時分割立体視の成立条件

正会員 磯野 春雄[†], 正会員 安田 稔[†]

あらまし 従来の時分割立体テレビ方式の問題点であるフリッカの発生や垂直解像度の低下などを解決したフリッカレス 120 Hz 時分割立体テレビ装置を試作し、この装置を用いて、これまで不明確であった時分割立体視の成立条件を検討した。実験には、水平方向ばかりでなく垂直方向にも両眼視差を与えたランダムドットおよび方形パターンを対象に、立体視可能な融合範囲を測定した。その結果、時分割 120 Hz 方式の融合範囲は、水平方向視角 40 分以内、垂直方向 5~7 分以内となり、従来の 60 Hz 方式や赤-緑メガネを用いるアナグリフ方式よりも融合範囲が広く、立体視しやすいことがわかった。また、時分割立体視に必要なシャッタ周波数や時分割提示条件でのフリッカ知覚についても検討した。

1. ま え が き

立体テレビ方式には、赤-緑メガネを用いるアナグリフ方式や偏光メガネ方式、時分割方式など種々の方式がこれまでに提案されている。このうち時分割方式は立体視における“両眼視差”の原理を用いているが、アナグリフ方式や偏光メガネ方式とは原理が異なり、1台のディスプレイ上に左右像を1フィールド毎に切り換えて提示し、このフィールド周期に同期させて左右眼の電子シャッタを開閉させて立体視するものである。しかし、時分割方式の基礎となる立体視の性質については、まだ十分に明らかにされていない。

今回、従来の時分割立体テレビ方式の問題点であるフリッカの発生や垂直解像度の低下などを解決したフリッカレス時分割立体カラーテレビ装置を試作し、この装置を用いてこれまで不明確であった時分割立体視の成立条件を検討した。

2. フリッカレス時分割立体テレビ装置の試作

図1は時分割立体テレビ方式の原理を示したものである。従来の時分割方式は、図1(a)に示すように現行テレビ方式のインターレースを利用し、第1フィールド

図1 時分割立体 TV 方式の原理
Principles of field-sequential stereoscopic TV systems.

ドを左画像、第2フィールドを右画像として、1/60秒毎に交互に切替える方式である。このため、立体視はできるが、30 Hzの大面积フリッカが発生するほか、垂直解像度が1/2に低下する。図1(b)に示す今回のフリッカレス時分割方式は、フィールドメモリーを用いて、現行テレビ方式における左カメラおよび右カメラからのテレビ信号を水平31.5 kHz、垂直120 Hzの走査速度をもつ4:1インターレースしたフィールド順次の立体テレビ信号に変換する。この信号を120 Hz方式にも対応できる28インチカラーCRTディスプレイへ供給し、液晶シャッタ¹⁾を用いて左画像と右画像を1/120秒毎に切替えて立体視する。

これによって、左右眼にはそれぞれ60 Hzの頻度

[†] NHK 放送技術研究所

“Conditions Providing for Field-Sequential Stereoscopic Vision”
by Haruo Isono and Minoru Yasuda (NHK Science and Technical
Research Laboratories, Tokyo)

図 2 120 Hz 時分割立体テレビ方式の画像提示条件
Picture presentation conditions of 120 Hz field-sequential stereoscopic TV system.

で 2:1 インタレースした画像が提示されることになり、フリッカのない走査線数の 524.5 本の立体カラーテレビ画像が得られる。図 2 に、120 Hz 時分割立体テレビ方式における画像提示条件を示す。

3. 時分割立体視の成立条件の検討

3.1 両眼視差量と融合範囲

両眼視差をもつ左右画像を、液晶シャッターにより時分割的に交互に切り替えて立体視する場合、両眼視差量が大きすぎると左右像が融合せず立体視できない。そこで、立体視が可能な融合範囲を測定した。

(1) 実験方法

一般に立体視の性質やメカニズムを調べるために、単眼で観察しても図形としての手がかりのないランダムドットパターンが用いられることが多い。これにより、純粋に両眼視差の性質を調べることができる。

本実験では、図 3 に示すようなランダムドットパターンの他に、方形パターンも用いることとし、図形としての手がかりのある場合と、ない場合の融合範囲の違いを比較した。

今回用いたランダムドットパターンは、パーソナルコンピュータを利用して作成したもので、単眼で見ると完全にでたらめなテクスチャとして見え、どのような形態もその中に認めることはできないが、立体鏡で観察すると両眼視差をもたせた中心部の正方形の領域で 3 次元的に奥行きをもって知覚される。すなわち、中心部の正方形を浮き上がらせるために、該当する点を左画像では右に、右画像では左にずらしてある。この位置ずれの度合いが両眼視差量になる。

今回の場合、水平方向ばかりでなく垂直方向にも両眼視差を与えたパターンを発生させ、水平、垂直の両方向について融合範囲を調べた。実験の系統図を図 4 に示す。ランダムパターンおよび方形パターンの大きさは、視角 $15.5^\circ \times 11.4^\circ$ 、中心部の正方形は $2^\circ \times 2^\circ$ である。被験者は CRT ディスプレイ上に時分割的に提示されたパターンを液晶シャッターを用いて観察し、立

図 3 実験に用いたランダムドットおよび方形パターン

Experimental patterns for a random-dot stereogram and for a figural stereo stimulus.

図 4 時分割立体視の実験系統図
Blockdiagram of experimental set up.

表 1 立体視の評定基準
Evaluation criteria of stereoscopic vision.

	基準
A	立体視可能
B	不安定に見える
C	立体視できない

図5 時分割立体視の成立範囲(120 Hz方式)(ランダムパターンの場合)
Horizontal and vertical disparity limits of binocular fusion for random-dot stereograms. (120 Hz field-sequential TV system)

体視できるかどうかを表1の基準により判定する。また、今回のフィールド周波数120 Hz方式と比較するために、従来の60 Hz方式および30 Hz方式についても融合範囲を測定した。

(2) 実験結果

図5はフィールド周波数120 Hz方式における3名の実験結果である。この結果から、ランダムパターンに対する時分割立体視の融合範囲は水平視差で視角40分以内、垂直視差で5~7分以内であることがわかった。一方、方形パターンに対する測定結果の一例を図6に示す。3名の被験者に共通している点は、方形パターンの方がランダムパターンよりも融合範囲が水平、垂直方向ともに広がっていることである。ランダムパターンの融合範囲が狭いのは、図形としての手がかりがないために左右眼の対応点がとりにくいためと考えられる。

次に、フィールド周波数60 Hz方式の融合範囲の測定結果の一例を図7(a), (b)に示す。この図か

図6 時分割立体視の成立範囲(120 Hz方式)(方形パターンの場合)
Horizontal and vertical disparity limits of binocular fusion for figural stereo stimuli. (120 Hz field-sequential TV system)

ら、60 Hz方式は120 Hz方式に比べて立体視できる範囲が水平、垂直方向ともに狭いことがわかった。60 Hz方式の融合範囲が120 Hz方式に比べて狭い理由は明確にはできていないが、おそらく左右眼に提示される画像の時間間隔が長くなると、視覚系内で左右画像の対応点がとりにくくなるためと考えられる。一方、フィールド周波数30 Hz方式の場合には、図3のランダムパターンと方形パターンにどのような視差量を与えても立体視できなかった。ランダムパターンと方形パターンに対する各フィールド周波数と融合範囲の関係を図8に示す。

3.2 時分割立体視に必要なシャッタ周波数

時分割方式では左右眼を電子シャッタで交互に開閉して立体視するが、立体視が成立するためのシャッタ

(a) ランダムパターンの場合

(b) 方形パターンの場合

図 7 時分割立体視の成立範囲 (60 Hz 方式)
Horizontal and vertical disparity limits of binocular fusion for random-dot stereograms and for figural stereo stimuli. (60 Hz field-sequential TV system)

図 8 各時分割方式と融合範囲
Binocular fusion areas for various field-sequential stereoscopic TV system.

周波数は明確にされていない。そこで、液晶シャッタの駆動周波数を変えて立体視が成立するための最低周波数を測定した。

(1) 実験方法

時分割立体テレビ装置では、フィールド周波数を連続的に変化させることができないため、図 3 に示したランダムパターンをスライド写真にとり、これを立体視鏡 (PENTAX ステレオアダプタ) にセットして、液晶シャッタを用いて立体視した。実験系統図を図 9 に示す。シャッタ周波数は方形波発振器の周波数を可変することにより任意に設定できる。

図 9 実験系統図

Blockdiagram of exeperimental set up.

(a)

(b)

図 10 時分割立体視が成立するためのシャッタ周波数
Shutter frequency for the field-sequential stereoscopic vision.

(2) 実験結果

図10(a), (b)に被験者2名の結果を示す。この図から、個人差はあるが液晶シャッタの周波数が14~16 Hz 以上であれば融合状態が安定して立体視できることがわかる。したがって、時分割方式のフィールド周波数はこのシャッタ周波数の2倍であるから、立体視の成立の点からいえば少なくとも28~32 Hz 以上必要ということになる。

一方、時分割立体テレビ装置を用いて行った図8の実験結果では、フィールド周波数30 Hz 条件では立体視できなかった。この点については、スライド写真による実験と立体テレビ装置による実験の間に、観視条件の違いや表示面の解像度、走査線の有無等の相違があることも原因として考えられるが、今後さらに検討する必要がある。

なお、立体視に共通する特徴として、最初立体視が成立しにくい場合もあるが、ひとたび成立するとなか

なか崩れないという性質がある。図10の実験結果にもこの特徴が認められる。

3.3 時分割提示条件でのフリッカ知覚

時分割方式では左右眼を電子シャッタで交互に開閉して立体視するため、電子シャッタの周波数が低いとフリッカが知覚される。

ここでは、液晶シャッタを使用して図11に示す刺激条件下のもとで、視野 $30^\circ \times 22.5^\circ$ の大きさをもつ一定輝度の白色パターンボックス（色温度 D_{65} ）を観察し、フリッカが知覚されない限界の周波数（臨界融合周波数、CFF という）を単眼および両眼について測定した。

表2の測定結果から、両眼を交互に開閉した場合のCFF値は、単眼のみのCFF値よりも約10%程度低下し、ハイビジョンの観視条件である視野 30° 、画面平均輝度 190 cd/m^2 のもとでは約55 Hz であった。したがって、フリッカの点からいえばフィールド周波数はこの両眼CFF値の2倍、少なくとも110 Hz 以上必要である。このことから、時分割立体テレビ方式のフィールド周波数は立体視の成立よりも、むしろフリッカの知覚限界から決められる。

今回試作した時分割立体テレビ方式は、フィールド周波数が120 Hz であるから、フリッカや動きの自然さなどの点でほとんど問題がない。

4. 検討および考察

4.1 アナグリフ方式の融合範囲

時分割方式と比較するために、アナグリフ方式の融合範囲を測定した。今回、図3に示したランダムドットパターンの左画像と右画像を、それぞれ120 Hz 時分割立体テレビ装置におけるカラー CRT ディスプレイの赤と緑の入力端子に加え、これを赤-緑メガネを用いて立体視した。実験結果の一例を図12(a), (b)に示す。その結果、アナグリフ方式の融合範囲は時分割方式よりも狭く、水平視差で視角30分以内、垂直視差で視角3~5分以内であった。

一般に、アナグリフ方式は赤と緑の色の違いによって左右像を分離するため、視野闘争が生じやすく、非常に不安定な見えかたをする。このため時分割方式に比べて立体視しにくく、またメガネをはずしても補色残像が残る。

4.2 頭部の傾きと立体視可能な範囲

2眼式立体テレビ方式では観察位置を変えると立体画像がひずんでしまう。また、頭部を左右に大きく傾けると立体視できなくなる。偏光メガネ方式の場合には、見る人が頭を斜めにすると偏光フィルタの偏光角

図11 フリッカの刺激提示条件
Presentation conditions of flicker stimuli.

表2 CFFの測定結果
Results of CFF measurement.

条件 被験者	単眼のみ呈示 CFF (Hz)		両眼* CFF (Hz)
	L	R	
MZK	61.9 ±1.8	61.5 ±1.5	55.3 ±1.9
SET	61.5 ±2.8	63.4 ±3.0	49.8 ±1.6
ISN	58.0 ±1.7	59.5 ±1.4	56.3 ±1.0

* 左右眼を交互に ON-OFF した場合の値。
同時に ON-OFF した場合には、単眼のみのCFF
よりも約5%上昇する。

図 12 アナグリフ方式における立体視の成立条件
Horizontal and vertical disparity limits of binocular fusion for the anaglyph system.

が変化して左右像の分離が悪くなり、クロストークが生じる。このため、許される頭の傾きは $\pm 10^\circ$ 前後である²⁾。これに対して、時分割方式の場合にはシャッタによって左右像を分離しているので、偏光メガネ方式に比べて頭部の傾きに対する許容範囲が広がることが予想される。

実際、時分割方式について頭部の傾きと立体視可能な範囲を図3のランダムドットおよび方形パターン(両眼視差が視角13分)を対象に測定した結果を表3に示す。この結果は4名の評定者の平均値を示したもので、時分割方式の場合には頭部を左右に $\pm 30^\circ \sim \pm 40^\circ$ 程度傾けても立体視できることがわかった。また、ランダムドットパターンよりも方形パターンのほうが、60 Hz方式よりも120 Hz方式のほうが許容範囲が広いこともわかった。

時分割方式において頭部を傾けると立体視できなくなる理由は、頭を傾けることにより垂直方向の視差ずれが生じるためと考えられる。垂直方向の視差ずれの許容限界は図5～図7に示すように、ランダムドットパターンでは視角5～7分、方形パターンで視角10～12分である。60 Hz方式の場合には、これよりも垂直方向の視差ずれの許容範囲が少しせまくなる。したがって、頭部の傾きに対しても120 Hz方式よりも厳しくなる。この傾向は表3の結果にも表れている。

表 3 頭部の傾きと立体視可能な範囲
Tilt angle of observer's head for stereopsis.

条件 評価	120 Hz 方式		60 Hz 方式	
	ランダム	方 形	ランダム	方 形
立体視可能	$\pm 35.7^\circ$	$\pm 41.7^\circ$	$\pm 30.8^\circ$	$\pm 36.8^\circ$
不安定に見える	{	{	{	{
立体視できない	$\pm 51.7^\circ$	$\pm 58.3^\circ$	$\pm 40.8^\circ$	$\pm 47.0^\circ$

4.3 時分割立体視と仮現運動の関係

空間的に離れた位置にある2つの光点を適当なタイミングで点滅させると、実際には動いたわけでもないのに両者の間に滑らかな動きの印象を生じる。このような現象を仮現運動という。

最近、図3に示したようなランダムドットパターンを用いた仮現運動の研究が注目されている。Brad-dick³⁾によれば、ランダムドットによる仮現運動は従来の古典的な仮現運動には見られない性質として、運動が生起する時間的、空間的範囲が非常に狭いこと、また、Dichoptic 提示(両眼に別々に提示する条件)では運動が生じないことなどをあげている。このランダムドットによる仮現運動が生じる時間間隔100 ms以下、空間間隔 視角15～20分の範囲(通常 Short-range と呼ばれる)のもとでランダムドットパターンを両眼に別々に提示すると、この場合には立体的に見える。すなわち、これは時分割立体視にほかならない。しかもこの Short-range の範囲は時分割立体視の成立する時空間条件ときわめてよく一致する。このことから、時分割立体視と Short-range の仮現運動とは裏腹の関係にあり、ランダムドットパターンを両眼に別々に与えるか、それとも同一の眼に与えるかの違いによって、人間の視覚系ではそれぞれ別の視覚現象として知覚される。

5. む す び

視覚実験用にフィールド周波数 120 Hz のフリッカレス時分割立体カラーテレビ装置を試作し、この装置を用いて時分割立体視の成立条件を検討した。時分割 120 Hz 方式は、従来の 60 Hz 方式に比べて以下の特長がある。

- (1) 視覚の CFF よりも高いフィールド周波数の採用により、フリッカがない。
- (2) 垂直解像度が低下せず、走査線 524.5 本の立体カラー画像が得られる。
- (3) 融合範囲が広く、立体視しやすい。
- (4) 視覚的負担が少ない。

これらの点から、60 Hz 方式よりも視覚系に整合していると考えられる。

今回試作した時分割立体テレビシステムは、立体視の研究以外にも医学用、教育用、工業用など多方面での利用が考えられる。今後は、この時分割立体テレビシステムを用いて、引き続き立体視に関する視覚特性を明らかにしていく予定である。

終わりに、本研究に用いた液晶シャッタに関して御協力頂いた(株)東芝、医用機器事業部および電子技術研究所の関係各位に厚くお礼申し上げます。また、日頃から御指導頂いている NHK 放送技術研究所、視

覚情報研究部の日下部長、ならびに、時分割立体テレビ装置の試作に協力された当研究部、山田職員に感謝する。さらに、本実験に参加された中央大学の瀬戸氏と評定者の宮崎嬢に謝意を表する。

(昭和 61 年 12 月 17 日受付)

【参 考 文 献】

- 1) 岩崎, 堀: “液晶シャッター式 X 線立体テレビジョン”, 信学全大, p. 1274 (1986)
- 2) 木谷: “立体テレビジョン”, テレビ誌, **36**, 12, pp. 11-19 (1982)
- 3) O. Braddich: “A short-range Process in Apparent Motion”, Vision Res., **14**, pp. 519-527 (1974)
- 4) 磯野, 安田: “時分割立体視の成立条件”, テレビ学技報, VVI 77-4 (Sep., 1986)

いその はるお
磯野 春雄 昭和 45 年, 東京電機大学工学部電気通信科卒業。47 年より, NHK 放送技術研究所視覚情報研究部に勤務し, 現在に至る。視覚心理と画像, ディスプレイの画質評価, 運動視, 立体視などの研究に従事。工学博士。正会員。

やすだ みおる
安田 稔 昭和 36 年, 名古屋大学工学部電気学科卒業。同年, NHK 入局。富山放送局技術部を経て, 41 年より, 同放送技術研究所に勤務。59 年より, 視覚情報研究部所属し, 現在に至る。バイオニクス, 視覚心理の研究に従事。工学博士。正会員。