

■原著論文 (VISION Vol. 10, 1998)

多視点画像を用いた3次元ディスプレイの立体視に関する研究
視差の連続性について

深谷直樹^{***}・小倉久忠^{**}・本田捷夫^{****}

* 通信・放送機構

〒140-0003 東京都品川区八潮5-7-2 MKKビル

** 千葉大学大学院自然科学研究科

〒263-0022 千葉市稲毛区弥生町1-33

*** 千葉大学工学部画像工学科

〒263-0022 千葉市稲毛区弥生町1-33

(受付 1997年8月27日；改訂受付 1997年10月27日；受理 1997年11月10日)

Continuity of the Perspective-views of the Reconstructed Image of
Multi-Perspective 3D Display

Naoki Fukaya^{***}, Hisatada Ogura^{**} and Toshio Honda^{****}

* Telecommunications Advancement Organization (TAO) of Japan
MKK Bldg. 5-7-2 Yashio, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0003, Japan

** Graduate School of Science and Technology, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-0022, Japan

*** Department of Image Science, Faculty of Engineering, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-0022, Japan

(Received 27 August 1997; Received in revised form 27 October 1997; Accepted 10 November 1997)

Multi-Perspective 3D display is expected to reconstruct a 3-Dimensional image without flipping, following on the observers' movement. Previous works have studied ways to reduce the conspicuousness of the flipping of the reconstructed image caused by the moderate blurring. This paper gives the results of our efforts to get rid of the flipping of the reconstructed image without blurring by the subjective evaluation of several holographic stereograms comprised of different numbers of Multi-Perspective-Views. Experimental results suggest that the flipping-free reconstructed image is obtained to make the viewing zone of the each perspective image at the viewing position smaller than the pupil of the eye. This means that the flipping-free image is dependent on the continuity of the perspective images themselves, which is surely incident to the pupil of the viewer's eye simultaneously.

1. まえがき

近年、立体ディスプレイの研究が盛んに行われている。このうち既に広く知られている2枚の視差を持つ画像を用いて両眼立体視により立体像の再生を行う方式のディスプレイ（2眼式ディスプレイと呼ぶ）では、観察者が移動しても観察される再生像の側面は変化しないという問題がある。

この問題を解決できる手法としてホログラフィ技術を利用した3次元ディスプレイや、視差を含んだ多視点画像を用いた3次元ディスプレイ（以下多視点画像ディスプレイと呼ぶ）がある。このうち多視点画像ディスプレイはホログラフィ方式に比べ、要求される情報量を少なくできる可能性を持つため、より実現性の高い手段として注目されている。この多視点画像ディスプレイにはバララックスバリア方式、レンティキュラ方式、Integral Photography、ホログラフィックステレオグラム（Holographic Stereogram 以下 HS と記す）、集束化光源列を用いた方式¹⁾、アナモルフィック光学系を用いた方式²⁾等がある。またCGH（Computer Generated Hologram）の手法を用いたホログラフィにおいても、ホログラムデータ計算時間の短縮を図るため、HSの手法を取り入れた多視点式で自然な3次元像を再生しようという提案もなされている³⁾。

ただこれまで開発された多視点画像ディスプレイの多くは、観察者が移動すると観察される再生像の側面自体は移動するが、像の移動がスムーズではなく、観察される3次元像に<とび>を発生するものであった。これは多視点画像ディスプレイであるとはいえ、再生像の視点数が少ないため、3次元像が連続して認識されないためである。以下、本論文ではこの3次元再生像が連続して観察され、<とび>を感じないことを、視差が連続していると表現する。

この多視点画像ディスプレイの視点数と視差の連続性の問題に対し、すでに Burckhardt⁴⁾ や大越⁵⁾、Halle⁶⁾、St. Hilaire^{7,8)}らにより検討

がなされている。ただし彼らの議論は、もともと多視点画像の視点数が少ないため現に発生している3次元像の<とび>を、像の奥行きに合わせて再生像を<ぼかす>ことで<とび>を打ち消すための最適条件を求めようというものである。また観察者の視力に基づく分解能を考慮していないので、観察者には<とび>は認識されないものの、再生像は奥行き方向に明らかなくぼけ>を含んでいる。再生像の奥行きが深くなるにつれ像をぼかす事は、ある物体を注視させ、それ以外は背景とするような像空間の再生には有用である。しかし、例えば3次元CAD用のディスプレイのように、再生像全体に鮮明さを要求されるような用途には問題がある。

そこで本研究は、従来研究されてきた<ぼけ>により<とび>を補償するのではなく、多視点画像ディスプレイにおいて<ぼけ>を含まずに<とび>をなくすために必要な視点数の評価を行うことを目的とする。多視点画像ディスプレイとしてHSを用い、視点数を変えた複数サンプルを準備した。これを用いて複数被験者により感応評価を行った結果、視差の連続性について新たな知見を得たので報告する。

2. HS合成系仕様

HSは観察点がある間隔でつぎつぎと異なった多数枚の画像列を原画として用い、1枚のホログラムに合成して3次元像を再生する技術である。従って原画像の撮影間隔、及びホログラムに合成する際の記録間隔（記録された一つ一つの微小ホログラムを要素ホログラムと呼ぶ）を変える事で、容易に多視点画像の視点数を変えたサンプルを準備できる。HSの合成は原画列の撮影行程、HSの合成行程に分かれ、それぞれの行程で再生像の<解像度>を劣化させる要因を含む。そこでまず、観察者の視力に基づく<解像度>を満足する3次元像を再生するために必要な、HSの合成系仕様を求めた。

再生像の解像度を劣化させる要因は、前述の大越らの議論に見られるように、[ぼけ]，[解像度]，[回折による点像の広がり]の3つに大きく分類され、これらの2乗和の平方根として再生像の<解像度>が規定される。そこでこれらの議論を参考に、今回のHS合成光学系に即したHS再生像の<解像度>を求める理論式を求めた。

[ぼけ]は原画列の撮影時、カメラレンズの焦点深度によって決まる、被写体の奥行きに伴うフィルム面でのぼけ量を意味する。今回はカメラとしてCCDカメラを用いた。被写体の奥行きは、まず、CCD受光素子面でのぼけ量がCCD受光素子の画素サイズ以下という条件で制限される。

[解像度]は、多視点画像ディスプレイの原理から発生する多重像によるぼけに関係している。今回のHS合成系では原画列をLCD (Liquid Crystal Devices) パネルに表示し、プ

ロジェクションレンズを介して投影する。投影像の結像面に視野レンズを置き、要素ホログラムサイズを規定する微小開口に光線を集光する(図1参照)。多視点画像ディスプレイにおいてある奥行き位置に再生像が見えるようにするためには、隣り合う視域から対応点を見つめた時、ディスプレイ上の異なる位置に像を表示する必要がある。ところが視域の替わり目で再生像を観察する時、隣り合う視域からの再生像が同時に観察され、多重像となってぼける。この多重像によるぼけがディスプレイの解像度を規定する。基本的には使用するLCDの解像度が高い程、また要素ホログラム露光時の微小開口径が小さい程、解像度は上がる。また奥行きが深くなるほど解像度は落ちるため、ここでも再生像の奥行きが制限される。

[回折による点像の広がり]は、多視点画像ディスプレイにおいて解像度が非常に高く

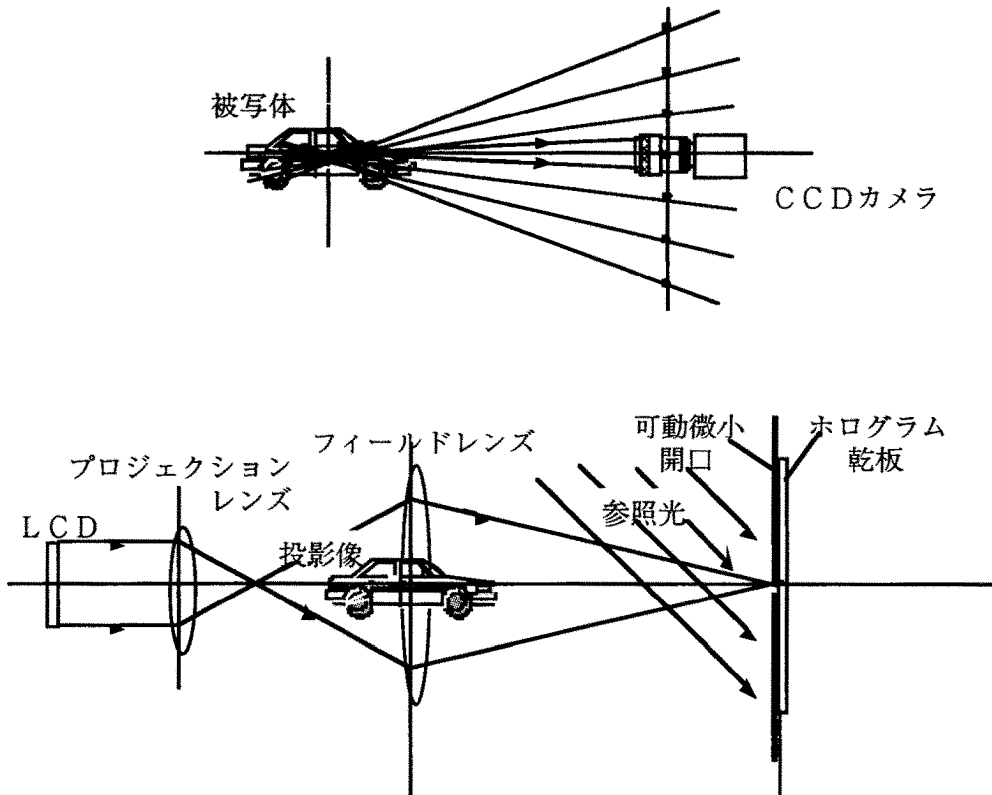


図1 原画列撮影系とHS合成系

なった時、相反する問題として浮上してくる。今回の光学系では HS 合成に使用する LCD の持つ微細な画素構造、要素ホログラム露光時の微小開口、さらに被験者の眼の瞳孔により回折を生じ、点を再生しようとしても点像が広がりを持つ。従来の大越らの議論では、回折による点像の広がり量を Fraunhofer 回折像の第 1 暗輪の間隔で近似して、点像の広がり量を定義している。我々は正確さを期すため、全ての回折を Fresnel 回折式で表し、合成した回折像の第 1 暗輪の間隔として、点像の広がり量を数値計算により求めた。

以上より求めた再生像の〈解像度〉の理論式に、HS 合成系に用いる実験装置からあらかじめ決まる仕様値を代入した。残りの変数値は被験者の 2 線弁別視力を 1.0、瞳孔径を 5 mm と仮定し、再生像の〈解像度〉が被験者の視力に基づく分解能より細かいという条件を基に、HS の合成系仕様を決定した。ここで求めた HS の合成仕様は、再生像を静止して観察した時、再生像の分解能が視力に基づく分解能より細かいために必要な条件に他ならない。表 1 に HS の主要仕様値を示す。今回の HS モデルの場合、被験者はホログラム乾板に顔を近づけ、乾板より遠く離れた位置に再生像を観察する事になる。この場合、回折による広がりを支配する要素ホログラム開口から被験者の眼までの距離はかなり短く、絶対的な広がり量が少なくなる。加えて観察される再生像までの距離は長いので、相対的に回折による再生像の解像度劣化を受け難い構成になる。尚、瞳孔径の値が変化しても、網膜上に結像する Fresnel 回折波の複素振幅分布の変化は非常に小さく、瞳孔径の差はほとんど

無視できる。

3. 実験条件

前記 HS 合成系仕様を基に、要素ホログラムの記録ピッチを変えて HS を合成し、多視点画像の視点数と視差の連続性を感応評価した。

あらかじめ幅 125 mm、高さ 100 mm の領域で、水平方向に 0.5 mm、垂直方向に 2 mm 間隔で、合計 12500 枚の原画像列を撮影した。要素ホログラムの記録ピッチに合わせて微小開口サイズを変え、事前に撮影した原画像列から記録する要素ホログラム位置に対応した位置で撮影した画像を選択して HS を合成した。合成した HS の記録ピッチを表 2 に示す。ところで人間の眼は水平方向に並んでおり、水平方向の移動に対して視差の〈とび〉を顕著に感じる。そこで水平方向に比べて垂直方向の要素ホログラム記録ピッチは粗く取った。合成したホログラム乾板は幅 125 mm、高さ約 40 mm で、全面にそれぞれの記録ピッチで要素ホログラムが露光されており、水平方向に移動できる十分な余裕が確保してある。HS の観察は周りの物体が視認される事による影響を排除するため、暗室内で行う。ホログラム乾板を治具に固定した上で被験者は椅子に腰掛け、ホログラム乾板から所定の距離だけ顔を離し、顔を左右に移動させて HS の再生像を観察する。治具その他を全て黒色の紙で覆うことで、被験者には空間上に浮かんだ HS の再生像のみが観察される。もちろん照明光は観察者の眼に入らないよう、off-axis の再生になっている。ホログラム乾板上には要素ホログラムの規則的に並んだ矩形開口が認められるが、観察条件に合わせて乾板に顔

表 1 HS 主要仕様値

再生像（被写体）サイズ	100 mm (W) × 80 mm (H) × 80 mm (D)
再生像奥行き中心から観察面までの距離	650 mm
ホログラム乾板から観察面までの距離	50 mm

を近づけて再生像を凝視すると、要素ホログラムの矩形開口模様は全く気にならない。観察される像は He-Ne レーザによる赤色単色の再生像である。

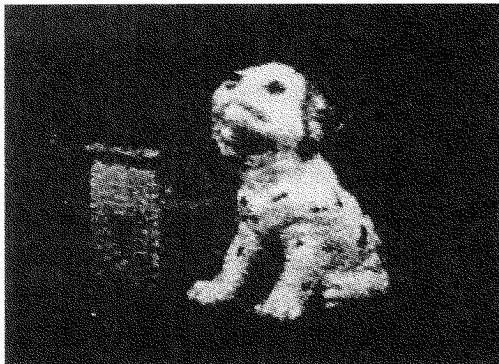
当初我々は、視差の連続性を確保するために必要な視点数を、次のような仮定を基に見積もっていた。再生される3次元像で、被験者に対し最も近い点と最も遠い点を考える。ある距離において被験者が再生像を見つめながら移動する時、隣り合う要素ホログラムから再生される画像におけるこれら対応点の幾何学的な位置ずれ量が、被験者の視力に基づく分解能以下であれば、被験者は再生像の<とび>を認識できないと仮定した。この条件は被験者が再生像の<とび>を、再生される立体像の対応点の<とび>として認識するものと仮定し、対応点の<とび>量が視力に基づく分解能以下となる幾何学的関係をモデル化したものに他ならない。この条件を基に求めた視差が連続するための多視点画像の視点

数、即ち要素ホログラムの記録ピッチは、視力 1.0 の被験者の場合 1.33 mm となり、視力値の高い被験者では更に細くなる。

図2に要素ホログラムの記録ピッチ 1 mm と 4 mm のHSによる再生像を、同じレンズの絞り径で撮影したものを示す。向かって右側に犬の置物、左側に斜めに机の玩具を配置してある。要素ホログラムの記録ピッチが大きいほど、HS合成系仕様で述べたディスプレイの多重像に基づく[解像度]が低下し、HS再生像自体の<解像度>が低下する。写真ではあまり差が目立たないが、4 mm ピッチで記録したHSの再生像は、斜めに置いた机の足の模様あたりに、わずかではあるが多重像に基づくぼけが発生している事が解る。実際の観察状況では、観察者の眼の瞳径は写真撮影時のカメラレンズの絞り径より小さいため、ぼけはこれほどには目立たない。机の足の模様部分のみを意識的に凝視して初めて、若干のぼけを認識できる程度である。これは今回合成した最大の要素ホログラム記録幅である 8 mm ピッチのものについても同様で、殊更意識して眺めなければ、静止状態で観察した再生像がどの記録ピッチで作成されたものかの判断は難しい。厳密な実験の目的からすると、本来実験に用いるサンプルの分解能が視力に基づく分解能より粗い事が見込まれる場合、HSの合成系仕様自体を再度検討し直し、奥行きの浅い3次元再生像で評価を行う

表2 HSの露光条件

水平方向ピッチ (mm)	垂直方向ピッチ (mm)
1	2
2	2
3	4
4	4
6	6
8	8



a)



b)

図2 合成した HSからの再生像。 a) 要素ホログラム水平方向記録ピッチ 1 mm, b) 要素ホログラム水平方向記録ピッチ 4 mm.

のが常道ではある。しかし奥行き深い再生像の方が像のとびが認識されやすいであろう事を考慮すると、これ以上奥行き浅い再生像で評価する事は避ける方が望ましい。加えて移動しながら物体を観察する動体視力の分解能は、通常の静止視力の分解能より劣っている。そこで合成したHSサンプルは、多視点画像ディスプレイにおいて観察者の移動に伴い観察される3次元再生像の視差の連続性について、〈とび〉を含まずに〈とび〉をなくするために必要な視点数の評価を行う目的には、十分に使用に堪えるものであると判断し、今回の実験ではHS合成系の仕様を変更することなく評価を行った。

4. 実験結果

合成した6種類のHSをそれぞれ10回ずつランダムな順番で計60回提示し、視差が連続して観察されるかどうかを感応評価した。被験者はHSの再生像を見つめながら顔を左右に移動し、移動に伴い観察される像の側面が、〈とび〉を感じることなく連続的に変化したかどうかを尋ねている。被験者は20代男性6名で、日頃からホログラムやHSによる再生像を見慣れている。なお、被験者には特に再生像の特定の位置に注目して、〈とび〉が感じられるかどうかを判断させるような指示は出しておらず、銘々が日頃ホログラムやHSを観察している経験に基づき、視差の連続性の判断を行っている。またホログラム乾板の交換時に、要素ホログラムの規則的に並んだ矩形開口等の手がかりにより、被験者にHSの種類が判明しないように配慮した。

作成したHSサンプルそれぞれに回折効率異なるため再生像の明るさが変化し、HSの種類によって被験者の瞳孔径も変化する。また被験者各人のもともとの瞳孔径の個人差も大きい。そこでこれらの影響を排除し、統一的な評価を行うため、次に定義する同時入射画像数で実験結果を評価した。

同時入射画像数 =

眼の入射瞳面積

観察面に投影された
要素ホログラム開口面積

全ての被験者について、6種類のHSそれぞれの観察時に赤外線フィルムで顔面の写真を撮影し、入射瞳径を実測する。再生像奥行き中心からホログラム乾板までの距離は600mm、ホログラム乾板から観察面までの距離は50mmとなっているので、観察面に投影された要素ホログラム開口面積は、元々の要素ホログラム面積を1.17倍した値である。

同時入射画像数の物理的イメージを図3に示す。多視点画像ディスプレイでは、それぞれ視差を含んだ画像を再生する光線束が眼の瞳で切り取られ、瞳の中に入射した画像が合成されて、眼の位置に対応した再生像を見る事ができる。同時入射画像数が1以上という事は、この眼で切り取られる画像が1つ以上、すなわち両眼とも常にいずれか隣り合う要素ホログラムからの画像が、同時にそれぞれの眼の瞳に入射している状態を示す。一方で同時入射画像数が1より小さい場合は、状況によっては左右それぞれの眼には記録時に投影された平面画像それぞれ1つずつのみが入射する場合が存在する。しかし左右で視差のある画像を観察する事になるため、再生像は両眼視差により立体像として認識される。なお、同時入射画像数を計算する場合の眼の入射瞳面積は、前述のようにHSの種類毎にそれぞれの被験者の実測値を用いているので、被験者の個人差、HSサンプル間の回折効率の差等の影響は排除される。

表3に実験結果を示す。連続にみえたと申告した回数を%で記入した。被験者のインシヤル横の数值は、各被験者の視力(含む矯正視力)を示している。この結果から見る限り、連続と認識する条件はほとんど被験者の視力値に関係せず、ほぼ一定の要素ホログラム記録ピッチの値で視差の連続性の値が100

%に達している。同じ要素ホログラムのサイズでも被験者毎の同時入射画像数が大幅に異なっているのは、被験者の入射瞳径の個人差が非常に大きいためである。定義から解るように同じ仕様のHSで同時入射画像数が少ない被験者ほど、入射瞳径が小さい事を表す。前述のように要素ホログラムの記録ピッチが粗いHSほど、非常にわずかとは言えくぼけに

よるくたびの補償効果も含まれている可能性もある。しかしながら全体を通して言える事は、同時入射画像数が1以上の値を示せば、間違いなく全員が視差が連続していると認識しているという事である。

5. 考察

得られた連続性認識の評価結果は、被験者

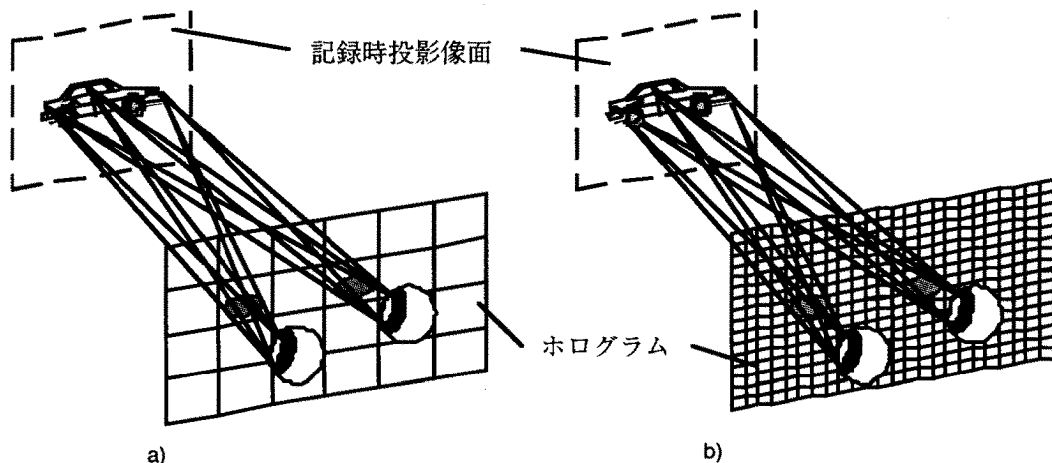


図3 同時入射画像数物理的イメージ。a) 同時入射画像数 < 1, b) 同時入射画像数 > 1.

表3 HSのサンプリングピッチの差に基づく視差の連続性評価実験結果

HS仕様	T.S. (1.0,1.0)		S.A. (0.9,0.9)		T.T. (1.5,1.5)	
	同時入射画像数	連続認識率	同時入射画像数	連続認識率	同時入射画像数	連続認識率
1×2	12.05	100	6.30	100	12.05	100
2×2	7.62	100	6.02	100	6.02	100
3×4	2.01	100	1.39	100	1.90	100
4×4	0.99	70	1.15	100	1.51	100
6×6	0.85	10	0.67	50	0.56	0
8×8	0.48	0	0.38	0	0.32	0

HS仕様	T.U. (1.2,1.2)		H.N. (1.0,1.0)		K.N. (0.1,0.1)	
	同時入射画像数	連続認識率	同時入射画像数	連続認識率	同時入射画像数	連続認識率
1×2	8.85	100	6.60	100	12.05	100
2×2	4.43	100	3.98	100	7.87	100
3×4	1.21	100	1.13	100	1.86	100
4×4	1.11	100	0.76	0	1.67	100
6×6	0.60	40	0.34	0	0.87	80
8×8	0.34	0	0.23	0	0.49	0

の視力にほとんど関係せず、各被験者の同時入射画像数が1を越す3~4mmの要素ホログラム記録ピッチで、視差の連続性が100%に達している。前述のように再生像を立体像として認識し、立体像の対応点の<とび>量が、視力1.0の眼の分解能以下の時に視差が連続して感じられると仮定したモデルでは、とびが認識されないされない要素ホログラムのサンプリングピッチは1.33mmとなり、実験結果とはずいぶん異なる。もともと

1) 被写体として用いた物体が、比較的曲面を多く含む物体であり、像の<とび>を比較的認識しにくい

2) 観察時の瞳孔からも分かるように、再生像があまり明るくないため視力が低下し、理論値を求める際仮定した視力1.0以下の可能性がある。

といった要因も含まれている事は考えられるが、それ以上に大きな隔りがある。したがってこの仮定モデルを観察される再生像の視差の連続性に当てはめるのは難しい。

今回の実験結果を見ると、現状得られるデバイスを用いた多視点画像ディスプレイで、像の<解像度>が視力に基づく分解能に等しい程度の範囲内に限られた奥行き3次元像を再生した場合、同時入射画像数が1以上の値、すなわち観察面での平面画像の視域幅が眼の瞳孔径以下となれば全員が視差が連続していると認識している。これは再生像を見つめながら移動する時、どのような状況でも両眼それぞれに隣り合う視差を含む平面画像の一部が同時に入射している事を表している。したがって左右それぞれの眼に対し、入射する平面像は常に連続的に変化する事となる。よって多視点画像ディスプレイにおいて、観察者の移動に合わせて再生像の観察される側面が<とび>を感じることなく連続的に変化するようにするためには、左右それぞれの眼に入射する平面画像が連続的に変化するような視点の細かさで画像を準備すればよいと言える。この結果は従来HSを作成する際、数

mm以下の記録ピッチで作成すれば、観察される再生像の視差の連続した自然な再生像が得られると経験的に言われてきた事と一致し、結果の妥当性が支持される。

一例として、今回被験者の多くが視差が連続すると認識した4×4mmピッチのHSと全く同様の再生像仕様を、一般的な多視点画像ディスプレイを用いて再生しようとした場合と、ホログラフィを用いて再生しようとした場合の、要求される標本点数を比較してみる。多視点画像ディスプレイとしてHSその物の標本点数と比較しないのは、HSは要素ホログラムの記録自体はホログラフィの技術を用いて行うため、参照光を入射する分だけホログラム面上の空間周波数が高くなり、必要となる標本点数が増大するためである。一般的な多視点画像ディスプレイの場合、水平・垂直両方向に視差を持ち、観察者の移動に伴い連続した視差を再現させるために必要な標本点数はおおよそ 7×10^7 となる。一方でフルパララックスホログラムによる再生の場合、必要となる標本点数はおおよそ 5×10^8 となる。ホログラフィには焦点調節と輻輳が一致するなど優れた特性が存在するので、情報量の削減効果だけで優劣を述べることはできない。しかし観察者の移動に伴う再生像の視差の連続性のみを考慮した場合、多視点画像ディスプレイの方が標本点数が2桁ほど低くなり、大幅な情報量削減につながる。

6. むすび

多視点画像を用いた3次元ディスプレイにおいて、HSをモデルに、観察者の移動に伴い再生像の観察される側面が連続して変化する条件を検討した。視差の連続性を支配するのは、再生される立体像の対応点が空間的に連続して移動する事より、むしろそれぞれの瞳の中に入射する平面画像が連続している事が重要であり、観察面での各画像の視域が瞳孔径より小さい事が重要である。観察者の移動に伴い観察される像の視差の連続性のみに着

目した場合，多視点画像ディスプレイを用いることは，ホログラフィに比べると大幅な情報量削減につながる。

最後に本研究を進めるにあたり，熱心な議論と有益な助言を頂いた日本大学の吉川助教授，通信・放送機構の梶木研究員，実験にご協力頂いた被験者各位に感謝致します。

文 献

- 1) Y. Kajiki, H. Yoshikawa, T. Honda: Three-dimensional display with focused light array. *S. A. Benton (Ed): Practical Holography X, Proceedings of SPIE*, 2652, 106-116, 1996.
- 2) K. Matsumoto and T. Honda: Research of 3-D display using the anamorphic optics. *S. S. Fisher and J. O. Merritt (Eds): Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IV, Proceedings of SPIE*, 3012, 199-207, 1997.
- 3) T. Yatagai: Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms. *Applied Optics*, 15, 2722-2729, 1976.
- 4) C. B. Burckhardt: Optimum parameters and resolution limitation of integral photography. *Journal of the Optical Society of America*, 58, 71-76, 1968.
- 5) 大越孝敬：三次元画像工学。産業図書，1972.
- 6) M. W. Halle: Holographic stereograms as discrete imaging systems. *S. A. Benton (Ed): Practical Holography VIII, Proceedings of SPIE*, 2176, 73-84, 1994.
- 7) P. St Hilaire: Modulation transfer function and optimum sampling of holographic stereograms. *Applied Optics*, 33, 768-774, 1994.
- 8) P. St Hilaire: Optimum sampling parameters for generalized holographic stereograms. *S. A. Benton (Ed): Practical Holography XI, Proceedings of SPIE*, 3011, 96-104, 1997.