

論文 自然な観察を目指した 3次元動画像表示*

For the Fatigue-free Viewing on 3D Displays

深谷直樹
Naoki FUKAYA

小倉久忠
Hisatada OGURA

阿部真也
Shinya ABE

本田捷夫
Toshio HONDA

For the fatigue-free viewing, 3D displays are required to reconstruct the flipping-free image, which can elicit the accommodation harmonized with the convergence. Electro-Holographic display and Multi-Perspective display have an ability to satisfy such conditions. Considering from the sampling rate of the image information, Electro-Holographic display is considered as the one of the Multi-Perspective display that has extreme continuous parallax. This paper gives the result of our efforts to get rid of the flipping, and elicit the blur between the images of the different depth, reconstructed by Multi-Perspective-Views.

Experimental results suggest that more number of the Multi-Perspective-Views, which are surely incident to the observers' eyes simultaneously, are required to elicit the blur than to get rid of the flipping. In addition, more the subtle difference of the image depth is reconstructed, the greater the increase in the required number of Multi-Perspective-Views as a logarithm becomes.

Key Words : Electro-Holographic Display, Multi-Perspective Display, Flipping-free Image, Elicitation of the Blur, Number of the Multi-Perspective-Views

1. はじめに

近年の立体動画像ディスプレイの目覚ましい発展、普及に伴い、より自然な3次元像を、疲労感を感じることなく観察できる立体動画像ディスプレイの出現が望まれている。というのもこれら立体動画像ディスプレイの多くは、2枚の視差を含んだ画像を左右の眼に入射させて、両眼視差を利用して立体感を得ているもので、観察者が移動しても移動した側面の像を観察できないという問題がある。また眼の調節と輻輳に矛盾を生じ、再生される立体像によっては比較的短時間の観察でも疲労感が発生する。

この問題に対し2つのアプローチが試みられようとしている。一つはホログラフィ技術を用いた3次元動画像ディスプレイである。ホログラフィはあたかもそこに空間的に像が実在しているかのように、必要な波面の光学的情報がすべて再生される。従って、眼の調節と輻輳の矛盾を生じない究極の表示方式としての期待が高い。しかしながら、これを動画像ディスプレイに応用するとすると、高密度、高速応答の空間光変調素子が必要となり、近年の空間光変調器の発展に支えられて、ようやく本格的な研究が始まったばかりである。

もう一つのアプローチは、視差を含んだ多視点画像を用いた3次元動画像ディスプレイ(以下、多視点画像ディスプレイと呼ぶ)で視点数を大幅に増やし、観察

* 三次元映像のフォーラムの了解を得て、3D映像誌 Vol.12, No.4(1998.12)より一部加筆して転載

者の移動に合わせて観察される再生像の側面が、<とび>を生じることなく連続的に変化するようにしようとする試みである。以下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。この方法では更に画像数を増やすことで、片眼でも単眼内に生じる視差により、輻輳角に対応する位置に物体の奥行きを認識できる(調節を誘導できる)可能性がある。

調節は眼球の水晶体を変形させて網膜上に鮮明な像を結像させる機能である。我々は実物体に眼の調節を合わせる場合、物体からあらゆる方向に連続的に散乱する光線を眼の瞳で切り取り、網膜上で一つの像として結像させている。ホログラフィはこの散乱する光線を連続的に記録・再生したもので、多視点画像ディスプレイは散乱する光線を離散的にサンプル・再生したものである(従って多視点画像ディスプレイの方が、要求される情報量が少ない)と見なすことができる。

ところで散乱する光線が離散的にサンプルされたものであっても、すなわち多視点画像による離散的な光線の再生であっても、サンプリングが細かければ網膜上で一つの像として結像させる調節機能が働く可能性がある。多視点画像ディスプレイは視差を含んだ複数画像を同時に被験者の片眼の瞳に入射させる方式で、本来光学的には多重像が観察される。しかし調節には

自分の意志で可能な成分もあり，多重像が観察されるとき，それが最良の像として観察されるようにコントロール可能な人もいる．

もし複数の被験者がほぼ同じ傾向で，比較的容易に多重像が最良の像として観察されるようなコントロールを行える条件が存在するならば，多視点画像ディスプレイで調節を機能させられる可能性は十分にあると考えられる．多視点画像ディスプレイで視差が連続し，焦点調節を誘導できる 3 次元像が再生できれば，それより多い情報量を持つ動画ホログラフィ方式でも，当然この条件を満たした 3 次元像が再生できることが期待できる．

そこで今回，多視点画像ディスプレイで観察者の移動に際して観察される再生像の側面が連続的に変化するために，また輻輳位置に多重像による単眼の調節を誘導できるように必要となる，入力画像のサンプリング条件を明確化する基礎実験を行ったので報告する．

2. 再生像の視差の連続性について¹⁾

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ては，既にBurckhardt²⁾ や大越³⁾，Halle⁴⁾，St. Hilaire^{5), 6)} 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する 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．ここでは<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った．多視点画像ディスプレイとしてホログラフィックステレオグラム(Holographic Stereogram 以下HSと記す)を用い，視点数を変えた複数サンプルを準備した．

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

(記録された一つひとつの微小ホログラムを要素ホログラムと呼ぶ)を変えることで，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．これら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．その上で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．Table 1にHSの主要仕様値を示す．

2.1 実験条件

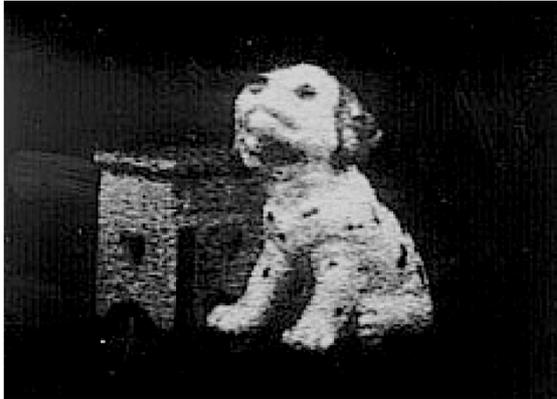
前記HS合成系仕様を基に，要素ホログラムの記録ピッチを変えてHSを合成し，多視点画像の視点数と視差の連続性を感応評価した．合成したHSの記録ピッチをTable 2に示す．人間の眼は水平方向に並んでいるため，水平方向の移動に対して視差の<とび>を顕著に感じる．そこで水平方向に比べて垂直方向の要素ホログラム記録ピッチは粗く取った．合成したホログラム乾板は幅 125 mm，高さ 約 40 mm で，全面にそれぞれの記録ピッチで要素ホログラムが露光されており，水平方向に移動できる十分な余裕が確保してあ

Table 2 Exposure conditions of the Holographic Stereograms

Horizontal pitch (mm)	Vertical pitch (mm)
1	2
2	2
3	4
4	4
6	6
8	8

Table 1 Specifications of the Holographic Stereograms

Image size	100mm(W) × 80mm × 80mm(D)
Distance from the center of the image depth to the viewing plane	650mm
Distance from the Hologram Plate to the viewing plane	50mm



a) Horizontal Pitch : 1mm



b) Horizontal Pitch : 4mm

Fig. 1 Reconstructed Image of the experimental Holographic Stereograms

る。

HSの観察は周りの物体が視認されること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。治具その他をすべ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。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。Fig.1に要素ホログラムの記録ピッチ1mmと4mm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ものほど、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。

2.2 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。

作成したHSサンプルそれぞれに回折効率が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。また被験者各人の元々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 =

$$\frac{\text{眼の入射瞳面積}}{\text{観察面に投影された要素ホログラム開口面積}}$$

すべ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、入射瞳孔径を実測する。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Fig.2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ことができる。同時入射画像数が1以上ということは、この眼で切り取られる画像が一つ以上、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一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ことになるため、再生像は両眼視差により立体像として認識される。

Table 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。被験者のイニシャル横の数字

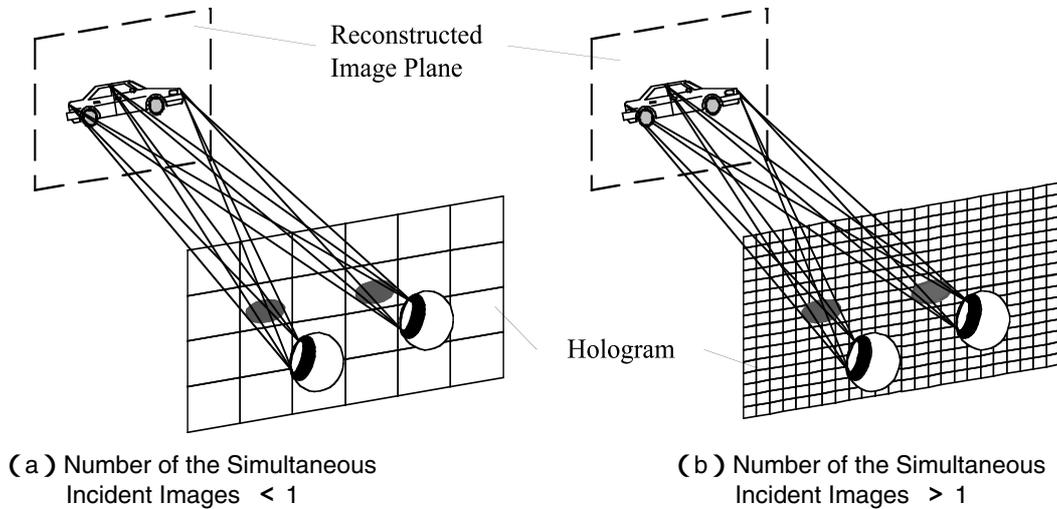


Fig. 2 Concept of the Simultaneous Incident Images

Table 3 Experimental results of the recognition as Flipping-Free on Holographic Stereograms

Specifications of the HS	T.S. (1.0,1.0)		S.A. (0.9,0.9)		T.T. (1.5,1.5)	
	SII No.	FFR	SII No.	FFR	SII No.	FFR
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

Specifications of the HS	T.U. (1.2,1.2)		H.N. (1.0,1.0)		K.N. (0.1,0.1)	
	SII No.	FFR	SII No.	FFR	SII No.	FFR
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

SII No. : Number of the Simultaneous Incident Images
 FFR : Rate of the recognition as Flipping-Free

値は、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ごと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。定義から分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、入射瞳径が小さいことを表す。視力値、入射瞳径の個人差に関係なく、同時入射画像数が1以上の値を示せば、全員が視差が連続していると認識している。

2.3 考察

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とき、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ことを表しており、左右それぞれの眼に対し、入射する平面画像は常に連続的に変化することとなる。従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ことと一致し、結果の妥当性が支持される。

3.奥行き異なる物体間でのぼけの誘導について⁷⁾

3.1 輻輳位置に多重像による調節を誘導するための多視点画像ディスプレイ構成

多重像による調節を誘導するため、ディスプレイに要求される仕様をFig.3に模式的に示す。今仮にディスプレイ面上の4点 $a_{L1,2}, a_{R1,2}$ から方向性を持った光線が射出し、空間上の1点Aで交差した後そのまま直進し、眼の瞳に入射するものとする。同様にディスプレイ面上の4点 $b_{L1,2}, b_{R1,2}$ から延長線が空間上の1点Bで交差するような光線が出射した後、眼の瞳に入射するものとする。説明の都合上、片眼の瞳に入射する光線の本数はそれぞれ2本としているが、調節を誘導するためにはもっと数多くの光線本数が必要となるであろうことは、容易に想像される。眼の瞳に入射した光線は、水晶体の屈折力に応じた位置で交わるように、光線の進行方向が変化する。眼が効果的な調節を行っていない場合、左右それぞれの眼の網膜上には4つの点となって映る。

もし眼が点Aで交差する光線が網膜の中心窩の位置

で交わるような調節を行った場合、点Aの像は1点に結像(A_L', A_R')し、点Bで交差する光線は網膜より水晶体側の位置で交わり(B_L', B_R')、網膜上では2点に分離する。加えてこの場合、両眼の視軸の向きは空間上の交差点Aで交わることとなり、輻輳位置は点Aとなるため、輻輳位置と調節位置が一致する。

これまで点として議論した内容は、像に置き換えても成立する。空間上の位置A,Bで交差する光線群としての像が、眼の瞳に入射する。眼が効果的な調節を行っていない場合、2種類の二重像が網膜上に映る。眼が交差位置Aの二重像が中心窩で一つに重なるような調節を行う場合、両眼の輻輳位置は空間上の位置Aとなり、交差位置Bの像はやはり二重像として網膜上に映る。そしてやはり同様に、輻輳位置はAの位置となり、輻輳位置と調節位置が一致する。

すなわち輻輳位置に多重像が一つに重なるような調節を誘導できる多視点画像ディスプレイは、光線の進行方向を選択・制御できる機能を有し、かつ眼の瞳内に複数の光線を入射させられるように、非常に細かいピッチで並んだ光源要素を持つ構成であることが要求される。ここで光線の進行方向を選択・制御することは物体の視差を再現することに他ならない。

また光源要素のピッチが細かいことは眼の瞳内に同時に複数画像が入射することに他ならない。従って輻輳と多重像による調節が一致した多視点画像3次元ディスプレイは、瞳内に光線の方向を保存した視差を含んだ複数画像を同時入射させることができるディスプレイであるといえる。

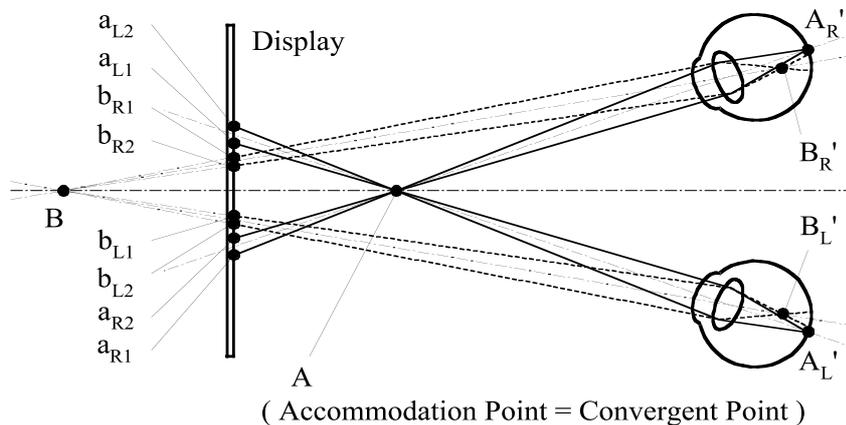


Fig. 3 Principle of the elicitation of the accommodation point to the convergent point

3.2 多重像によるぼけを発生させるために十分な画像数の検討

これまで述べたよう、定性的には眼の瞳に光線の方向を保存した複数の視差を含んだ画像を同時に入射してやることで、多重像による調節が誘導できる可能性が存在する。そこで次のような実験を行い、片眼の瞳に視差を含んだ画像を複数同時入射させ、多重像により奥行き異なる像にぼけの発生する条件を求めた。Fig.4は実験系を模式的に示したものである。

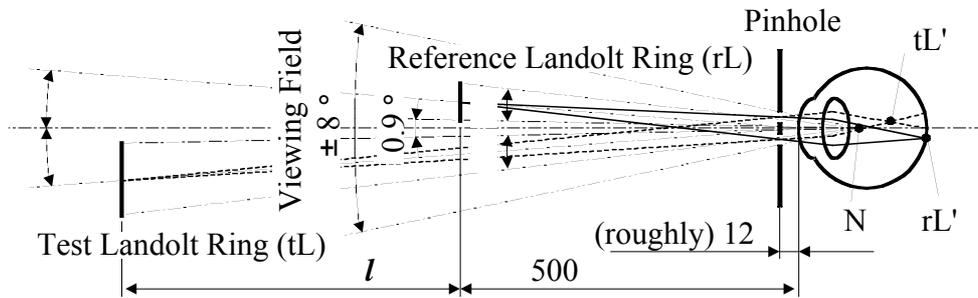


Fig. 4 Experimental system of the elicitation of the blur between the images of the different depth, reconstructed by Multi-Perspective-Views

被験者の眼から 500mm の位置に、基準とするランドルト環を設置する。基準ランドルト環から 1 離れた位置にテストランドルト環を設置する。互いのランドルト環は見かけ上のサイズが等しくなるように、互いの視角(Fig.4中)を等しくする。ランドルト環は 1 枚の台紙に一つのみ記され、基準ランドルト環、テストランドルト環ともに各試行ごとに台紙ごと取り替える。

被験者はFig.5に示すマトリックス状に配置したピンホールを通して 2 つの視標を単眼で観視し、他方の眼は遮光する。ピンホール前面に遮光用のマスクをかけ、光線が透過するピンホールの穴の数を変化させる。ピンホール数が最大 9 個のときでマトリックスの対角は約 3.9 mm であり、ピンホールを透過した光線はすべて片眼の入射瞳を透過する。

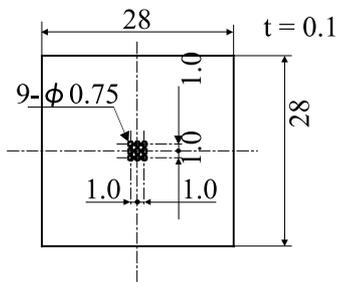


Fig. 5 Specifications of the Pinhole Plate

被験者は 2 つの視標を同時に観視できるよう、ピンホールを通して観視される二つの視標が視野を等分するように、すなわち照準線が二つの視標間隔の中点(Fig.4中)を通るようにして観視する。二つの視標の間隔は、ランドルト環外周間隔が視角約 0.9 となっている。実際の実験系ではピンホールを通した視野は約 $\pm 8^\circ$ であり、2 つの視標を含む台紙全体を十分同時に観視できるとともに、情報受容特性で分類すると、瞬時に情報受容が可能な傍中心視である有効視野の範囲内にある⁸⁾。

それぞれの視標は観視位置から見たとき、視標表面の輝度が等しくなるように照明する。ピンホール数に関係せずピンホール板透過後の光束が等しくなるように、ピンホール個数に応じてNDフィルタをピンホール直前に設置し、見かけの明るさが変化しないようにする。ランドルト環を記した台紙のサイズは、視角が縦横それぞれ 6.8° で統一され、すべての距離において見かけのサイズが等しくなっている。またランドルト環のサイズに対して上下に十分な余裕があり、ピンホールを通して観視すると視野の大半は台紙が占め、全体が白い背景の中央に 2 つのサイズが等しく適当な方向に切れ目を持つランドルト環が並んでいるように見える。ちなみに基準視標の視標面照度は約 3200 lx であるが、ピンホール及びNDフィルタを通しての観視となるため瞳に入射する光束は少なくなり、この実験系での視力値はほぼ通常の視力検査における各人の視力値と等しい程度の値となった。

ピンホールはアイパッドに固定され、眼をアイパッドに押し付けた場合の距離は、眼前およそ 12mm となる。この間隔ではピンホールの回折によるぼけを感じることなく、指標を観視することができる。ピンホール径が十分小さいため、ピンホール数が 1 個のときは焦点深度が非常に深くなる。このため後述の実験条件

における最大視標間距離においても、基準視標とテスト視標は同時に鮮明に観視できる。つまり焦点を合わせるための要因が全くない、2次元平面画像であるとみなすことができる。

位置のずれた複数のピンホールを透過した各平面画像は、それぞれの位置のずれに合わせた視差を含み、ピンホールの個数を変えることで同時に瞳に入射する視差を含んだ平面画像の数を変化させられる。

被験者は常に基準ランドルト環が最良の像になるように意識的にコントロールした状況下で、同時に観視されるテストランドルト環の向きを報告してもらう。まずピンホール数1個の状態での通常の視力検査と同じように、視力値の低い方から始めて各人の視認できる上限(最小のランドルト環サイズ)の基準視力値を測定する。各視力値に対し4回の試行を行い、正当率75%以上となった視標条件をもって視力値を定義した。

次にピンホール個数を2個にし、今度は各人の基準視力より1ランク高い視力値(例えばある被験者の基準視力が1.0であったら1.2)から測定を開始し、順次視標の視力値を下げて正当率が100%になるまで測定を行う。以降同様に、順次視標の視力値を下げていく方法で、ピンホール数9個までの測定を行う。

ピンホール数1個の場合、前述のように被験者は二つの実際には奥行き異なる視標を鮮明に観視できる。ピンホール個数を増すに連れ、本来多重像である視標に対し、基準ランドルト環が最良の像となるように意識的にコントロールしている(Fig.4中 rL')ので、その分距離の離れたテストランドルト環の像(Fig.4中 tL')は認識が困難になり、視力値が低下することが確認できた。

光学的には本来、テストランドルト環は多重像として認識されるはずである。しかしピンホール板に対して正しく顔を位置合わせし、視差を含んだ複数画像が偏りなく瞳に入射するようにすると、互いの円環が折り重なって明確に分離できず、輪郭が不明瞭になる。このため、視覚的にはただのぼけとしてしか認識されない。これらの結果は、多重像により調節が機能している可能性を示唆していると考えられる。なお、開けてあるピンホールの配列方向の規則性の影響を避けるため、ランドルト環はすべて斜めの方向に切れ目を持つものを使用した。

以上、ピンホール個数、すなわち同時に瞳に入射する視差を含んだ画像数に対する視力値の測定実験を、

Table 4に示す5種類の基準視標とテスト視標の間隔 l について、繰り返し試行した。

Table 4 Experimental conditions

Distance from the Reference Landolt Ring l (mm)	250, 500, 750, 1000, 1250 (+0.67D, +1D, +1.2D, +1.33D, +1.43D)
---	---

3.3 実験結果

Fig.6に、基準視標とテスト視標の間隔250mmのときの、ピンホール個数と視力値の測定結果を示す。被験者は裸眼、若しくはコンタクトレンズによる補正により、視力が正常な20代男女計4名を選んだ。Fig.6の各被験者のイニシャル横の数値は、各人のピンホール1個の状態での基準視力を示す。各人の元々の視力値のばらつきを排除するため、ピンホール個数1個のときのテスト視標の視力値を100%に規格化した。

若干のばらつきはあるが、ピンホール個数が6個から7個になったとき、大幅な視力低下が発生していることが分かる。視標間隔250mmの場合、視差を含んだ同時入射画像数6~7個が、多重像が最良の像となるようなコントロールにより、離れた位置の像がぼけて認識できなくなる顕著な効果が現れる臨界点であるとみなすことができる。

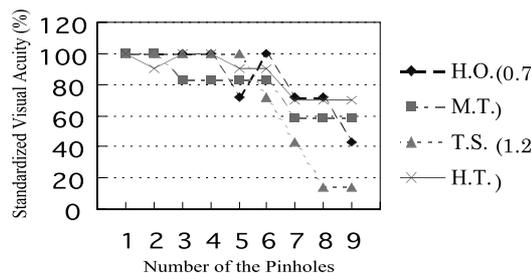


Fig. 6 Experimental results of the relation between the number of pinholes and the standardized visual acuity

なお、ピンホールの個数が増えるに連れ、ぼけによる視力低下が顕著になるのと同様、多重像である基準視標が最良の像として観察されるようなコントロールが、無理なく自然に行えるようになる。他の視標間距離における実験においても、4名の測定結果がほぼ一致した画像数で大幅な視力低下が起きている。すなわち各視標間距離において、多重像により異なる奥行き像にぼけが発生する臨界点が存在することを示している。

Fig.7は今回の実験結果をまとめたもので、視標間距離 l と、多重像によりぼけが発生する臨界点に対

応するピンホール個数の関係を示している。換言すると、多視点画像で構成された基準距離の多重像が最良の像となるようなコントロールが容易に働き、かつ実空間で観視するときのようにそこから離れた距離にある物体がぼけて見えるために十分な、片眼に同時に入射する視差を含んだ画像数を表している。

縦軸のピンホール個数は、各視標間距離のFig.6に対応するグラフにおいて、各被験者の視力値が80%を横切る際のピンホール個数、すなわち多重像が最良の像となるためのコントロールが容易に働き、離れた位置の像がぼけて認識できなくなる顕著な効果が現れる視差を含む同時入射画像数をグラフから読み取り、4人の被験者の平均を取ったものである。点線が測定値をそのまま結んだ折れ線、実線は対数近似した曲線を示しており、両者がかなり一致していることが分る。

縦軸を対数に取った片対数のグラフでは、対数近似した曲線がほぼ直線となる。なお、視標間距離が増加するにつれ、多重像によりぼけが発生するために十分な瞳への同時入射画像数が減少しているが、多重像である基準視標が最良の像として観察されるようなコントロールも、視標間距離の増加に合わせて少ない入射画像数でも容易に行えるようになる。

3.4 考察

今回の実験は、将来、多重像を用いて奥行きのある像にぼけを発生させられるような、多視点画像ディスプレイをシステム化することを前提とし、この場合に必要な片眼に同時に入射させる視差を含んだ画像数を評価することを目的とした実験である。実際のシステムで、瞳内に光線の方向を保存した視差を含んだ複数画像を同時入射させることを考えた場合、ディスプレイシステム化の容易さ、表示データ処理の容易さ等から、ディスプレイ要素はマトリックス状に並べる方

が都合良い。

そこで本実験でも、ピンホールはマトリックス状に配置した。加えてピンホール個数3個までの測定では、ピンホールは横1列に開いた状態で測定を行っている。ランドルト環として斜め方向に開いたものを用いているとはいえ、横1列に並んだピンホールがぼけの度合いに影響を及ぼすことは十分考えられる。

また前述のように、視標間距離が短くかつピンホール個数の少ないうちは、多重像である基準ランドルト環が最良の像となるようなコントロールを行うのに、被験者はそれなりに努力を要し、不自然な緊張を強いられる。視野の中で同時に観察されるとはいえ、テストランドルト環の向きを読み取るのに、無意識のうちにテストランドルト環が読み取れるようなコントロールが行われてしまう可能性もある。従って視標間距離が短く、ピンホール個数が少ない範囲のデータの信頼性は、疑問が残る点がある。

ただし、前述のように、本実験はシステム化を目指した場合の評価であり、視標間距離が近くてもピンホール個数が十分多いとき、またはピンホール個数は少なくても視標間距離が遠いときは、多重像によりぼけが顕著に現れる臨界点がすべての被験者でほぼ同じ値を示す。また多重像が最良の像となるコントロールも比較的容易に行えるという結果が得られている。

すなわち、本実験結果は観察者が見たいと思う像が最良の像となるようなコントロールが容易に行え、そこから離れた位置にある像が明らかにぼけてみえるために、片眼の瞳に同時に入射する視差を含んだ画像数の十分条件を示している。換言するならばここで示された値は、誰もが多重像を最良の像として観察できるコントロールを誘導するために必要な、絶対数を示したものである。

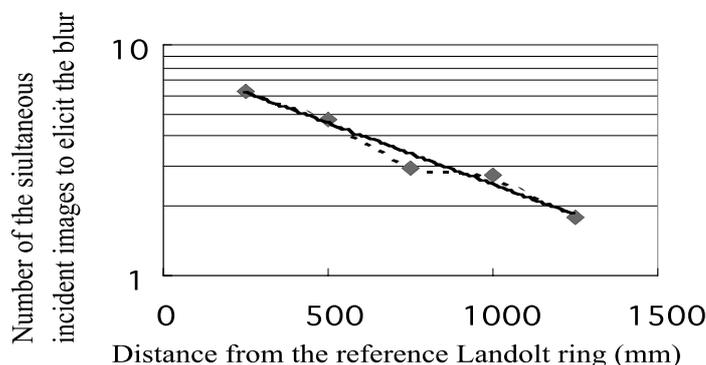


Fig. 7 Experimental results of the relation between the distance of the Landolt rings and the number of the simultaneous incident images to elicit the blur by Multi-Perspective-Views

今回の実験では視標間距離が増大すると、多重像が最良の像として観察されるためのコントロールが容易に働くために十分な、片眼に同時に瞳に入射させる視差を含んだ画像の要求数は減少するという結果になった。多重像による調節が発生しているとするなら、視標間距離が広くなれば、Fig.4の l が大きくなる。これはピンホールを透過し、眼の瞳に入射した光線の結像点 lL' が、より一層水晶体に近付くことを意味する。 lL' が水晶体に近づけばその先網膜までの距離が長くなり、網膜上における光線の分布範囲が広がるため、一つの像として認識が困難となる。すなわち視標間距離が広くなれば少ない情報量でも視力値の低下として現れやすく、実験結果の傾向が支持される。

今回の実験では実際に焦点調節反応自体の計測は行っていない。ところで融像性の輻輳刺激のみを与えても焦点調節が引き起こされる(輻輳性調節)ことは広く知られている。従って今回の結果を踏まえた多視点画像ディスプレイを構築すれば、単眼での多重像により誘導される(可能性を持つ)調節と、両眼での輻輳に誘導された調節の位置が一致し、より自然に近い観視ができるであろうことが推測される。

4. まとめ

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ことより、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ことが重要であり、観察面での各画像の視域が瞳孔径より小さいことが重要である。

また、多視点画像ディスプレイの原理である片眼の瞳の中に光線の方向を保存した視差を含んだ複数画像を同時入射させることで、比較的容易に多重像が最良の像となるようなコントロールが行え、そこから離れた位置にある像がぼけて観察されることを、複数の被験者を用いた視力値の低下により検証した。これは多視点画像を用いた3次元ディスプレイで調節が誘導できる可能性を示していると考えられ、輻輳と多重像による単眼の調節位置が一致し、実空間と同じように奥行き離れた物体程ぼけて観察される現象を再現できる可能性が存在することを示している。

多視点画像ディスプレイでは、多重像を最良の像として観察するようなコントロールを行った像の近くに

位置する像ほど、ぼけて観察されるための十分条件を満たす同時に瞳に入射する視差を含んだ画像数は、ほぼ対数的に増大する。

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、千葉大学の塩入助教授、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。

<参考文献>

- 1) 深谷直樹, 小倉久忠, 本田捷夫: “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”, VISION, Vol.10, No.1(1998), p.1.
- 2) C. B. Burckhardt: “Optimum Parameters and Resolution Limitation of Integral Photography”, Journal of the Optical Society of America, 58(1), Jan.(1968), p.71.
- 3) 大越孝敬: 三次元画像工学, 第4章, 産業図書(1972).
- 4) M. W. Halle: “Holographic stereograms as discrete imaging systems”, Practical Holography VIII, S. A. Benton, Ed., Proceedings of SPIE 217(1994), p.73.
- 5) P. St Hilaire: “Modulation transfer function and optimum sampling of holographic stereograms”. Applied Optics, 33(5), Feb(1994), p.768.
- 6) P. St Hilaire: “OPTIMUM SAMPLING PARAMETERS FOR GENERALIZED HOLOGRAPHIC STEREOGRAMS”, Practical Holography XI, S. A. Benton, Ed., Proceedings of SPIE 3011(1997), p.96.
- 7) 深谷直樹, 阿部真也, 本田捷夫: “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 奥行き異なる物体間でのぼけの誘導について”, VISION, Vol.10, No.1(1998), p.11.
- 8) 畑田豊彦: “人はどのように立体視しているか?”. OPTRONICS, 12(1993), p.47.



< 著 者 >



深谷 直樹
(ふかや なおき)

基礎研究所 第4研究
生体信号解析の技術開発に従事。
工学博士



阿部 真也
(あべ しんや)

(原著発表時)千葉大学大学院自然
科学研究科像科学専攻
立体画像観察時の調節・輻輳反応
の同時測定の研究に従事。
現在, 日本IBM



小倉 久忠
(おぐら ひさただ)

(原著発表時)千葉大学大学院自然
科学研究科像科学専攻
立体像観察時の視差の連続性の研
究に従事。
現在, 京セラ株式会社



本田 捷夫
(ほんだ としお)

千葉大学工学部
情報画像工学科教授
工学博士
立体像表示, 光・画像計測, 画像
処理の研究に従事。