

## 2眼式立体画像による立体形状の再現性に関する一検討

立平 靖      山口博幸      秋山健二      小林幸雄

ATR 通信システム研究所

現行テレビジョンをもちいた2眼式立体画像の両眼視差（主要な奥行き方向のてがかり）の再現能力と人間の立体視知覚特性とを実験的に比較した。この結果、現行テレビジョンの水平解像度の不足のため、人間はピクセル間隔に相当する大きさの両眼視差を知覚することができ奥行き方向の偽輪郭という画質劣化を招くことが判った。また、立体視することができる両眼視差の空間周波数限界は垂直方向については3.2cpd程度で、水平方向については2.5cpd程度であることがわかった。この値は現行テレビジョンにより表現できる両眼視差の空間周波数帯域幅以下であるので、効率的な空間周波数帯域の利用が可能である。

この結果は、高画質の3次元画像を実現するために必要な情報量に関する必要条件を示すものである。

## A Study of Optimal Display Factors in Stereoscopic TV Images for Human Stereoscopic Vision

Yasushi Tatehira      Hiroyuki Yamaguchi      Kenji Akiyama      Yukio Kobayashi

ATR Communication Systems Research Laboratories  
Twin 21 MID Tower, 2-1-61 Shiromi, Higashi-ku, Osaka, 540 Japan  
Telephone +81-6-949-1825

Experiments to compare the ability of a stereoscopic TV image (binocular TV image pairs) to generate disparity (binocular parallax) - the main depth cue for human stereoscopic vision - with the characteristics of human stereoscopic vision have been performed.

In the experiment it was found that, because of the inadequate horizontal resolution, the minimum amplitude of disparity is stereoscopically perceptible thus causing image quality deterioration in the form of false contouring of depth. And it was also found that the perceptible high frequency limit of disparity is about 3.2cpd for horizontal gratings, and about 2.5cpd for vertical gratings. This value is below the spatial frequency bandwidth of disparity that a stereoscopic TV image can generate. Therefore, efficient band width utilization is possible.

Results of these experiments present the guidelines for designing display factors of high quality 3D images.

## 1. はじめに

通信技術の発達により遠隔地間の通信に対する要求は新たな局面を迎えた。即ち、対地にあたかも自らが存在するような、臨場感のある通信への要求が高まっている。

画像通信における臨場感を向上させるための手法として両眼視差を有する左右画像（2眼式立体画像とよぶ。）の利用が考えられる。2眼式立体画像を伝送するためには人間の立体視知覚特性に整合した伝送システムの設計をすることが画質の面と、伝送効率の面から重要である。

本稿では、TVを用いた2眼式立体画像の両眼視差（主要な奥行き方向のてがかり）の再現性と人間の立体視知覚特性とを比較し、立体形状を視覚的な劣化なしに再現するために必要な情報量を明らかにした。更に現行方式のTVを用いて2眼式立体画像を構成する場合の問題点及び情報圧縮による効率的な伝送の可能性を指摘した。

## 2. TVを用いた2眼式立体画像による立体形状の再現性<sup>(3),(4)</sup>

### 2.1 2眼式立体画像における立体形状の再現

立体画像の特有の画質要因として立体形状の再現性があげられる。2眼式立体画像において立体形状は主に両眼視差により再現される。両眼視差の再現性は次の2つのファクターで把握することができる。

i) 両眼視差の最小の振幅

ii) 両眼視差の空間周波数帯域

i) はどれだけ小さな奥行きの変化を再現できるかということであり、ii) はどれだけ複雑な奥行きの変化を再現できるかということに対応する。本章ではテレビジョンを用いた2眼式立体画像（以後ステレオTV画像と呼ぶ）の両眼視差の再現性と従来測定されている人間の立体視知覚特性を比較した結果について述べる。

### 2.2 立体視知覚特性（両眼視差弁別閾空間周波数特性）

人間が知覚できる最小の両眼視差（両眼視差弁別閾）は、空間周波数の関数として測定されている<sup>(1),(2)</sup>。従来の測定例を図1に示す。

図1より、両眼視差の弁別閾は1 cpd 付近をピークとするバンドパス型で、ピーク時の弁別閾は10~20sec であることがわかる。この特性曲線より上の部分は人間が知覚できる立体形状の領域で、この領域の上下が前節で述べた i) の両眼視差の最小の振幅に対応し、この領域の横方向の幅が ii) の空間周波数帯域に対応する。次節以降でこの領域とステレオTV画像が再生できる立体形状の領域を比較し、立体視知覚特性とステレオTV画像の特性の整合性を検討する。

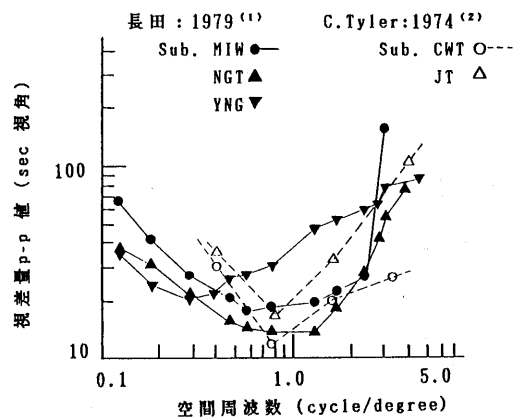


図1 両眼視差弁別閾空間周波数特性の測定例

### 2.3 ステレオTV画像で再生可能な両眼視差の最小振幅について

両眼視差は右眼用画像と左眼用画像の対応している画素の水平方向の位置のずれである。ステレオTV画像の場合、両眼視差の最小の振幅は表示しうる水平方向のずれの最小値に対応する。従って両眼視差の最小振幅は水平解像度で限定される。この水平解像度による限定をHD TVと現行方式の場合について各々求め図2に示した。なお水平解像度については、HD TVはサンプリング周波数64.8MHz、現行TVは、サンプリング周波数13.5MHzのデジタル方式を仮定し算出した。また、視距離は、後で行う実験との比較のため3.67H（Hは画面高）とした。

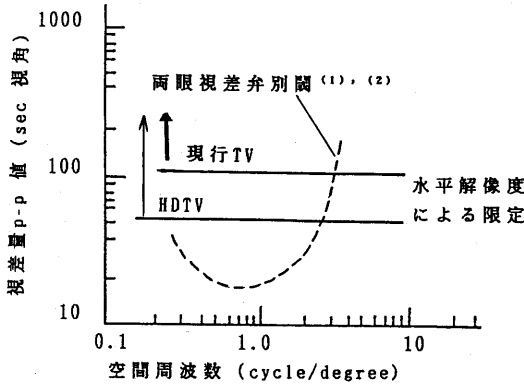


図2 ステレオTV画像により再生可能な両眼視差の振幅(視距離3.67H)

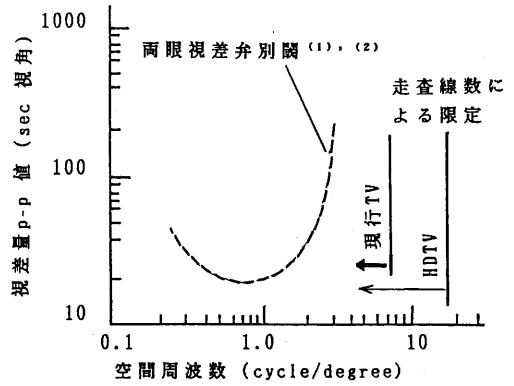


図4 ステレオTV画像により再生可能な両眼視差の垂直空間周波数(視距離3.67H)

## 2.4 ステレオTV画像で再生可能な両眼視差の空間周波数帯域について

### 2.4.1 垂直空間周波数帯域

2眼式立体画像の両眼視差空間周波数帯域(垂直方向)は図3に示すように左右の画像に正弦波状の視差を与えた画像を想定することにより把握できる。この画像を2つのTV画像で表示する場合、表示できる両眼視差の最大空間周波数は走査線数で限定される<sup>(1)</sup>。この走査線による限定をHDTV(走査線1125本)、現行TV(走査線525本)の場合について図4に示した。ここでは後で行う実験との比較のため視距離を3.67H(Hは画面高)とした。

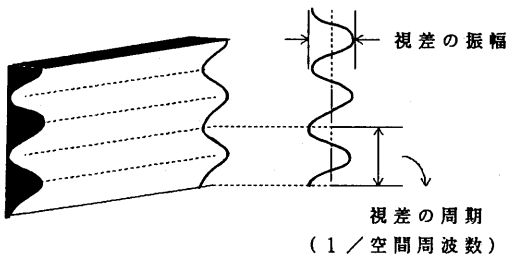


図3 奥行き方向正弦波

### 2.4.2 水平方向空間周波数帯域

図5に示すような水平方向の両眼視差の変化をテレビジョンで表現する場合の空間周波数に対する限定条件を考えてみる。図5に示す様な縦縞状の奥行き変化を持つ立体を2眼式立体画像で表現する場合には、両眼視差 $\Delta D$ は(1)式で示す正弦波となる。

$$\Delta D = A + A \sin 2\pi f_x \quad (1)$$

$A$  : 振幅(深さに対応)

$f_x$  : 水平方向空間周波数

この視差量に従って左画像が右画像に比較して水平方向にずれているとすると図5に示すように右画像のa点に対応する点は左画においては視差量 $2A$ だけずれた $a_L$ 点になる。また、右画像のb点に対応する左画像の点は、視差量0なので同一位置の点 $b_L$ 点となる。この時視差 $2A$ により移動された $a_L$ 点と $b_L$ 点との位置関係が逆転してしまうとはや正弦波状に波打つ立体とはならない。従って、縦波状の奥行き方向正弦波を2眼式立体画像で表現する場合には次式で示す制約がある。

$$2A < 1/2 \cdot T \quad (2)$$

$T$  : 周期、 $1/f_x$

ここで $A = 1/2$ とすると $T = 2$ (pixel)が最高空間周波数となるが、これが同時にサンプリング定理を満たす限界になる。この限定条件を図6に示す。

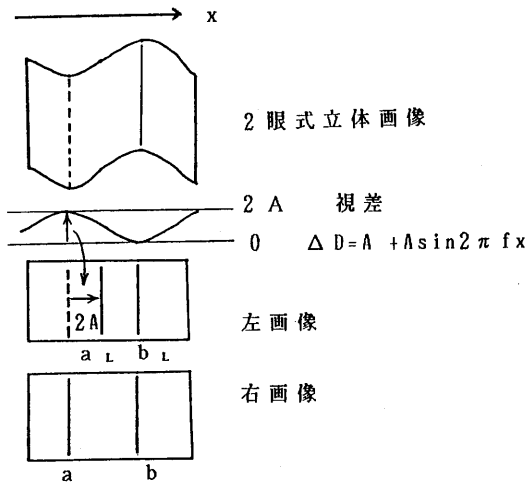


図5 縦方向の奥行き正弦波

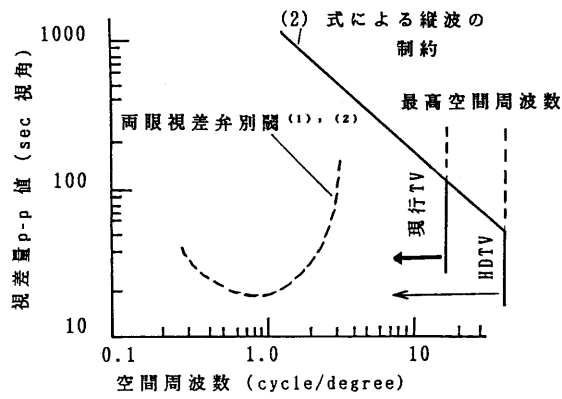


図6 ステレオTV画像で再生可能な両眼視差の水平空間周波数(視距離3.67H)

2. 5 ステレオTV画像による立体形状の再現性と立体視知覚特性の整合性の検討

2. 3 節及び2. 4 節で示した限定条件で囲まれた領域は、ステレオTV画像により立体形状の再現が可能な領域となる。この領域上に人間の両眼視差弁別閾空間周波数特性をオーバーラップさせ比較することにより、ステレオTV画像の立体形状の再現性と、立体視知覚特性の整合性を考える事ができる。図1で示した両眼視差弁別閾の平均値を求め、図2、図4および図6に破線で示す。なお、両眼視差弁別閾の水平方向空間周波数特性の測定例は少ないので、水平方向と垂直方向で空間周波数特性に差はな

いと言う指摘<sup>(1)</sup>に従い垂直方向のものを図6に記入した。これらの図においてステレオTV画像により再生できる両眼視差と知覚特性を比較することにより、以下の事実が考察される。

i) 人間の知覚可能最小振幅はステレオTV画像が再生可能な両眼視差の最小振幅より小さいため人間が知覚可能な小さい振幅をステレオTV画像は表示できない。従って画質劣化の可能性がある。(図2において知覚可能な領域よりステレオTV画像が再生可能な領域の方が上にある。)

ii) 人間が知覚できる両眼視差の空間周波数帯域はステレオTV画像が再生可能な空間周波数帯域を下回っているので視覚的な劣化のない情報圧縮の可能性はある。(図4及び図6において知覚可能な領域の方がステレオTV画像が再生可能な領域より幅が狭い。)

次章以降でこの考察結果を実際実験をすることにより確認した。

3. 立体視知覚特性とTVによる2眼式立体画像の両眼視差再現性を比較する実験

本章では前章までに行った考察を実際実験を実施して確認した結果について述べる。

実験はすべて720×512画素(サンプリング周波数13.5MHz)、8bit/pelのモノクロのデジタル画像2枚を用い、これを時分割立体視装置を接続したフレームメモリにロードして行った。

3. 1 両眼視差最小振幅について

まず、両眼視差最小振幅である1ピクセルの両眼視差により生じられる奥行きを、人間が知覚できるかを確認した。図7の様なランダムステレオグラムを作成し、時分割立体視装置により観察したところ両眼視差量1ピクセル分の奥行きは知覚でき、3. 2で述べた水平解像度の不足による2眼式立体画像の性能の不足を裏付けた。

また、図3に示すような奥行き方向正弦波のランダムステレオグラムを作成し、観察したところ、正弦波状の凹凸として観察されるべき画像に等高線状の偽輪郭が発生し、図8の様に板を重ねた様に観察された。この現象は0.5cpd

(cycle/degree)以下の低周波で特に顕著であった。これは、水平画素数の不足による2眼式立体画像の性能の不足が、偽輪廓という画質劣化を招くことを示している。

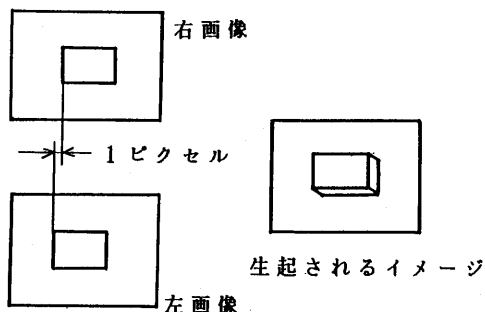


図7 両眼視差最小振幅の確認

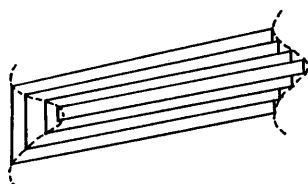


図8 知覚された偽輪廓

### 3. 2 空間周波数特性について<sup>(4)</sup>

#### 3. 2. 1 実験方法

図9のように視差の空間周波数が次第に変化するようなステレオTV画像を用いて、立体視することができる空間周波数の限界を振幅の関数として測定した。

図9の様な周波数スイープ状の両眼視差は、(3) (4) 式で与えた。

(a) 横波の場合

$$\text{視差} = A \cos(\frac{\pi y^2}{K} + \pi) + A \quad (3)$$

A : 視差の振幅

K : 係数

y : 垂直座標 (図9参照)

b) 縦波の場合

$$\text{視差} = A \cos(\frac{\pi x^2}{K} + \pi) + A \quad (4)$$

x : 水平座標 (図9参照)

(3)、(4) 式で下線部は位相関数  $\Phi$  であり、これを  $x$  および  $y$  で微分すると角周波数が得られ、更に正弦波と仮定した場合の空間周波数  $f_x$ 、

$f_y$  が得られる。

(a) 横波の場合

$$d\Phi_y / dy = 2\pi \cdot (y / K)$$

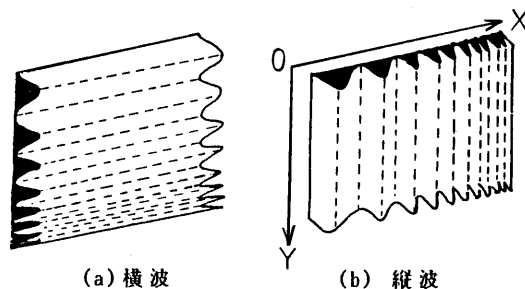
$$f_y = y / K \quad (5)$$

(b) 縦波の場合

$$\text{同様に } f_x = x / K \quad (6)$$

従って、空間周波数  $f_x, f_y$  は座標  $x, y$  に比例する。Kは、画面内に表示する最高空間周波数を決定する係数で、予備実験の結果より  $K = 3000$  とした。

実際に用いた画像は、左右2枚の256レベルの乱数によるランダムパターンである。閾値測定は、(3) 式における振幅Aが異なるステレオTV画像を10種類ランダムな順序で提示し、だんだん空間周波数が高くなっている画像のどこまでを凹凸のある縞として立体視できるかを画面上に表示したカーソルにより被験者が指示した。被験者は5名で、3回行った測定データの平均値を立体視可能限界の空間周波数とした。なお、空間周波数は画面の大きさ(290mm × 390mm)有効画素数(460 × 670pixel)、視距離(3.67H)を考慮して計算した。



(a) 横波

(b) 縦波

図9. 実験に用いた画像

#### 3. 2. 2 実験結果

図10に5名の被験者のデータの平均値を示す。また、2章で説明した垂直方向及び水平方向の現行TVによる表現の限界の空間周波数を実線で記入した。立体視限界空間周波数は、振幅に依存し300 ~ 400(sec)付近にピークがあることが図10よりわかる。このピークの値は、横波の場合2.7 cpd 縦波の場合2.1cpd付近であり、これが知覚しうる両眼視差の空間周波数の限界の値である。この値は従来求められている奥行

き方向弁別特性<sup>(1)</sup>、<sup>(2)</sup>から推測される立体視可能限界周波数より若干低くなっている。これは両眼視差量を画素で量子化したための歪みの影響と考えられ、3.1節で指摘したステレオTV画像の性能の不足に起因する。また縦波と横波で限界周波数に差がでていますが、これはこの歪みが縦波で顕著に影響するためと考えられ実際にはすでに指摘されている<sup>(1)</sup>のように両者の差はほとんどないと思われる。

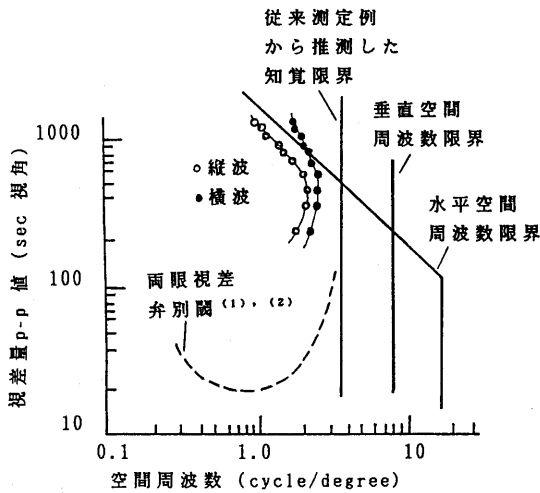


図10 視差の知覚限界空間周波数

#### 4. 考察

##### 4.1 最小振幅について

3.1節で述べた現象より、現行TVを用いた2眼式立体画像では性能が不足していて、水平画素数の改善が必要である事がわかった。図2より、現行TVで表現できる最小の振幅は約100秒、両眼視差弁別閾は約20秒であるので現行TVの水平画素数を5倍程度にすれば劣化のない2眼式立体画像がえられる。

##### 5.2 空間周波数特性について

図8より現行TVを用いた2眼式立体画像の両眼視差の空間周波数帯域は立体視知覚特性を上回っており高域周波数成分を削減できる可能性がある。2眼式立体画像の圧縮伝送方式の一例として一方の画像と両眼視差を伝送する方法<sup>(1)</sup>を想定すると空間周波数3cpd程度(1周期あたり10ピクセル程度)までの両眼視差を伝送すれ

ばよいから、視差を5×5ピクセル毎にサンプリングすれば立体視可能な空間周波数領域をカバーできることがわかる。従って、各ピクセル毎に視差量を検出する必要はなく5×5ピクセルの領域どうしのマッチングにより視差を検出すれば良い。

#### 5. まとめ

現行TVを用いた2眼式立体画像の両眼視差の再現性と、人間の立体視知覚特性を比較した。この結果不足している情報量と、冗長な情報量があることがわかった。さらに、情報量が不足しているために発生する画質劣化とその改善法の一例にふれた。また冗長な情報量に着目し2眼式立体画像の情報圧縮方法について触れた。

#### 6. 参考文献

- (1) 長田: 医用電子と生体工学 Vol.20, No.3
- (2) C.W. Tyler: Nature, Vol.251 (1974)
- (3) 立平ほか: 昭和63年信学会春季全大D-75
- (4) 立平ほか: 1988年TV全大7-1

## 質疑応答 立平

**出澤** 空間周波数はテレビの方の特性を表しているか目の特性なのか、目の方も横に二つならんでいるから縦と横で多少ちがってくるのですね。おかしくないんじゃないかという気がするのですが、テレビを横にしたら、また違った結果が得られると思いますが。

**立平** 今、我々がやっているテレビというのは横方向に走査しているので、そういった制約をつければあの数字になると思います。それとあと横波と縦波で視覚特性が確か違ったような結果になっているのですけれど、我々の考えている所では実験条件がちょっと悪いかなどという見方が強い。それに関して生理的な裏をとってあるとかそういう訳ではないので何とも言えないのですが、実際他の方がやられている中でも縦波と横波はだいたい一緒だろうと言われてはいますが。

**出澤** ディスプレイを横にしてやったら、なにか差が出るのか出ないのか、やってみる価値があるという気がするのですけれど。

**立平** ディスプレイを横にしても視差は必ず横方向につける必要があると思うのですけれど。ですから今度は視差をつける単位が普通にやる限りは走査線単位になります。それで普通のテレビでやっている場合はデジタルだとどうしてもピクセル単位ですけれども、アナログ単位でやることも理屈の上では難しくないと思います。どちらかと言うと立体テレビジョンを構成する上に於いては、横方向がアナログ的にいくらでも動かせる方がメリットが大きいと思います。

**出澤** 最初にテレビを作った人はそこまで考えていた訳ではないでしょうから。具体的な表示はどういう絵を表示したのですか。

**立平** 実際使った絵柄は0から255と言う数字をランダムに発生して作ったソフト的に発生させたランダムパターンです。実際、表示している機器は30Hzのオルタネートです。

**出澤** 基本的にはバイナリーですか、白黒の。

**立平** 白黒で、0から255のランダムで濃淡が分布しています。

**近藤** 左右の絵が対応している訳ですね。

**立平** そうです。一枚の絵を作って、あのように正弦波状に視差をつけて表示する訳です。

**近藤** そうするとそれは1ピクセルずつ動かさずに、最後の考察からいえば5ピクセル単位で動かせば良いと言うことですか。

**立平** 動かしてやっただけではないのですけれど、動かしても立体視可能だと思います。

**近藤** コンピュータグラフィックスの方ですと、右目と左目の図を別々にわざわざ計算して作りますが、1つだけ作っておいてもう1つはこのような方式で視差だけ与えておいて移動させるだけでできるという可能性があるということですか。

**立平** できると思います。ただ可能性があるというだけですが。ピクセルの粗さと言うのがあって先程の最小振幅の話になるのですが。そういう問題が出てきますのでやはり用途によります。立体形状に関しては2つの絵を独立に計算する方がやはり正確です。

**吉田** 今のお話ですと、2枚のコンピュータグラフィックスの絵を情報圧縮可能ということですか。

**立平** そうですね、そのようなデータベース化等は可能だと思いますが、やはり2枚の絵ですから右眼で見えていなくて左眼で見えている場合もありますので単純に移動だけでは駄目だと思います。2枚の絵の差分を取ると色々情報圧縮の方法があって何がいいのか色々やっているところです。