

解説

立体映像とコンピュータグラフィックス†



加納 裕†† 斎藤 史彦††

1. 序 言

コンピュータグラフィックス (CG)^{2),3),39)}の発展の歴史の一つは、自然現象表現のための方法論追求の歴史と言える。ray-tracing や radiosity に代表される現在のレンダリング技術により生成された画像の中には、ほとんど写真と錯覚するほどのものも出現している。アニメーション技術では、Hamilton の最小作用の原理などの物理法則を適用した研究が盛んである。これは従来のスプライン曲線などを用いたキーフレーム補間法とは質的に異なるものである。モデリング技術に関しては生物の表現方法が注目されている。

一方、立体映像^{1),36)}は CG とは別の意味での現実世界シミュレーション技術である。パララックス・バリアを用いた立体写真は立体映像の普及に貢献したが娯楽以上のものではなかった。立体映像が興味ある研究対象として認識されたのは、1948年の D. Gabor によるホログラフィの発明以降であろう。古く Euclid の時代からその原理が知られていたと言われる立体視は、人間の立体認識機構を解明する実験手段として、新しいマンマシン・インタフェースを実現する手法として、あるいは医用、化学、設計などの分野に対する応用技術として、その利用法が検討されている。また、レンチキュラ・シートや空間走査方式による裸眼観察可能な立体映像生成方式の利用が将来期待されている。

こうした背景の中で立体映像と CG を併用して、より現実感、臨場感を与える映像を得ようとする試みが最近活発である。本稿は立体映像技術と CG の関連について解説することを目的とする。

2. 立体映像の分類

立体映像を実現する手段は多種多様である^{12),14),17),37)}。

それらの分類方法もいろいろ考えられるが、本稿では文献 18) の分類法に準じた説明を行う。

観察者が立体映像を認識するための生理的要因は次の 4 つである^{6),8),23)}。

- 1) 両眼視差：両眼の網膜上の像の差異の検知作用
- 2) 輻輳：両眼の視線のなす角度の検知作用
- 3) 調節：眼球の水晶体の焦点距離の調節作用
- 4) 運動視差：網膜上の像の遠近 2 点の相対的な運動の検知作用

これらの要因の利用形態によって、立体映像は表-1 のように分類できる。まず立体映像は並列面複眼視と空間像形成に分かれる。並列面複眼視とは一對の両眼視差画像を用いるものであり、観察者の存在を仮定している。それに対して空間像形成とは、観察者とは独立に空間に 3 次元像を形成するものである。

並列面複眼視はさらに二眼式と多眼式に分類できる。二眼式は立体視とも呼ばれ、像情報は左右の 2 種類である。多眼式は一對の視差画像を複数個用意する。

二眼式は両眼視差と輻輳を利用し、多眼式はさらに運動視差も利用する。空間像形成はこれら三つの要因のほかに調節も利用する。

これら立体映像方式が各種の CG 形態に適合できるわけではない。CG との親和性については表-2 を参考にいただきたい。

表-1 立体映像の分類

形態		実現例	要因
並列面複眼視	二眼式	アナグリフ、偏光、時分割、ステレオビュー	両眼視差 輻輳
	多眼式	レンチキュラ、ホログラフィック・ステレオグラム	両眼視差 輻輳 運動視差
空間像形成	ホログラフィ	計算機ホログラム	両眼視差 輻輳
	空間走査式	パリアフォーカルミラー、移動スクリーン	調節 運動視差
	空間標本式	ミラーシャッタ、液晶積層	

† 3D Images and Computer Graphics by Yutaka KANOU and Fumihiko SAITO (SOLIDRAY Co., Ltd.).

†† (株)ソリッドレイ研究所

表-2 立体映像方式とCGの親和性

	二眼式	レンティ キュラ	ホログラフ イックステ レオグラム	計算機ホ ログラム	空間走査
回り込み	× *1)	○	◎	◎	◎
断層像	○	○	○	◎	◎ *2)
シェーディング	◎	◎	◎	△	×
リアルタイム性	◎	○ *3)	× *4)	×	○
カラー化	◎	○	×	×	○
解像度	◎	△	△	×	○

- *1) 頭部に3次元センサをつけて位置方向変化によって画像を変更することは可能。
- *2) ファントムイメージとなる。
- *3) 実画像の場合はリアルタイム性を確保できる。CG画像の場合計算量が多い。
- *4) ホログラム記録後のアニメーションは可能。

3. 二眼式表示方式^{24), 28)}

一対の左右両眼視差画像を利用した二眼式の立体映像表示方式は、画像作成が容易なこと、情報量が著しく少ないことなどからCGに広く用いられている^{1), 18), 26), 27), 30), 33), 44), 55)}。技術的にはほぼ確立した分野である。

3.1 映像分離形態

二眼式では両眼の映像の分離形態が重要であり、それにより以下の表示方式の分類が可能である。

- 1) アナグリフ方式：波長による分離
- 2) 偏光方式：偏光による分離
- 3) 時分割方式：画像開閉機構による分離
- 4) ステレオビュア方式：両眼への直接画像入力による分離

アナグリフ方式は、赤青眼鏡に代表される色フィルタによる左右画像分離方式である。偏光方式は、位相の直交した偏光子による分離である。時分割方式は、左右画像を表示装置に時系列に交互表示し、それに同期した視域開閉装置を用いる方法である。詳細は3.3で述べる。ステレオビュア方式は、プリズム、レンズ、鏡などを用いて両眼に直接画像を与えるものである。

3.2 左右画像算出法

CGによる一対左右両眼視差画像生成法について説明する。

一般にCGでは、視野交換及び透視変換により3次元空間が2次元平面に投影される²⁾。視野変換は、視点位置 p 、視線ベクトル (view plane normal) u 、上方向ベクトル (view up vector) v 、 u と v で形成さ

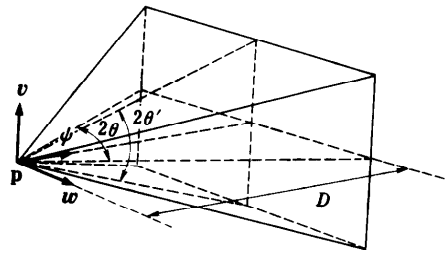


図-1 視野変換及び透視変換

れる面に垂直なベクトル w で定義される直交変換である。透視変換は水平、垂直視野角により定義される、同次座標 (homogeneous coordinates) を用いた変換である (図-1)。

一対の左右視点の決定は、 p を w 方向に互いに逆方向に適切な距離 d ずらすことにより行われる。視線ベクトルは左右ともに u に一致させる。これは輻輳角が0であることを意味する。これは一見奇妙である。なぜならば、人間が物を観察するときは必ず左右の視線は収束しているからである。しかしCGにおいて輻輳角を設定すると、透視変換の性質により画像の中心以外では垂直視差が生ずる。垂直視差の存在は立体視を困難にする。

以上の手続きにより両眼視差像が作成される。しかし、立体視を行う際に奥行き感が過度に強調されたり、その逆にならないように、以下の三つの変数について考慮しなければならない。

- 1) 視点と仮想(実)再生面間距離 (D)
- 2) 両眼間隔 (d)
- 3) 水平視野角 (2θ)

図-2を用いて説明する。 d/D 及び θ が、計算機空間における値と現実立体視空間における値が一致すれば、立体の再現性はほぼ正確であると考えられる。

図-2 (a)において式(1)が成立する。

$$\Delta x_1 = d_1 \cdot \Delta z_1 / (D_1 - \Delta z_1) \tag{1}$$

Δx_1 は Δx_2 に投影されるので、

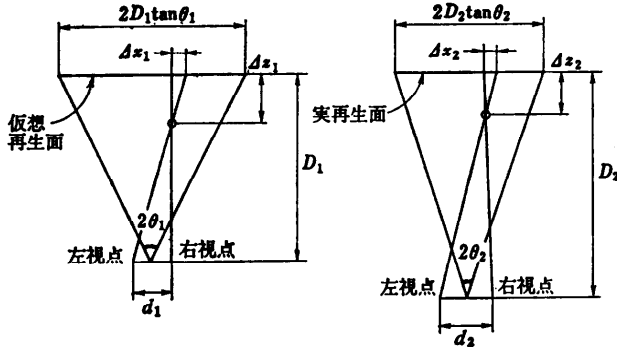
$$\begin{aligned} \Delta x_2 &= \Delta x_1 \cdot (D_2 \cdot \tan \theta_2) / (D_1 \cdot \tan \theta_1) \\ &= d_1 \cdot \Delta z_1 / (D_1 - \Delta z_1) \\ &\quad \cdot (D_2 \cdot \tan \theta_2) / (D_1 \cdot \tan \theta_1) \end{aligned} \tag{2}$$

したがって、図-2 (b)の関係は式(3)で与えられる。

$$\begin{aligned} (D_1 - \Delta z_1) \cdot \Delta z_2 \cdot \tan \theta_1 \cdot (d_2 / D_2) \\ = (D_2 - \Delta z_2) \cdot \Delta z_1 \cdot \tan \theta_2 \cdot (d_1 / D_1) \end{aligned} \tag{3}$$

さて、立体形状が再現される条件は(4)式で与えられる。

$$\Delta z_2 = \Delta z_1 \cdot (D_2 \cdot \tan \theta_2) / (D_1 \cdot \tan \theta_1) \tag{4}$$



(a) 計算機空間 (b) 実立体視空間
図-2 左右視差画像作成法

用が一般的となっている。液晶セルと偏光子の組合せで液晶シャッタが構成される。これをさらに改良したものが偏光眼鏡を用いるものであり、最近では特に円偏光の利用が重要である。図-3に説明するように、ディスプレイ管面に偏光子、液晶セル及びλ/4板を配置し、円偏光を生成する。λ/4板及び偏光子で構成される眼鏡を使用すると、円偏光がデコードされる。円偏光は直線偏光と異なり、頭部の傾きが生じても左右画像のクロストークが誘発されにくい。

式(4)を式(3)に代入すると式(5)が得られる。

$$(D_1 - \Delta x_1) \cdot \tan \theta_1 \cdot (d_2 / D_2) = (D_1 \cdot \tan \theta_1 - \Delta x_1 \cdot \tan \theta_2) \cdot (d_1 / D_1) \quad (5)$$

式(3)は Δx_1 を含んでいるので、一般には立体形状は正確には再生できない。 $\theta_1 = \theta_2$ の場合に限り式(5)は式(5)'となる。

$$d_2 / D_2 = d_1 / D_1 \quad (5)'$$

式(5)' から d_1 の値を決定することにより、適切な視差画像が生成されることになる。

3.3 時分割による表示方式

時分割表示方式は二眼式の中でもっとも幅広く用いられているので、若干詳しく解説する。

時分割方式利用に際して考慮すべきことは、立体視成立周波数及び臨界融合周波数である。前者は左右画像が融合され立体視可能な下限周波数であり、後者はフリッカを知覚しない下限周波数である。後者のほうが前者と比較して高く、約 110 Hz という報告がある¹⁹⁾。したがって時分割を行う場合には 110 Hz 以上で左右画像を切り替えることが望まれる。

時分割方式で使用する画像開閉機構は次の三つが代表的である。

- 1) PLZT
- 2) 液晶シャッタ
- 3) 偏光眼鏡

PLZT (lead (=plumbum)-lanthanum-zirconate-titanate) は透明セラミックスであり、位相の直交した二つの偏光子とともに使用する。スイッチングは高速であるが、駆動電圧が高いこと(数百 Volt)、透過率が低いこと(～15%)、破損しやすいことなどが欠点である。このために最近では液晶セルの使

4. 多眼式表示方式及び空間像形成

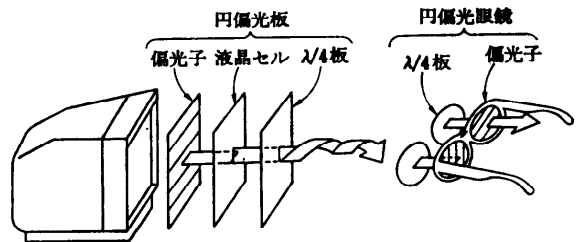
方式^{6), 17), 35), 36)}

前章で説明した二眼式は基本的に眼鏡などの補助媒体が必要であった。本章では裸眼観察可能な立体映像実現手段について述べる。これらは将来において期待される技術である。

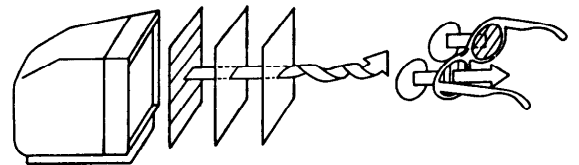
4.1 レンティキュラ方式^{5), 6), 10)}

レンズやバリアを用いて裸眼立体視を行う多眼式にはパララックス方式、レンティキュラ方式、インテグラルフォトグラフィ(IP)方式がある。

パララックス及びレンティキュラ方式は、複数の短冊状画像を並べ縦縞のスリットまたは円筒型レンズを



(a) 液晶セル電圧オフ



(b) 液晶セル電圧オン

図-3 時分割円偏光方式の原理

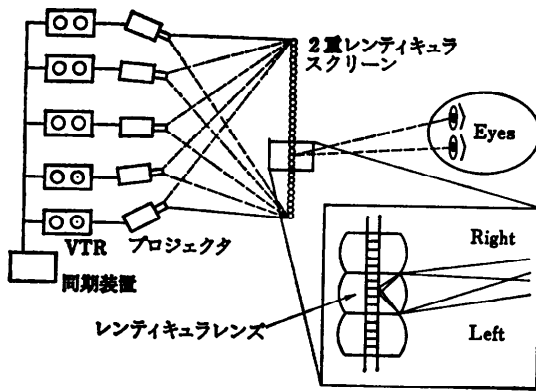


図-4 投射型レンティキュラ方式

とおして画像を観察する方式である。被写体を複数(6~16個程度)の方向から観察した画像を並べることによって画像の飛びが抑制される。これらの方式は水平方向の視差のみ得ることができる。IP方式は蝸の目レンズをとおして画像を撮影観察するが、左右上下の視差を得ることができる。

レンティキュラ方式で複数のプロジェクタで投射し観察する方法を図-4に示す。各プロジェクタは異なった視点から被写体を観察した画像を投影する。周辺部の像の歪みを補正するための光学系が重要となる。レンズ配置を放射状にしたソ連のステレオキノ³⁶⁾やフレネルレンズを用いた筑波博松下館のシステム²⁹⁾、西ドイツの例⁴¹⁾など研究事例も多い。

指標付高解像力CRTによるレンティキュラ方式^{7),21)}は、レンズとの位置合わせ精度を正確に保つため、指標(レンズ間隔の蛍光線条)を横切る走査線に歩調を合わせて複数の画素をレンズ間に表示する。水平分解能(レンズ間隔)を1mm、8個の視差画像を用いて300mmのCRTに表示するためには、水平2400画素必要となる。CRTの解像度、コンバージョンともに現状以上のものが望まれる。

CGでレンティキュラ方式の視差画像を作成する際は、撮影時の逆視像を考慮する必要がなく、複数の連続した視点からの透視変換像(またはその鏡像)を生成すればよい。投射型はそれらを同時投射し、CRT型ではそれらをレンズ間に順に1画素ずつ配置するように走査する。

4.2 ホログラフィ⁴⁵⁾

ホログラフィは記録、再生方式によっていろいろな分類があるが、CG画像をホログラムにする場合は、周囲または奥行き方向の多数の画像を記録合成する。

ホログラフィック・ステレオグラム(HS)^{16),48),51)}はホログラムを利用した多眼式とも言え、CGに適した手法である(図-5)。HSにおいて、特に形状が円筒型のマルチプレックス・ホログラム(MH)¹⁶⁾について説明する。

MHは通常、被写体を周囲から順に0.5~1度程度の間隔で35mmフィルムに撮影し、円筒型レンズとスリットを通したフィルム像とレーザとの干渉縞を短冊状に順に記録して1枚のホログラムフィルムを作成する。このフィルムを円筒型にして中心線上に白色光を置く(図-6)。水平方向の視差のみをもつ。35mmフィルムに撮影する画像は、対象を周囲から観察したCG画像やアニメーション画像である。明確な像の範囲は縦2/3、横は円筒直径の1/2程度、カラー化は難しい。また作成上ウェットな過程を経るが、光学素子を利用して直接ホログラムに記録させる方法も研究されている⁴²⁾。

複数の断層像(CT像など)のフィルムを切断面の位置関係と同一に並べ順にホログラムに合成すると、ファントムイメージ(3Dの透過像)で観察できる⁴⁹⁾。断層像からファントムイメージでないホログラム作成する場合は、断層像から3次元像を計算機で再構築後複数の視差画像をCGで表示し、マルチプレックス方式でホログラムにする¹⁶⁾(図-7)。この際ボリュームレンダリングなどのCG技法が効果的である。

計算機で直接干渉縞を計算し描画する計算機ホログラムの研究例⁶⁷⁾もあるが、まだ自由にCG画像を生成するには至っていない。

4.3 空間走査方式

空間走査方式には、螺旋切断面や円盤を回転させてレーザで投影する移動スクリーン方式や、パリアフォーカルミラー(varifocal mirror)方式がある。

移動スクリーン方式^{53),54)}は、レーザによりスク

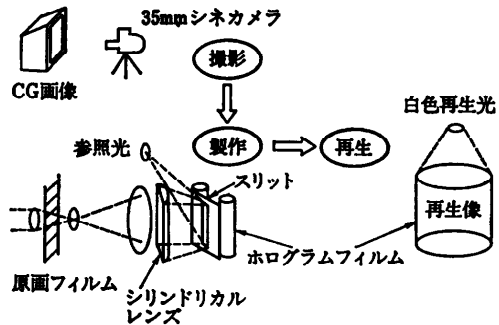


図-6 マルチプレックスホログラムの製作

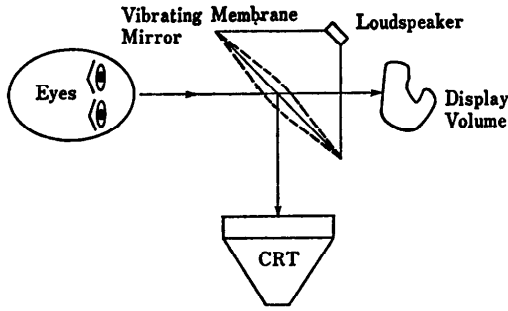


図-10 パリフォーカルミラー方式の原理

リーンに物体の切断面を順次描画し、それに同期してスクリーンを移動させる(図-8, 9)。スクリーンの形状及び移動特性により、切断面の画像を補正する必要がある。

パリフォーカルミラー方式^{4),50),56)}のグラフィックディスプレイは、スピーカの構造をもつ振動鏡にCRT画像を投射し、画像の奥行きとミラーの位置を同期させてその反射像を観察する(図-10)。CRTの表示画像は平行投影された像であるが、描画される各画素の奥行き情報に従ってミラーの位置が変化するので、反射像が空間中に認識される。中心より約30度の範囲で回り込んだ像を観察できる。ただし、ミラーの動きが線形でなく、またミラーによる反射像に歪みが生じるので、移動スクリーン方式同様補正が必須となる。

これらの方式は計算機制御となるので、CGの表示においてリアルタイム性がある。しかし、ファントムイメージとなるのでワイヤフレーム表示や断層像重ね合わせ表示には有効であるが、ソリッドモデルのシェーディング表示などにはあまり向かない。

5. 応用例

立体映像技術とCGに関する応用研究事例、及び関連製品について述べる。いずれも二眼式に関するものが圧倒的多数である。

5.1 研究事例

人間と計算機の新しいインタフェースとして、人工現実感(artificial realities)の研究が進められている^{3),13)}。これは、頭部搭載型ステレオディスプレイにより観察者が現実から完全に遮

断され、計算機で生成された仮想環境に自らを置くものである。頭部の位置姿勢の取得可能なセンサを搭載することにより、動作に応じた映像を生成することができ、高度な臨場感が実現される。

立体視を利用した計算機対話環境に関する研究は数多くみられる^{33),34),47),52)}。これらの研究成果は将来標準として浸透する可能性がある。

工業製品の設計の評価に立体映像を利用する試みがある⁹⁾。CADにより作成された計算機モデルからレンダリングによりシェーディング画像が得られるが、さらにそれに現実感を与えるために立体映像が用いられる。

ロボット・シミュレーションに立体映像を利用する研究もある。CGの実画像のスーパーポーズにより、統一されたシミュレーション環境を実現する計算機システムが提案されている²⁸⁾。アームの複雑な軌跡や障害物との干渉を理解するには、立体視CGの利用が有効であろう²²⁾。

流体力学や構造力学における3次元解析結果を表現する手段として、立体映像は効果的である⁴⁰⁾。この分野の表示対象は、通常可視不能な空間内に配置された物理量であり、疑似3次元表示法(shading, shadowingなど)の適用だけでは不十分である。速度などのベクトル量あるいは流跡などは、立体映像として可視化することで解析結果の理解が深まるとされる(図-11)。

医用への応用としては、CTあるいはMRIなどから得られる断層像を立体視映像あるいはホログラム

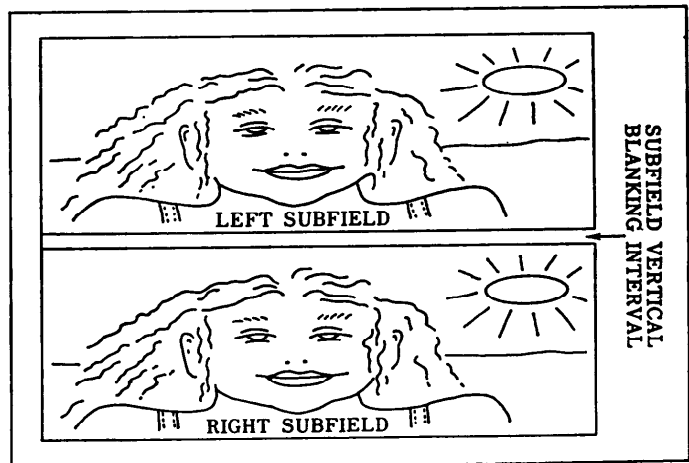


図-12 時分割方式におけるフレームバッファ画像構成²¹⁾

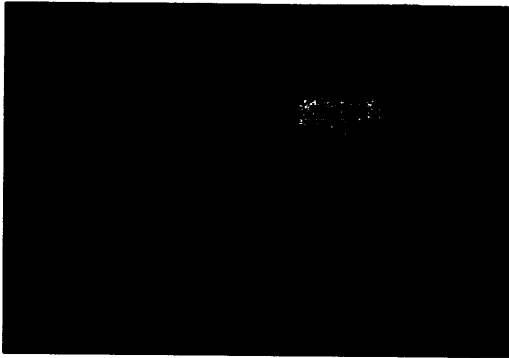


図-5 ホログラフィック・ステレオグラム
 (提供: マサチューセッツ工科大学 メディアラボ)

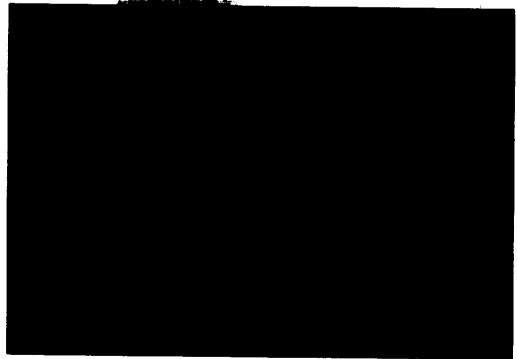


図-8 スクリーン移動法 例 1
 (提供: 芝浦工業大学 山田博昭助教授)

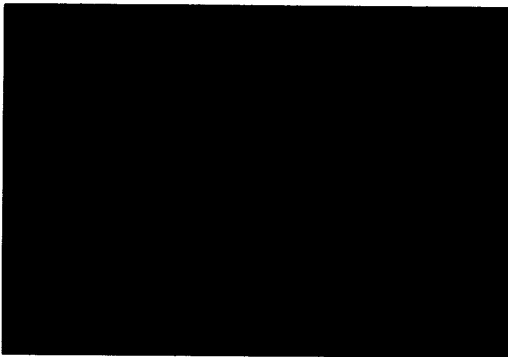


図-7 マルチプレックス・ホログラム
 (提供: 東京工業大学 本田捷夫助教授)

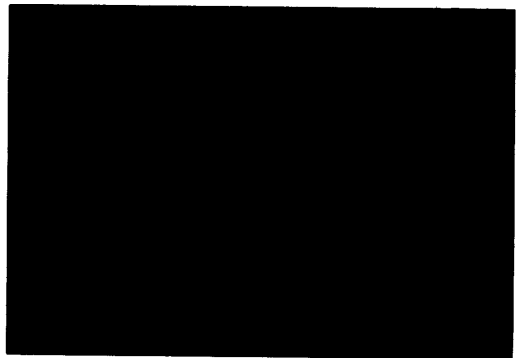
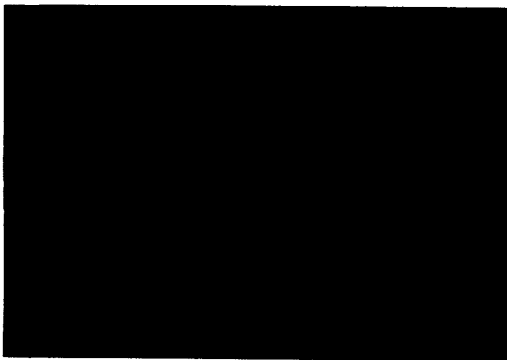
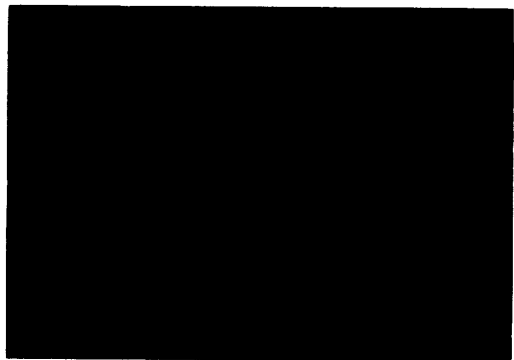


図-9 スクリーン移動法 例 2
 (提供: 芝浦工業大学 山田博昭助教授)



(a) 左眼画像



(b) 右眼画像

図-11 流体解析結果表示例
 (データ提供: 宇都宮大学 秋山光庸教授 日本原子力研究所 功刀資彰氏)

として観察する試みがある^{16), 20), 46), 49)}.

化学の分子設計への立体映像の適用は、古くからその有用性が認められている³²⁾。分子はその3次元形状そのものが問題となることがあり、形状を立体映像で把握することは重要である。

5.2 製 品

StereoGraphics 社の映像同期周波数変換器は、GWS やディスプレイコントローラから出力される映像同期信号の垂直成分を倍に変換する機能及び液晶シャッターまたは液晶スクリーン(偏光子、液晶セル、 $\lambda/4$ 板で構成)を駆動する機能をもつ²⁶⁾。図-12に示すように、垂直方向を約1/2に圧縮した左右画像をフレームバッファ内に構成することにより、フリッカのない時分割立体CG表示が可能である。ただし垂直解像度が半分になる。最近同社では赤外線を用いてシャッターを制御する装置も開発している。

Tektronix 社の GWS は、垂直周波数を約倍(115 Hz)にする機能及び液晶スクリーンを駆動する機能が内蔵されている⁴³⁾。立体像の生成も GWS 側がローカルに行う。

VPL Research 社は人工現実感のための計算機システムを開発した³⁾。これは NASA の Ames 研究所による研究成果である。頭部搭載型液晶ディスプレイが核心部であり、GWS から両眼視差画像がディスプレイに供給される。頭部には McDonnell Douglas 社の 3SPACE が取り付けられている。この装置は直交コイルを用いて位置姿勢6自由度を検知する3次元ディジタルであり、頭部の運動を表示に反映させることができる。さらに、手や体の動きを検知する装置を組み合わせることで計算機モデルを体感することができる。

Genisco 社の SpaceGraph は、パリアフォーカルミラー方式の唯一の商品化されたグラフィック・ディスプレイである⁵⁶⁾。コンピュータと接続し、ワイヤフレームや CT 像の立体映像が観察できる。

三洋電機は NHK 技研と共同でフリッカレス 3D ビデオディスクシステムを開発した¹¹⁾。本システムはディスク記録及び再生装置からなる。このディスクには NTSC の倍の情報量が記録可能である。映像周波数帯域は 8.4 MHz である。再生時に 4:1 インターレースと呼ばれる映像信号が出力され、フリッカのない立体視 CG の観賞が可能である。

6. 結 言

立体映像と CG についての解説を行った。現在の主流は二眼式であるが、将来は裸眼で立体映像が観察可能な方式の利用が望まれる。二眼式はその利点から今後も重要な役割を果たすであろう。ただし眼の疲労の問題が指摘されており、原因の解明と適切な対策が成就されることが必要であろう。

実画像を用いた立体映像は重要なテーマであるが、本稿の範囲を逸脱するので触れなかった。しかしそれは本文内容とかなり重複するところがある。

謝辞 日頃からご教示いただいている日置敏昭氏(三洋電機)、川上隆氏(日産自動車)、本稿を執筆するにあたりご協力賜りました本田捷夫助教授(東京工業大学)、山田博昭助教授(芝浦工業大学)に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 安居院, 中島: ステレオグラフィックス & ホログラフィ: ザ 3D, 秋葉出版 (1985).
- 2) Foley, J. D. and Van Dam, A.: Fundamentals of Interactive Computer Graphics, Addison-Wesley (1982).
- 3) Foley, J. D.: Interfaces for Advanced Computing, Scientific American, pp. 127-135 (Oct. 1987).
- 4) Hamasaki, J., Nagata, Y. and Okada, M.: Real-time Transmission of 3D Image Using Volume Scanning and Spatial Modulation, Applied Optics, Vol. 16, No. 6, pp. 1675-1685 (1977).
- 5) 濱崎: レンティキュラ画像, 画像電子学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 415-428 (1981).
- 6) 濱崎: 三次元映像と動画像, 3D 映像, Vol. 1, No. 1, pp. 11-19 (1987).
- 7) 濱崎, 岡田, 宇都宮, 植村, 竹内, 神林: 指標付高解像力ブラウン管による実時間三次元映像直接表示装置, テレビジョン学会技報, Vol. 10, No. 54, pp. 19-24 (1987).
- 8) 畑田: 立体映像の視覚心理, 映像情報, Vol. 20, No. 1, pp. 27-36 (1988).
- 9) 島中, Jones, K. M., 浦谷, 今駒: ビジュアルモデルの立体視への応用, 情報処理学会研報, Vol. 88, No. 58, pp. 63-70 (1988).
- 10) Higuchi, H. and Hamasaki, J.: Real-time Transmission of 3-D Images Formed by Parallax Panoramagrams, Applied Optics, Vol. 17, No. 24, pp. 3895-3902 (1978).
- 11) Hioki, T., Toyama, T., Morita, Y., Watanabe, H., Isono H., Yasuda, M., Kusaka, H. and Yamada, M.: Flickerless 3-D Laser Video

- Disc System, SMPTE Television Technology in Transition, pp. 95-106 (1988).
- 12) 平田, 鈴木: 3次元ディスプレイ, テレビジョン学会誌, Vol. 41, No. 7, pp. 610-618 (1987).
 - 13) 廣瀬, 古賀, 石井: 人工現実感を利用した三次元空間内作業用マンマシンインタフェース, 第4回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 201-206 (1988).
 - 14) Hodges, L. F. and McAllister, D. F.: True Three-Dimensional CRT-based Displays, Information Display, Vol. 3, No. 5, pp. 18-22 (1987).
 - 15) 本田: ホログラフィック・ステレオグラムによる立体像表示, 3D映像, Vol. 3, No. 3, pp. 3-6 (1989).
 - 16) 本田, 辻内: マルチプレックス・ホログラムを用いた医用画像の立体表示, 映像情報, Vol. 19, No. 5, pp. 59-64 (1987).
 - 17) 井越: 三次元表示技術の展望, 精密工学会誌, Vol. 54, No. 2, pp. 1-6 (1988).
 - 18) 井越: コンピュータグラフィックス用入出力装置, 情報処理, Vol. 29, No. 10, pp. 1126-1134 (1988).
 - 19) 磯野, 安田: 時分割立体視の成立条件, テレビジョン学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 549-555 (1987).
 - 20) 岩崎: 三次元表示技術の医療分野への応用, 3D映像, Vol. 2, No. 2, pp. 7-13 (1988).
 - 21) 金子, 濱崎, 岡田, 尾上: レンティキュラ板による計算機出力の3次元表示, 電子通信学会総大会, 1101 (1979).
 - 22) 川崎, 井上, 渡部: オフラインテーピング用ロボットシミュレータにおける立体視表示, 3D映像, Vol. 3, No. 3, pp. 15-18 (1989).
 - 23) 日下: 3次元情報の基礎, テレビジョン学会誌, Vol. 41, No. 7, pp. 604-609 (1987).
 - 24) Lipton, L.: Foundations of the Stereoscopic Cinema, Van Nostrand Reinhold (1982).
 - 25) Lipton, L. and Meyer, L.: A Flicker-Free Field-Sequential Stereoscopic Video System, SMPTE J., Vol. 93, No. 11, pp. 1047-1051 (1984).
 - 26) 町田: 映像メディアにおけるコンピュータグラフィックス, 情報処理, Vol. 29, No. 10, pp. 1196-1201 (1988).
 - 27) 正路: パソコンによる対話型3次元立体視法, 日経 CG, 9月, pp. 124-129 (1987).
 - 28) 松井, 塚本: マルチメディアディスプレイを用いた統合型遠隔ロボット制御法, 日本ロボット学会誌, Vol. 6, No. 4, pp. 301-309 (1988).
 - 29) 村上, 野添, 米田: 多眼式カラー立体テレビジョン, テレビジョン学会技報, Vol. 9, No. 9, pp. 33-38 (1985).
 - 30) 中嶋, 安居院: 特集国際科学技術博覧会, 6. コンピュータグラフィックス映像, テレビジョン学会誌, Vol. 39, No. 7, pp. 622-627 (1985).
 - 31) 中前: 3次元コンピュータグラフィックス技法情報処理, Vol. 29, No. 10, pp. 1082-1089 (1988).
 - 32) 中野: 液晶シャッターを使った分子模型のステレオ表示, 現代化学, 6月, pp. 51-54 (1988).
 - 33) 西川: 立体視 CG システムのシミュレーション, 日経 CG, 12月, pp. 100-110 (1986).
 - 34) 野間, 岩田: 回り込み動作に対応した立体映像表示システムの開発, 第4回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 207-210 (1988).
 - 35) 大口: 展示用特殊映像の種類と歴史, PIXEL, No. 65, pp. 124-134 (1988).
 - 36) 大越: 三次元画像工学, 産業図書 (1972).
 - 37) Okoshi: Three-Dimensional Displays, Proceedings of the IEEE, Vol. 68, No. 5, pp. 548-564 (1980).
 - 38) 大頭: 二眼式立体視技術と視覚機能, 精密工学会誌, Vol. 54, No. 2, pp. 255-259 (1988).
 - 39) Rogers, D. F. and Adams, J. A.: Mathematical Elements for Computer Graphics, McGraw-Hill (1976).
 - 40) 齊藤, 加納: 3次元処理のための機器, ソフトウェアの流れの可視化への応用, 流れの可視化学会誌, Vol. 9, No. 35, pp. 409-413 (1989).
 - 41) Schulze, E.: Research on 3D Imaging in West-Germany, 3D映像, Vol. 2, 第5回研究会予稿集, pp. 38-41 (1988).
 - 42) Schulze, E.: Generation of Animated 3D Images by Holographic Optoelectronic Displays, 3D映像, Vol. 2, 第5回研究会予稿集, pp. 42-46 (1988).
 - 43) 首藤: 立体視可能な三次元グラフィック・ディスプレイ, 映像情報, Vol. 20, No. 1, pp. 55-60 (1988).
 - 44) 角: 富士通パビリオンのコスモドーム; コンピュータグラフィックスによる全天周立体映像, テレビジョン学会技報, Vol. 8, No. 45, pp. 3-8 (1985).
 - 45) 鈴木: 実戦ホログラフィ技術, オプトロニクス社 (1986).
 - 46) 鈴見, 井上, 笠野, 北村, 小久保: 電子顕微鏡の3次元立体像再構築システム, 映像情報, Vol. 20, No. 1, pp. 49-54 (1988).
 - 47) 竹村, 伴野, 小林: 3次元指示入力の評価について, 情報処理学会研報, Vol. 88, No. 58, pp. 47-52 (1988).
 - 48) 館野: CG ホログラフィのつくり方, PIXEL, No. 60, pp. 158-162 (1987).
 - 49) 鳥脇: 医用3次元画像の表示と処理, 映像情報, Vol. 20, No. 5, pp. 41-51 (1988).
 - 50) Traub, A. C.: Stereoscopic Display Using Rapid Varifocal Mirror Oscillations, Applied Optics, Vol. 6, No. 6, pp. 1085-1087 (1967).

- 51) 辻内: ホログラフィによる3次元映像ディスプレイ, テレビジョン学会全大, pp. 431-434 (1987).
- 52) 上野, 刈部, 浅田, 村上, 中井: パーソナルコンピュータと映像機器の立体視システム技法について, 情報処理学会研報, Vol. 88, No. 58, pp. 29-36 (1988).
- 53) Williams, R. D. and Garcia, F. Jr.: A Real-Time Autostereoscopic Multiplanar 3D Display System, SID 88 Digest, pp. 91-94 (1988).
- 54) 山田, 大平, 久保, 増田, 宮地: 切断面表示方式による三次元ディスプレイ, テレビジョン学会技報, Vol. 10, No. 47, pp. 27-32 (1987).
- 55) 山本, 安部: 立体 CG アニメーションの作り方 PIXEL, No. 70, pp. 117-120 (1988).
- 56) 山崎: 3次元画像表示システム—SPACEGRAPH, 図形と画像, Vol. 2, No. 4, pp. 90-91 (1981).
- 57) 谷田貝: 計算機ホログラム, 画像電子学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 407-415 (1981).
(平成元年 10 月 2 日受付)
-