

[解説]

立体視の原理と3D技術への応用

広内 哲夫

1. はじめに

19世紀前半に写真が発明されると、欧米ではすぐに立体写真が考案された。写真の表面に浮き上がって見える立体像は当時の人々に強烈なインパクトを与え、立体写真のブームが起こったのである。人々はその不思議なリアルさに酔いしれ、その後、映画が発明されると立体映画もすぐに登場した。そして、立体視の現象の解明も進み、立体の図形・画像・映像は娯楽へと応用され、それと共に種々の立体機器の開発も進められていった。

立体ブームは、立体写真の誕生以来、現在までに数十年単位で繰り返し起きている。数年前からの3D(立体)ブーム(注)は、現在衰えたとはいえ、その延長線上にあると言える。そこで本稿では、読者の方々に「3D世界への道案内」となるように、立体視の原理とその応用技術(3D技術)を簡潔に紹介する。

(注) 現在では“立体”とは言わないで、“3D”と表現することが多い。人々は3Dという用語にハイテクという語感を感じているようである。

2. 立体視の仕組み

2.1 輻輳と開散

まず、人が絵画のような平面をどのように眺めているかを簡単に説明する(文献1)。図1に示すように、絵画面上の点Aを眺める場合、人は左右の眼球の視線を注視点Aに向ける。このとき眼球は内側に回転するが、この回転を輻輳、そして、2

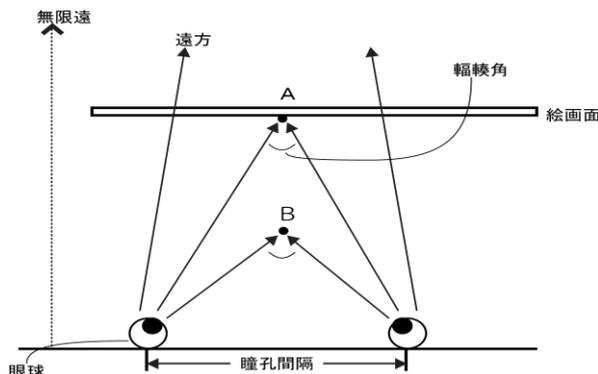


図1 眼球の動き (文献1)

つの視線の成す角を輻輳角と呼ぶ。また、眼球から注視点の絵画面までの距離を視距離と呼ぶ。左右の眼球の瞳孔間隔は一般の成人で、約6.5cmである。また、眼球内の水晶体は、周りの毛様体筋と呼ばれる筋肉の働きによって、近くを見るときは厚くなり遠くを見るときは薄くなり、それによって焦点調節を行う。

ところで、注視点をA点から手前のB点に移したとすると、眼球はより内側に回転して、その視線の成す輻輳角は大きくなる。また注視点を絵画面よりも遠方に移すと、眼球は外側に回転するが、これを開散と呼ぶ。無限遠では、左右の視線は平行になり、そのときの輻輳角は0度である。個人差はあるが、眼球はそれ以上外側に向かっては開散しない。「読書して目が疲れたときには空を眺めればよい」とよく言われるが、これは輻輳角が小さくなると、眼の筋肉の緊張が和らぐためである。

2.2 両眼視差

本節では、両眼立体視と呼ばれる視覚の生理現象について述べるが、現在の3D技術はこの現象を利用している(注:次ページ)。図2(a)に示すような2本の棒が置かれた3次元実世界(この世界を世界Wと言うことにする)を想定する(文献2)。そして、

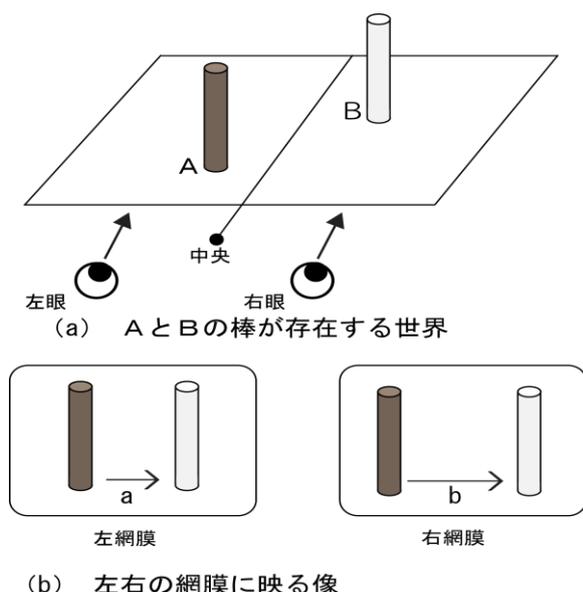
Tetsuo Hirouchi

文教大学情報学部

Bunkyo University

[解説] 2013年1月31日受付

© 情報システム学会



(b) 左右の網膜に映る像

図2 両眼立体視 (文献2:本図は文献の図を本稿の主旨に合うよう改変している)

1本Aは中央の左側の前方に、もう1本Bは中央の右側の後方に置かれているとする。人がこの2本の棒を中央前方から眺めると、左眼と右眼の網膜にはそれぞれ、図2(b)に示すような2次元像が映し出されることになる(実際には網膜内で左右、上下はそれぞれ逆転して映る)。この左右の網膜に映った2つの2次元像に基づいて、人の脳はその視覚生理機構によって、脳内に図2(a)の3次元の奥行きのある世界Wのイメージを再現するのである。

(注) 両眼立体視による立体感を知覚できない人は、日本人では統計的には1~2%程度は存在すると言われている(文献1)。人は両眼視差だけに頼って奥行きを知覚しているのではなく、色々な要素を総合して立体視を行っている。例えば、単眼でも立体感を得ることは可能である。これは水晶体の焦点調節を行う毛様体筋の動きなどから、脳が立体感を知覚すると言われている。

奥行き感(立体感)を感じるのは、左網膜と右網膜に映る2次元像が微妙に異なっていることに起因する。図2(b)に示すように、左網膜上に映った棒Aの像と棒Bの像の間隔をa、右網膜上に映った棒Aの像と棒Bの像の間隔をbとすると、左右の網膜に映った像の位置関係にはズレが生じていて、 $a < b$ の関係が成立する(もしズレがなければ $a = b$)。このズレを両眼視差(あるいは単に視差)

という。この視差によって人の脳は、3次元実世界における物体の前後関係を知覚する。もし、網膜上で $a > b$ となれば、図2(a)において、棒A、Bの前後関係が逆転する。実際、網膜上で左右のズレを逆転($a > b$ とする)させるプリズム付きのメガネをかけた人は、前後関係の逆転した錯覚の3次元世界を体験することになる(文献2)。

それならば、網膜に映る2次元像(見た世界は世界Wとする)を視差のある2次元図として図形化し、その図を人の左右の網膜に提示してみよう。人の脳は3次元世界Wを脳内に再現できるのだろうか?それが出来るのである。これが立体視の基本原理となるものであり、立体視を実現する2次元図をステレオグラム(stereogram)という。

現在の実用的な3D技術は基本的に、両眼視差に基づくステレオグラムの考え方を利用しており、それは脳に一種の錯覚を起こさせるものである。立体視のデモンストレーションが初めて行われたときは(1838年)、ステレオグラムは手書き図形であったが、写真機が発明されてからは写真、その後は動画となっていく。

3. 立体視の図式化—遠近感の判定

立体視の原理を工学的に応用するには、遠近感を定量化する必要がある。このため、図2(b)の網膜に映った像を改めてステレオグラムとして図3に描くことにする。左眼用の図に描いた左棒を A_L 、右棒を B_L 、右眼用の図に描いた左棒を A_R 、右棒を B_R とする。ステレオグラムの左右対をそれぞれ左右の網膜に提示すると、脳は図2(a)の世界Wを立体像として融像することになる。これが図3による立体視である。実際に図を眺めるには、平行法という方法(絵図の表面を注視するのではなく、遠くに焦点を合わせるように眺めると、自然に立体像を視認できるという方法)を用いる。左図は左眼で眺め、右図は右眼で眺めるのであるが、その眺め方は多少訓練する必要がある。そうすると、網膜上の2つの像が脳内で融合され、立体像が視認できる。一般に人々はこれを「立体的に見える」というが、実体を見ているのではなく、虚像としての立体像を知覚している。

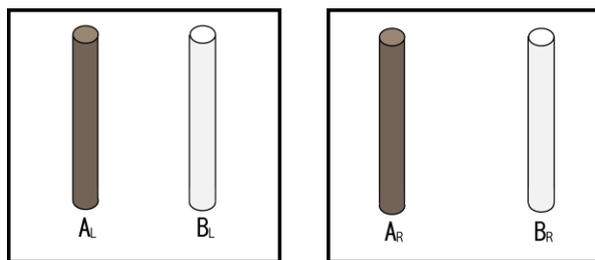


図3 棒 A, B のステレオグラム

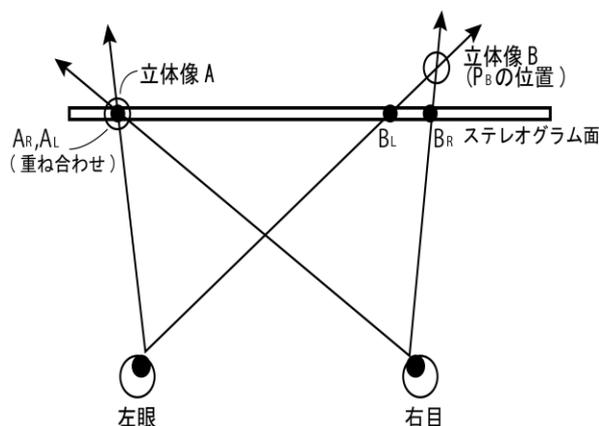


図4 ステレオグラムの後方での融像

図3のステレオグラムの左右対を重ね合わせて、幾何光学的な図式化を試みてみよう。図4は、図3の左右の対を、棒 A_L と棒 A_R を同一位置として重ね合わせたもので、平行法でそのステレオグラムを眺めている状態を示している。この場合、 B_L と B_R の間の距離が視差（ズレ）となる。左眼の視線がステレオグラムの左眼用図形に映った棒 B_L を注視点とすると、右眼は右眼用図形に映った棒 B_R を注視点とするように働く。左右の視線の注視点は、脳の視覚機構によって一対一に対応するのである。ステレオグラムを眺めている人は、図4のように左右の視線が交差する位置 P_B に棒 B の立体像を視認する。それ故、人は棒 B がステレオグラムの後方に存在するように遠近感を感じる。

今度は図3のステレオグラムの左右対を、上記と同様な仕方で、 B_L と B_R を同一位置として重ね合わせる。この場合 A_R と A_L の間の距離が視差となり、図5に示すように、人は視線の交差する位置 P_A に棒 A の立体像を視認する。それ故、人は棒 A がステレオグラムの手前に存在するように遠近感を感じる。

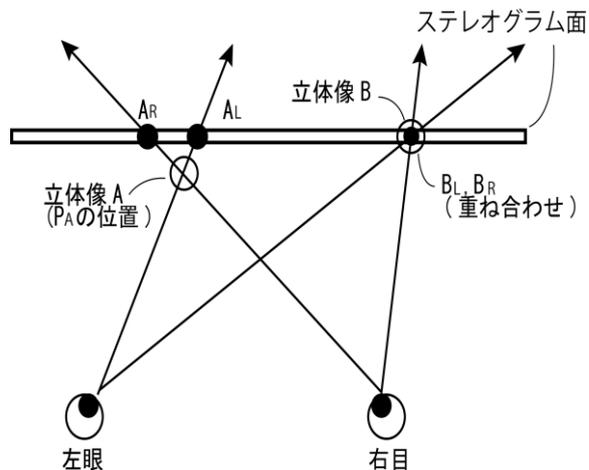


図5 ステレオグラムの前方での融像

ところで、図4における棒 A_L , A_R と、図5における棒 B_L , B_R は、それぞれ視差は生じていないので、視線の交差はステレオグラム上である。この場合は、図4における棒 A と図5における棒 B の立体像は、それぞれステレオグラム上に視認される。

このような考察をさらに進めると、視差の大きさから人が視認する立体像の位置を推定することができる。この視差を制御すると、立体写真の立体像の引っ込みと飛び出しを自由にコントロールすることが可能になるが、それについては、第7章（立体コンテンツ制作への応用）で説明する。

4. ランダムドット・ステレオグラム

4.1 ユレッシュのRDS

脳内では立体視はどのように行われるのであろうか？ これを解明したのが、ハンガリー出身のベル研究所研究員のユレッシュ (B.Julesz) である。立体視が流行し始めた19世紀中頃、ヨーロッパでは、ステレオグラムを閲覧する装置の開発に貢献した2人の英国人物理学者、ホイートストーン (C.Wheatstone) とブリュースター (D.Brewster) が、視覚心理学における「形と奥行き」の知覚について論争していた。ホイートストーンが「奥行き知覚は左右における対応する点同士の視差が重要である」と唱えたのに対して、ブリュースターは、「遠近的要素を表現する形が奥行きの手がかりとなる」という説を主張した^(文献3)。その後、立

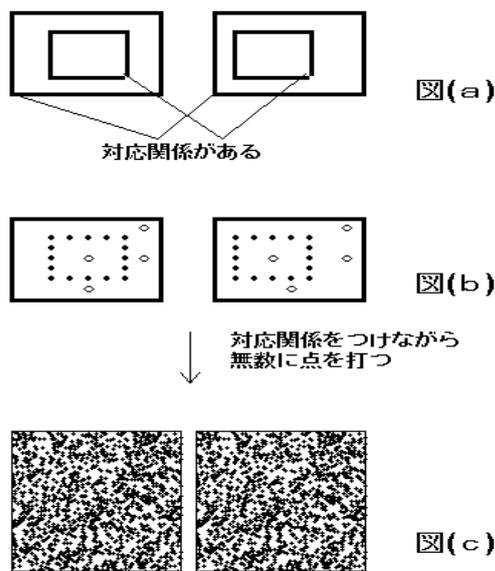


図6 RDSの説明図（文献4：本図は筆者の元ゼミ生が描いた図を改変している）

体視においては「形を認知してから奥行きを知覚する」という考えが定説となったが^(文献2)、本当のところはどうなのであろうか？

そこで、ユレッシュは1950年代末に、この問題を解決するために、ランダムドット・ステレオグラム（random dot stereogram；以下RDSと略記）と呼ばれる図形を開発した^(文献2)。読者の中もご覧になった方は多いと思われるが、それは図6(c)に示されるような点（ドット）を無数にかつランダムに打ったものであり、この図形を（裸眼で平行法によって）眺めると、立体的な形が眼前に浮かび上がってくるのである。筆者も1990年代中頃に、知り合いの教授からRDS（実際には後述のオートRDS）を見せてもらったが、その立体感には圧倒された。思わず「何これ？ 凄い」と言ってしまうほどのバーチャルリアリティー的な感覚で、立体像が目の前に迫ってきたのである。

「一見無意味な点の集合体でありながら、何故そこに立体図形を視認できるのか？」手順を踏んでこれを説明しよう^(文献4)。図6(a)に示すステレオグラムでは、これを平行法で眺めると、ステレオグラムの対となる左右の実線で描いた内側の四角形は、視差が付いて（ズレて）配置されているので、2.2節で示した理由によって、手前に飛び

出して視認される。ところで、この左右の内側の四角形を図6(b)のように黒点で示してみよう。この対の黒点は、左右の対となる内側の四角形のそれぞれに対応する線上の位置にランダムに打ったものである。このステレオグラムを平行法で眺めると、図6(a)と同様に飛び出した四角形を視認することができる。

そこで、このステレオグラムの左右の対において、対応するそれぞれの位置（外側の枠からの距離が同じになる左右の位置と内側の四角形からの距離が同じになる左右の位置）に点（左右で2個の点を一对の点とする）をランダムに数多く打ってみよう（図6(b)では白点で示してある）。点の数が増えるに従って、四角形を形成する点の対は、他の点の中に紛れ込んで見分け難くなる。そして図6(c)のようになると、ランダムに打った点群は全く見分けがつかなくなり、図6(c)を一瞥しただけではそこに何の図形が描かれているのかは分からない。しかし、平行法でこのステレオグラムを眺めると、そこに紙面から手前に飛び出した四角形を視認することができる。これがユレッシュの考案したRDSである。

ユレッシュのRDSでは形に関する情報は、視差のある左右の対応点以外、取り払われている。しかし、私達はRDSの中に形を視認することができる。これは、脳がまず、対応点同士のズレを手掛かりとして奥行きを知覚して、その後形を認知していることを意味している。ユレッシュはRDSの研究を通して、人間の視覚機構が、「奥行きを知覚した後に形を認知する」という仕組みに成っていることを示した。それまでの「形を認知した後に奥行きを知覚する」という定説は、RDSによって否定されたのである^(文献2)。

RDSは人間の奥行き知覚の研究に多大なる貢献をしたが、次のような新しい疑問も湧いてきた。脳はどのようにして一対一に対応する左右の点を見出しているのだろうか？これについては現在、認知科学上の大きな謎になっている^(文献2)。

4.2 オートステレオグラム—エンタメへの応用

ユレッシュのRDSは、対となる左右の図を平行法で眺めるものであった。その後、1979年にタイラー（C.Tyler）は、左右2枚の図から成るステレ

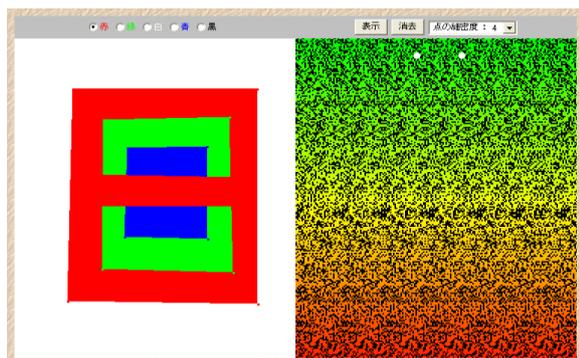


図7 RDS制作ツールで作成したオートRDSの例

オグラムを1枚の図として作り出す方法を考案した(文献2)。これをオートステレオグラムと呼ぶ。これは壁紙効果として知られている視覚の原理を応用したものである。建物の内部に貼られる壁紙は一般に、横幅が狭く縦に長い短冊状の領域に描かれた模様が一定の間隔で、横方向に周期的に繰り返して配置されていることが多い。この壁紙を何気なく眺めていると、突然そこに実際とは異なる奥行き感を感じることもある。これが壁紙効果と呼ばれる視覚現象である。この壁紙効果を利用すると、1枚のステレオグラムであっても、そこに埋め込まれた左右の対となる図形を、それぞれの網膜に分離して提示することが可能となる。

オートステレオグラムは、2枚の図から成るステレオグラムと比べると、その模様の繰り返しによる左右の対応点の間隔が短いので、一般の人にとって立体像の視認が行い易い特長がある(文献2)。オートステレオグラムでは、コンピュータを用いて数学的な手法で、立体像の基になる立体図形を埋め込むのが一般的である(文献5)。オートステレオグラムは、眺める人にバーチャルリアリティー的な感覚を体験させるので、1990年代に世界的に大流行し、エンタメ用としての書籍も多数出版された(現在も継続して出版されている)。

図7に筆者が開発したRDS制作ツールを用いて作成したオートRDSを示す(文献4)。その制作ツールによって、左側に描かれた図形が右側のオートRDSに自動的に変換されている。左側の図形がオートRDSの立体像になっていることを視認して頂きたい。(青、緑、赤の図形の順で奥から手前

に飛び出してくる)。

なお、現在ではオートステレオグラムは、ドットの代わりにテクスチャを用いるカラーフィールド・ステレオグラム(CSF)と呼ばれるものに進化している(文献15)。CSFはドットのRDSよりも鮮明な立体感が得られるので、書籍や雑誌におけるエンタメ用として盛んに用いられている。

5. 立体技術の発展

5.1 立体視用機器の登場—ステレオスコープ

立体視はギリシャ時代から知られており、1600年頃には、両眼立体視による立体面を描いたという記録がある(文献6)。立体視に関する機器を初めて開発したのが、4.1節に登場したホイットストーンである。彼は1838年、図8(a)に示すような立体面を鏡で反射させるステレオスコープ(立体鏡)を開発した。その当時は、左眼用と右眼用の2枚の図形は手書きで制作されたと伝えられている(文献3)。このステレオスコープの登場により、一般の人々は立体面を簡単に立体視することが可能になったと言える。

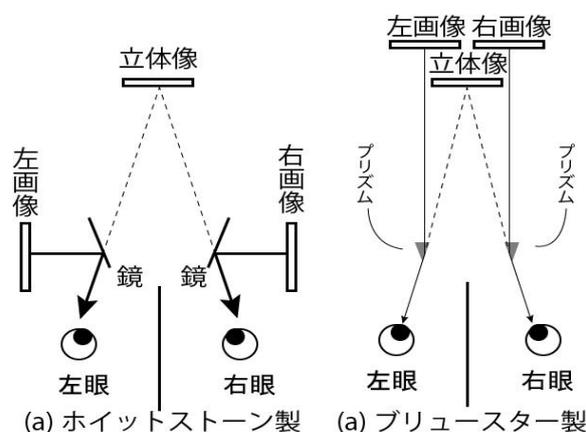


図8 ステレオスコープ(文献2)

1839年にダゲール(L.J.M.Daguerrel)がダゲレオタイプといわれる銀板写真を発明し、ステレオグラムは写真技術を使用して発展していった。1949年、同じく4.1節で登場したブリュースターが、図8(b)に示すようなプリズムを用いたステレオスコープを発明し、立体視用機器は小型化した。特に1851年のロンドン万博以降、社交界では立体写真が流行し、1853年には、立体写真機も登場し

ている (文献³⁾。

この頃使用されたステレオスコープは、左右の図形をそれぞれ隔離し、鏡やプリズムを用いて左右の眼に提示する図形の経路を2つ用意していた。このような原理は現在でも3D-HMD (ヘッドマウントディスプレイ) に応用されている。3D-HMDは、液晶あるいは有機ELの2対の超小型ディスプレイを左右の眼に直接提示する方式であり、眼前を大型眼鏡で覆うような装置ではあるが、大画面の立体テレビで立体映像を眺めるのと同じような立体環境を利用者に提供する。

5.2 左右図形の分離技術の登場—アナグリフ

ステレオスコープは利用上の制約から、それ程普及しなかった。そこで、左眼用と右眼用の2枚の図を異なった色で重ねて描き、色の波長でその色を分離する方法が考え出された。その色の分離には、レンズに代えて赤と青のセロファンを貼ったメガネが用いられ、そのメガネを掛けることによって左右の図が分離されて、それぞれの眼に提示されるものであった。これがアナグリフと呼ばれる方式であり、ドウ・アルメイダ (D'Almeida) は1858年に幻灯を使用して、またドロン (L.D. du Hauron) は1891年、紙面 (印刷画) を用いて、それぞれアナグリフの効果を示した (文献³⁾。

アナグリフでは一般に無地 (白色) の紙面に、青色で左眼用の図形が、また赤色 (青の補色) で右眼用の図形が、それぞれ重ねて描かれており、その赤と青の図形には視差 (ズレ) が付けられている。そして、赤と青の図形が混在した紙面 (アナグリフ) を、左眼用の赤セロファンと右眼用の青セロファンが貼られた赤青メガネを用いて眺めると、そこに立体像が視認される。

アナグリフにおける色分離の原理は以下の通りである。左眼用の赤セロファンは、赤の補色である青色の図柄を遮断するので、青色の図柄は黒く認識される。一方、赤色の図柄は赤セロファンを透過するが、背景色である白色の3原色成分の赤色も透過するので、結果として赤色の図柄は、赤成分に同化して認識されない。同様に、右眼用の青セロファンは、青の補色である赤色の図柄を遮断するので、赤色の図柄は黒く認識される。一

方、青色の図柄は青セロファンを透過するが、背景色である白色の3原色成分の青色も透過するので、結果として青色の図柄は、青成分に同化して認識されない。

このように赤青メガネは、左眼には青図形を、右眼には赤図形を、それぞれ分離して左右の網膜に提示するので、2.2節で述べた立体視の原理に基づく青図形と赤図形の視差から、人はアナグリフ図形から立体像を視認することが可能となる。

19世紀末になると映画が発明され、アナグリフを利用した立体映画は20世紀の初期 (1915年) に登場した (文献³⁾。しかしアナグリフには、左右の色の違う赤青メガネをかけるため、眼精疲労が起きやすく、また原理的にカラー化ができないという問題もあった。それでも一時期、アナグリフ立体映画は流行したが、強力な立体視のツールには成らなかった。しかし、アナグリフは手軽に立体視を楽しむことができるので、雑誌や書籍の印刷媒体では、現在でも娯楽用に活用されている。またインターネット上のウェブサイトでは、アナグリフの立体写真を楽しむ愛好者は多い。

現在では、アナグリフはコンピュータ画像処理と融合して、これまでの赤青の2色だけではなく多色から成るカラーアナグリフと呼ばれるものに進化している。立体感の弱いカラーアナグリフでは、左右の画像の視差が小さいため、裸眼で何気なく眺めた場合には、カラー写真のように見えることもある。カラーアナグリフは、自然光で撮影された写真画像 (原画) においては、左画像は赤成分、右画像はシアン (緑+青) 成分から構成されるので、その2つの画像を重ね合わせると、充分とは言えないが色彩 (カラー) が表現できるのである。そのため用いるメガネは、赤・青系よりも赤・シアン系のメガネの方が効果的である。勿論、赤青 (赤シアン) メガネで眺めた立体像においては、原画の色彩は再現されないことは言うまでもない。

図9に、筆者が開発した立体写真ビューアSPV (第9章で紹介) を用いて作成したカラーアナグリフの例を示す。



図9 SPVで作成したカラーアナグリフの例

6. 現在の立体映像装置

6.1 立体映画 (3D 映画)

網膜に提示する左右の図形を分離する方法として、アナグリフではカラー化が出来ないのが難点であった。そこで、新しい分離技術が模索されていたが、それを実現したのはランド (E.H.Land) である。彼は 1935 年、偏光と偏光膜を用いた偏光メガネ方式の分離方法を考案した。自然光はあらゆる方向に振動しているのに対して、ある一定の方向にのみ偏って振動する光を偏光という。ランドはある結晶を薄く引き延ばしてプラスチック膜に貼り付けて面積の大きな偏光フィルターを作ること成功した^(文献3)。この偏光フィルターは、一定の方向に振動する偏光のみを通過させる働きがある。

これを映写機 (プロジェクター) に応用すると、偏光メガネ方式の立体映画を実現することができる。この方式の立体映画は、1939 年のニューヨーク万国博覧会に登場した^(文献3)。

図 10 に示すようにプロジェクターを 2 台用いて、左眼用の映像と右眼用の映像をスクリーン上に重ねて投影するが、投影レンズの前に偏光フィルター (左レンズにはフィルターA, 右レンズにはフィルターB) を貼り付ける。左レンズで一方方向面に振動する偏光 a のみを、右レンズでその偏光とは振動面が 90 度回転した偏光 b のみを、それぞれ通過させるようにする。そして、シルバースクリーン (偏光を乱さないで鏡のように反射させるスクリーン) で反射された偏光 a と偏光 b を、各々に対応する偏光フィルター (左眼用にはフィ

ルターA, 右眼用にはフィルターB) を貼った偏光メガネで受光する。そうすると、左眼のメガネは左のプロジェクターから照射された偏光 a を、右眼のメガネは右のプロジェクターから照射された偏光 b を、それぞれ透過させ、他の偏光は遮断するので、左右の網膜には分離した映像が提示される。これによって人は立体像を視認することが可能となる。

しかしこの偏光方式は、フルターを 2 重に装着することから、最終的に網膜に達する光量はかなり減少することになり、画面が暗くなる欠点がある。しかし、現在の偏光方式の立体プロジェクターでは、この点はかなり改善されている。

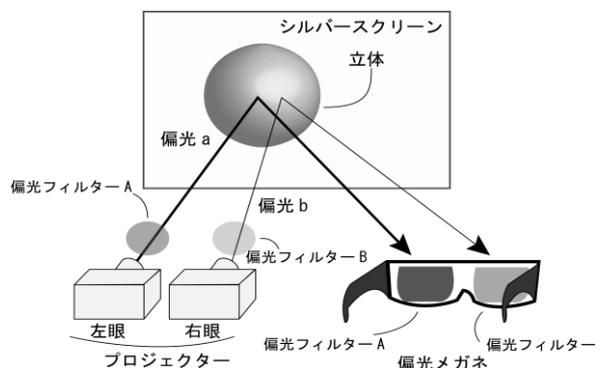


図10 偏光メガネ方式の立体映画

なお上記の記述では、偏光の一種である「光の進行方向に対して振動面が一定」という直線偏光を用いて説明したが、偏光の中には「光の進行方向に対して振動面が円を描く」という円偏光もある。立体映画の上映方式は、直線偏光 (IMAX システム) や円偏光 (RealD システム) が用いられ^(文献7)、映画会社によって統一されてはいないが、現在では、偏光メガネ方式が立体映画の主要な方式になっている。

6.2 立体テレビ (3D テレビ)

現在の立体テレビの主要な方式の一つは、上記の偏光メガネを用いた方式である^(文献1) (従来までは液晶シャッターメガネ方式が主流であったが、最近では偏光メガネ方式が有力になりつつある)。立体ハイビジョン・テレビにおける画面の解像度は 1920×1080 であり、画面の垂直方向に走査ラインが 1080 本並んでいる。その画面には超精密な偏

光フィルムが貼られている。

図 11(a)に示すように、その偏光フィルムは、「奇数ラインでは偏光 a を通すが、それとは振動面が 90 度回転した偏光 b は通さないという偏光フィルター A」と「偶数ラインでは偏光 b を通すが、それとは振動面が 90 度回転した偏光 a は通さないという偏光フィルター B」の 2 種類のフィルターから構成されている。偏光フィルム面には、最初のラインに偏光フィルター A が、次のラインに偏光フィルター B が、と言うように、偏光フィルター A と B が交互に極細フィルターとしてそれぞれ 540 本貼られている。この画面を、左眼用に偏光フィルター A、右眼用に偏光フィルター B が貼られた偏光メガネを用いて眺めるのである。

偏光メガネ方式は原理上、垂直方向の解像度が半分になるという欠点があるが、現在では種々の工夫がなされ、見た目上改善されている。(液晶シャッター方式にもシャッターの開閉のため明るさが半分になるという欠点がある)。なお、実際の立体テレビでは、6.1 節で述べた円偏光が用いられることが多い。

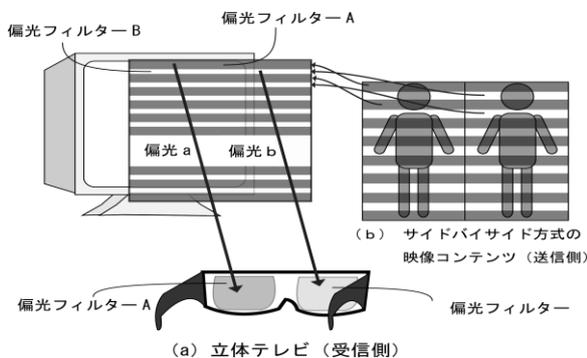


図 11 偏光メガネ方式による立体テレビ

立体テレビのコンテンツについて説明しよう。立体番組を放映する放送局からは、図 11(b)のように、画面が中央で左右に分割され、左側には左眼用の映像、右側には右眼用の映像が、それぞれ横に 2 分の 1 に圧縮された状態で送られてくる。このような立体フォーマットをサイドバイサイド方式と呼ぶ(この方式はテレビ放送以外の立体コンテンツにおいても主要な方式の一つになっている)。閲覧時のテレビ画面上では、左眼用の映像は水平方向に 2 倍に拡大され、偏光フィルター A が貼られた 540 本のライン上に映し出される。また、

右眼用の映像は同じく水平方向に 2 倍に拡大され、偏光フィルター B が貼られた 540 本のライン上に映し出される。

6.3 裸眼立体ディスプレイ装置

現在、立体メガネを装着しなくとも、立体映像を閲覧できる裸眼立体ディスプレイ装置も登場している。その一つの技術を簡単に紹介しておく(文献9)。液晶ディスプレイ技術を用いたパララックス・バリア方式と呼ばれる裸眼立体ディスプレイ装置は、メガネなしで左右の映像を分離して網膜に呈示するものである。この技術は現在、ゲーム機やコンピュータ・ディスプレイ装置あるいはデジタル・サイネージ(電子看板)などに利用されている。

パララックス・バリア(parallax barrier)とは、“視差の障壁”といった意味で、その基本原理は 1903 年に米国のアイビス(F. E. Ives)によって考案された(文献3, 文献8)。この原理は次に述べる通りである(文献8)。図 12 に示すように、ディスプレイ画面には、両眼視差のある 2 つの画像を、縦方向(紙面の表面から裏面に向かう方向)に細長く分割して、それを交互に縦のラインに並べる。そして、画面の手前には、左の画像は左の眼に、右の画像は右の眼に提示できるように、画像の繰り返しの周期に合うように障壁(バリア)を置く。当然のことながら、バリアのないスリット部分は画像と視野角が同一になるように設定する。このようなパララックス・バリアを装備した専用ディスプレイ画面を適切な位置から眺めると、裸眼で画像を立体視することが可能となる。

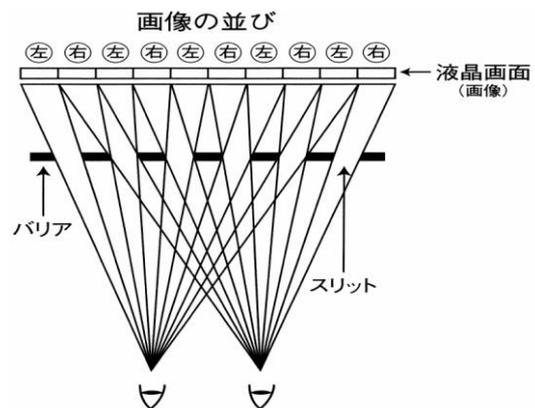


図 12 裸眼立体ディスプレイ装置(文献8)

現在では、このバリアは液晶ディスプレイ技術で形成される。この原理に基づいて製作された裸眼立体液晶ディスプレイ装置の画面の解像度は、横方向が通常の2分の1となる。この方式の難点は眼の位置が左右にぶれると、立体感が損なわれるので、閲覧者は頭を動かさずに画面を注視する必要がある。上記の説明で用いている立体画像は1組であるが、立体画像を複数組用いて立体感が損なわれない工夫がされた「多眼式」と呼ばれるディスプレイ装置も登場している。しかし、解像度に難点があり、またコンテンツ制作に負担がかかりすぎるので、「多眼式」はこれからの技術といえよう。(コンピュータを用いて1組の立体画像から複数組の立体画像を自動的に作り出す方法も試みられている)。

なお、パララックス・バリア方式とともに、そのバリアをレンテキュラ・レンズと呼ばれる薄鋸型レンズに代えたレンチキュラ方式の研究開発も進められ、その技術は現在、裸眼視用の立体テレビや立体ディスプレイ装置(用途はデジタル・サイネージ等)に応用され始めている(文献3, 文献14)。

7. 立体コンテンツ制作への応用

7.1 融像する立体像の位置

立体視の原理を応用すると、立体像が融像する位置を推計することができる。推計式は、図4や図5を用いて導くことが可能である。閲覧者の眼から画像(ステレオグラム)までの距離(視距離)を h 、眼の瞳孔間隔を e 、視差(ズレの大きさ)を D とし、画像から融像される立体像までの距離を u とすると、図から比例式を立てることによって、以下の式1を導出することができる(文献8)。

$$u = D \times h / (e - D) \quad (\text{ただし } e > D) \quad (\text{式1})$$

式1においては、 D が正の場合には u は正とし、このとき、立体像は画像面よりも後方に融像するものとする。そうすると、 D が負の値の場合には u は負となり、立体像は画像面よりも前方に融像する。また、 D が零の場合には u は零となり、画像面上で融像する。従って、立体像の位置 u は視差 D の単調増加関数なので、 D が大きくなるに

従って u は大きくなり、立体像は後退する。ただし、式1は立体視の幾何光学的な立場のみから導かれたものであり、視覚生理学的な考察は入っておらず、また、立体視には個人差があるので、概略的な推計を行うための式であることに注意されたい。

ところで、式1を考察することで、立体テレビ用のコンテンツを制作する上で注意すべき事柄が見えてくる。式1の導出から分かるように、 $D \geq e$ のとき、式1は理論的には成立し得ないのである。これは「脳は立体像を融像できない」と解釈できる。

2.1節で述べたように左右の視線は、無限遠を眺めた場合には平行になるが、輻輳によって遠くから近くのものを見るに従って、各々内側に向いてくる。一方、視線は開散によって輻輳角が負になる外側へは回転し難い。この限界を越えると、立体像は単なる2重像として認識されることになる。(この限界には個人差があるようである)。

このことから、「立体テレビや立体映画などの立体コンテンツの制作者は、瞳孔間隔 e よりも視差 D が大きくなるような映像を制作しないように心掛けるべきである」というガイドラインが出てくる。瞳孔間隔は一般成人では、約6.5cm程度であるが、発達段階の6歳前後の子供では5cm程度といわれている。このため、子供のいる一般家庭向けの立体コンテンツが作り出す視差は、5cm以内とすることが求められている(文献10)。ただ映画に関しては、スクリーンまでの視距離が長いため、この制限を越えても、立体像の視認が可能であると言われている(文献11)。しかしこのときでも、ハリウッド映画では、瞳孔間隔の2倍以上の視差にはならないように調整しているようである(文献11)。

7.2 立体コンテンツにおけるズームング技術の開発

前節で求めた立体像の位置を推計する式1を、立体コンテンツを制作する場合に応用してみよう。立体映像や立体写真の画像面を拡大すると、その倍率に比例して視差 D は拡大する。そのため7.1節で考察したように、立体コンテンツをズームング(高倍率化による接近)していくと、閲覧者の視認する立体像は立体感を増しながら徐々に後退

していき、ある位置 u (理論上は $D \geq e$ となる u の位置であるが、個人差がある) で立体視は破綻し、立体像は単なる 2 重像に転化してしまうのである。そこで、これまでの立体コンテンツの制作や上映においては、高倍率によるズーミングを行わないのが普通であった。敢えてズーミングを行ってもその倍率は高々 2 倍程度である。

映像におけるズーミング手法は、非立体コンテンツではよく用いられる通常的手法であり特別なものではない。立体コンテンツ制作者は、今後盛んになると思われる立体コンテンツにも、技術的な飛躍があるならば、その手法を導入したいと思っている。そこで筆者は、「ズーミングしながら立体写真を閲覧する技術」の開発を行った。以下に、これまでに述べた立体視の原理に基づいて、その一部を紹介することにする (文献12, 文献13)。

立体写真をズーミングする場合に必要な情報は、「どの位置を何倍でズームするのか」という情報である。通常非立体写真では、ズーミングというよりも写真全体を単に拡大するだけであるので、情報は倍率だけでよい。しかし立体写真においては、位置が重要となる。実空間での位置は 3 次元 x, y, z であるが、立体写真では、 z に代わる情報は上記の視差 D が担うことになる。

画像倍率を m 、そのときの視差を D とする。そして、倍率 m_1 の画像から倍率 m_0 のターゲット点の画像に対してズーミング ($m_1 \leq m \leq m_0$) するものとする。ズーミングしながら画像を単に拡大すると、それに従って視差 D の絶対値は大きな値となっていく。そこで、何らかの数式的な処理を導入して、ターゲット点に近づくに従って視差 D を零近傍に近づくようにすれば、上記したような立体像の破綻を防ぐことが可能となる。画像を m_0 倍に拡大した画面上での視差 D を零とする式は、以下のように求められる (文献12, 文献13)。

$$D = \{a / (1/m_1 - 1/m_0)^n\} \times \{(1/m - 1/m_0)^n \times (1 - m/m_0)\} \quad (式2)$$

式2を用いると、倍率 m_1 から倍率 m_0 の間で連続的に変化する倍率 m の値に対して、滑らかにかつ単調に変化する視差 D の値を求めることが可能となる。 a は倍率 m_1 において、被験者が快適に感

じる立体感の視差 D を実現するパラメータであり、実験によって定められるが、経験的には一意に決めてよいものである。また、 n は累乗のパラメータであり、ズーミングにおいて立体像が遠くから閲覧者に向かって迫ってくる状態を定めるものであるが、この値はシミュレーションによって決定される。

パラメータ n の決定は次のように行う。3次元コンピュータ・グラフィックスでは、物体 (オブジェクト) の倍率 m とその奥行き z の関係は、倍率 m が 2 倍になれば奥行き z は 2 分の 1 となるような反比例の関係がある。そこで立体視においても、このような関係をほぼ満たす指数 n を、シミュレーション解析から求めればよい。立体像の奥行き u は式1から、また立体像の大きさ b は、以下の式3から求めることが出来る (文献12, 文献13)。ただし、大きさ b は、実画像の倍率に対する立体像の倍率で表している。

$$b = \{m \times (u + h)\} / h \quad (式3)$$

式1, 式2, 式3を用いて倍率 m に関してシミュレーションを行うと、「 u と b をある基準で変換しその積が一定であるという関係をほぼ満たす指数 n の値は、0.7 付近の値である」ということが分かった。従って、式2を用いてターゲット点の倍率 m_0 を定めれば、その点まで滑らかにズーミングでき、その過程で、閲覧者は破綻しない立体像を視認することが可能となる。 m_0 は、理論上は制限ないが、実用上は写真の解像度の関係で 15 倍程度までである。

このようにして、筆者の開発した方法を用いると、これまでズーミングが不可能であった立体写真においては、視差 D をコントロールすることによってその実現が可能となったのである。

8. おわりに

3D 技術はまだまだ、開発途上の技術である。3D プームは 2009 年、アメリカの立体映画、『アバター』の世界的な大流行をきっかけに起きた出来事であった。日本では翌年、家電メーカーが立体メガネ方式の立体テレビを一斉に発売し、その年

は 3D 元年と呼ばれた。しかし一般の人々は、それから 2 年経った現在では、潮が引くように関心を示さなくなった。映画館ではともかく、家庭において立体メガネを使用してまでも見たいと思うコンテンツが少ないことが、ブーム退潮の原因であると言われている。

本稿では紙面の関係もあり、3D 技術の歴史のほんの一部しか紹介出来なかったが、立体表示装置はこれまで多種多様なものが数多く出現している。しかし、いまだに本命が登場していないのも、ブームが長続きしなかった理由の一つであろう。そのため、立体フォーマットの規格統一も一部しか進んでいない。消費者もその点は気付いているようだ。次世代立体テレビの本命は NHK が進めているインテグラル立体テレビ^(文献 14)と思われるが、その技術も研究開発途上であり、まだ市場に出現する気配はない。このような背景のもとで、今回の騒動ともいえる 3D の熱狂があったと言う訳である。

写真が登場した 19 世紀中頃以降、3D ブームは数十年単位で起こっている。「リアリティーを追い求める人間の願望は、ブームが去っても十数年後には新しい立体装置を發明しブームを再燃させる」という繰り返しの歴史である。今後も更なる 3D ブームの波が押し寄せて来ることが予想される。政府（総務省）は 2025 年に立体放送を計画しているが、果たして人と技術を含めた 3D システムの状況はどのように変化するのか、筆者にとっては楽しみである。

9. 付記

筆者は、本論文の 7.2 節で紹介した立体写真をズームする技術（2012 年特許取得）を応用したソフトウェア SPV を開発した。SPV は、Stereoscopic Photo Viewer（立体写真ビューア）の略で、その愛称は「ズーミー君」である。SPV は業務向けの Basic 版、エンタメ向けの Multi 版の 2 つがある^(文献 16)。Basic 版は画像のトリミング表示機能や自動ズーム展示機能を持つソフトで、15 倍までのズームが可能である。一方、Multi 版は立体愛好者向けのソフトで、立体 IT 機器用、立体鏡用、カラーアナグリフ用、裸眼立体視用の

4 種の使用モードが用意されている。本ソフトはフリーソフトウェアとして今後、公開する予定である（連絡先：文教大学学園広報マーケティング室）。なお、JR 西日本の関連会社（嵯峨野観光鉄道）のジオラマ館（京都市）には、2013 年春に Basic 版の導入が計画されている。（2012 年 12 月末記）

参考文献

本稿の中で文献番号を明記していない箇所においても、下記の文献の要旨を参考にさせていただきました。感謝申し上げます。

- (1)志水英二他著、『ここまできた立体映像技術』、工業調査会、2000 年 8 月
- (2)下條信輔、『視覚の冒険—イллюジョンから認知科学へ—』、産業図書、1995 年 4 月
- (3)尾上守夫、羽倉弘之他編集、『3 次元映像ハンドブック』、朝倉書店、2006 年 2 月
- (4)広内哲夫のホームページ、「ステレオグラムの原理」+「ステレオ・エディタ」、『ステレオグラム美術館』、<http://www.bunkyo.ac.jp/~hiro/java/stereo/index.html>（2012 年 12 月閲覧）
- (5) D.G.Stork & C.Rocca "Software for generating auto-random-dot stereograms", Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, pp525-534, 21(5), 1989.
- (6)安居院猛他著、『ステレオグラフィックス&ホログラフィ』、秋葉出版、1985 年 4 月
- (7)河合隆史他著、『3D 立体映像表現の基礎』、オーム社、2010 年 9 月
- (8)河合隆史他著、『次世代メディアクリエイター入門 1—立体映像表現—』、カットシステム、2003 年 12 月
- (9)広内哲夫他著、「X3D/VRML97 で創られた仮想世界を立体表示するステレオビューアー—彩画 3D をベースにしたその実現」、『情報研究』、pp195~pp228, 第 39 号, 2008 年 7 月
- (10)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—2010 年 4 月 20 日改訂—』、3D コンソーシアム、2010 年 4 月（2012 年 12 月 Web サイトからダイ

ロード)

- (11)宮島英豪,『S3D 映像制作』, ワークスコーポレーション, 2011年4月
- (12)広内哲夫,「立体写真のズームングを制御する融像式の提案」,『3D映像』, pp17~pp30, 第25巻, 第3号, 2011年9月.
- (13)広内哲夫,「融像式を用いたズームング可能なステレオフォトビューア」,『情報研究』, pp17~pp56, 第46号, 2012年1月(文献12の総説となっている)
- (14)羽倉弘之他著,『裸眼 3D グラフィックス』, 朝倉書店, 2012年8月
- (15)安居院猛他著,『C 言語グラフィックス』, 昭晃堂, 2009年11月
- (16)広内哲夫,『SPV 使用説明書』, 文教大学学園 (SPV ソフトに同梱), 2012年12月