

# 凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ:Ensphered Vision

橋本 渉\*<sup>1</sup> 岩田 洋夫\*<sup>2</sup>

Ensphered Vision: Spherical Immersive Display using Convex Mirror

Wataru Hashimoto \*and Hiroo Iwata\*<sup>2</sup>

**Abstract** – This paper describes about spherical immersive display using convex mirror. Our display provides seamless image that totally surrounds a viewer. In order to construct the system, we designed optical configuration of display through the virtual projector that simulates behavior of projected light. The prototype display based on the optical design provides 360 degree horizontal and 115 degree vertical image. This optical configuration has an advantage in displaying video image. Then we also developed a camera head with convex mirror, which corrects distortion of displayed image.

**Keywords** : optical design, virtual projector, spherical display

## 1. はじめに

空間没入型ディスプレイは、人間の周囲を大型のスクリーンで囲むといった呈示方式である。非常に高い臨場感を生成することができ、従来よりフライトシミュレータなどに応用されてきた。最近では、CAVE [1] に代表されるような構成のディスプレイが広く普及しつつある。

この没入型ディスプレイは優れた呈示能力を持つ反面、装置全体が大きくなるを得ないといった構造上の問題を抱えている。映像を観察する空間と投影に必要な空間を合わせると、専用の部屋を確保しなければならないほどである。また、映像面積が大きくなるにしたがって複数系統の映像を用いることになる。そこで発生する映像同士の継ぎ目やスクリーン面の継ぎ目は、見回す動作をする際に不自然さを伴う。特に継ぎ目の問題は、実写映像を投影する際に深刻なものとなる。

装置の容積を小さくするためには、投影に要する容積を小さくしなければならない。また映像の継ぎ目をなくすためには、スクリーンを球面形にし、映像数を減らして画像を広い範囲に結ばせることになる。こうした背景より、著者らは凸面鏡の性質を利用して、狭い投光容積に対し広範囲に継ぎ目のない映像を呈示できる没入型ディスプレイ (Ensphered Vision) を提案している [2]。凸面鏡を利用するメリットは、特殊なレンズなどの投影装置を利用せずに映像を拡散、結像させ

ることである。また、半球ではなく全方向に投影することも可能となる。その反面、反射によって光路長が大きく変わり、結像位置や結像状態が大きく変化することになるので、設計時にシミュレータなどによって光線の挙動を明らかにしておくことが不可欠となる。本論文では以上のような背景のもとに、凸面鏡の反射による光学計算を含めた没入型ディスプレイの設計手法に述べ、それに基づいて試作されたディスプレイを紹介するものである。

## 2. 没入型ディスプレイの問題点と Ensphered Vision の利点

没入型ディスプレイを映像との相互作用を目的として用いる場合、問題点を整理すると次のようになる。

### (1) 設置容積

プロジェクタによってスクリーンの前面や背面に投射すると、投影に必要な容積を確保する必要がある。また映像とのインタラクションをするための空間が必要で、ユーザが投影光と干渉してはならない。この問題に対し、著者らの研究グループでは投影効率の高い菱形 12 面体ディスプレイを試作している [3]。また画面に LED などの光学素子を配置して、投影を必要としないものもある。

### (2) スクリーンの継ぎ目

スクリーンが多面体で構成されている場合、面の継ぎ目や頂点が発生する。これは眼球の焦点調整系にとって不適切であり、見回す動作をするときに不自然さを伴う。この問題を解消しているのは、スクリーンが球面形によるものである。五藤光学研究所の VIRTUALIUM [4] や航空宇宙技術研究所のハーフドーム

\*1: 筑波大学大学院 工学研究科

\*2: 筑波大学 機能工学系

\*1: Graduate School, Univ. of Tsukuba

\*2: Institute of Engineering Mechanics, Univ. of Tsukuba

スクリーン [5]、著者らの背面投射球面ディスプレイ [6] などがある。

### (3) 映像の継ぎ目

広い領域に映像を呈示するために複数系統の映像を利用すると、映像同士の継ぎ目が発生する。継ぎ目の部分の映像を拡散させてなめらかにすることもできるが、実写映像を投影する場合、撮像や投影に必要な光学系のキャリブレーションが煩雑である。この問題に対して、1系統の映像を特殊な魚眼レンズを利用して投影する製品もある (VisionDome [7])。

### (4) 観察点の確保

映像をスクリーンに前面投影する場合、投影装置が映像空間に入ってくることは、観察者の視界を遮ったりすることから都合が悪い。投影容積の問題と関連して映像空間が小さくなると、この問題は深刻なものとなる。前述の VisionDome でも半球の中心に投影装置を配置するため、理想的な観察位置を確保できないことになる。

こうした問題点から、1. 設置容積が小さく、2. スクリーンが球形、3. 映像系統数が少なく、4. 観察点を確保できるものが求められる。この条件を満たすため、球面スクリーンの内部に単一の映像源を配置することを考えると、映像を拡散しながら近距離で画像を結ばせる必要がでてくる。そこで、本研究では映像の拡散に凸面鏡の性質を導入している。凸面鏡を利用するメリットは、プロジェクタなどの光束を拡散させるだけでなく、光束の焦点深度を大きくできることである。結果として半球ではなく全方向に結像でき、焦点深度の許す限りスクリーンの形状を変更できることになる。この凸面鏡を用いて映像を拡散する場合の配置を図1に示す。これは1系統のプロジェクタがカバーする立体角が最も大きい例である。

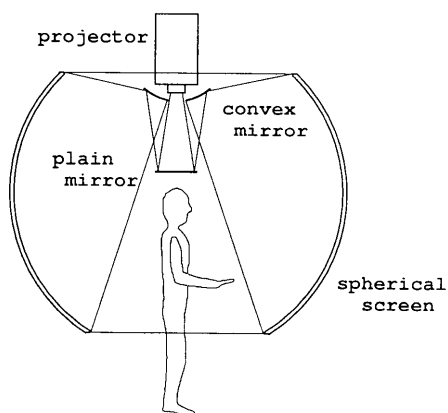


図1 全方向球面没入型ディスプレイ  
Fig.1 Omni-directional Spherical Immersive Display

## 3. Ensphered Vision の設計手法

凸面鏡を利用して映像を拡散する場合、スクリーンの所定の位置に結像させるには、その配置関係や凸面鏡の曲率などの諸パラメータを定めなければならない。このパラメータを決定するために、プロジェクタや凸面鏡の光学系モデルを計算機上で近似的にシミュレートし、設計に用いるための手法について述べていく。

### (1) プロジェクタの結像

プロジェクタが放つ光の挙動を厳密に調べるには、プロジェクタの光源からプロジェクタのレンズ群による光の挙動を追跡し、光束の出力状態を導くことになる。射出レンズからの光束はレンズ設計者の意図した位置、つまり平面に結像し、その収差も実用上問題のない小さなものであると考えられる。そこで、プロジェクタから投影される映像は理想的な結像をしていると仮定すると、射出レンズから出る光束の挙動は図2のようなモデルで表わすことができる。

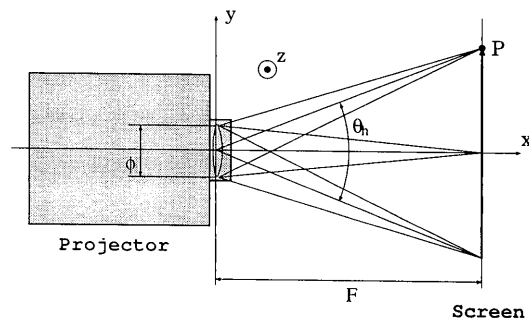


図2 プロジェクタの結像  
Fig.2 Projected image

レンズから射出される光束は、プロジェクタの内部光学系を知らなくても、焦点距離  $F$ 、レンズの有効径  $\phi$ 、水平面角  $\theta_h$ 、及び垂直面角  $\theta_v$  を調べるだけで、空間的な挙動を表わすことができる。このようにプロジェクタの光束の近似モデルを作成することによって、光線追跡への応用が容易となる。

### (2) 凸面鏡の反射による結像と収差

ではプロジェクタの投影光が凸面鏡に当たるとどうなるかを考えてみる。プロジェクタと結像する点との間に、半径  $R$  の球面をもつ凸面鏡を中心が光軸上にあるように置くと、図3ようになる。

本来  $P$  で結像する点は凸面鏡によって  $P'$  に結像することになる。また、凸面鏡の曲率中心が焦点距離より奥にある ( $L > F$ ) と、反射によって光束の開きの角度が小さくなるため、焦点深度が大きくなる。収差について調べてみると、屈折がないため色収差は発生しないことになる。しかし結像点が光軸から離れる (点  $Q$ ) か曲率中心が光軸からずれると、単色収差が生じる。したがって、曲率中心への距離  $L$  や曲率半径  $R$

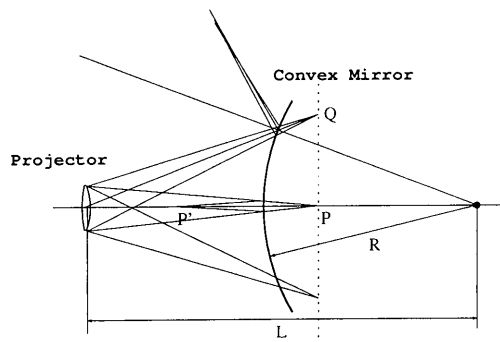


図3 凸面鏡による反射  
Fig. 3 Reflection with convex mirror

を適切にとり、最も収差の小さい状態を模索する必要がでてくる。

### (3) 結像評価

収差や結像を評価するには、プロジェクタの結像面上の各点に対して、レンズ面から出力される全光束について、レンズ面からスクリーンまでの光線追跡をしなければならない。図4はある結像点に向かってレンズ面から出る光束の挙動について示している。光束がスクリーンにぶつかる時1点で結ぶのが望ましいが、前節で述べたように凸面鏡から反射すると収差が発生する。これを観察するには、レンズ面から出る光束群を光線追跡し、最終的にスクリーンに投影された錯乱円の状態を調べればよい。レンズ面全てについて調べることは膨大な計算量につながるため、レンズの特徴点を利用することになる。実際の光学計算における像評価では、レンズのFナンバーや実際に何本かの光線を追跡して定めた特徴点を用いている。しかしプロジェクタ内部の光学系が不明瞭なことから、ここでは射出瞳が最も大きく見積られた場合、すなわちレンズの径の大きさを利用する。レンズの中心 $M$ を通る主光線と、レンズ端( $A, B$ 及び $C, D$ )を光束の特徴点として用いると、光線追跡の結果としてスクリーンに十字( $A'-B', C'-D'$ )及び $M'$ が出来ることになり、この位置と大きさが結像の状態を示す目安となる。この十字が小さく、 $M'$ の同心円上にあるほど理想の結像状態に近いことになる。

## 4. 実際の設計計算

これまで述べてきた光学系の知見に基づいて、実測値による光線追跡シミュレーションをおこない、実機的设计を図った。プロジェクタの光学的な仕様、鏡やスクリーンの配置関係や曲率がわかると、光線追跡が可能となり結像位置や状態を決めることができる。しかし、結像位置などから鏡の配置や曲率などを逆計算することは極めて難しい。また曲率や鏡の大きさなどの物理的制約や、光路上の障害物による干渉などの要

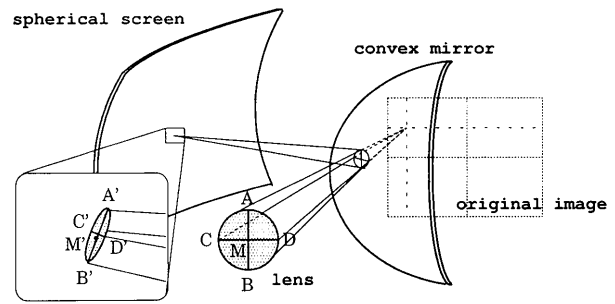


図4 光線追跡  
Fig. 4 Ray tracing

因から、数式による算出はさらに見通しの悪いものとなる。そこで、物理的制約などによる境界条件を設定し、未知数である鏡の配置や曲率を仮定しながら、もともと結像状態のよい場合を評価して決めていくことにしている。

### (1) プロジェクタ光束モデルの設定

本研究で使用したプロジェクタはDLA-G10(Victor)で、プロジェクタからの光束の挙動を調べるため、実機より測定したものをを用いた(表1)。このプロジェ

焦点距離 $F$	1850~[mm]
垂直画角 $\theta_v$	0.0~0.264[rad]
水平画角 $\theta_h$	-0.173~0.173[rad]
レンズ径 $\phi$	72[mm]

表1 DLA-G10の光学仕様(実測値)  
Table 1 Optical configuration of DLA-G10 (measured)

クタには鉛直方向にあおり角があり、台形歪みの補正機能が備わっていないため、上下方向の対称性が損なわれてしまう。そこで見かけ上のあおりをなくすために、プロジェクタをピッチ回転下向きに0.132[rad]回転して画角の中心に新たな光軸を設定している。

### (2) 配置関係と境界条件

次に光線追跡で必要となる鏡やスクリーンの配置について幾何的に定める。各パラメータを図5のようにとると、5つのパラメータで平面、球面を2次関数などによって表現することができ、光線の挙動を定めることができる。なお、観察者の視点はスクリーンの中心にあるものとし、原点を射出レンズの中心、光軸をx軸、プロジェクタのあおり方向をy軸、紙面手前方向をz軸とする。

これらの未知数は、物理的な配置条件や加工上の制約などによって拘束を受けることになる。主な境界条件は、1.プロジェクタと凸面鏡が干渉しないために $L_c < R_c$ 、2.平面鏡と観察者の干渉しないために $L_m \leq L_s$ 、3.焦点深度を大きくするために $F < 2L_m + L_c$ 、4.スクリーン加工上の制約より $R_s = 1050[mm]$ である。

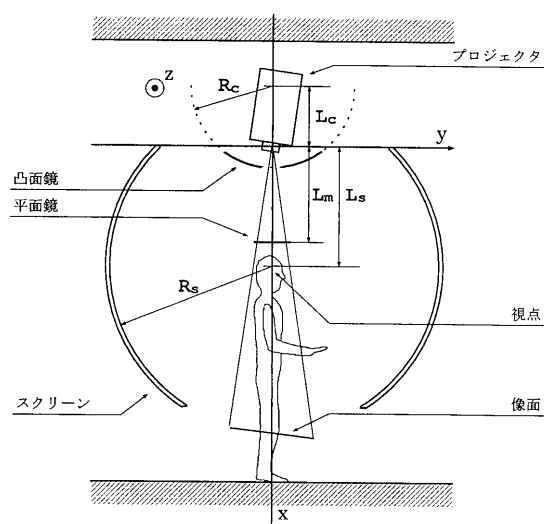


図5 光学設計のためのパラメータ  
Fig. 5 Physical parameters for optical design

この境界条件の下で未知数  $L_m, L_c, R_c, L_s$  の4つを設定すると、光線追跡の準備が整うことになる。

### (3) 光線追跡

光線の追跡にはスネルの法則 [10] に基づいておこない、平面鏡の反射、凸面鏡の反射を経てスクリーンへの結像までを幾何学的に算出する。プロジェクタの光束モデルと境界条件下の未知パラメータを利用すると、結像の状態が定まる。x-y 平面で対称となるので、光線追跡すべき結像点は半分になる。しかし結像点に対し5つのレンズ特徴点に関する光線追跡をおこなわなければならない、設定すべき未知パラメータは4つあるので、未知パラメータを境界条件だけで拘束しながら計算しても膨大な時間を必要とすることになる。

そこで未知パラメータの大まかな推測と光線追跡の結果表示を目的として、光線追跡のシミュレーションプログラム (図6:Virtual Projector) を作成した。図は完成形 (表2) による光線追跡の結果を表示している様子で、結像状態を表す十字が球上で点として表示されている。各パラメータを変更しながら結像状態や表示位置などを目視で確認することができるので、未知パラメータの大まかな組み合わせ範囲を探ることができる。

### (4) 結像の評価

バーチャルプロジェクタによって得た未知パラメータの範囲によって、総当たりの光線追跡計算をおこなった。結果の評価は、結像状態を示す十字の大きさ、有効画素、視点から見たときの仰角と俯角、主光線の結像位置を対象にした。

結像状態を示す十字はレンズ特徴点による光線追跡の結果から得られる。このとき、主光線の結像位置が十字の内部にあることを確認しておく。レンズ有効径

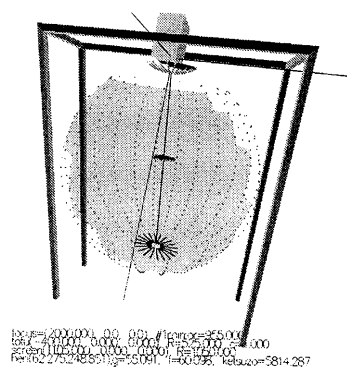


図6 バーチャルプロジェクタ  
Fig. 6 Virtual Projector

を大きく見積もっているため、実際より大きめに算出される。計算の結果、最も小さくなったのは1点あたりの十字の辺の長さが平均で5.38[mm]であった。

一方、画素を最も有効に利用している状態というのは、スクリーン下部の映像が出ない無駄な領域が原画面上で小さくなる場合である。この領域は、凸面鏡の中心を貫通する穴の内径と平面鏡の外径が決まると、干渉チェックによって決まる。凸面鏡の内径と平面鏡の外径は最外周 (スクリーン上部に結像) の光束が通過、反射できるように優先して決められる。計算の結果、映像の出ない部分が最も小さくなるのは原画面上の縦 (直径)5 に対して中空の径1であった。これは元画像の垂直解像度が1024[pixel] のとき、スクリーン経線上の解像度が410[pixel] になることに相当する。

一方、仰角や俯角は視線よりそれぞれ50度以上ある場合で算出すると、最大で計120度程度まで大きくできることがわかった。

これらの結果はすべて同時に満たされるわけではないので、このより評価基準を緩くしながら画素数を優先して選定した。この時の評価と選定されたパラメータは表2のようである。

十字の長さ (全体平均)	5.56[mm]
十字の長さ (最下点平均)	1.75[mm]
十字の長さ (水平線上平均)	5.70[mm]
十字の長さ (最上点平均)	9.82[mm]
スクリーン経線上画素	410[pixel]
仰角	55.1[degree]
俯角	60.1[degree]
凸面鏡曲率半径 $R_c$	525[mm]
凸面鏡曲率の中心までの距離 $L_c$	400[mm]
平面鏡までの距離 $L_m$	955[mm]
スクリーン中心までの距離 $L_s$	1105[mm]
凸面鏡外径	498[mm]
凸面鏡内径	124[mm]

表2 選定されたパラメータ  
Table 2 Examined parameters

## 5. 試作機の性能

設計に基づいて試作した没入型ディスプレイは、球面スクリーン、プロジェクタ、架台、凸面鏡、平面鏡より構成されている。

球面スクリーンの直径は 2.1[m] で、垂直角は仰角、俯角あわせて 125 度と大きめにつくってある。材質は発泡スチロールの削り出しによるもので、メンテナンス性を高めるために全体を 8 分割することができる。図 7 は 8 つのうちの 1 ユニットの写真をはずして、内部が見える状態にしたものである。投影面側は、投影光線の反射を押さえるため発泡剤 0.1% を塗布しており、スクリーンゲインは 0.47 である。架台を含めた占有容積は 2.4(W)[m]×2.4(D)[m]×3.3(H)[m] で、天井がやや高め部屋に設置することができる。プロジェクタは前出の DLA-G10 で、全周に拡散呈示するために SXGA や Hi-Vision 表示に対応したものをを用いている。凸面鏡はアルミ合金を削り出しの後メッキ加工したもので、架台に固定されている。また平面鏡は通常のガラス鏡で、光線を遮らないようにテグスで吊り下げられている。

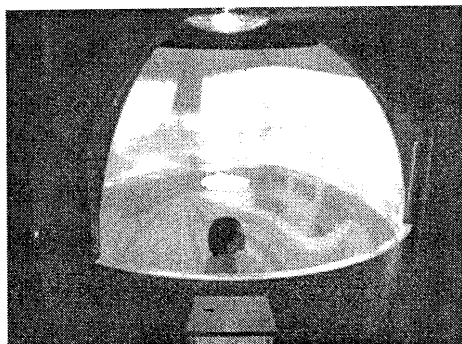


図 7 試作した全方向球面没入型ディスプレイ  
Fig.7 Implementation of Omni-directional Spherical Immersive Display

本ディスプレイが映像を照射した場合の結像状態について調べた。結像の位置については、表 2 の仰角や俯角を得られることがわかった。結像の状態を定量的に示すことは困難であるため、1 画素の大きさを測定し本来表示される画素の大きさと比較することになっている。測定箇所はあおり角の影響を平均的に受ける部分で、図 5 における x-y 平面上のスクリーン上の点である。測定値と設計された理論上の画素の大きさを表 3 に示す。ここでの測定値とは、1 画素がスクリーン上に表示された時の大きさである。範囲で記入されているのは、原形をとどめている画素の大きさと周囲に広がった光の大きさを意味している。また理論値とは画素の分布 (図 10) から算出したものである。理論値から測定値を引いたものが、結像の誤差や凸面鏡の拡

散などの要因によって発生したものとなる。表 3 の十字の長さ、つまり結像の誤差と比較すると、設計値より小さいことがわかる。これはレンズの有効径を大きめに見積もっているために生じているものである。結像の状態を評価して得られた設計値はおおむね妥当であると考えられる。

	測定値	理論値
1 画素の大きさ (最下点)	5[mm]	4.6[mm]
1 画素の大きさ (水平)	5~8[mm]	5.2[mm]
1 画素の大きさ (最上点)	9~17[mm]	8.6[mm]

表 3 全方向球面ディスプレイの表示画素の大きさ  
Table 3 Pixel size of Spherical Immersive Display

なお、主観的に観察した場合スクリーンの最下点付近では画素の輪郭まで弁別される。水平付近においても画素の周囲へ拡散する光量が少ないため、画素の判別ができる程度である。仰角 40 度付近から経線方向への拡散が顕著になり、場所によっては画素の原型をとどめないところもでてくる。したがって、本ディスプレイでは画面上方に文字などの表示要素の小さな情報を出力することは難しい。

次に本ディスプレイが映像を照射した場合の照度分布は、図 8 である。この測定では、スクリーン上に 10cm 角の白い正方形をプロジェクタで照射していき、そこに光電池式照度計 (SANWA LX-3131) のセンサをスクリーン面法線方向に置いて計測している。左右対称となる半球分について経線、緯線を 10 度おきにとり、その位置に 10cm 角の白い正方形をプロジェクタで投影していく。その位置に光電池式照度計 (SANWA LX-3131) のセンサをスクリーン面法線方向に向けることで、照度を測定している。図の右方向が画面の上方向 (あおり方向) に相当し、照度は 20~35[lx] の範囲に分布していることがわかった。照度のばらつきに関しては、スクリーンに均一な映像を投影しても、明るさのムラは感じられない程度である。また明るさについては、球面ディスプレイの設置環境を暗くすることでコントラストを確保し、実用上問題なく呈示をおこなうことができる。なお、理論値による照度分布を算出したところ、およそ 30~65[lx] の範囲に分布することがわかった。実測値とこれを比較すると、約半分の光量が失われていることになる。これは反射鏡表面における減衰が大きいためと考えられる。

## 6. ソフトウェアによる歪み映像生成

この球面ディスプレイに映像を投影するには、あらかじめドーナツ状に歪ませた映像をプロジェクタに入力しなければならない。ここではテクスチャマッピングの技法を応用し、所定の位置の画像を貼付けること

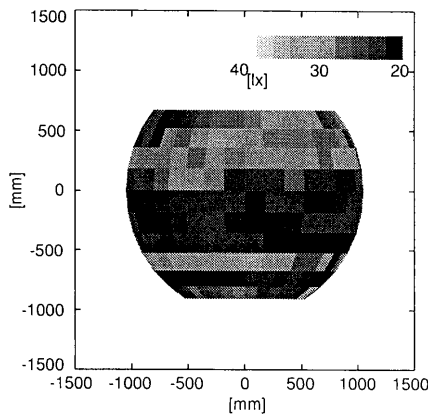


図8 スクリーン上の照度分布

Fig. 8 The distribution of illuminance on the spherical screen

によって補正をおこなっている。水平角  $\theta$  の映像を補正する場合の様子を図9に示す。補正処理は以下のような手順でおこなわれる。

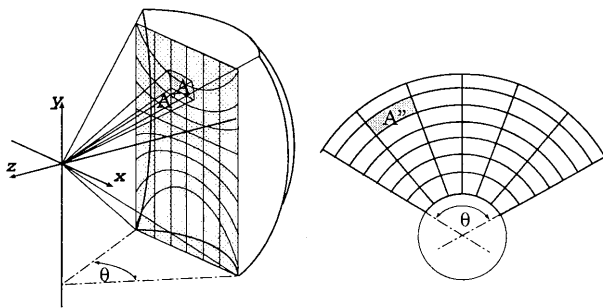


図9 視野角  $\theta$  の映像の球面歪み補正

Fig. 9 Distortion correction of the image covering viewangle  $\theta$

(1) 映像を全天周分フレームバッファに格納する

まず最初に、図9の球殻部分の映像を全天周分描画する。全方向を分割するとき、スクリーンの半径や仰角、俯角がきまると、視野の大きさは幾何学的に算出でき、図の網目部分のところに映像を射影された画像を生成することができる。

(2) テクスチャの切り出し

次に描画された映像から、所定の位置で切り出すための準備をおこなう。球面上の領域 A に対応する画像上の A' の部分を算出することに相当する。扇上の各領域 A'' に対する A の位置関係はスクリーンの光学設計時に算出されており、図10のようになる。ここでの  $\theta_1$  はプロジェクタの主光線(中心軸)に対する画角(扇形の放射方向に相当)で、 $\theta_2$  はスクリーンの緯度を表している。スクリーンの緯度と水平角がわかると A の位置が定まり、その座標を画像上に射影することによって A' の空間座標が求まるといいうわけであ

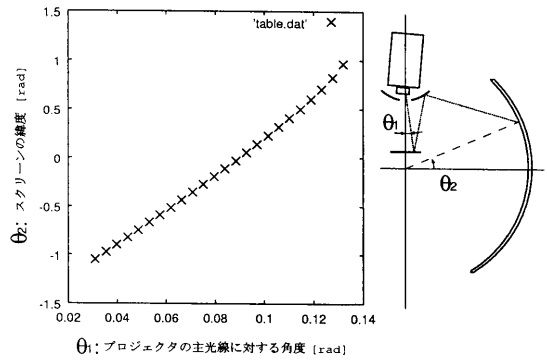


図10 角度の対応テーブル

Fig. 10 Relation table between light angle of projector and viewangle

る。なお、網目の部分はテクスチャとして扱われるため、(1)の視野の大きさからテクスチャ座標を算出する必要がある。

(3) テクスチャを所定の位置にはりつけていく

最後の段階で、切り出されたテクスチャを扇形の所定の位置に貼付けていく。中心角は(2)で用いた水平角に対応し、母線の長さは(2)で参照した図10のとおりに  $\theta_1$  から算出できる。テクスチャの切り出し点と貼付け点が定まると、テクスチャマッピングを実行することができる。この作業を複数方向の映像に対して同様におこなうと、継ぎ目のない全周分の映像が完成する。なお、プロジェクタのあおり角による台形ひずみをキャンセルするには、プロジェクタのあおりがある状態で視野を定義する必要がある。

実際にプロジェクタから投影される映像は、図11左側の視野映像に対して右のようになる。これは観察者が格子模様の立方体の中にいる時の映像で、全周を4分割したときの視野が A~D に対応している。なお、描画に Onyx(i-station,IP25) を利用した場合の描画速度は、この図のような映像の場合で 15[Hz]、純粋に補正に要する時間は約 50[ms] である。

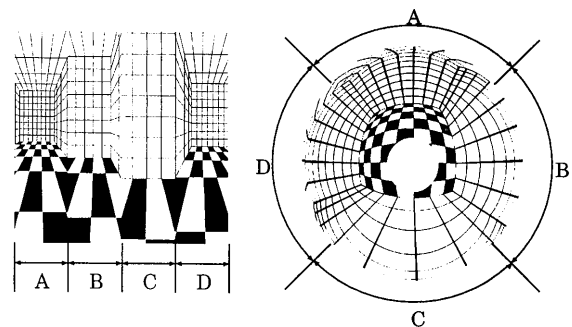


図11 テクスチャの原画と最終出力画像

Fig. 11 Original image and projected image

## 7. 楕円鏡による歪み映像生成

球面ディスプレイ用の映像を生成する方法として、計算機によるソフトウェア補正のほかに、撮影時に歪ませてしまう方法がある。曲面鏡によって反射される映像をハイビジョンカメラ等で撮影すると、一系統の映像を全方向に呈示できることになり、撮影時の構成が非常にシンプルなものとなるほか、映像の継ぎ目の心配をしなくてもよいことになる。ここで留意しなければならないのは、投影における光学系をそのまま撮像に転用できないということである。これは、投光における光線の方向と、集光における光線方向が異なることに起因している。

一般に2次曲面を用いた撮像系は、口径の大きな反射式の望遠鏡などで用いられており、光線を多く集める目的で用いられている。VRに積極的に利用している例としては、回転双曲面ミラーをカメラの鉛直上に配置し、結果として全方位の映像を取得することができるHyperOmniVision [11]がある。双曲面鏡は焦点に向かってくる光束を別の焦点に結ぶという、撮像に理想的な性質をもっている。この性質を利用して、本球面スクリーンの光学系に適合するような回転双曲面の算出を試みた。プロジェクタ画角とスクリーン画角の対応関係(図10)を用いて光線追跡計算をおこなったところ、双曲面鏡ではスクリーンの垂直視野角をカバーすることができないことがわかった。

そこで一般的な2次曲面を定義し、撮像時と投影時の誤差が最も小さくなるように近似面を算出した。双曲面と異なる点は、スクリーン上の誤差のほかに方向に関する誤差が生じることで、この方向余弦を小さくするという条件が加わることになる。

算出の方法は、 $x$ - $y$ 平面上での反射点を2点与え、その2点の位置と傾きを境界条件とし、残りの点によって誤差修正をしながら近似曲面を導出するものである。最初に与える2点はカメラの画角、焦点距離、焦点深度を満たしておく必要がある。図12は、 $x$ - $y$ 平面上の $y$ 正方向におけるスクリーン上下端を境界条件として近似曲面を導出した結果である。この回転楕円体は短軸長134[mm]、長軸長192[mm]である楕円を長軸まわりに回転したもので、さらに $z$ 軸に1.78度傾けたものである。

この回転楕円体を用いるとき、撮影時と投影時との誤差が大きくなる場所は、境界条件から離れたところに位置するスクリーン上部の縁の部分で、スクリーン上での誤差が180[mm]、方向に関する誤差が16度であった。

この結果に基づいて回転楕円体鏡を作成し、ハイビジョンカメラと組み合わせた撮像系を図13に示す。こ

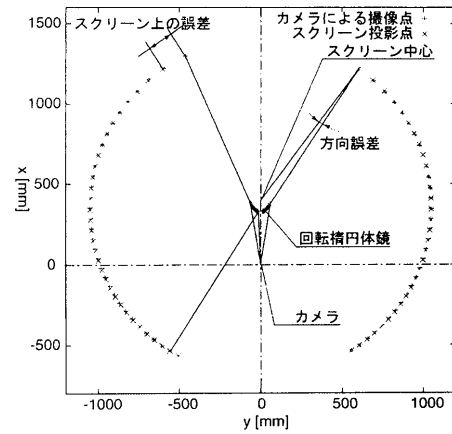


図12 近似曲面とそれによる誤差  
Fig. 12 Approximation curved surface and error

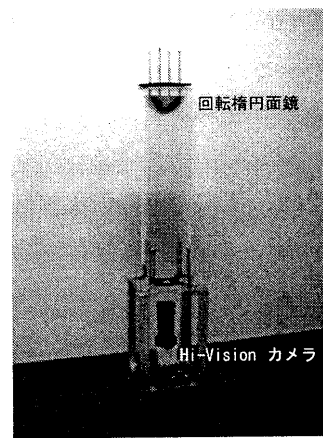


図13 実写映像の撮像系  
Fig. 13 Real scene capturer

の装置によって撮像した映像(図14)を球面ディスプレイに投影したところ、スクリーン上縁の映像に関しては歪みが大きいですが、それ以外の部分では不自然さは感じられず、呈示上大きな影響を与えないことがわかった。しかし非常に広範囲の映像を反射するため、撮影範囲に極端に明るい物体があると周囲が露光不足のため暗くなったり、ハレーションをおこすといった問題が生じた。

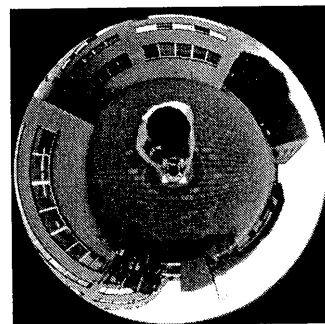


図14 撮影された実画像  
Fig. 14 Captured image of real scene

## 8. Virtual Projector を用いた他の構成例

本論文で述べてきた、凸面鏡を用いた球面没入ディスプレイの設計手法は、図1で示される構成以外にも適用できるような一般性がある。例えば、4章で設計した試作機では1系統の映像を全方向に呈示しているため、解像度の点で必然的に問題が生じてくる。現行のプロジェクタを活用して、視野の前方に画素を集める方法も有効であるという考えから、ドーム型没入ディスプレイの設計もおこなっている。本装置の設計方法は4章と同様であり、作成された配置関係は図15で、そのときの仕様は表4となっている。この構成において映像を表示するためには、必然的に補正映像が必要となってくる。6,7章で述べた方法を利用して、補正テーブル及び撮像系も同時に作成している。

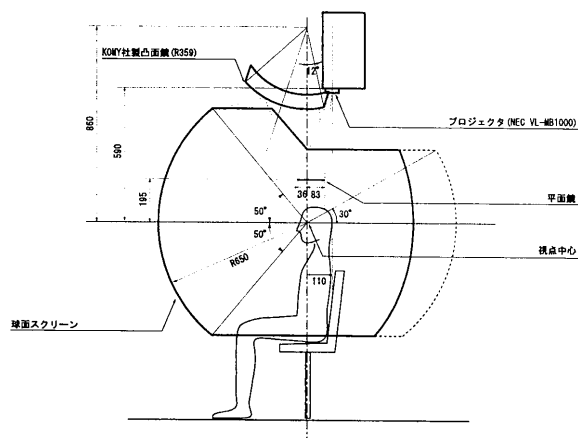


図15 ドーム型スクリーンの側面図  
Fig.15 A side view of dome type screen

凸面鏡曲率半径	359[mm]
スクリーン半径	650[mm]
スクリーン経線上画素	約 670[pixel]
仰角	45[degree]
俯角	50[degree]
最大水平角 (最下部)	267[degree]
最小水平角 (最上部)	120[degree]

表4 ドーム型スクリーンの仕様  
Table 4 Specification of dome type screen

なお、図15は半球型であるが、平面鏡の角度を変更してプロジェクタを頭上前方に配置すると、前後の対称性を確保することができる。図15の構成を2セット合体することによって全方向型に拡張することも可能となる(図16)。

## 9. 結論

本稿では、凸面鏡の反射を用いた球面没入型ディスプレイの設計手法について述べてきた。実際に光線追跡シミュレーションによって得た結果より試作機を作

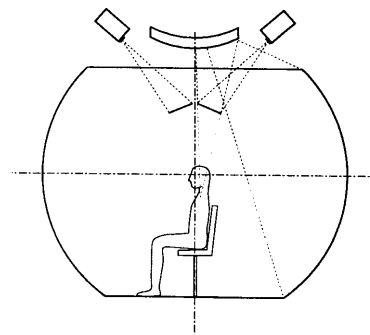


図16 拡張されたドーム型スクリーンの側面図  
Fig.16 A side view of extended dome type screen

成し、さらに本ディスプレイに映像を投影するためのインフラを構築した。

本ディスプレイの特徴は、凸面鏡を用いて映像を省スペースながら広い範囲に結ばせていることである。単純な機器構成にもかかわらず、全方向の映像を呈示することが可能になる。しかし、映像を拡散させると継ぎ目の問題がなくなる反面、解像度の上で問題が生じてくる。また映像を出力するためには、計算機による歪み補正や楕円鏡を用いて特別に生成しなければならない。こうした点は、従来の没入型ディスプレイと比較すると短所となり得ることを念頭におくべきである。

凸面鏡によって焦点深度が大きくなることは、映像表示面の形状や距離を選ばないことを意味している。例えば部屋の壁等に直接映像を投影することも可能である。したがって、没入型ディスプレイに限らず映像と現実の融合といった複合現実感の生成などに威力を発揮するものと考えている。

## 参考文献

- [1] Cruz-Neira, C. et al.; Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality, Proc. of SIGGRAPH'93 (1993)
- [2] 岩田洋夫: シームレス全周球面ディスプレイ, 日本VR学会大会論文集, Vol.3, 1998
- [3] 岩田洋夫: 菱形12面体を用いた全立体角ディスプレイ, 日本VR学会大会論文集, Vol.1, 1996
- [4] <http://www.goto.co.jp/product/virtualium-j.html>
- [5] 竹田仰, 他: 大型ディスプレイによる重心同様の影響, Human Interface N&R, Vol.11, No.2, 1996
- [6] 岩田洋夫, 他: 背面投射球面ディスプレイ, Human Interface N&R, Vol.12, No.2, 1997
- [7] <http://www.virtual-reality.com/products.html>
- [8] 三宅和夫 著: 幾何光学, 共立出版, 1979
- [9] 中山治平 著: レンズ設計工学, 東海大学出版会, 1986
- [10] 応用物理学会光学懇話会 編: 幾何光学, 森北出版, 1975
- [11] 尾上良雄, 他: 全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス, 信学技法, PRMU97-20, 1997
- [12] 橋本 渉, 他: 凸面鏡を用いた全方向球面ディスプレイの光学設計, 日本VR学会大会論文集, Vol.3, 1998