

立体映像技術の現状と将来

岡野 文 男

Present Status and Expectation of Three-Dimensional Video Technology

Fumio OKANO

Many researches on three-dimensional video technologies are activating with progress of the latest information technology. These systems are classified into four types, namely, binocular type, a multi-view type, a volume display type, and a spatial image reproduction type, from a point of view of the characteristics of observable images, and are described focusing on systems for moving images about the latest research trend in this report. It combines subjects should be solved for actual uses and the future possibility.

Key words: stereoscopic, three-dimensional, multi-viewpoint, holography, integral photography

立体映像に関する技術の研究開発は、ここ10年あまり活発化し、継続的に行われるようになってきている。これは、デジタル技術の進展によって映像によるコミュニケーション手段が多くの分野において一般化し、さらにマルチメディアに代表される多様なサービスへの期待があること、信号処理の高速化やディスプレイ技術の発展により新しい立体映像技術の可能性を試行できるようになったことによるものと考えられる。

本稿では撮像・表示装置について、特に最近の動向を動画に関して、現状を紹介し、将来の可能性についても言及する。なお、立体という言葉は、両眼視差を用いた stereoscopic の意味での二眼式を示す狭義の意味で使われる場合と、より高度なものとして three-dimensional を含めた広義の意味で使われる場合があるが、今回は後者の広義のものとして使用する。

1. 立体視の手がかり

図1に示すように、視覚を通じた奥行き知覚のための手がかりは複数ある。これらは、両眼視による要因と単眼視による要因に大別できる。

両眼視による要因として、まず、輻輳があげられる。図2に示すように、ある被写体を眺めるとき、両眼は内向きに回転して視線はその被写体の上で交わる。この眼の回転角(輻輳角)を筋肉の緊張として脳がとらえ、立体感を感じる。また、離れた位置にある2つの眼から、被写体を眺めたとき、注視点では両眼の映像の差はないが、注視点からずれると両者に差が生じる。この差を両眼視差という。この両眼視差が大きいと2重像になるが、ある程度以下ならば、1つの像に融合して見える。この両眼の差が奥行き感を与える。

単眼視による要因として、ピント調節(以後「調節」とよぶ)や運動視差があげられる。これらは、後述する空間像再生式では重要な要素となる。

調節は、被写体までの距離に応じて水晶体の厚みを変化させる反応である。厚みを与える際の筋肉の反応や網膜上の光学像のぼけにより、奥行きが知覚されるとされている。調節による奥行き知覚は2~3mの近い距離に有効となる。ただし、調節と両眼で生じる輻輳とは独立ではなく、お互いに影響を受ける¹⁾。

運動視差は、画面上の被写体やカメラの移動に伴う受動

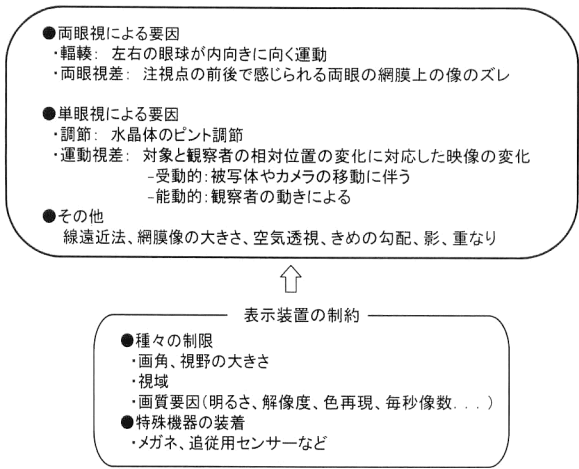


図1 立体視の手がかり。

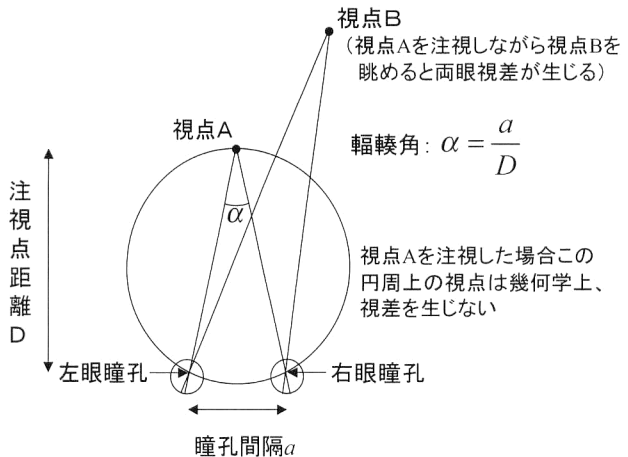


図2 注視点と輻輳。

的なものと、画面を眺める観察者の移動によって画像が変化する能動的なものに分けられる。前者は、通常の2次元の表示装置においても生じる。後者は、実物を見たときと同じような視覚効果を提供できるため高度な表示法であるが、デバイスへの要求が厳しくなるため高度な信号処理が必要である。

網膜上の大きさも十分な手がかりを与え、これを利用したのが絵画の遠近法である。しかし、表示装置としては積極的に用いることは少ない。

立体映像技術としては、立体視の手がかりとなる輻輳、両眼視差、運動視差、調節をいかに実現するかが研究対象になっている。また、表示装置を介して立体映像を観察する場合、これらの直接的な要因のほか、画角や視域(立体映像が観察可能な領域)が臨場感や没入感を保持するために重要な要因となる²⁾。

2. 立体映像システムの分類と最近の研究

立体映像システムの分類の仕方はいろいろあるが、ここ

表1 立体テレビの方式と視覚機能。

方式	輻輳	両眼視差	運動視差	調節
二眼式 2台のカメラ、ディスプレイを並べる	○	○	×	×
多眼式 多数のカメラ、ディスプレイを並べる	○	○	○	×
体積表示式 奥行き方向に表示面を配置する	○	○	×	○
空間像再生式 被写体の光線を再現	○	○	○	○

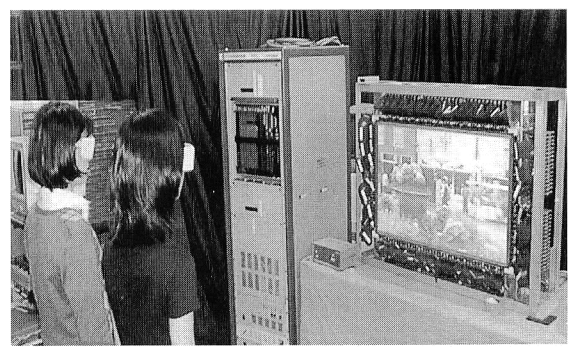


図3 プラズマディスプレイを用いた立体ハイビジョン表示装置。

では、立体像の性質から二眼式、多眼式、体積表示式、空間像再生式の4つに分類する(表1参照)。いずれの方式においても、実際に実現できるシステムではそれぞれ課題を抱えており、それらを克服すべく研究が進められている。これらを最近の研究内容を含めて紹介する。

2.1 二眼式

二眼式は、古くから行われている方式で、主に輻輳と両眼視差を用いている。左眼で見たときの映像、右眼で見たときの映像を別々に撮影して、左映像は左眼だけに、右映像は右眼だけに分離して提示する方式である。この分離方法に多くの方法が提案されており、“眼鏡あり”と“眼鏡なし”に分けられる。

“眼鏡あり”としては、一方の眼の画像を赤で、他方を青で表示し、青、赤の眼鏡をかけて見るアナグリフ方式や偏光眼鏡を用いるものが知られている。また、時分割シャッター眼鏡を用いる方式も開発されており、プラズマディスプレイ(PDP)と組み合わせて高画質な立体像を提供するシステムも試作されている(図3)³⁾。

“眼鏡なし”としては、縦のスリットにより分離するパラクスバリアーや、明るさを保持できるレンチキュラーレンズ方式が開発されている。現在では種々の改良方式があ

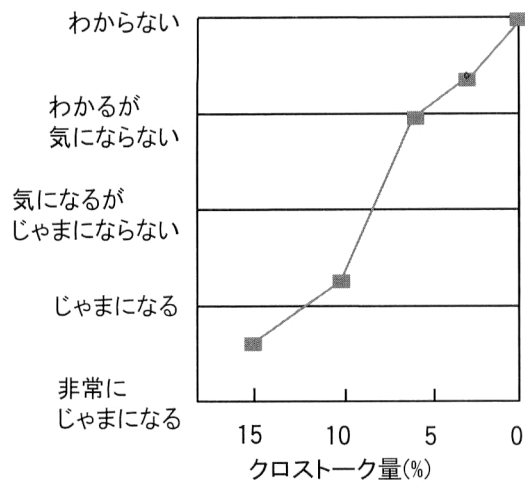


図4 左右映像間のクロストーク妨害。一般画像での妨害度の評価結果例。

る⁴⁾。また、液晶パネルのバックライトに指向性を与えて映像を分離するもの⁵⁾も開発されている。これらは眼鏡が不要である反面、観察位置や視域に制限が生じる。なんらかの手段で観察者の眼の位置を検出し、それに追従するように視域を制御することで視域を拡大したり、観察者の位置に応じた画像を提供する方法も提案されている⁶⁾。

左右1組の液晶パネルや小型CRTを組み込み、直接左右の眼で見ることにより立体像を得るゴーグル型の表示装置であるヘッドマウントディスプレイ (HMD)⁷⁾の開発も進められている。高性能なコンピューターによる映像生成技術の飛躍的向上に伴い、生成した立体映像によるリアルタイムな環境を提供できるまでになった。また、マクスウェル光学系⁸⁾やレーザーにより画像を網膜上に投影する手法⁹⁾も行われている。これに視差画像を与え、立体映像を提示することにより、頭部の動きに連動したさまざまな視点からの映像を与えることができ、運動視差の効果が得られる。HMDはバーチャルリアリティーの仮想環境下において没入感が得られやすい特徴がある。

二眼式は、基本的には撮影時に2台のカメラを用い、表示時には2台の表示装置を並列して表示する簡単な構成である。二眼式の特徴は画質がすぐれていることであり、高品質なハイビジョンと二眼式を組み合わせると、より臨場感の高い立体ハイビジョンが構成されている。

撮影・表示装置自体の研究のほか、見やすくするための機器や条件の研究も進んでおり、特に、

- (1) 縦横・回転などの幾何学的な左右画像のずれ
- (2) 左右画像の色・明るさの違い
- (3) 左右画像間のクロストーク

について検討されている。(1),(2)については、ディスプ

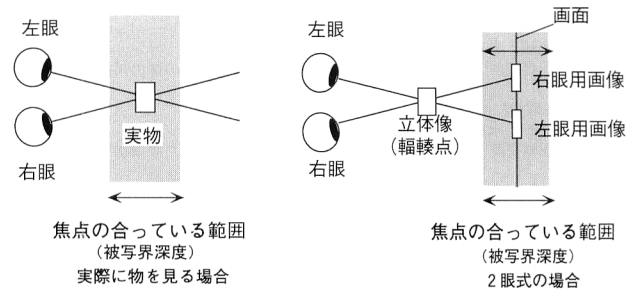


図5 被写界深度と立体像の関係。

レイだけでなくカメラ側でも発生する。特性差が大きい場合、立体映像が見づらくなるだけでなく疲労にもつながるが、撮影・表示装置の適切な管理によりある程度回避することは可能である。幾何学的ひずみを立体ハイビジョンで検討した例がある¹⁰⁾。特に垂直にずれがあると見づらくなる傾向がある。ディスプレイは左右映像を左右の眼にそれぞれ分離して供給する仕組みを備えているが、通常はその分離が完全ではないことで(3)が問題となる。実際のクロストーク量は、偏光フィルター方式ではフィルターのほかスクリーンの特性も影響し1%程度かそれ以下、直視型の時分割方式ではCRTの蛍光体の残光やシャッター眼鏡の特性の影響により6~7%前後の値となる。クロストークが大きい場合、画質を損なうだけでなく、両眼融合できずに立体映像として見るができなくなる。一般の絵柄で許されるクロストーク量は、主観評価実験により数パーセントとの結果が得られている(図4)¹¹⁾。また、撮影や表示の条件によって、観察者に知覚される立体像のひずみが発生するが、それが書割効果など視覚に与える影響の研究もなされている¹²⁾。

ある距離の点の実物を注視した場合、左右の視線がその注視点に向く眼球運動(輻輳)が生じる。同時にその距離に応じた眼のピント調節が作用する。この2つは相互に矛盾なく働く。しかし、二眼式では視差により輻輳は誘発されるが、スクリーン距離が変わらないためピント調節すべき距離がほぼ固定される(図5)。このため、実物を見る場合と異なる状態が生じて眼の疲労原因になる可能性が指摘される^{13,14)}。画面距離の確保や過大な視差を避けることでこの状態が緩和されると考えられるが、他の疲労要因も含め今後十分に検討を重ねてゆく必要がある。この輻輳と調節に関する知見を、番組制作時の奥行き再現範囲などに適用していくことで、見づらさや疲労が軽減されるであろう。

2.2 多眼式

多眼式は、二眼式の延長にあり、輻輳と両眼視差を用いているが、観察者の位置に応じて画像が変化する、つまり

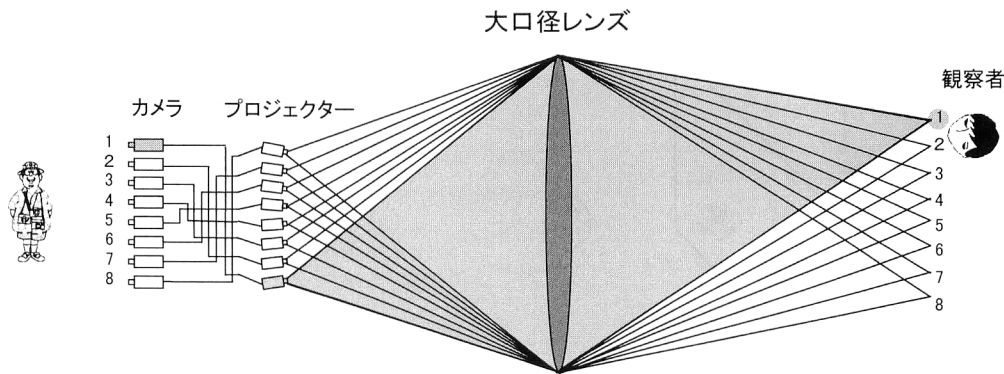


図6 多眼式 (多重化しないタイプ). 観察者が顔を動かすと,
 (1:右眼)(2:右眼)(3:右眼).....(7:右眼)
 (2:左眼)(3:左眼)(4:左眼).....(8:左眼) の位置で, その位置に応じた立体像が見える.

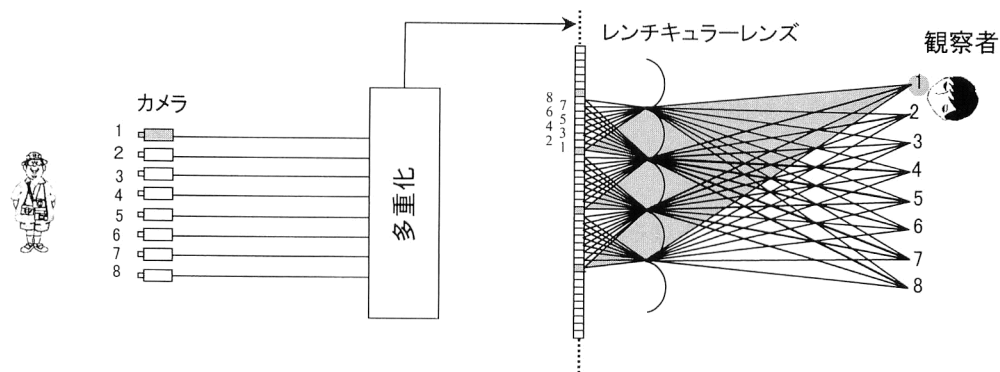


図7 多眼式 (多重化タイプ). 観察者が顔を動かすと,
 (1:右眼)(2:右眼)(3:右眼).....(7:右眼)
 (2:左眼)(3:左眼)(4:左眼).....(8:左眼) の位置で, その位置に応じた立体像が見える.

運動視差をもつ。ただし、眼に対応するカメラの数が少ないと、観察者が移動する際に、画像の切り替え点で急激に画像が変わるために、ぎくしゃくし、いわゆるフリッピングを生じる。一般的には、水平方向の眼に対する表示を行うが、垂直方向に並べ垂直視差を与えることも可能である。多眼式は、1つのカメラの映像は観察者の1つの眼に入力されるが、実際の装置の構成では多重化しないタイプと多重化するタイプがある。

多重化しないタイプは表示装置をカメラの数だけ配列し、それを大口径凸レンズ(図6)や大口径凹面鏡などで投影する方式である。最近では、それらのかわりにホログラフィックスクリーン¹⁵⁾を用いるシステムも試作されている。各眼の表示装置をカメラの数だけ用意すれば、画質を損なうことなく立体像が得られる。

一方、高解像度の表示装置の出現に伴い、多重化する方式も試みがなされている。各眼に対応するカメラ映像を1画素ごとに分離し、表示装置上で1つのブロック(要素画像)に各カメラの画素を割り付け多重化する(図7)。した

がって、 N 眼のシステムでは、水平画素は N 倍の表示装置が必要となる。実際には8眼の程度のもので試作されている¹⁶⁾。

2.3 体積表示式

体積表示式は、なんらかの手段で表示面を奥行き方向に複数配置し、その奥行き位置に相当する画像を表示する方式である。スクリーンを奥行き方向に高速に移動させ、その移動位置に同期させて画像を表示する移動スクリーン式¹⁷⁾、螺旋形のスクリーンを回転させ、奥行き方向にスクリーンを連続的に配置した効果をもつ回転スクリーン式¹⁸⁾、実際に表示面を奥行き方向に積層する表示面積層式などが提案・試作されている。いずれも、奥行きに対応する位置に実際の画像が位置することから焦点調節が効く。表示面が離散的に配置されているものを総称して奥行き標本化式とよぶこともある。奥行き標本化式の場合には、表示面の間奥行きは再現されないが、この課題を隣接する表示面の輝度に重みをつけて表示して解決する方法も考案されている¹⁹⁾(図8)。

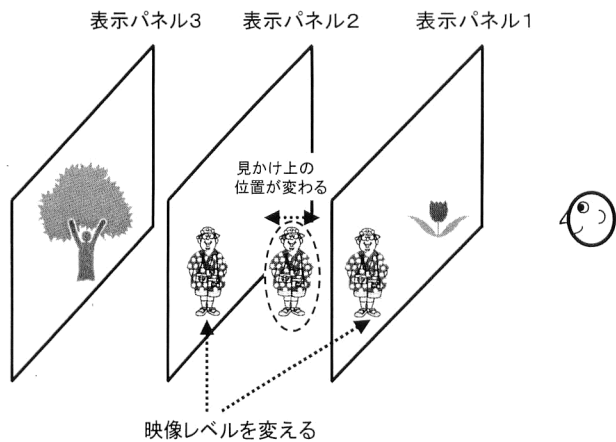


図8 表示画像の重みづけをした体積表示法。

いずれの場合でも、観察者が動いて運動視差を得ようとするとき、後面の画像が透けて見える現象も伴うので、それを防ぐためには観察者の眼の位置を検出し、画像の見え隠れを制御する必要がある。

2.4 空間像再生式

空間像再生式は、被写体から発せられた光線そのものを再生し、あたかも物体があるかのように立体像を再現する方式である。したがって、当然眼鏡なしで立体像を観察でき、両眼視差はもちろん、焦点調節や運動視差ももつ理想的な方式である。

インテグラルフォトグラフィー (IP)²⁰⁾方式も空間像再生式に分類される。この方式は、写真による技法として早い時期 (1908年) に提案されている。多数の要素画像からの光線は各要素レンズを通して集光され、被写体と同じ位置、同じ大きさで光学像を生成する (図9)。

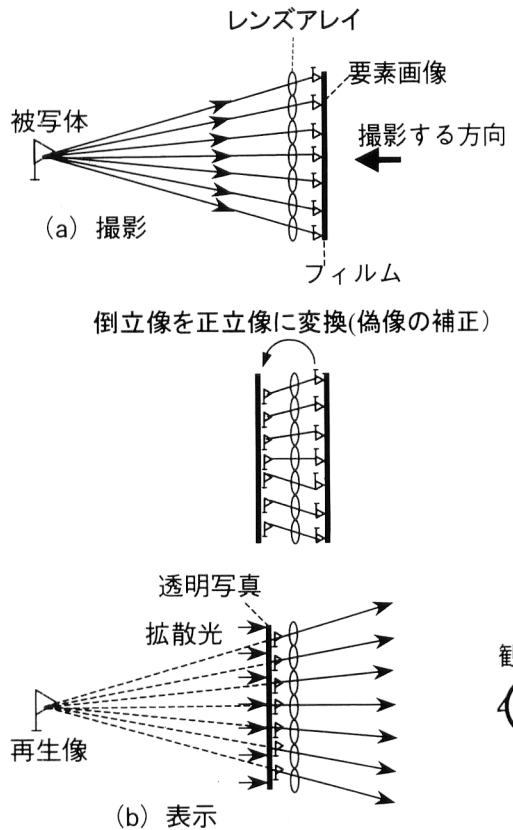


図9 インテグラルフォトグラフィーの基本原理。

IP方式の表示装置の構成は多眼式の多重化タイプと同じである。図10に、あらためて撮影と表示の関係を示す。この多重化タイプでは、各カメラの各画素の信号は分離され、表示装置の各要素画像の中に他のカメラの画素とともに多重化・再配置される。一方、IP方式では、図11に示すように、撮影時にあらかじめ多重化された信号つまり要素

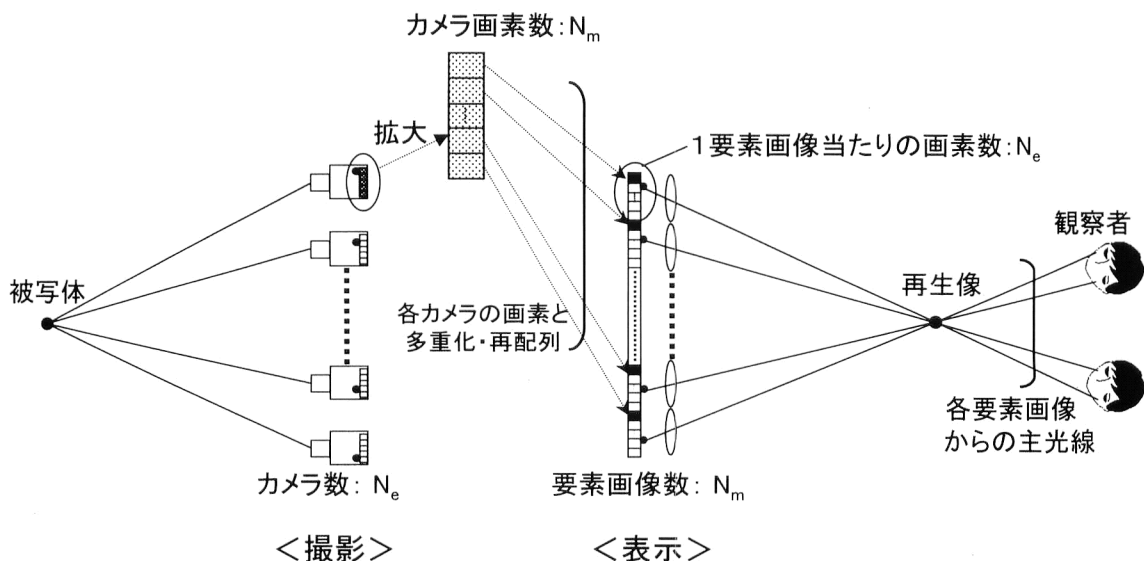


図10 多眼式における撮影と表示の関係 (正確には偽像の補正が必要)。

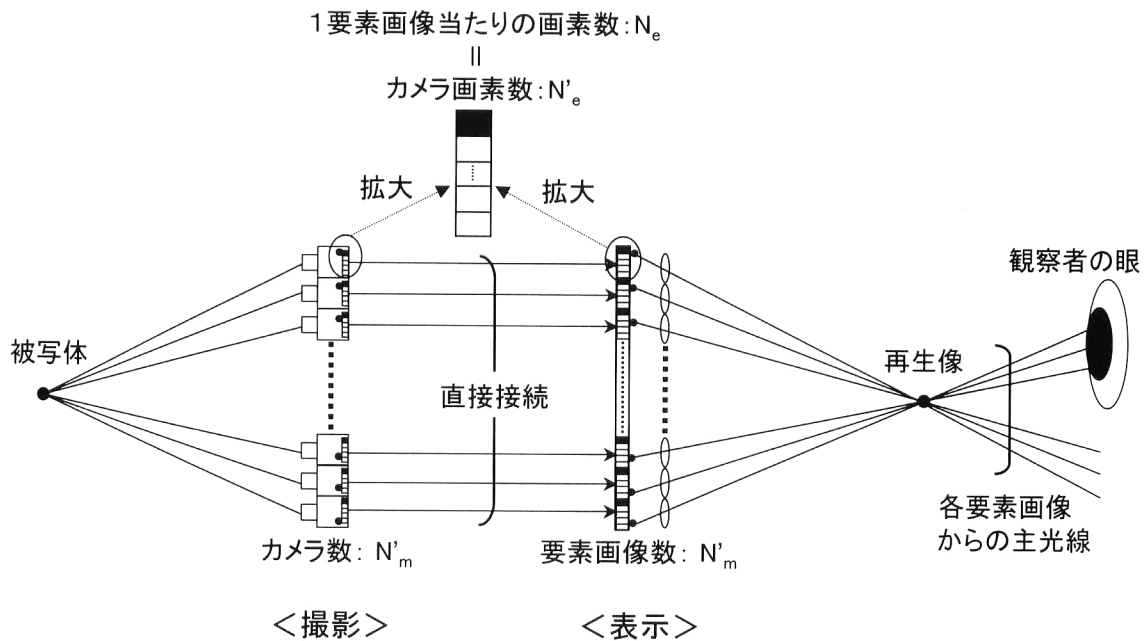


図11 インテグラルフォトグラフィーにおける撮影と表示の関係 (正確には偽像の補正が必要)。

画像の信号を1つの微小カメラで撮影し、そのまま表示される。つまり、多眼かIP方式かは、表示装置の構成だけで決まるのではなく、撮影を含めたシステムとして分類するのが適当であろう。多眼式では表示装置の要素画像数は各カメラの画素数に一致し、IP方式では微小カメラの数に対応する。したがって、撮影・表示ともに1次元にレンズ(レンチキュラーレンズ)を並べれば、1次元のIP方式も実現できる。微小画像を2次元に並べれば垂直視差を与えることができる。

要素画像の数が解像度の上限を与えるため、要素画像の数は理想的には現在のテレビの画素数程度必要となる。さらに、要素画像の間隔が十分に細かければ、再生像の一点に集まる光線のうち複数の要素画像からの光線が同時に観察者の眼に入力されるため、眼の焦点調節が働く状態となる。

NHKでは最近、レンズアレイとして屈折率分布レンズの2次元配列したものを用いることで、これまで課題とされてきた偽像(奥行き逆転)を解消し、電子的手段(テレビカメラと液晶パネル)により初めてリアルタイム撮像を実現した²¹⁾(図12)。また、レンズアレイのかわりに、要素画像の背面に点光源を配置させた方式²²⁾も考案・試作されており、IP方式の変形といってよい。撮影された要素画像は多くの視点情報を有することから、各視点から見た2次元画像を抽出する応用も提案されている²³⁾。

多視点映像の空間的な配置を十分稠密にすることをめざした試作例もある。集束化光源列²⁴⁾(FLA)とよばれる光

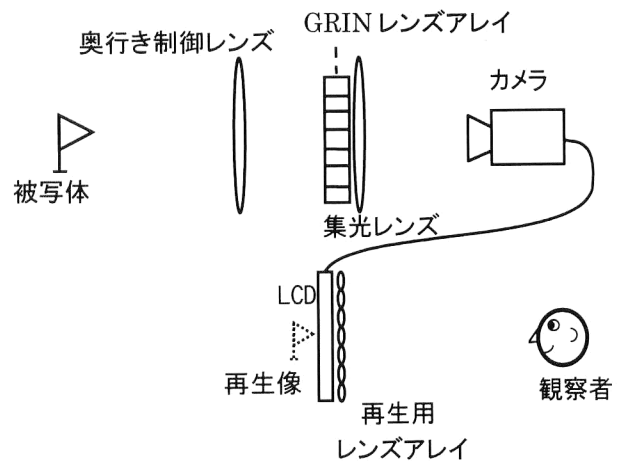


図12 インテグラルフォトグラフィーによるリアルタイム実験システム。

線方向が密に分布した光源群により、45視点を実現している²⁴⁾。1次元の視差しかもたないが、水晶体の調節応答も実現することをめざしており、自然な立体映像が期待できる。この方式も、IP方式の一種と考えられる。IP方式で調節が効くかどうかは、微小レンズのピッチおよび再生像の位置に関する。

空間像再生式としては、干渉縞を記録再生するホログラフィーが有名である。光の波面を記録するので、理想的な空間像再生式といえる。動画ホログラフィーは映画方式も研究されているが、ここでは電子的な手段によるテレビ方式について例を見てみる。これにはいずれも実験レベルではあるが、音響光学変調器(AOM)を用いるものと、高解

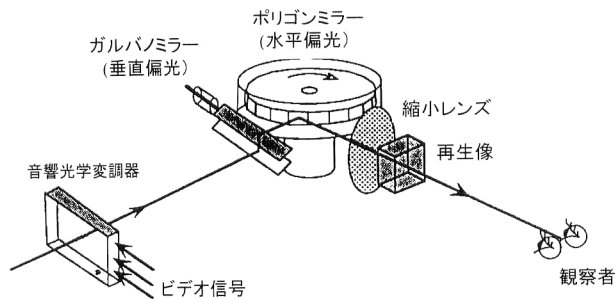


図13 MITによる動画ホログラフィー。

像度の液晶パネル (LCD) を用いるものがある。

前者は、計算機により生成した信号をもとに AOM で発生させた等価的な回折格子と多面鏡による走査によって実時間再生像を得るもので、MIT が 1990 年に発表した (図 13)²⁵⁾。ある程度の制約 (垂直視差なしなど) があるが、両眼で観察可能な動画を得た初めての方式である。

LCD による方法は、干渉縞をその上に表示し像再生する方法である。十分な像サイズと視域を得るには現在実現可能な画素数、画素ピッチの細かさを大幅に上回る LCD が必要であるが、TAO (通信・放送機構) では、多画素 LCD をさらにハーフミラーにより複数組み合わせる実験を試みている²⁶⁾。また、現状 LCD の画素ピッチが十分細くないため問題となる共役像を除去する手法や、回折格子の高次光による視域の拡大法の提案もなされている²⁷⁾。さらに、フィルムを用いたものと同様、白色光による再生²⁸⁾も検討が進められている。

これら空間像再生式は高度なシステムであるが、デバイスなどに対する要求が厳しく、現時点では動画システムとしては画質に課題がある。

立体映像は 3 次元の空間情報を取得し、それを表示するため、2 次元情報よりも多くの情報を必要とする。そのため、デバイスやシステム構成も高度なものが要求される。それを避けるためには、3 次元情報を限定的に扱わざるをえない。

その例が二眼式であり、画質はすぐれているものの、反面、立体の視覚的效果は限られる。一般への幅広い利用を想定した放送などの場合、立体映像の観察に伴う疲労や違和感も解決すべき課題としてあげられている。たとえば、2 章 1 節で述べた輻輳と調節の不整合の問題などである。立体映像の応用分野が広がる中、効果的な立体システムを構築するためにも、疲労や立体視や奥行き知覚の機構解明など、ヒューマンファクターの研究も重要である。

一方、空間像再生式のように実物を見たときと同様な効果を求めれば、3 次元空間そのものの情報を扱うことが必

要である。現時点では、デバイスやシステム構成がその要求には不十分で、画質は低くならざるをえない。必要な膨大な 3 次元情報の取り扱いもまた課題である。映像符号化の今後の動向として、構造解析や認知に基づくオブジェクトベース符号化の考え方があがるが、これは立体映像の効率的な情報圧縮とも整合する。しかし、自然画像の 3 次元構造の解析は困難さが伴う場合が多い。構造解析まで立ち入らず、視点位置における映像を光線の方向をパラメータとして表現することで、汎用性の高い立体映像の記述 (光線記述法) を行う試みも報告されている²⁹⁾。

今後の高度情報化社会における社会的インフラとして、立体映像への期待はますます高まると考えられる。撮像・生成から信号処理、伝送、表示を見渡した体系的な研究の進展により、実用的なシステムが数多く実現され、新たな情報の提供手段として、あるいは豊かな臨場感をもつシステムとして、発展してゆくことが期待できる。

文 献

- 1) 比留間伸, 橋本佳三, 武田常広: “立体テレビ鑑賞中の調節応答の測定”, *テレビジョン学会誌*, **48** (1994) 1293-1300.
- 2) 矢野澄男: “立体画像における画角の影響”, *テレビジョン学会誌*, **45** (1991) 1589-1596.
- 3) 浜田宏一, 山本敏裕, 栗田泰市郎, 高野善道, 湯山一郎: “DC 形 PDP を用いた時分割 2 眼立体表示法の検討”, *映像情報メディア学会誌*, **54** (2000) 452-458.
- 4) H. Isono, M. Yasuda and H. Sasazawa: “Autostereoscopic 3D LCD display using LCD-generated parallax barrier,” *12th Int. Display Research Conf., Japan Display '92* (1992) pp. 303-306.
- 5) 大森 繁, 鈴木 淳, 片山国正, 佐久間貞行, 服部知彦: “バックライト分割方式ステレオディスプレイシステム”, 3 次元画像コンファレンス (1994) pp. 219-224.
- 6) K. Talmi and J. Liu: “Eye and gaze tracking for visually controlled interactive stereoscopic displays,” *Signal Processing: Image Communication*, **14** (1999) pp. 799-810.
- 7) 日経エレクトロニクス, No. 618 (1994).
- 8) 稲見昌彦, 川上直樹, 前田太郎, 柳田康幸, 舘 暉: “マックスウェル光学系による広視野立体ディスプレイ”, *Human Interface 第 44 回研究会*, **12** (1997) pp. 291-294.
- 9) M. Tidwell, R. S. Johnston, D. Melville and T. A. Furness: “The virtual retinal display—A retinal scanning imaging system,” *Proceedings of Virtual Reality World '95* (1995) pp. 325-333.
- 10) 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の幾何学ひずみの検地限, 許容限”, *電子情報通信学会論文誌, D-II, J80-DII* (1997) 2522-2531.
- 11) 花里敦夫, 奥井誠人, 山之上裕一, 湯山一郎: “2 眼立体表示におけるクロストーク妨害”, 3 次元画像コンファレンス (1999) pp. 258-263.
- 12) H. Yamanoue, M. Okui and I. Yuyama: “A study on the relationship between shooting conditions and cardboard effect of stereoscopic images,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, **10** (2000) 411-416.
- 13) 渡部 勲, 吉田辰夫: “眼の調節—輻輳の制御機構”, *NHK 技*

- 術研究, **23** (1971) 58-76.
- 14) 江本正喜, 矢野澄男: “立体画像観視に伴う融像幅の変化”, 映像情報メディア学会誌, **54** (2000) 72-78.
 - 15) J. Y. Son, V. I. Bobrinev: “Autostereoscopic imaging system based on holographic screen,” Proc. SPIE, **CR76** (2001) 30-60.
 - 16) 磯野春雄, 安田 稔, 竹森大祐, 金山 秀, 山田千彦, 千葉和夫: “8眼式メガネなし3次元テレビジョン”, テレビジョン学会誌, **48** (1994) 1267-1275.
 - 17) 山田博昭, 角田弘明, 宮地杭一: “移動スクリーン3次元ディスプレイ”, 3次元画像コンファレンス, **6** (1992) 36-41.
 - 18) 日経エレクトロニクス, No. 508 (1990).
 - 19) 高田英明, 陶山史朗, 大塚作一, 上平員丈, 酒井重信: “新方式めがねなし3次元立体テレビ”, 3次元画像コンファレンス'00 (2000) pp. 99-102.
 - 20) G. Lippmann: *Comptes-Rendus 146* (1908) pp. 446-451.
 - 21) F. Okano, J. Arai, H. Hoshino and I. Yuyama: “Three-dimensional video system based on integral photography,” *Opt. Eng.*, **38** (1999) 1072-1077.
 - 22) 尾西朋洋, 武田 勉, 谷口英之, 小林哲郎: “光線再生法による3次元動画ディスプレイ”, 3次元画像コンファレンス'01 (2001) pp. 173-176.
 - 23) T. Naemura, H. Harashima: “Ray-based approach to integrated 3D visual communication,” Proc. SPIE, **CR76**, (2001) 282-305.
 - 24) 梶木善裕, 吉川 浩, 本田捷夫: “集束化光源列 (FLA) による超多眼式立体ディスプレイ”, 3次元画像コンファレンス (1996) pp. 108-113.
 - 25) S. A. Benton: “Experiments in holographic video,” Proc. SPIE, **IS-8** (1990) 247-267.
 - 26) 本田捷夫: “ホログラフィック動画表示の現状”, 3次元画像コンファレンス'98 (1998) pp. 129-134.
 - 27) 三科智之, 山田光穂, 岡野文男: “画素構造をもつ空間光変調素子による高次回折光を用いたホログラフィーの視域拡大”, 映像情報メディア学会誌, **55** (2001) 688-695.
 - 28) 高野邦彦, 佐藤甲癸: “液晶パネルと白色光源を用いたカラーホログラフィー立体動画表示装置”, 映像情報メディア学会誌, **55** (2001) 1308-1314.
 - 29) 藤井俊彰, 金子正秀, 原島 博: “光線群による3次元空間情報の表現とその応用”, テレビジョン学会誌, **50** (1996) 1312-1318.

(2001年10月26日受理)

