

# 全方向球面ディスプレイにおける立体映像の生成

橋本 渉\*1 高柳道寛\*2 岩田洋夫\*2

## A rendering method of stereoscopic image with Spherical Immersive Display

Wataru Hashimoto\*1 Michihiro Takayanagi\*2 and Hiroo Iwata\*2

**Abstract** – This paper reports about omni-directional stereoscopic images on a spherical immersive display. The display has an advantage that the direction of binocular disparity is constant. We examined basic performance of stereoscopic viewing of this display. Then we implemented and examined the method which enables us to generate stereo images without tracking of viewer's direction.

**Keywords** : Immersive Projection Technology, Stereoscopic Image, Distortion Correction

### 1. はじめに

人間の周囲を映像で覆ってしまうことで没入感を与える装置は、没入型ディスプレイとよばれる。このディスプレイは、人間の中心視野のみならず周辺視野にも映像を呈示することができるため、高臨場感表示はもちろん、人間に情報を伝達するという点からも高い能力を有している。最近では、シミュレータやアミューズメントといった臨場感重視の応用だけでなく、シミュレーション結果の表示解析や可視化表示などにも利用され、その広視野による情報呈示の有用性について議論されている。

一方、没入型ディスプレイの応用に関する研究だけでなく、装置そのものの模索も続けられてきた。没入型ディスプレイ装置は、一般に呈示画角に比例して大型となるため、この設置コストは利用者側の切実な問題である。また大型の没入型ディスプレイでは、装置の構成上、平面スクリーンの組み合わせによるところが大きく、人間が周囲を見まわす場合には映像の不自然さを禁じ得ない。見回し動作を考慮するならば、眼球の調整系より呈示面が曲面や球面となるのが理想的である。こうした背景より、小型の容積で曲面に映像を呈示できるようなディスプレイ技術が模索されつつある。例えば、LED アレイを人間の周囲で高速回転させ、その残像によって映像を呈示する仕組みの TWISTER<sup>[1]</sup> や、小型のドームスクリーンに魚眼レンズで投影する VisionStation などである。全方向球面ディスプレイ<sup>[2]</sup> もその一つで、プロジェクタ映像を凸面鏡の反射によって球殻内部に反射させる技術を用いており、人間の周囲 360 度にシームレス映像を投

影することが可能である。

本研究は、この全方向球面ディスプレイにおいて立体映像を表示することを目標としている。立体視可能な球面ディスプレイのハードウェアについては、すでに<sup>[3]</sup>で報告したとおりであるが、本稿では実際に立体映像の呈示を試みたので、その基本呈示性能について報告する。さらにこの球面ディスプレイでは、頭部をロール角に傾けない限り視差の方向や大きさがほぼ一定となる。このことより頭部運動測定を用いない立体表示を試み、その問題を明らかにする。

### 2. 立体視可能な全方向球面ディスプレイ

#### 2.1 全方向球面ディスプレイ

全方向球面ディスプレイの基本構成は、プロジェクタ映像を平面鏡で折り返し、凸面鏡で拡散反射させたあと、球面スクリーンに投影される仕組みとなっている(図1)。

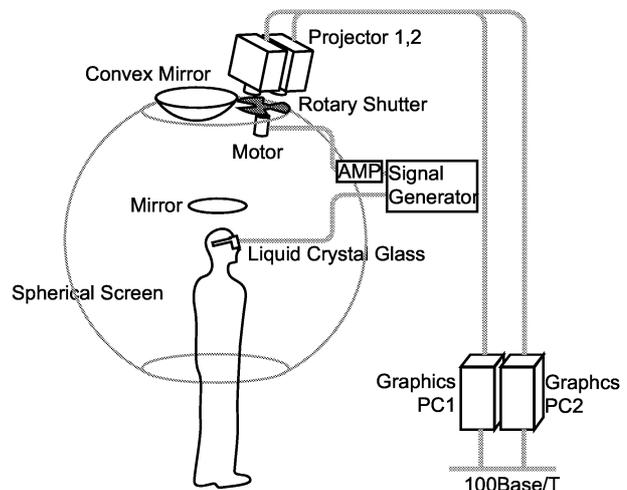


図1 立体視可能な全方向球面ディスプレイ  
Fig.1 Surrounded Spherical Immersive Display with Stereoscopic View

\*1: 大阪工業大学

\*2: 筑波大学

\*1: Osaka Institute of Technology

\*2: University of Tsukuba

### (a) スクリーン

球面スクリーンの内径は2.1[m]で、北極部と南極部を除いた垂直画角は中心より仰角60度、俯角65度である。スクリーンの材質は発泡スチロールの削り出しによるもので、8分割のパーツから構成されている。映像の投影面となる内側には、光線の反射によるコントラストの低下をおさえるため発砲剤を塗布してある。球面スクリーンの曲率中心は床面よりおよそ1.7[m]で、装置の高さは3.3[m]、占有面積は2.4[m] × 2.28[m]である。

### (b) 反射鏡

映像を反射するために、アクリル製の平面鏡と曲率半径359[mm]の球面凸面鏡が配置されている。平面鏡は投影光を反対側に折り曲げるため、観察者の頭上に天吊にされている。天吊には細いワイヤーを使用しているが、これは映像との干渉を最小にするためである。

プロジェクタ映像の画素を無駄にせず、フォーカスの合った状態で投影できるような配置を作り出すのは難しい。このため、バーチャルプロジェクタ<sup>[4]</sup>と呼ばれる、映像の反射をシミュレーションする専用のプログラムを使用し、その結果に基づいて反射鏡やスクリーン、プロジェクタが配置されている。

### (c) プロジェクタ

両眼視用に2台のプロジェクタ(DLA-G10)を並べて配置している。各プロジェクタにはそれぞれ映像生成用のPCが接続されており、それらのPCは100Base-TのTCP/IPによる通信で同期をとっている。なお、後述する歪み補正の処理速度と比較すると、通信速度は無視できるほど小さく、ほぼ同時に所定の映像が呈示されるものと考えて良い。

両眼用の映像は、プロジェクタのレンズ面付近にある回転式のシャッタによって、開放・遮断の制御がおこなわれる。モータの回転と同期した制御信号を、液晶シャッタに有線で送信することにより、時分割方式の両眼立体視を実現している。シャッタリング速度は最大で90Hzで、これは画像のちらつきを感じさせない程度である。

## 2.2 歪み補正

プロジェクタ映像を曲面にそのまま投影すると、たいていの場合、映像に歪みが生じる。このことは球面ディスプレイ一般にいえることだが、映像を正確に投影するためには、特殊な歪み補正が不可欠である。歪み補正は、プロジェクタが単眼の場合には若干ずれていても映像が少し変形するだけで、人間の目にはなかなか気づかれにくい。しかし、立体映像の投影のためプロジェクタを2台使用する場合は、極めて正確に補正しなければならない。観察者から見て左右方向にずれると、予想外の視差が発生し、上下方向だと融像す

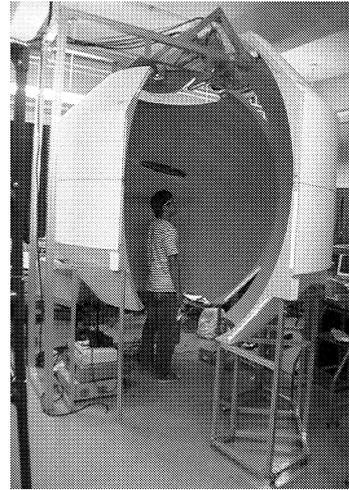


図2 全方向球面ディスプレイの外観  
Fig.2 Overview of Surrounded Spherical Immersive Display

ら困難になるためである。

本研究の球面ディスプレイでは、凸面鏡による映像の反射を用いており、特殊な幾何学歪みを前提に開発をおこなってきた。この歪み補正は、元画像上の縦横のピクセル位置を示す2つのパラメータと、球面上の極座標を示す3つのパラメータ(1つは既知)の1対1の写像関係からなっており、この関係を補正テーブルと便宜的に呼んでいる。立体視をおこなうためには、前述の理由より補正テーブルを厳密にキャリブレーションする必要が出てくる。ここで、どの程度厳密なキャリブレーションが必要かを見積もるために、スクリーン上でどれだけずれが生じるとスクリーンから浮き出したように見えるか、という実験をおこなってみたところ、左右方向でおよそ15mm程度であった。これは少なくとも2台のプロジェクタ間で、キャリブレーションの精度を15mm以下におさえる必要があることを意味している。これを手作業でおこなうのは困難を極めるため、自動的におこなう方法を検討した。例えば<sup>[5]</sup>では、ドームスクリーンに継ぎ目なく映像を投影するために、デジタルカメラによって投影状況を把握し、幾何補正やレンディングをおこなっている。本研究ではこの方式を参考にし、全方向に回転するカメラ雲台と画像処理によっておこなうこととした(図3)。

カメラは、スクリーン上の任意の緯線経線に向けることができるように、ヨー角、ピッチ角に回転する雲台に固定されている。雲台のモータはPCによってコントロールされる。プロジェクタからは縦縞と横縞のパターンを照射して、小型のNTSCカメラで撮影する。この画像はPCのキャプチャカードで取り込み、パターンを解析してプロジェクタ画像のピクセル位置

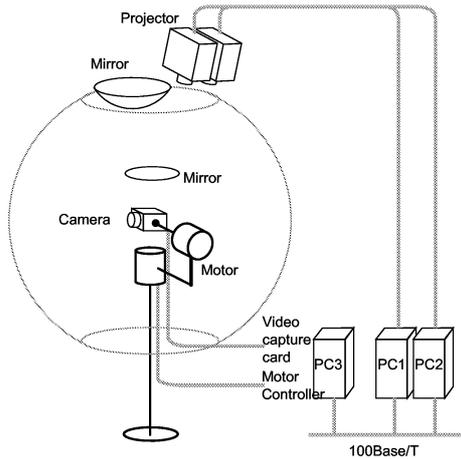


図3 歪み補正の自動キャリブレーション環境  
Fig.3 Environment of automatic calibration for distort correction

を特定する．これによりスクリーン上との対応関係が決まり，それを補正テーブルとする．雲台を移動する前に，もう一方のプロジェクタ画像でも同様の処理をおこなう．現状では経線方向を40分割，緯線を10分割したときのキャリブレーション所用時間は約4時間である．なお，この補正装置によって1画素程度のずれ(6mm)におさえることが可能となったが，平面鏡で反射しなかったプロジェクタの光が直接スクリーンにあたるなどの要因で，パターンを正しく読み取れず，正しく補正できない箇所もあった．この場合は手動で調整をおこなっている．

### 3. 立体呈示の性能評価

前述の歪み補正をおこなった状態を利用し，本ディスプレイにおける立体映像の呈示性能について評価をおこなった．

#### 3.1 融像範囲

画像による両眼立体視では，自然視と異なり，輻輳は立体像にあるが調節は像の呈示面に固定されるため，輻輳と調節の不一致を生じる．輻輳と調節の不一致が大きくなると，像を融合して見ることができず2重に見えてしまう．ここでは，本ディスプレイの立体視における性能を測る一つの指標として，この融像範囲を調べる実験をおこなった．

実験では画像をスクリーン上に投影し，左右像の視差が0の状態から徐々に視差をつけていく．融像しなくなったときに報告してもらい，そのときの視差をもとにスクリーンからの浮き出し量を計算でもとめ，融像限界とした．これを8人の被験者で1人につき3回おこない，平均をとった．なお，今研究すべてでおこなう実験に用いる画像としては，視差のついた陰影のない白色の円(直径10[cm])と，視差のついていない

白色の緯線と経線を5度間隔で全周に表示した格子模様(以後，この経線と緯線をグリッドと呼ぶ)を使用した．白色の円は遠近に関わらずスクリーン上で10[cm]の大きさとなるようにし，目線の高さに表示する．視差のついた円と調節面上にあるグリッドを比較することで，融像範囲を調べる．

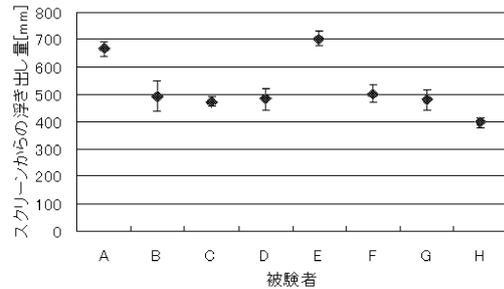


図4 像が2重に見え始めた距離  
Fig.4 Distance between the screen and stereo object when viewers recognize the object as a dual

実験結果を図4に示す．全員の平均は約525[mm]であり，これは輻輳角で7.08度に相当する．また，グラフには標準偏差による誤差範囲も示してある．この実験より，個人差がやや大きいですが，平均としてはスクリーンの半径の半分ほどに像が浮き出るまで左右画像は破綻せずに融合してみえるという結果が得られた．

#### 3.2 単方向での立体呈示性能

本ディスプレイは本来全方向に映像を表示することができるため，観察者は自然と周囲を見回すことになるが，その前に見回し動作を考慮しない単方向に限定した立体映像の呈示性能を評価しておく．評価は，実際の呈示距離に対する被験者の回答距離を比較するものである．

前節と同様の白円とグリッドを用意し，被験者にはどこに円が浮き上がって見えるか，あらかじめ持ってもらっていた棒でさしてもらおう．実験者はその棒とスクリーン面との距離を測定する．円につける視差は，スクリーンから手前に浮き出す距離が70,140,210,280,350,420[mm]となる6種類である．これらの視差のついた円を1人につき2回ずつランダムに見てもらおう．被験者数は6名である．図5は実験時の写真である．

実験結果は図6のようになった．被験者が感じる浮き出し量は実際の呈示位置より手前となり，浮き出し量が大きくなるにつれてその認識誤差は大きくなっている．これは映像の解像度の問題の他に，画面上に固定された焦点面と，視差から誘発される輻輳の位置との間に生じるずれが原因と考えられる．今回呈示した

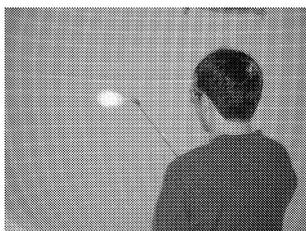


図5 実験風景

Fig. 5 Overview of the test environment

映像は実験の性質上、平面的な物体で近づいても大きさが変化しないものだが、物体に陰影や大小をつければ、認識誤差が小さくなることも予想される。

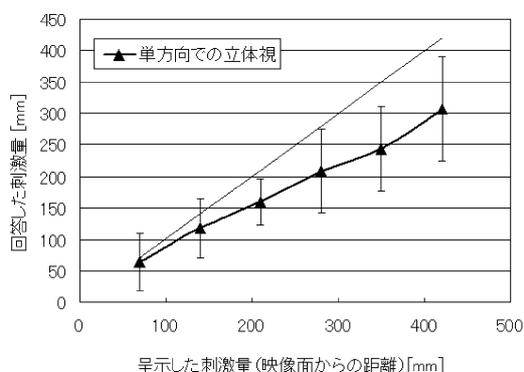


図6 単方向での立体像呈示位置と被験者の回答位置の比較

Fig. 6 Comparison of the distance between presented image and answered position (single direction)

### 3.3 頭部方向測定による全方向の立体視

両眼立体視をおこなう際には必ず映像に視差をつけることが必要になる。全方向映像において立体視をおこなう際には、観察者がどの向きを向いているかをシステムが検知し、映像を生成するのが一般的な手法である。ここでは頭部方向測定により全方向立体視が可能であるかを確認する。

#### (a) 実装

観察者の向いている方向を検知するのに、ここでは Polhemus 社の FASTRAK を用いた。トランスミッターは球面の内部の映像に干渉しない位置におき、レーザーを被験者の頭部にとりつける。これにより観察者がどこを向いているのかを計測し、それをもとに映像に視差をつける。なお、ここでは観察者が頭部をロール角に傾けない、常に球の中心に視点がある、という前提のもとに、ヨー角だけを計測し、立体映像に反映させている。運動視差も考慮にいれず、静止状態の立体視性能を評価する。

#### (b) 全方向立体視の評価実験

他の実験と同じくグリッドを全周に表示し、球面を

8 つに等分割した位置に視差をつけた白円を表示させる。映像につける視差には9種類あり、スクリーンからの浮き出し量が50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450[mm]となるように計算によってだされたものである。これらの視差をつけた円は1つの場所につき2回ずつ呈示される。被験者の頭にセンサをつけ、円の表示された方向に向いてもらう。そして、円がどの位置に浮き出て見えるかをあらかじめ持っていていた棒でさしてもらい、スクリーンからの距離を測る。被験者数は8人で、1人につき8種類の方向すべてに1回ずつ視差のついた円を表示する試行を2回ずつおこなった。

被験者が感じた浮き出し量を調べると図7のようになった。前におこなった単方向での立体視の実験結果と比較すると、あまり差がみられない。このことより、頭部方向測定によって単方向と同様の立体視が可能であることが確認された。

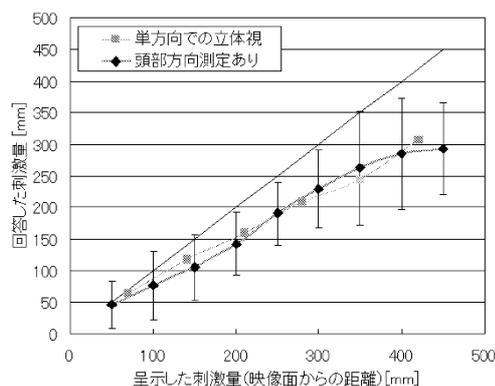


図7 全方向での立体像呈示位置と被験者の回答位置の比較

Fig. 7 Comparison of the distance between presented image and answered position (omni-direction)

#### (c) 立体視の方向依存性

(b)の結果を利用し、表示方向による呈示性能のばらつきを調べた。図8は方向による、呈示刺激量と回答刺激量との差をあらわしたものである。数値がマイナスとなっているのは、呈示刺激よりスクリーン側に回答がなされたことをあらわす。南北、北西、南東で認識誤差が大きいようにみえるが、この場所は上からみたとときプロジェクタからの光の直線上の位置に近く、平面鏡で反射しなかったプロジェクタの光がスクリーンにあたり、光のバウンドのためコントラストが低下していることが影響の一つと考えられる。

### 4. 頭部運動を測定しない立体視

没入型ディスプレイでは、頭部運動のセンシングによって立体視をおこなうのが一般的である。しかし大

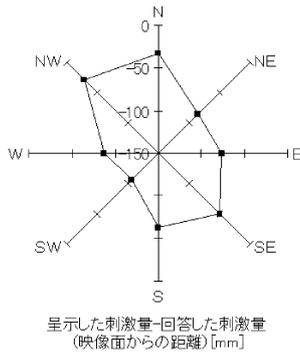


図8 立体呈示性能の方向によるばらつき  
Fig.8 Difference of the performance of stereoscopic viewing by viewer's direction

型で単方向のスクリーンで立体視をおこなう場合、頭部運動の測定はあまりない。これは頭部をロール角に傾けない限り、映像面に対する観察者の視差方向はほぼ一定となるため、破綻の小さな立体呈示が可能だからである。この状況では、運動視差を呈示することはできないが、大勢で同時に映像をみるのに適している。

一方、本球面ディスプレイは、観察者からみて360度の方向にスクリーンがあり、等方的に映像を呈示することができる。この時、頭部を大きく移動して映像を観察するのは、ディスプレイの構造上難しく、運動視差の呈示のメリットがあまりない。観察者は体全体を回転させて映像を眺めることになるが、頭部が常に球のほぼ中心にあるため、視線方向に対するスクリーン面は垂直に保たれる。これは、球面スクリーンが大型スクリーンをつなぎあわせた縮小版であり、頭部をロール角に傾けない限り、スクリーン面における視差の方向や大きさはほぼ一定となることが考えられる(図9)。

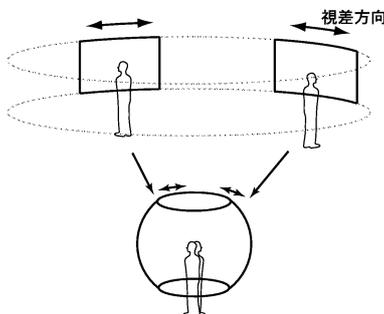


図9 球面スクリーン内における視差方向  
Fig.9 Direction of the parallax inside the spherical screen

ところが、視差の方向が一定であるからといって、単純に左右像をスクリーンの中心軸で回転させるわけにはいかない。映像面より手前の物体には目線が交差、

映像面で一致、映像面より奥では目線が平行の向きに輻輳がつかなければならないからである。そこで、ここでは立体映像の生成に際し、前述のような大型スクリーンによる立体映像のつなぎあわせにより、頭部運動を測定しなくても立体視ができるかどうかを試みた。

#### 問題点

大型のスクリーンをつなげていく、という方法で映像を生成すると、その継ぎ目の部分で不整合が生じる。これは立体視に影響を及ぼしかねない。例えばドーム型スクリーンが4面、全方位にあると仮定して、本球面ディスプレイに映像を出す場合、両眼の配置とスクリーンの関係は、図10のようになる。

本来呈示されるべき視差の方向は円周の接線方向であるが、実際に呈示される方向は図のように4分割された四角錐型の視野の底面に平行になり、視野の継ぎ目に近づくにつれて2つの間でずれが大きくなっていく。そして、継ぎ目の部分では視差Dで呈示したはずのものが、それよりも短いdとなってでてきてしまう。これにより、実際に被験者に示される視差は呈示されるべきものよりも短く、結果理論値による浮き出し量よりも浮き出していないように見えることになる。

この問題は視野の分割を限りなく増やしていくことによって、ずれによる破綻が小さくなり、やがては立体視に問題を与えなくなるほど小さくなると考えられる。そこで、実際に分割数を増加させていき、その時の立体像の見えについて調べることにした。

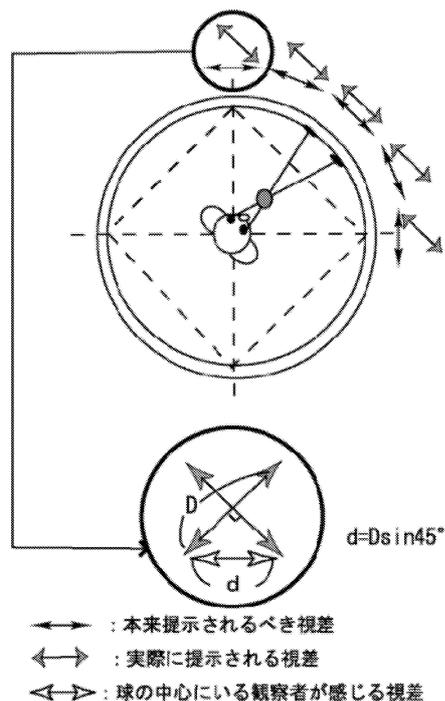


図10 球面スクリーン内における視差方向  
Fig.10 Direction of the parallax with four viewports inside the spherical screen

## 実験

ここでは視野の分割数を増やすことによって、頭部方向測定おこなわずに全方向立体視が可能であるかどうかを検証するため、分割数による立体視への影響を調べる実験をおこなった。視野の分割数として4,6,8,16,32の5種類を用意して、他の実験同様グリッドを全周に表示し、視野の継ぎ目の場所に視差のついた白い円を表示させた。どの位置に浮き出て見えるかをあらかじめ持ってもらっていた棒でさしてもらい、スクリーンとの間の距離を測る。用意した視差は6種類で、スクリーンからの浮き出し量が70,140,210,280,350,420[mm]となるように計算によってだされたものである。これら6種類の視差をつけた球を順番をランダムにして表示させ、一人につき6種類の視差を1回ずつ経験する6回の試行を2回ずつおこなう。これを5種類の分割数すべてにおいておこなった。被験者数は6人である。

実験結果を図11に示す。単方向での立体視実験と結果を比較するため、図6の結果を継ぎ目のない部分としてグラフに入れている。また32分割の場合は16分割とほとんど同じであったため、グラフ表記を割愛している。まず、視野の継ぎ目に画像を表示させたときの方が、被験者が感じるスクリーンからの浮き出し量が小さい。これは先に述べた通り、継ぎ目の部分で視差が実際より小さくなってしまっていることに起因している。また、分割数を増やすことによってこの誤差が小さくなっていき、分割数を8以上にしたときに単方向で継ぎ目のない場所で立体視をおこなったときの結果とほとんど同じになる。

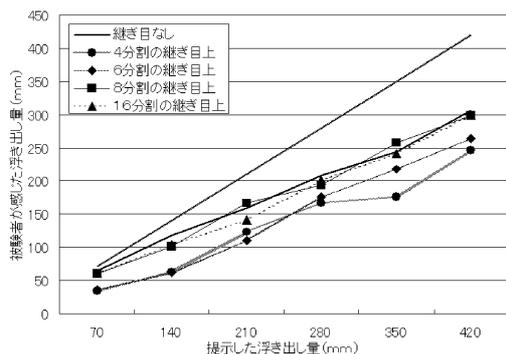


図11 分割した継ぎ目での立体像呈示位置と被験者の回答位置の比較

Fig.11 Comparison of the distance between presented image and answered position (above the joint of divided view-points)

結果として、今回の実験では分割数を8以上にすれば頭部方向測定ありの場合と同等の全方向立体視が可能であることがわかった。しかし、分割数を増やすときにも多ければ多いほどよいという訳ではない。表1

は本実験における画像更新速度を視野の分割数に応じて測定したものである。この表からわかる通り、分割数が多くなるとその分映像の補正に時間がかかり、描画速度が遅くなってしまふ。今回の実験は立体画像として単純な物体を表示させたが、複雑な画像を呈示するときを考えると分割数が少ないほうが望ましく、一意に決定することは難しい。

表1 視野の分割数に対する画面更新速度  
Table 1 The relationship between the number of divided viewports and frame rate

視野の分割数	更新速度 [Hz]
4	27.18
6	20.36
8	19.00
16	9.00
32	4.67

## 5. まとめ

本稿では全方向ディスプレイについて、実際に立体映像の呈示を試み、その基本呈示性能について調べた。ここで、球面ディスプレイの歪み問題に対しては、全方向に稼動できるカメラ雲台を利用して、画像処理によるキャリブレーションをおこなった。基本呈示性能では、方向にやや呈示誤差が見られる傾向、呈示距離に対して回答距離が小さくなる傾向が観察された。また、頭部運動測定を用いない立体表示として、多面スクリーンの縮小近似形として映像生成をおこなってみたところ、継ぎ目の部分で視差の誤差が大きくなることがわかった。また、視野の分割数を増やしていくことで、この誤差を小さくしていくことが可能だが、歪み補正処理能力とのトレードオフとなることがわかった。今回の立体視に関する実験では、スクリーンの手前の像に対する評価のみとなったが、回答方法を工夫して、スクリーン後方に関しても評価をおこなってみたい。また、単純な図形でなく広がりを持つ物体や動画表示、実写映像の立体表示も試みたい。

## 参考文献

- [1] Kunita et.al.:Immersive Autostereoscopic Display for Mutual Telexistence: TWISTER I (Telexistence Wide-angle Immersive STEReoscope model I); Proc. IEEE VR 2001, pp.31-36, (2001)
- [2] 岩田:シームレス全周球面ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, pp.155-158, (1998)
- [3] 橋本, 他:立体視可能な全方向球面没入型ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp.355-358, (2001)
- [4] 橋本, 他:凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ: En-sphered Vision; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.4, No.3, pp.479-486,(1999)
- [5] 小宮:600万画素超高精細プロジェクションシステム; 映像メディア学会技術報告, Vol.25, No.76, PP.41-46, (2001)