無ひずみ条件に基づいた小形・軽量な立体ハイビジョンカメラの開発とその画面効果

Development of a Compact 3-D HDTV Camera based on Orthostereoscopic Conditions and Psychological Effects of the Images

正会員 山之上 裕一[†], 正会員 岡野 文男[†], 正会員 奥井 誠人[†], 正会員 湯山 一郎[†]

Hirokazu Yamanoue[†], Makoto Okui[†],

Fumio Okano[†] and Ichiro Yuyama[†]

Abstract Research on shooting conditions of 3D program production for natural 3D images has been continued. In the study, it has been shown that orthostereoscopic conditions bring about no inconsistency between depth information from perspective of the lenses and that from binocular parallax. A newly developed 3D camera is based on orthostereoscopic conditions which results in compactness of the camera (weight 8 kg). At the same time, the new camera has a zooming function and is valuable in many ways, especially sport broadcasting. In this paper, we give an outline of the newly developed 3D HDTV camera and the results of subjective evaluation tests on psychological effects of the images shot by the camera. These tests show that the images shot by this camera are more powerful and comfortable to view than those shot by existing 3D cameras.

キーワード：立体画像，立体カメラ，ズーム，見易さ，ひずみ，箱庭効果

1. ま え が き

デジタル技術の進歩により放送技術が21世紀に向けて大きく進展する中、新しい放送サービスの可能性のひとつとしてハイビジョンによる立体テレビの研究を行っている¹⁾²⁾。この立体テレビは、図1に示すように人間の右目、左目に相当する2台のカメラの画像を、テレビを見る人のそれぞれ右目、左目に与えることによって立体感をもたらすもので、2眼式といわれている。しかし、私たちが実際に物を見る場合と異なり、撮影時の左右カメラの間隔、レンズの焦点距離、レンズの光軸の方向など、さまざまな条件設定によっては、得られる立体映像が不自然で見づらいものとなる場合がある³⁾。これまで立体映像特有のひずみとして問題となってきた「箱庭効果⁴⁾⁵⁾（被写体が不自然に小さく感じる現象）」や「書き割り効果⁶⁾⁷⁾（被写体に厚みを感じられず、薄い板のように感じる現象）」などはこの例といえる。立体テレビを実用化するためには、このように大きさや被写体の立体感などを、自然に再現することによって高い臨場感を実現すると同時に、眼の疲労を避ける

図1 立体ハイビジョン3D HDTV.

観点からも、「自然で見やすい」ことが重要である⁸⁾。

このため、実際の番組制作等を通して、撮像条件や視聴時の観察条件を様々に変化させて、立体画像のひずみや見え方の研究を行ってきた。その結果、立体画像において被写体の大きさや立体感を自然に感じるためには、網膜にうつる2次元画像がもたらす奥行き感（パースペクティブまたは線遠近法による奥行き感で、図2に示すように像の大きさから奥行き情報を得ることができる）と、立体画像として見た場合に生じる奥行き感（図3：両眼視差）を一致させる

1998年2月18日、映像情報メディア学会技術報告（放送現業研究会）に発表
1999年7月2日受付、1999年10月22日再受付、1999年12月6日採録

[†] NHK 放送技術研究所

〒157-8510 東京都世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-2229)

[†] NHK Science and Technical Research Laboratories

(1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157-8510, Tokyo)

図 2 パースペクティブによる奥行き感
Depth sensation from perspective.

図 3 両眼視差による奥行き感
Depth sensation from binocular disparity.

ことが重要であること⁹⁾、そしてこれを満足するには、無ひずみ条件として知られる撮像方法および視聴条件が有効であることが明らかとなった¹⁰⁾。この無ひずみ条件は、撮像時のカメラの光軸を平行に保つと同時に、その間隔を人の平均的な瞳孔間隔とすることが必要条件となっている。

これまで、番組制作の現場においては、図 4 に示したように左右カメラの間隔を広げたり、光軸を交差させその交点の位置を前後させることにより立体感を演出してきた。そして、自然な立体感が得られるまで各シーンに応じてカメラの間隔や光軸の交点の位置を調整するため、手間がかかるという問題があった。これに対し光軸を平行にしその間隔を固定することにより、光軸調整が不必要となり、きわめて効率的な番組制作が期待できる。同時に、立体カメラを構成する場合にも、左右カメラの配置調整機構が不要になる分、より小形化・軽量化が可能となる。今回、当所では、これらの成果を基に小形・軽量の立体ハイビジョンカメラを開発した。

図 4 従来の立体映像撮像
Usual stereoscopic shooting.

一方、これまでの立体ハイビジョンの撮影においては、基本的に固定焦点レンズを用いてきた。その理由は、通常のズームレンズでは、左右カメラのズームレンズが独立に動作し、レンズ焦点距離の違いやズームストロークによる光軸変動が生じるためである¹¹⁾。これらは、左右画像間で、大きさのずれ、垂直のずれ、水平のずれといった幾何学的ひずみをもたらす¹²⁾。今回開発したカメラは、光軸が平行で固定されているという特性を活かし、ズームレンズの駆動機構を共通化した。また、ズームストロークに伴う光軸変動に対応するため、光軸補正機構を光学ブロックに内蔵した。このため、きわめてスムーズなズームが可能になったと同時に、ズームに応じて立体感が自然に変化するため、臨場感のある立体ズーム画像となっている。このズーム機能が可能となることにより、被写体の移動が大きいスポーツ番組などにおいて、映像表現の幅が広がると同時に、番組制作の、能力の向上と効率化が期待できる。

本報告では、この立体カメラの概要と、本カメラで撮影した立体画像を主観評価により検証した結果を報告する。

2. 新しい立体カメラの概要

2.1 無ひずみ条件

前述のように、被写体の大きさや立体感が自然な立体画像を見るためには、パースペクティブによる奥行き感と、両眼視差による奥行き感が矛盾しないことが重要で、これを満足するには、無ひずみ条件が有効である。今回開発した立体カメラは、この無ひずみ条件に基づいて設計されている。図 5 に無ひずみ条件を示す。図 5 に示すように、無ひずみ条件とは、

- ① 撮影レンズの光軸が平行であること。
- ② 撮影レンズの間隔と左右画像の提示間隔と瞳孔間隔が等しいこと ($d_1 = d_2 = d_3$)。
- ③ 撮影レンズの画角と画面を眺めたときの視角が等しいこと ($\alpha = \beta$)。

の3つの条件の総称である。したがって、無ひずみ条件とは、撮像時のみならず視聴時も条件を規定するものである。そして、この条件下においては、立体画像空間は、幾何学的計算上、実空間を等倍でコピーしたものとなる¹³⁾¹⁴⁾。実際に画面のサイズがある程度大きい場合、主観的にも実空間を見た場合と等しい、すなわち、無ひずみとなることが報告されている¹⁵⁾¹⁶⁾。ここで、撮像時の条件に着目すると、光軸を平行とし、その間隔を人の平均的瞳孔間隔である65 mmに固定する点が、本カメラの大きな特徴のひとつである。

2.2 光軸を平行に固定する利点と欠点

次に、番組制作の観点から、カメラの光軸を平行に固定する利点と欠点について述べる。

(1) 立体カメラの小形・軽量化

これまでの立体カメラは立体感を演出するため、カメラの間隔を変化させたり、レンズの光軸を交差させその交点の位置を前後させる左右カメラの配置調整が必要であっ

図5 無ひずみ条件
Orthostereoscopic conditions.

た。そのため、図6に示すように、左右カメラそれぞれについて、水平方向の移動機構、回転機構、垂直方向の移動機構、回転機構、そして時計方向の回転機構など、カメラの配置調整機構部が必要であった。図7に従来の立体カメラ(写真左)とこれらのカメラの配置調整機構部(写真右)の一例を示す。カメラヘッド単体に比べ、左右のカメラの配置調整機構部が大きな重量を占めている様子が示されている。この写真の例では、カメラヘッドが左右2台合わせて4 kg程度であるにもかかわらず、立体カメラ全体としては、レンズを除いても25 kgにも及ぶものとなっている。

これに対し新しい立体カメラを図8に示す。これまでのカメラの配置調整機構を省き、光軸と撮像素子である2/3インチ CCD(幅9.6 mm, 高さ5.4 mm)の位置関係を数十 μ m程度補正する機構をカメラヘッドの光学ブロック内に設けることにより、重量が約8 kg(レンズ含む)と大幅な軽量化に成功した。また、大きさも図8に示すように、カメラマンが肩に担げる程度まで小形化している。この光軸とCCDの位置関係の補正については、2.3節および2.4節で詳しく述べる。

(2) 撮影時間の短縮

従来のようにレンズの光軸を交差させる撮影方法では、背景にある被写体が、再生時の画面サイズによっては融合しない可能性があった(後方発散)。また、自然な立体感が

図6 左右カメラの配置調整機構
Adjustment of LR camera configuration.

図7 従来の立体ハイビジョンカメラ
Conventional 3D HDTV camera.

図 8 新しく開発した立体ハイビジョンカメラ
New 3D HDTV camera.

得られるまで各シーンに応じてカメラの間隔や光軸の交点の位置を調整するため、手間がかかるという問題があった。一方、光軸を平行に設定している本カメラは、光軸調整の必要がない。また、図5における d_2 を再生画面のサイズに応じて設定することで、背景が融合しない後方発散が生じる可能性もなく、効率的な番組撮影が可能となっている。

(3) 台形ひずみ

図9(a)のように光軸を交差させて撮像する場合、同図(b)のように台形ひずみが生じる¹⁷⁾。このひずみは、同図(c)に示すように、撮像距離が短く、また、カメラ間隔が広いほど顕著になる。これは、奥行き感をひずめると同時に、立体像として融合しにくい画像となる。このため、番組制作においては、このひずみを目立たないようにするため、撮影時のみならず、編集時においても、左右画像の水平位置、垂直位置などを調整する必要があった。

今回、光軸を平行に固定したため、台形ひずみが生じない。したがって、ポストプロダクションにおいても、左右画像の位置調整作業がなくなるため、効率的な編集作業が可能となった。

(4) 立体感の演出

本カメラは、すでに述べたように、基本的に無ひずみ条件に基づいている。このため、立体感を強調したり、あるいは、ある特定の被写体を飛び出させたりというような立体感の演出の自由度が制限される。特に、カメラを顕微鏡に取り付けてカメラ間隔を数mmに狭め微小物の世界を表現したり、あるいは、カメラ間隔を数mから数十kmにまで広げることにより、地球規模の大きさのものを立体画像として表現するというような演出は不可能である。

今回開発した立体カメラは、カメラ間隔を人の平均的な瞳孔間隔と同じ65mmに固定することにより、人が日常

図 9 台形ひずみ
Keystone distortion.

図 10 CCD の中心と光軸の水平方向のずれ
A horizontal gap between lens axis and the center of CCD.

肉眼で立体的に感じる範囲を、立体画像として表現するのに適している。

2.3 光軸と CCD 中心の位置関係

無ひずみ条件のひとつである、視聴時の左右画像間隔(図5: d_2)を、あらかじめ撮影時に実現するため、本カメラにおいては、カメラヘッドの光学ブロック部において、CCD の中心と光軸を図10に示すように水平方向に d_4 だ

けずらす機構を設けている。図5における d_2 と図10における d_4 は理論的に等価である¹⁸⁾。今回開発したカメラでは、再生画面サイズ120インチを想定し2/3インチCCDを1.2%(0.115mm)水平にずらした。画面サイズ120インチは、現在の立体ハイビジョンシアタで最も普及している画面サイズである。もちろん、再生画面のサイズに応じて、CCDを自由に水平方向に調整することができる。

このように、CCDと光軸の位置をずらすことにより、編集時に画像の水平位置をずらす(位相補正)作業がなくなると同時に、画像の見切れが生じる心配がなくなるという利点がある。

2.4 立体ズームの問題点と特徴

今回開発した立体カメラの大きな特徴のひとつとして、ズーム機能もあげられる。ここでは、これまでの立体ズームに伴う問題点を示すと同時に、本カメラにおける対策方法について述べる。

立体撮像においてズームレンズを使用する場合、大別して、左右レンズのズーム、フォーカス、アイリスの制御精度が保てないため左右差が生じるというレンズ制御精度の問題と、ズームストロークにおける光軸変動の2つが課題であった¹⁴⁾。

(1) レンズの制御精度

ズームの制御が左右レンズで異なると、図11に示すように左右画像でサイズの違いが生じ、非常に見にくい立体画像となる。また、フォーカスやアイリスが異なるとピントや明るさに左右差が生じる。このため、従来のズーム機構では、あらかじめ何点かの左(右)カメラのズーム値、フォーカス値、アイリス値に対応する、右(左)カメラのズーム値、フォーカス値、アイリス値を記憶させておき、その間は線形補完する方式を用いていた。しかし、モータの立ち上がりの瞬間の伝達時間、モータのトルク、負荷量の差、および調整ポイント間の線形補完の誤差は、右左画像においてサイズ、ピント、明るさの違いとして無視できないこと、最初の調整ポイント以外では調整に多くの時間がかかることなどの欠点があった。このため、本来のズームレンズの機能というよりは、レンズ交換が不要な固定焦点レンズ群という位置づけであった。

このレンズの制御精度については、レンズ制御のモータが左右別々であることが主要な原因である。本カメラにお

いては、光軸が平行で固定されているという利点を活かし、レンズ制御のモータを共通化した。これにより、焦点距離が固定している場合はもちろんのことズームストローク中においても、サイズ、フォーカス、アイリスについて、左右差のきわめて少ない立体画像を撮影することが可能となった。

(2) 光軸変動

ズームストロークにおける光軸変動は、図12に示すように、立体画像に水平のずれ、垂直のずれを生み、立体画像としての融合を妨げる。図12は、ズームインに従い、対象物の像の大きさは同じでも、映る位置が左右画像間で大きくずれた例である。ズームする前には画面の中央に被写体をとらえていても、ズーム後の左目画像では被写体が大きく画面左上方に、右目画像では大きく画面右下に映し出されている。

この光軸変動は、主として次の3つの原因で生じると考えられる。すなわち、倍率収差やザイデル収差等のレンズ単体の問題、レンズとカメラ筐体取り付け部のあそび、そして図13に示すように、レンズ光軸とCCDの中心の相対的な位置関係が、左右カメラでそろっていないことである。それぞれの問題について検討した結果、3番目にあげたCCDの中心と光軸との相対的な位置関係が左右カメラで合っていないという問題が、大きな影響を及ぼすことが

図12 ズームにともなう水平・垂直方向のずれ
Horizontal and vertical gaps by zooming in.

図11 左右で像のサイズが異なる場合
Size inconsistency between L and R images.

図13 CCDの中心と光軸の垂直方向のずれ
A vertical gap between lens axis and the center of CCD.

明らかとなった¹¹⁾。特に、図 13 に示したように、垂直方向の相対的な位置関係がそろっていない場合は、左右画像間で垂直のずれが生じ、立体像としてきわめて見にくい画像となる。

本カメラにおいては、図 10 において示したように、CCD の水平方向の移動機構に加え、垂直方向の移動機構も持たせている。これにより、光軸変動に伴う幾何学的ひずみを検知限以下¹²⁾に抑えている。

(3) ズームに伴う再現空間の特徴

今回使用したズームレンズは、2/3 インチで焦点距離 12 mm から 96 mm の 8 倍のレンズである。この場合、画角が 43.6° から 5.7° の変化となる。ここで、図 5 に示した無ひずみ条件を実現しようとする、撮像レンズの焦点距離(画角)に応じて、視距離も変化させなければならない。すなわち、焦点距離 12 mm で撮影した場合、画面サイズ 120 インチで視距離 3.3 m(画角 43.6°)の位置が無ひずみ条件を満足するが、焦点距離 96 mm で撮影した場合には、視距離が 26.7 m(画角 5.7°)もの距離となる。実際の視聴条件を考慮すると、このように、撮影レンズのズームに応じて視距離を変化させることは不可能である。視距離が短い場合、必然的に、長焦点レンズで撮影した画像は、奥行き方向が圧縮され、書き割りのような立体画像となる。この問題を解決するためには、左右カメラの光軸を交差させ、レンズの間隔を数十 cm にまで広げることが考えられる。しかし、レンズの間隔が広がることにより、立体カメラ全体の大きさが増すこと、箱庭効果が新たに生じる可能性があること、立体像として融合するための撮影可能な奥行き範囲が限られるなど、問題点が多い。例えば、焦点距離 96 mm(画角 5.7°)で撮影した場合、奥行き方向の圧縮効果を軽減するには、カメラ間隔を 50 cm 以上に広げる必要がある¹⁹⁾。

しかし、一方でズーミングに伴う立体画像空間の変化として、実際に人が移動する場合と似ているという特徴がある。実世界においては、対象物に近づくに従い対象物の網膜像の大きさが大きくなるが、本カメラの立体ズームの場合も、短焦点から長焦点距離にズームインする場合、ズームにより 2 次元的な像の大きさが大きくなると同時に、対象となる立体像が飛び出してくるからである。本カメラにおける無ひずみ条件の設定では、最も焦点距離の短い 12 mm レンズの場合、カメラより 3.3 m の位置にある被写体の立体像が表示画面の位置に再現される。そして、焦点距離の最も長い 96 mm レンズの場合には、カメラから 26.7 m の位置にある被写体の立体像が画面の位置に再現される。すなわち、もともとカメラから 26.7 m の位置の被写体の立体像は、焦点距離 12 mm の場合には表示画面より奥に再現されるが、ズームインに伴い焦点距離 96 mm の場合には表示画面上に再現され、見かけ上立体像が近づくのである。これは、きわめて自然な移動感を生じる。これに対し、従来の光軸を交差させる撮像法の場合、

光軸の交点は一定であるため、このような移動感が生じない。

この立体ズーム画像も含め本カメラの画像のもたらす心理的な効果については次章で述べる。

3. 新しく開発した立体カメラの画面効果

次に、本カメラで撮影した立体画像がどのような画面効果をもたらすかを調べるため、種々の評価項目を設け、因子分析を施し検討した。評価画像としては、本カメラの実用性の検証を兼ねて行ったアフリカロケで収録した立体画像を対象とした。また、比較対照として立体映像標準チャートの画像²⁰⁾も用いた。

3.1 評価画像

評価画像は、本カメラで撮影した動画像 14 種類、従来の撮像法による画像の代表として標準チャートより 1 種類の、合計 15 種類の動画像である。それぞれの動画像を立体画像として表示する場合と、左目画像のみを使用し 2 次元画像として表示する場合の 2 つの表示条件を設けた。各動画像は 1 シーン 15 sec である。表 1 に、各画像の撮像条件とその内容について簡単に示す。

画像 No. 1 から No. 5 は、本カメラの焦点距離 12 mm で撮影した画像で、今回の実験の視聴条件においては、無ひずみ条件を満たす画像である。画像 No. 6 から No. 10 は、本カメラで中焦点から長焦点のレンズで撮影した画像で、撮影レンズの画角が画面の表示画角より狭い。以上の画像はレンズの焦点距離を固定し撮像した画像である。No. 11 から画像 No. 14 は、本カメラによる比較的ゆっくりとしたズーム画像である。画像 No. 15 は、立体映像標準チャート中の画像名「Flower pot」で、これまで、MPEG-2 の MVP の画質評価実験など数々の評価実験において使用されている²¹⁾²²⁾。この画像は、光軸を交差させる方法で、光軸交点まで 5 m、カメラ間隔 65 mm、焦点距離 12 mm の固定焦点レンズで撮像している。また、今回の評価画像においては、激しいカメラの動き、速い被写体の動き等は含まれていない。

3.2 評価実験

表示画面サイズは 120 インチで、撮像レンズが焦点距離 12 mm(レンズ画角 43.6°)にて無ひずみ条件が成立するようにするため、視距離を 3.3 m とした(図 5 において $\alpha = \beta = 43.6^\circ$)。同時に視距離を人の目の焦点深度($\pm 0.3 D$: 3.3 m)とすることによって、輻輳と調節の矛盾による影響を軽減するように努めた²³⁾。画像の提示方法は、上述のように立体画像の場合と 2 次元画像の場合の 2 つに分けて提示した。ただし、2 次元画像提示の場合も偏光眼鏡を装着するなど、観視条件を立体画像提示の場合と同様に設定することにより、眼鏡の有無や左右画像の表示装置の特性差が実験結果に影響を及ぼさないように留意した。

評価実験は、それぞれの評価画像に対し、表 2 に示す評価項目を設け、

表 1 評価画像
Test images.

画像 No.	レンズ	光軸	台形ひずみ	内 容	カメラ、被写体の動き	撮像距離
1	ワイド*	平行	なし	一本道をバス停に向かって歩いてくる人たち	カメラ固定、被写体がゆっくり近づいてくる	近
2	ワイド*	平行	なし	商店街と買い物客	ゆっくりとした左パーン	近
3	ワイド*	平行	なし	市場で買い物をする少女	カメラ、被写体とも固定	近
4	ワイド*	平行	なし	建物の前に並ぶ村人達	ゆっくりとした左パーン	近
5	ワイド*	平行	なし	広い草原で草を食べる象の親子	カメラ、被写体とも固定	近
6	中	平行	なし	サバンナで休む一頭のライオン	カメラ、被写体とも固定	中
7	長	平行	なし	広い草原で草を食べるシマウマの群	カメラ、被写体とも固定	遠
8	長	平行	なし	森の前で草を食べるガゼールの群	カメラ、被写体とも固定	遠
9	長	平行	なし	広い草原で草を食べるヌーの群	カメラ、被写体とも固定	遠
10	中	平行	なし	獲物をねらうチーター	ゆっくりとチーターをフォロー	中
11	ズーム	平行	なし	カメラに興味を示し近づいてくるチーター	近づいてくるチーターに合わせて、ズームバック	中～近
12	ズーム	平行	なし	通りを忙しそうに横切る男	斜めに横切る男に合わせて、ズームバック	中～近
13	ズーム	平行	なし	港から出発する船	遠ざかる船を送りながら、ズームバック	遠
14	ズーム	平行	なし	広い草原で草を食べるガゼールの群	遠くのガゼールにゆっくりとズームイン	遠
15	ワイド	交差	あり	円形の花壇ごしの少女	ゆっくりとした回り込みドリー(光軸交点まで5m)	近

*: 本視聴条件下で無ひずみ条件を満たす。

表 2 評価項目
Evaluation items

	評 価 項 目
1	画面の枠が気になる
2	見易い
3	ミニチュアのような
4	奥に広がった
5	臨場感がある
6	疲れる
7	画面より飛び出した
8	目が痛い
9	自然な(大きさ、立体感)
10	大きい
11	心地良い
12	迫力のある
13	扁平な、のっぺりした

図 14 因子負荷量
Factor loading.

3.3 実験結果

得られた主観評価データに対し因子分析を行った結果、累積寄与率 69% で 2 つの因子を抽出した。図 14 に、2 つの因子による各評価項目の因子負荷量を 2 次元平面上に展開して示す。図 14 より、第 1 の因子(図中縦軸)を「迫力・臨場感」の因子(寄与率 40%)とし、第 2 の因子(図中横軸)を「見易さ」の因子(寄与率 29%)とした。

抽出した第 1 の因子「迫力・臨場感」を対象に、それぞれ 2D と比較した各画像の因子得点を図 15 に示す。同様に図 16 に、第 2 の因子「見易さ」を対象に、2D と比較した各画像の因子得点を示す。

3.4 「迫力・臨場感」の因子について

従来より立体画像は 2 次元画像に比べ、迫力や臨場感が

- 5: あてはまる
4: ややあてはまる
3: どちらともいえない
2: ややあてはまらない
1: あてはまらない

の 5 段階で評価した。また、被験者が表 2 のすべての評価項目に答えるまで、15 sec の評価画像を繰り返し提示した。被験者は、20 代から 40 代の男女 16 人である。全員あらかじめ立体映像標準チャートによる視機能検査を行い、動画、静止画ともに立体映像の融合には問題がないことを確認している。

図 15 因子「臨場感・迫力」に対する評価画像の因子得点
Factor scores about sensation of reality and power.

図 16 因子「見易さ」に対する評価画像の因子得点
Factor scores about easiness for viewing.

増すといわれているが²⁴⁾、本実験結果も図 15 に示すように、同様の結果となった。しかし、画像 No. 4「村人達」や画像 No. 8「ガゼール」に見られるように、立体画像としての撮像条件が同じであるにもかかわらず、「迫力・臨場感」の因子が十分に増していない場合も示されている。この結果は、撮像条件が同じでも絵柄によっては立体画像

としての効果が十分に得られない場合があることを示している。この 2 つの立体画像の場合、評価項目「奥に広がった」において、2 次元画像の主観評価値が他の画像に比べ低い一方で、評価項目「扁平な、のっぺりした」において評価値が高い。すなわち 2 次元的な絵柄そのものに奥行き感が乏しいことが理由として考えられる。

3.5 「見易さ」の因子について

2 眼式立体画像においては、2 次元画像と異なり、輻輳と調節の矛盾、明るさや色など左右画像間の特性差などが、「見易さ」の因子に影響を与えると考えられる。本実験においては、上述 3.2 節の評価実験で述べたように、これらの点に留意したが、図 16 に示すように、「見易さ」の因子に関し、立体画像全体の因子得点の平均は 2 次元画像のそれより劣る結果となった。この理由としては、人の目の焦点深度内に立体画像空間を再現したといえども、実際にものを見る場合と違い輻輳と調節の矛盾は存在すること、また、撮像の際の左右カメラの特性の違い等が考えられる。今後さらなる検討および改善が求められるところである。

一方、本カメラで撮像された立体画像(画像 No. 1~14)は、従来の撮像方法で得られた立体画像(画像 No. 15)より因子得点が高い。特に、焦点距離 12 mm レンズを使用し、無ひずみ撮像・観察条件を満たしている画像(画像 No. 1 から No. 5)およびズーム画像(画像 No. 11 から No. 14)はその傾向が顕著で、因子「見易さ」の因子得点が 2 D 画像より勝る場合も示されている。

この理由として、再現空間の自然さおよび画枠による立体感の消失²⁵⁾などが考えられる。再現空間の自然さとは、立体画像において被写体の大きさや立体感が自然に再現されているかどうかで、評価項目「(大きさや立体感に関して)自然な」に相当する。画枠による立体感の消失は、2 眼式立体画像システムにおいて、ディスプレイ面より手前にある立体像が画枠にかかることが原因である。これは、画枠と立体像のあいだで反遮蔽領域を生じるなど、違和感の原因となる。これは、評価項目「枠が気になる」に相当する。因子負荷量を示した図 14 より、両評価項目とも抽出された因子「見易さ」に大きな影響を与える項目であることが示されている。表 3 に、両評価項目の主観評価結果において、2 D 画像と比較した場合の立体画像の平均および撮像条件別の平均を示す。

(1) 無ひずみ条件を満たす画像

まず無ひずみ条件を満たしている画像(画像 No. 1~5)に着目する。表 3 に示されているように、この条件は、その定義どおり被写体の大きさや立体感を自然に再現するために最も有効な条件である。同時に、同じ撮影シーンならば、他の撮像方法より画枠ひずみを生じにくい。本実験の視聴条件の画面サイズ 120 インチ、視距離 3.3 m においては、撮像時の被写体までの距離が 3.3 m 以上のものは、すべて画面の奥に再現されるためである。

表 3 主観評価データ
Subjective evaluation data.

評価項目	自 然 な		枠が気になる	
画像	2D との比較	撮像法別の平均	2D との比較	撮像法別の平均
画像 No. 1	0.25	無ひずみ条件下 0.28	0.19	無ひずみ条件下 0.04
画像 No. 2	0.38		-0.13	
画像 No. 3	0.19		0.31	
画像 No. 4	0.13		-0.25	
画像 No. 5	0.44		0.06	
画像 No. 6	-0.25	中・長焦点レンズ -0.29	0.50	中・長焦点レンズ 0.18
画像 No. 7	-0.44		-0.19	
画像 No. 8	-0.25		0.00	
画像 No. 9	-0.31		0.19	
画像 No. 10	-0.19		0.38	
画像 No. 11	0.50	ズームイン 0.13	0.38	ズームイン 0.14
画像 No. 12	0.25		0.00	
画像 No. 13	-0.19		0.19	
画像 No. 14	-0.06		0.00	
画像 No. 15	-0.06	光軸交差 -0.06	0.38	光軸交差 0.38

(2) 中・長焦点距離レンズで撮像した画像

これに対し、中・長焦点距離レンズを使用した場合(画像 No. 6~10)に無ひずみ条件を満足しようとする、撮像レンズの画角に応じて視距離を長くする必要がある。たとえば、本カメラのレンズ焦点距離 96 mm(画角 5.7°)で撮影した場合、画面サイズ 120 インチでは、視距離 27.6 m が無ひずみ条件を満足する視距離となる。この場合、撮像距離 27.6 m より手前にある被写体は、すべて画面より手前に定位することになり、画枠ひずみとなる確率が高い。また、実際には視距離 3.3 m で観察するため、奥行き方向が圧縮された立体画像となる。これらのことが、上述の両評価項目において、無ひずみ条件を満たす画像より評価値が劣る原因と考えられる。

(3) 従来の撮像法で撮像した画像

次に、従来の撮像法によって撮像された画像(画像 No. 15)に着目する。従来の撮像法は、演出効果としてシーンの主要な被写体の立体感を強調するため、同時に、背景など遠距離にある被写体の画面上での左右画像のずれを融合可能な範囲に収めるため、光軸の交点をやや遠方に設定する傾向が強い。その結果、光軸の交点より手前にある被写体が、視聴時、画面より手前に定位し、それらが画枠ひずみを引き起こす確率が高い。また、光軸を交差させることによる、再現空間のひずみや台形ひずみも問題となる。これらのことが、上述の両評価項目において、無ひずみ条件を満たす画像より評価値が劣る原因と考えられる。

(4) ズーム画像について

本カメラのズーム画像は、カメラ本体における光軸と CCD の中心の位置関係より、以下の特徴がある。すなわ

ち、ズームインする場合、対象となる被写体の画面上での像サイズが大きくなると同時に、その立体像が近づいてくる(飛び出してくる)。ズームバックする場合、画面上での像のサイズが小さくなると同時に、その立体像が遠ざかる。このズーム画像のもたらす画面効果は、再現空間における奥行き方向の圧縮が伴うものの、きわめて実世界と合致した移動感を生む。このことが、因子「見易さ」において、高い因子得点に表れたと考えられる。

4. む す び

立体画像において被写体の大きさや立体感を自然に感じるための有効な条件、「無ひずみ条件」に基づき開発した立体ハイビジョンカメラの概要を述べた。小形・軽量で、ズームが可能という特徴を生かし、アフリカでのロケを実施しその実用性を検証した。また、主観評価の観点から本カメラで撮影した立体画像のもたらす心理効果について検討した。その結果、本カメラの画像は、臨場感・迫力を十分に有していること、同時に本カメラは、従来より見やすい立体画像を撮像することが可能であることがわかった。今後、評価画像の種類を多くすると同時に、それぞれの画像の視差の分布やその時空間特性など、立体画像としての特徴量もふまえて検討する必要がある。

本研究を進めるに当たり、その機会を与えていただいた NHK 放送技術研究所元所長 西澤台次氏、および前所長 吉野武彦氏に感謝いたします。また、きわめて過酷な条件にも関わらず、アフリカでのロケを実施し貴重な映像を収録していただいた NTS 村上篤史氏をはじめスタッフの方々に感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) 泉武博監修, NHK 放送技術研究所編: “3次元映像の基礎”, オーム社 (1995)
- 2) H. Twaites and S. Yano: “Production Methods and Psychological Effects of 3-D HDTV”, 信学技報, HCS 96-1, **96**, 123, pp. 1-6 (June 1996)
- 3) D. L. MacADAM: “Stereoscopic Perceptions of Size, Shape, Distance and Direction”, SMPTE J., **62**, pp. 271-289 (1954)
- 4) 山之上ほか: “立体画像における大きさの歪みと撮像条件の関係”, テレビ誌, **48**, 10, pp. 1284-1292 (Oct. 1994)
- 5) R. Kutka: “Reconstruction of Correct 3-D Perception on Screens Viewed at Different Distance”, IEEE Trans. Communications, **42**, 1, pp. 29-33 (Jan. 1994)
- 6) S. Herman: “Principles of Binocular 3D Displays with Applications to Television”, SMPTEJ., **80**, pp. 539-544 (July 1971)
- 7) 繁樹ほか: “書き割り効果のメカニズム”, 信学技報, **98**, 47, pp. 153-160 (June 1998)
- 8) 畑田: “疲れない立体ディスプレイを探る”, 日経エレクトロニクス, 444, pp. 205-214 (1988)
- 9) H. Yamanoue: “The Relation Between Size Distortion and Shooting Conditions for Stereoscopic Images”, SMPTE J., pp. 225-232 (Apr. 1997)
- 10) 山之上ほか: “立体ハイビジョンにおける無ひずみ撮像・観察条件”, 映情学誌, **52**, 3, pp. 377-383 (Mar. 1998)
- 11) 山之上ほか: “立体ハイビジョン撮像におけるズーム機構の開発”, H9 信学総大, D-11-152
- 12) 山之上ほか: “立体ハイビジョン撮像における左右画像間の幾何学的歪みの検知限・許容限の検討”, 信学論, **J80-D-II**, 9, pp. 2522-2531 (Sep. 1997)
- 13) R. Spottiswoode, N. L. Spottiswoode, C. Smith: “Basic Principles of The Three Dimensional Film”, SMPTE J., **59**, pp. 249-286 (Oct. 1952)
- 14) 安達ほか: “2眼式立体画像空間の歪に関する考察”, 信学技報, IE83-73, pp. 49-54 (Oct. 1983)
- 15) 山之上ほか: “立体画像の無歪み撮像・観察条件と主観的距離・大きさの関係”, 信学技報, HIP96-31, pp. 37-42 (Jan. 1997)
- 16) 山之上ほか: “立体ハイビジョンにおける無歪み条件の主観的検討”, 映情学技報, **21**, 63, pp. 7-12 (Oct. 1997)
- 17) 山之上ほか: “立体ハイビジョン用 HARP カメラ”, NHK 技研 R & D, 31, pp. 58-67 (1994)
- 18) 岩本ほか: “時分割方式立体視における像の歪みの解析と光軸平行変位による歪みの除去”, 日本機械学会論文集 (C 編), **58**, 553, pp. 2701-2708 (Sep. 1992)
- 19) 大森ほか: “立体画像における撮像条件と書き割り効果”, 映情学誌, **53**, 3, pp. 437-441 (Mar. 1999)
- 20) Yamanoue: “Stereoscopic Test Materials”, Proc. of IDW98, 3D3-2, pp. 815-818 (Dec. 1998)
- 21) 片山ほか: “MPEG2 MVP@HL を用いた立体 HDTV 符号化画像の主観評価実験”, 映情学技報, **22**, 19, pp. 19-24 (Mar. 1998)
- 22) ISO/IEC JTC 1 SC29/WG 11 N1373, Report on the verification test on multiview profile, Oct. 1996
- 23) 比留間ほか: “調節応答から見た両眼融合式立体画像の観視条件”, 信学論, **73-D-II**, 12, pp. 2047-2054 (Dec. 1990)
- 24) 矢野: “立体画像表示における画角の影響”, テレビ誌, **45**, 12, pp. 1589-1596 (1991)
- 25) 石博ほか: “ステレオ表示における奥行き知覚ひずみとその防止法”, テレビ誌, **50**, 9, pp. 1256-1267 (Sep. 1996)

やま の う え ひ ろ か ず

山之上 裕一 1987年, 早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻(通信)修士課程修了。同年, NHK に入局。福島放送を経て, 1989年より, 同放送技術研究所にて, 立体ハイビジョンシステム, 視覚心理等の研究に従事。正会員。

おかの ふみお

岡野 文男 1978年, 東北大学大学院修士課程修了。同年, NHK に入局。1981年より, 同放送技術研究所に勤務。ハイビジョンカメラ, テレビジョンシステム, 立体テレビジョンの研究に従事。工学博士。正会員。

おくい まこと

奥井 誠人 1980年, 東京工業大学大学院物理情報工学専攻修士課程修了。同年, NHK に入局。1983年より, 同放送技術研究所に勤務。現在, 立体映像音響グループに所属し, 立体テレビジョンの研究に従事。正会員。

やま しいちろう

湯山 一郎 1970年, 東京大学電気工学科卒業。同年, NHK に入局。1975年より, 同放送技術研究所にて, ハイビジョンのシステム設計, 信号処理の研究に従事。現在, 立体映像音響部長として, 立体テレビ方式の研究を指導。工学博士。正会員。