブル上で、3Dコンテンツを共有する協調作業環境が異なる形で実現されている。ユーザにHMDを装着させる必要のない方式として、3Dディスプレイに実シーンの撮影映像と重畳する仮想像を、同時に立体で表示させるARアプリケーションも提案されている。最近では、任天堂が発売したゲーム機ニンテンドー3DSで、搭載されている3Dディスプレイと2眼カメラおよびARマーカを用いて、立体像をAR表示するゲームソフトが販売されている¹⁴⁾。

ARでは、2次元マーカを入力インタフェースとしても利用することができるため、入力インタフェースのための装置を他に用意する必要がない。この点において、ARはインタラクティブな3D閲覧環境を実現するのに、最も有望な選択肢の一つであると言える。

5. おすび

本稿では、日常的な生活空間で、3Dディスプレイに表示されている3Dコンテンツとユーザとのインタラクション、および、そのコンテンツを介したユーザ間のインタラクションを実現するための、ディスプレイ技術およびインタラクション技法について紹介した。これらの技術は、ショールームや博物館等の展示を主とするフィールドで使われているものも多くある。今後、ユーザを拘束しない3Dディスプレイおよび入力インタフェース技術の発展にしたがって、これらの技術がわれわれの日常空間にも浸透してくるものと考えられる。

(2011年9月6日受付)

〔文 献〕

- 1) 福島理恵子, 平山雄三: “観賞者参加型の3次元映像ディスプレイ”, 情報処理, 47, 4, pp.368-373 (2006)
- 2) 杉田馨, 福島理恵子, 小林等, 山本澄彦, 森下明, 平山雄三: “自然で直感的な立体映像操作を実現するインタラクティブ3次元ディスプレイシステム”, 情報処理学会インタラクシオン2007, pp.211-212 (2007)
- 3) Y. Kitamura, T. Konishi, S. Yamamoto and F. Kishino: "Interactive Stereoscopic Display for Three or More Users", in Proc. of ACM SIGGRAPH, pp.231-239 (2001)
- 4) K. Nakashima, T. Machida, K. Kiyokawa and H. Takemura: "A 2D-3D integrated environment for cooperative work", in Proc. of ACM VRST, pp.16-22 (2005)
- 5) G. Ye, A. State and H. Fuchs: "A Practical Multi-viewer Tabletop Autostereoscopic Display", in Proc. of IEEE ISMAR, pp.147-156 (2010)
- 6) 和田拓朗, 苗村健: “FloasionTable: 複合現実展示のための多方向から鑑賞可能な空間立像ディスプレイ”, 信学技報MVE2009-135, Vol.109, No.466, pp.29-34 (2010)
- 7) 吉田俊介, 矢野澄男, 安藤広志: “全周囲より観察可能なテーブル型裸眼立体ディスプレイ表示原理と初期実装に関する検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 15, 2, pp.121-124 (2010)
- 8) Oliver Bimber and Ramesh Raskar: "Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds", A.K. Peters Ltd. (2005)
- 9) 久田理, 山本景子, 金谷一朗, 佐藤宏介: “HYPERREAL 3次元形状デザイン支援システム”, 情報処理学会論文誌, 48, 12, pp.3873-3881 (2007)
- 10) 近藤大祐, 後藤敏之, 河野誠, 木島竜吾, 高橋優三: “自由曲面への投影を用いたバーチャル解剖模型”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 10, 2, pp.201-208 (2005)
- 11) H. Kato and M. Billinghurst: "Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System", in Proc. of IEEE/ACM IWAR, pp.85-94 (1999)
- 12) M. Billinghurst, H. Kato and I. Poupyrev: "The MagicBook - moving seamlessly between reality and virtuality", IEEE Computer Graphics and Applications, 21, 3, pp.6-8 (2001)
- 13) H. Kato, K. Tachibana, M. Tanabe, T. Nakajima and Y. Fukuda: "A City-Planning System based on Augmented Reality with a Tangible Interface", in Proc. of IEEE/ACM ISMAR, pp.340-341 (2003)
- 14) ニンテンドー3DS ARゲームズ (2011), <http://www.nintendo.co.jp/3ds/software/built-in/ar/>



岩井 大輔 (いらい だいきち) 2003年, 大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。2005年, 同大学大学院博士前期課程修了。2006年～2008年, 日本学術振興会特別研究員。2007年, 同大学大学院博士後期課程修了。2007年～2008年, 独バウハウス大学ワイマール校メディア学科客員研究員。2008年～2011年, 大阪大学大学院基礎工学研究科助教。2011年, 同大講師。投影型複合現実感, ヒューマンコンピュータインタラクシオンに関する研究に従事。博士(工学)。正会員。



佐藤 宏介 (さとう ひろあき) 1983年, 大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985年同大学院修士課程修了。1986年, 同大助手。1988年, 同大学院博士課程修了。1988年～1990年, カーネギメロン大学ロボット工学研究所客員研究員。1994年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。2003年, 大阪大学大学院基礎工学研究科教授。画像計測, 仮想現実感, デジタルアーカイブ等の映像情報メディアの研究に従事。工学博士。