

基礎論文

複数プロジェクタを用いた 立体視可能な全周球面没入型ディスプレイの開発

林隆伯^{*1}, 中泉文孝^{*2}, 矢野博明^{*3}, 岩田洋夫^{*3}

Development of a Full-surround Stereo Spherical Immersive Display Using Multiple Projectors

Ryuhō Hayashi^{*1}, Fumitaka Nakaizumi^{*2}, Hiroaki Yano^{*3} and Hiroo Iwata^{*3}

Abstract - We developed a spherical immersive projection display, a new model of EV(EnspheredVision). This display consists of spherical screen, plane mirror, convex mirror, six projectors and mechanical shutter. Multiple projector enables to improve the image resolution and brightness as compared with the former EV. Observer can watch the 360 degree panoramic stereo image using liquid crystal shutter glasses.

Key Words : Ensphered Vision, Spherical Screen, Projector, Stereo Display, IPT

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ディスプレイは、没入型ディスプレイと呼ばれる。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以上の映像を呈示することができるため、高臨場感表示や人間に情報を伝達する点で高い能力を有している。近年、その広視野による情報呈示の有用性からアミューズメントなどの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などにも利用され、様々なタイプの没入型ディスプレイが研究されてきた。

平面スクリーンを組み合わせたタイプでは CAVE[1]がその基本型であるといつてよい。CAVE は、1辺 2.1mの立方体の部屋で、前、左、右の3つの壁面と床の計4面に4台のプロジェクタで映像が投影される。また CAVE のスクリーン面数を5つに増やした CABIN[2]、スクリーン面数を6つにし観察者の周り全てを覆う COSMOS[3]などがある。これらは投写光とは反対側からスクリーンの透過光を観視する背面投写型で、観察側の室内はある程度明るくとも障害にならない反面、スクリーン後方に完全暗室の投写室を設けるため、ある程度大きな設置空間を必要とする。また人間が周囲を見回す場合には、スクリーンの継ぎ目の存在により、スクリーンまでの視距離が一定でないため、不自然さを感じる

原因ともなる。見回し動作を考慮するならば、眼球の調節系より呈示面が曲面となるのが理想的である。こうした点より、小型の容積で曲面に映像を呈示可能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[4]や、小型の半球スクリーンに魚眼レンズで投影する VisionStation、同じく半球スクリーンにソフトウェアによる歪み補正で投影する CyberDome[5]、凸面鏡を用いて全周球面スクリーンに投影する Ensphered Vision[6], [7]などである。

多くの曲面ディスプレイは、水平視野角 360 度ではなく 180 度前後の曲面スクリーンを用いているため、見回し動作による曲面スクリーンの利点を生かしきれていない部分があると考えられるが、Ensphered Vision(以下 EV)では反射鏡を用いることで少ない設置容積ながら全周球面スクリーンによる水平 360 度・垂直 120 度程度の映像を呈示できることが利点として挙げられる。しかしその反面、水平 360 度を1台のプロジェクタのみで投影していたため、投影映像の解像度や明るさなど画質面で問題があった。

この問題点を解決する方法として、水平視野角 360 度あたりのプロジェクタ台数を増やし、高解像度化するという解決策が挙げられ、実際に水平 360 度あたりのプロジェクタを3台に増やした EV を試作し、性能評価を行った[8]。ただしこの試作機では立体視を行うことを考慮していなかった。立体視を考慮した際の高解像度化による利点としては、従来の EV で見られた解像度や光量不足によって立体画像がぼや

^{*1}筑波大学 理工学研究科 (三菱プレジジョン株式会社)

^{*2}筑波大学 理工学研究科 (ATR メディア情報科学研究所)

^{*3}筑波大学 システム情報工学研究科

^{*1}Graduate School of Science and Engineering, Univ. of Tsukuba (Mitsubishi Precision Co., Ltd.)

^{*2}Graduate School of Science and Engineering, Univ. of Tsukuba (ATR Media Information Science Laboratories)

^{*3}Department of Intelligent Interaction Technologies, Univ. of Tsukuba

けるなどして認識できないといった問題点も改善可能であると考えられる。そこで本研究では試作機をさらに発展させ、立体視を考慮した高解像度な全周球面没入型ディスプレイ（便宜上ここでは新EVと呼ぶこととする）のハードウェア及び投影用ソフトウェアの構築を目的としている。

2. Ensphered Vision の原理

従来のEVは1台のプロジェクタによってつなぎ目のない全方向映像を呈示することのできる球面ディスプレイで、図1はEVの最も基本的な構成である。

まずプロジェクタから投影された映像はプロジェクタの配置に自由度を持たせるため一度平面反射鏡で反射される。上方に設置された凸面鏡により再反射された映像がスクリーンに投影される。凸面鏡の性質により焦点深度が大きくなり、スクリーン上でフォーカスが合うように設計することができる。なお、投影する映像はスクリーンに映ったときに正しく見えるようテクスチャマッピングによる歪み補正を行っている。投影可能範囲は平面鏡の真下と凸面鏡がある部分以外は、投影した映像が映るようになっている。視野角は、図1に示したタイプでは水平方向360度、垂直方向120度程度が確保できる。

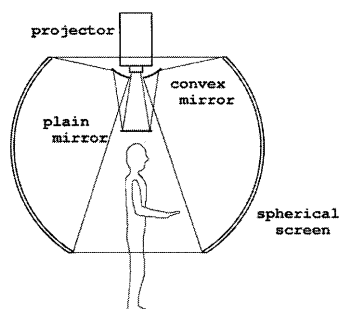


図1 Ensphered Vision の構成

Fig.1 Basic composition of Ensphered Vision

3. 新EVの開発

ここでは、水平360度をプロジェクタ1台で投影していた従来EVから、解像度・明るさなど画質面を向上させ立体視可能とした新EVの開発経緯を述べる。

3.1 設計仕様

(1) 球面スクリーンについては、試作機では発泡スチロールを使用していたが、投影面の凹凸が目立ってしまい没入感を著しく損ねていた。そこで新EVではFRP(Fiber Reinforced Plastics)を使用することにした。スクリーンの大きさについては設置する部屋のスペースを考慮して内径2.0[m]、プロジェクタ等の設置スペースを考慮して仰角・俯角はそれぞれ55度を確保できるような形状とした。これは従来のEVより内径が10[cm]小さく、仰角・俯角はそ

れぞれ5度狭い値である。

(2) 使用プロジェクタに関しては、三管式CRTプロジェクタは投影光を凸面鏡で反射させた場合、色ずれが発生するため本球面ディスプレイ方式では使用することができない。よって単眼式のプロジェクタを使用することになるが、単眼で時分割立体視の機能を備えるものは、筐体が大きく高価である。特に筐体大きい場合、スクリーン上部の開口部と凸面鏡の隙間に置くことが難しくなるため、限られた設置スペースを反射鏡によって確保している本方式にとって致命的である。そこで液晶プロジェクタを用いることとした。

高解像度化は水平視野角360度を投影するプロジェクタ台数を複数に増やすことで対応できる。このとき球面スクリーン上で歪みなく投影できるような1台分の出力画像は図2中の四角で囲った範囲のように扇形となる。この扇形の円弧角度は使用するプロジェクタ台数が増えるほど狭くなるため、それに伴いプロジェクタ画像領域の使用効率も減少する傾向にある。このプロジェクタ画像使用領域率を1台のプロジェクタにつきSXGAの解像度をもつ場合において、全プロジェクタにおける有効画素数と共に表すと図3になる。この図からプロジェクタ画像領域を最も効率良く使用できるのは3台のときであり、有効画素数については7台以上でほぼ頭打ちとなることがわかる。この結果と、内径2.0[m]のスクリーンにおけるプロジェクタ設置スペースを考慮すると片眼用4台以上の設置は困難であることから、使用プロジェクタ数は水平360度を投影する3台を1組とし、立体視のために左眼用・右眼用の2組、計6台とした。このとき視距離1.0[m]のスクリーンでの視力換算は片眼用1台のときの約0.06に比べ、片眼用3台のときは約0.15となる。また片眼用に3台を用いると、例えば市販のリアルタイム全方位カメラでは最も解像度が高いPoint Grey Research社製のLadybug[11]の全周画像を無駄なく呈示することが可能となり、実写全方位画像を呈示する場合には十分な解像度であると考えられる。

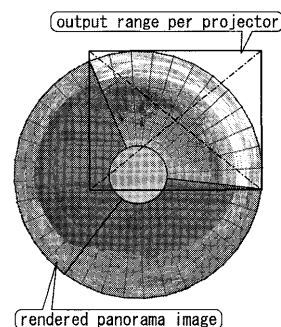


図2 出力画像分割

Fig.2 Division of rendered panorama image

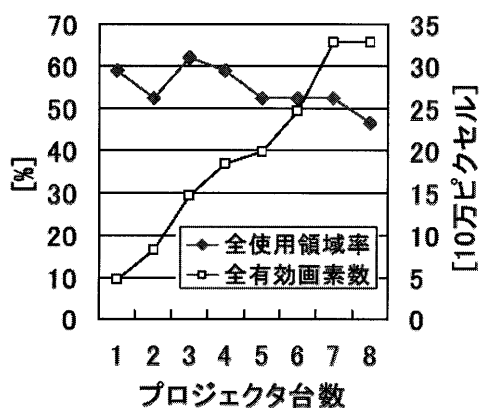


図3 プロジェクタ使用台数別の有効画素数の変化

Fig.3 Amount of valid pixels with different number of projectors

(3) 視野角は、1台のプロジェクタ投影範囲 120 度の水平視野角を延長し、延長した互いの端を投影スクリーン上でブレンディングしながら重ね合わせる。実際には左右 5 度ずつ延長、つまり 1 プロジェクタの最終的な水平視野角は 130 度とした。また、垂直視野角は人間の目に映る範囲に合わせて仰角・俯角合わせて 120 度として設計を始めたが、実際にはスクリーン上部のプロジェクタ等の設置スペースを考慮して仰角は 55 度、観察者真上にくる平面鏡の影響で俯角は 50 度とした。また左眼用と右眼用のプロジェクタ投影光がスクリーン上で同じ範囲に重なるのが理想的だが、共通の平面鏡・凸面鏡を全プロジェクタで使用している場合には実現できない。そこで左眼用と右眼用の投影範囲を水平方向に 30 度ずらし、その差は投影画像レンダリング時に視線方向を水平 30 度逆に回転させることで吸収することにした。

(4) 平面鏡の形状については、試作機ではプロジェクタ 1 台につき 1 つの鏡を割り当てていた。このようにすると、投影光は投影したプロジェクタと同じ側のスクリーンへと結像する。この利点は平面鏡を固定するステーが反射光を遮断しないことである。しかし欠点として平面鏡の配置に自由度が増えてしまいプロジェクタの位置調整がシビアになる。そこで新 EV では、従来の EV のように一枚で構成された円形の平面鏡を用い、そこに 6 台全ての投影光を反射させることにした。この平面鏡は投影光を遮らないように細いテグスによって吊り下げられる。

(5) 立体視を実現するための方式にはメカニカルシャッターによる時分割方式を採用した。時分割方式とは、左眼用、右眼用の映像を交互に切り替え、これと同期したシャッター眼鏡を着用して映像を見ることにより左右の映像を分離する方法である。投影系のディスプレイで用いられる代表的な手法とし

ては他に偏光方式があるが、偏光方式では偏光面をくずさないように投影面上に誘電体をコーティングしなければならず、プロジェクタからの光がスクリーン面でバウンドしてしまうため、全方向型 EV には向いていない。

時分割方式を実現するための方法であるが、EV 方式ではプロジェクタ設置空間に制限があることから、大型のプロジェクタの使用に適していない。そのため一般に大型となる単眼式で時分割ができるプロジェクタを用いることは容易でない。またプロジェクタレンズ前に StereoGraphics 社製の Z-Screen[12] のような液晶シャッターパネルを配置する方法では設置と制御が容易であるが、三管式 CRT プロジェクタや 3 板式 DLP プロジェクタでしか対応していない、開放しても投影光が完全透過せず光量不足になるといった問題点が挙げられる。以上の理由からメカニカルシャッター方式で時分割することが妥当だと考えられる。従来の EV では回転角度を制御しやすいステッピングモータを使ったメカニカルシャッターを採用し、1 組計 2 台のプロジェクタ映像を切り替えていた。これを参考にし、新 EV ではさらに 3 つのシャッターをタイミングベルトによって連結させ、1 つのモータで回転させることにした。なおこのメカニカルシャッター方式を使った例では他にマイクロドーム[9]がある。

3.2 シミュレータによる配置設計

実際の設計ではプロジェクタ・平面鏡・凸面鏡・スクリーンなどのそれぞれの位置・姿勢、凸面鏡の曲率半径、スクリーン上の投影範囲を決める。ここではプロジェクタなど EV を構成する物体をオブジェクトと呼び、位置・姿勢などの決定すべき値をパラメータと呼ぶことにする。配置設計では、要求された視野角全てをカバーする有効画素の数が最も多くなるように、且つそのときの結像状態が良くなるような配置パラメータや凸面鏡の曲率半径などのパラメータを決めればよいが、これらのパラメータの組合せは複雑になるため計算機によるシミュレータ(図 4)を利用する[7], [8]。このシミュレータでは各オブジェクトの位置・姿勢を自由に変更でき、そのときのパラメータでプロジェクタからの投影光がスクリーンのどこへ投影されるかなどの情報がリアルタイムで表示できるようになっている。シミュレータによる配置設計を開始できる条件としては、使用プロジェクタの決定とその光学中心・画角・あおり角が測定されていることで、要求される投影範囲や球面スクリーンの大きさなど物理的制約も把握しておくことが望ましい。

さらに新 EV の設計では従来の EV と比べてプロジェクタ、平面鏡、凸面鏡、スクリーンそれぞれのオ

プロジェクト同士による接触・投影光の遮断が生じやすい。そのためプロジェクタ等の 3D モデルと光線の干渉チェックを実装した。最終的なパラメータの最適化には、この干渉チェックを用いながら必要とされる投影範囲や有効画素数などの仕様を満たすように人間がインタラクティブに操作して最適化を行う。

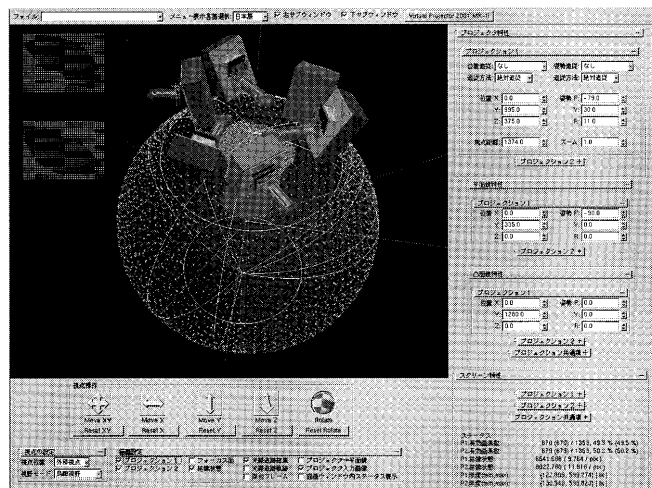


図 4 設計に使用したシミュレータ

Fig.4 Simulator for optical design

3.3 ステータ設計

前節の配置設計により、プロジェクタ、平面鏡、凸面鏡、スクリーンの配置を求めたことになるが、さらにこれらを固定するための架台を実際に設計する必要がある。架台設計に要求される点としては、(1)架台がプロジェクタ投影光を遮断してはならない、(2)プロジェクタ等の位置・姿勢を微調整できるような工夫が必要である、という 2 点が主にあげられる。(2)に関しては、シミュレータで使用するプロジェクタの光学中心・画角を実測する際の誤差、また EV を組み立てるときの誤差などにより、投影光がシミュレーション通りの理想的な場所に到達しないことが多々ある。新 EV を運用する上でまず必要なのが、各プロジェクタ投影光がそれぞれ要求されている投影範囲にきちんと投影できるかどうか、ブレンディングできるのに十分な範囲で投影光の重畳がなされているかどうかであることから、プロジェクタを EV 架台に設置した上で微調整時に水平移動はもちろん任意の方向に回転でき、調整後はしっかりと固定できる機構があることが重要となる。

実際のステータ設計には市販の 3DCG ソフトを用いた。本来ならば設計用の 3DCAD を用いるところだが環境が整えられなかったため、使い慣れたツールを選んだ。また 2 次元では空間的情報が把握しづらいため、3 次元で設計できるものがよいと判断した。手順は図 5 の通りである。

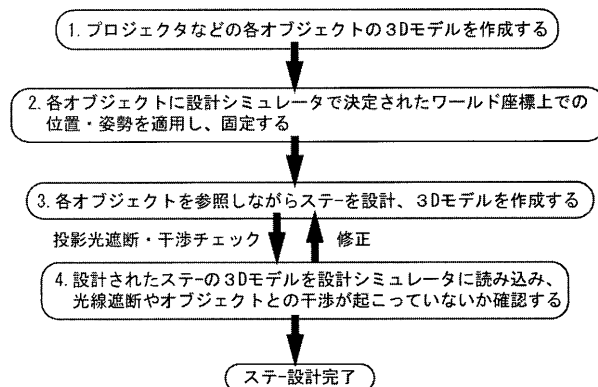


図 5 ステータの設計手順

Fig.5 Design process for Ensphered Vision's stay

なお各オブジェクトのローカル座標原点は、スクリーンは曲率中心、プロジェクタは実測した光学中心とし、平面鏡・凸面鏡は、投影光反射点が存在する範囲以上の大きさで作成する。こうして実際に設計したプロジェクタステータの様子を図 6 に示す。

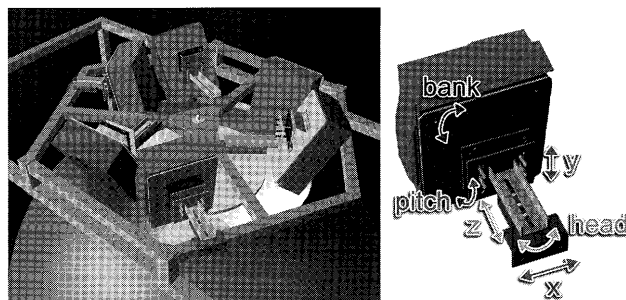


図 6 設計したプロジェクタステータ (CG イメージ)

Fig.6 Projector Stay (3DCG model)

3.4 メカニカルシャッターの製作

立体視をするための機構として時分割方式のメカニカルシャッターを製作した。図 7 はその模式図である。左眼用・右眼用プロジェクタ各 1 台の中心に回転式シャッターを配置しこれを 1 組とする。さらに計 3 組のシャッターをプーリとタイミングベルトで連結し中央のモータで駆動させる。モータにはある程度のトルクが必要なので maxon 製 DC モータ 118798 を使用した。また、モータドライバには岡崎産業製 TITech Driver PC-0144-2 を使用し、モータの速度を電圧変化によるオープンループで制御する。液晶シャッター眼鏡には I/O DATA 製の市販品を用いている。制御信号は、1 kHz 以上のバースト波を 555 タイマーによって作成し、ある 1 つのシャッターの真下に配置したフォトフレクタからの ON/OFF 信号を元にトランジスタによるスイッチングを行っている。よってモータと液晶シャッター眼鏡間のフィードバックは行っていないので、シャッターは予め全

てのプロジェクタ組で投影光の遮断の整合がとれるような位置に調節しておき、ちらつきのない速度が得られるまでモータドライバで調節するという方法をとっている。

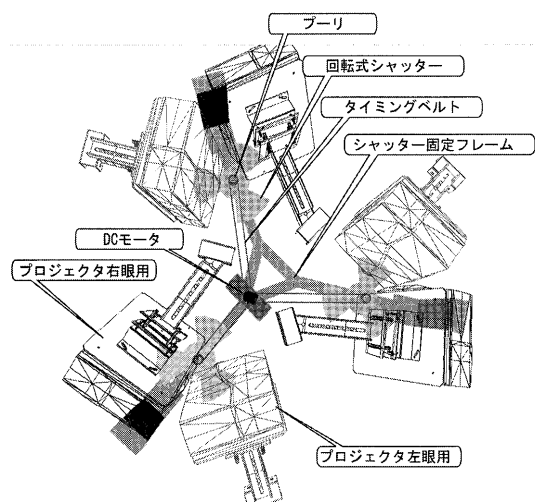


図7 メカニカルシャッター機構
Fig.7 Composition of mechanical shutter

以上新EVのハードウェア部の設計経緯を述べてきた。まとめとして、複数台のプロジェクタを用いたEVの設計には主として、使用できるハードウェアの選定、オブジェクトのパラメータの決定、各オブジェクト配置にあったステーの設計があり、前後の設計ステージを考慮しながら進めていくことが望ましい。

3.5 投影ソフトウェア

スクリーン上に歪のない映像を投影するためのソフトウェアは大きく分けて、ユーザが作成したワールドをレンダリングする部分、そのレンダリング結果をEVに歪み無く投影するために補正をかける部分で構成される。EVに映像を歪み無しに投影するためには、取得した全周映像を扇形状に変形させる必要がある。これを歪み補正と呼んでいる。配置設計が決定した時点であらかじめ幾何計算により、全周映像のどの緯度経度点を、変形後の扇形上のどの位置に貼り付けるかを算出でき、これの対応関係から歪み補正対応表を作成する。実際の投影時に全周映像はプロジェクタ台数分またはそれ以上の視体積分割を行い、平面映像として描画し、先ほどの対応表をもとにテクスチャマッピングの変形によって歪み補正を行う。さらに投影映像の境目を自然にみせるため、ブレンディングを行う。扇形の出力画像上で左右の水平5度の範囲を端にいくにつれ徐々に光量が減るように黒くする。

全周映像の立体視については、左眼用・右眼用で浮き出し量に合わせた視差をつけることにより実現

する。本全周球面ディスプレイでは頭部を大きく移動して映像を観察するのは俯角部分にスクリーンがせり出しているという構造上難しく、運動視差の呈示メリットもあまりない。そのため観察者はスクリーン球のほぼ中心から体全体を回転させて映像を眺めることになる。このとき視線方向に対するスクリーン面は垂直に保たれ、球面スクリーンを平面スクリーンでつなぎ合わせたものとして近似できる。そして図8のように、8つ以上の平面スクリーンで球面スクリーンを近似した場合、つまり視体積を全周で8分割以上行った場合に、観察者の視線方向をセンシングの必要なしに、単方向で継ぎ目の無い場所で立体視を行ったときの結果とほぼ同じになることが文献[10]で確認されている。新EVでも理論的に従来EVと同じことが適用できるため、同じく視体積8分割以上による表示を実装した。なお分割数はソフトウェア設定でただちに変更可能であるが、分割数を減らすと立体視性能に、増やすとフレームレートにそれぞれ悪影響が出るため、シーンの複雑さによって最適な分割数を決めることが望ましい。

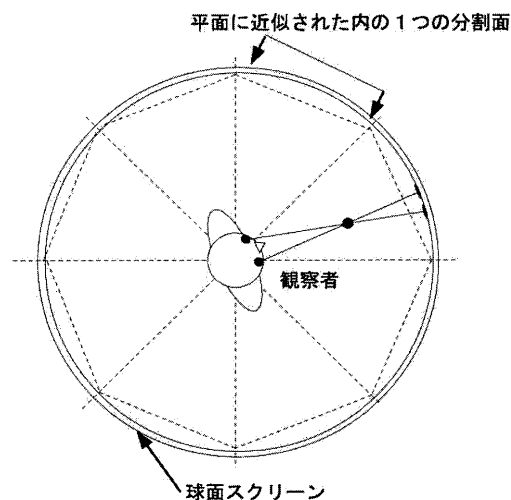


図8 視体積分割
Fig.8 View volume division

3.6 システム構成

全体構成を図9に示す。新EVシステムは大まかに映像生成部、投影系、メカニカルシャッター部で構成される。映像生成部はPC2台からなっており、左眼用・右眼用描画PC (Pentium4 2.26GHz) 各1台においてCG描画、歪み補正、その他のソフトウェア処理を実時間に行う。これらのPCは100Base-TのTCP/IPによる通信で同期をとっている。プロジェクタに入力される画像は、歪補正後に解像度3840 x 1024でレンダリングされ、トリプルヘッドのグラフィックカードMatrox Parheliaによりプロジェクタ1台につき1280 x 1024の解像度に分割され、6台の

プロジェクタそれぞれに入力される。CG 描画、歪み補正には OpenGL を用いている。なお表示する内容とは無関係に一回の歪み補正に要する時間は約 20[msec]であった。

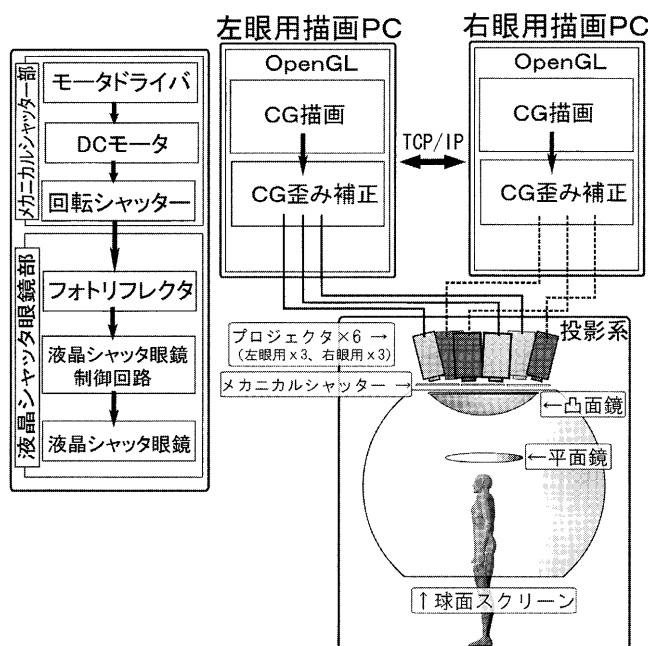


図 9 システム構成

Fig.9 System component

図 10 は内部が見えるように球面スクリーン水平 120 度分を外した状態で撮影した新 EV の外観である。投影系はプロジェクタ、平面鏡、凸面鏡、球面スクリーン、架台によって構成される。

(a) スクリーン

スクリーンは FRP 製の内径 2.0[m]、北極部と南極部を除いた垂直画角は中心より仰角 55 度・俯角 55 度の球面であり、人が出入りできるように 3 分割されている。球面スクリーンの投影面にはコントラスト低下を抑える塗料が塗られている。球面スクリーンの曲率中心は人間の視点に合わせたため床面よりおよそ 1.7[m] であり、全占有面積はおよそ 2.5(W) × 2.5(D) × 3.0(H) [m] である。

(b) プロジェクタ

使用プロジェクタは 3 原色反射型液晶シャッター方式の CP-SX5600J (日立製) で、SXGA の解像度に対応している。このプロジェクタを両眼視用に 2 台 1 組とし、計 3 組、つまり全プロジェクタ数 6 台を使用している。設置位置はスクリーン及び凸面鏡の直上であり、設計シミュレーション結果に基づいて投影光が平面鏡内に収まるような姿勢になっている。

(c) 反射鏡

反射鏡には平面鏡と凸面鏡を使用している。平面鏡は円形状直径 400[mm] のガラス鏡であり、架台から 3 本のテグスによって観察者の頭上に吊り下げられている。凸面鏡はアルミ合金をメッキ加工した曲率半径 512[mm] の球を厚さ 10[mm] で輪切りにした形状であり、架台に固定されている。

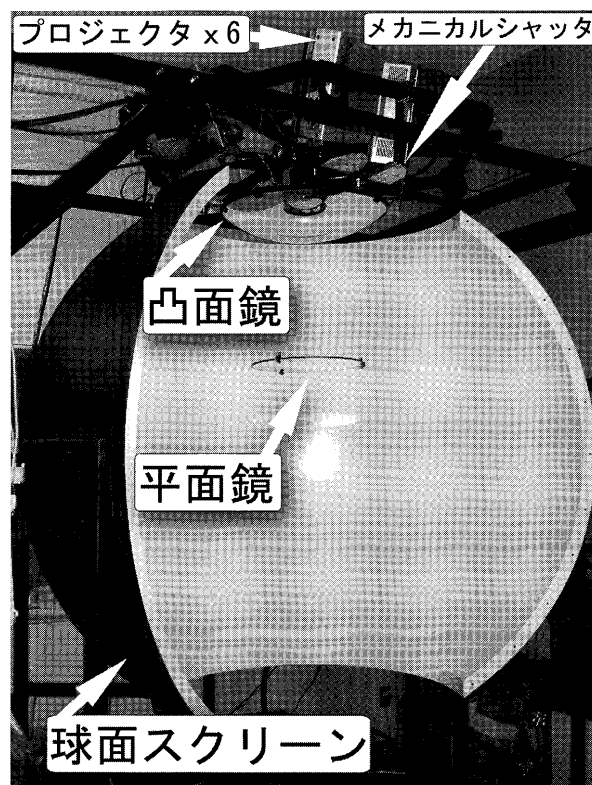


図 10 新 EV の外観

Fig.10 Overview of the new model EnspheredVision

(d) メカニカルシャッター

メカニカルシャッター部は、maxon 製 DC モータを中心に 3 方向に伸びたタイミングベルト、プーリ、回転シャッター、ベアリングホルダ、シャッターステータ、モータドライバ、液晶シャッター眼鏡とその制御回路によって構成される。図 10 にメカニカルシャッター部の概観を示す。両眼用の映像は、このプロジェクタレンズ面付近にあるシャッターによって開放・遮断の制御が行われる。1 つのシャッターには 70 度の角度を持つ 3 つの羽がある。つまり開放・遮断の時間比は 5 : 7 となり、遮断時間を多くとることで片眼用映像がもう一方の片眼用映像と混じるクロストークを防いでいる。3 つのシャッター全体の開放・遮断はタイミングベルトによって同期され、液晶シャッター眼鏡との同期は、1 つのシャッター真下に配置されたフォトリフレクタによる同期信号を有線で送信することで、時分割方式の両眼立体視を実現している。

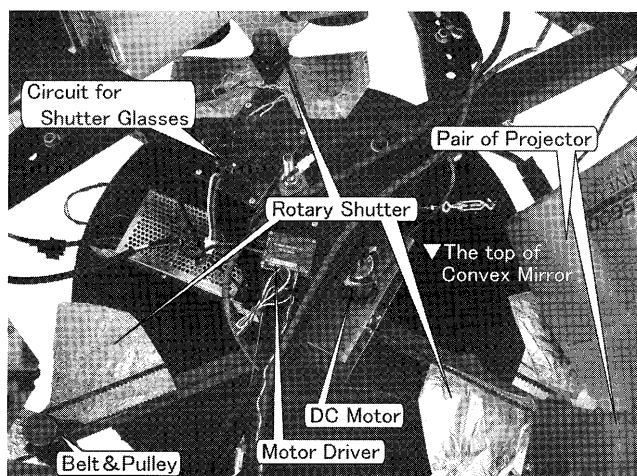


図 11 メカニカルシャッター外観（凸面鏡上部に設置）

Fig.11 Overview of mechanical shutter

(on the top of convex mirror)

3.7 投影映像の調整

設置後、球面スクリーン上で正しい投影結果を得るために、まず実際のプロジェクタ投影光が球面スクリーン上で結像する位置と、そのときのプロジェクタ画像上位置の対応関係を記録する必要がある。この対応関係を記録した対応テーブルを補正テーブルと呼んでいる。これは、もし全てがシミュレータ通りであれば必要ないが、実際にはあらゆる段階での誤差によって投影光の到達する位置がずれてしまうので、その誤差を吸収するキャリブレーションを意味する。

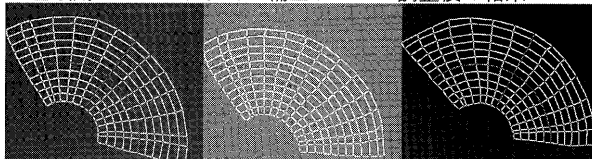
この補正テーブルは緯線経線をスクリーン上に投影し、スクリーン上での正しい位置へと緯線経線グリッドをマウスで配置するという方法で作成する。この作業が完了すると、スクリーン上で意図した位置に投影するためにはプロジェクタ画像上でどのピクセル位置に描画すればよいかが保障される。ランプ交換などによる若干の光学中心のずれが後から生じた場合でも、要求される投影範囲内に収まる程度のずれである場合がほとんどであり、この調整を行うだけで解決できる。

図 12 は設計シミュレータ上での補正テーブル出力イメージと、実際の補正テーブル、それを用いた歪補正後のレンダリング画像である。扇形の部分が球面スクリーンに投影される範囲であり、シミュレータ上でのイメージと比較してもほぼ設計値通りに出力されていることがわかる。また図 13 は水平 360 度の CG 映像を投影したときの様子である（カメラで撮影できるように球面スクリーン水平 120 度分を取り外してある）。

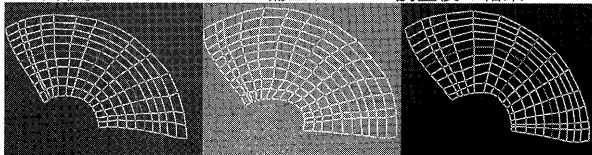
▼シミュレータ上での補正テーブル出力結果



▼左眼用プロジェクタでの補正テーブル調整後の結果



▼右眼用プロジェクタでの補正テーブル調整後の結果



▼歪補正後のCGパノラマ水平360度出力画像例

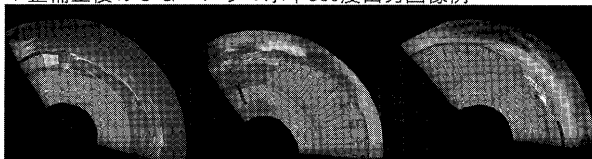
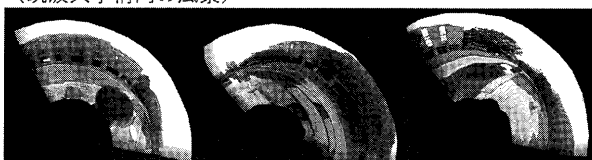
▼歪補正後の実写パノラマ水平360度出力画像例
(筑波大学構内の風景)

図 12 歪み補正後の出力画像

Fig.12 Distortion corrected output images



図 13 新 EV の投影の様子

Fig.13 Appearance of the new model EnspheredVision in operation

4. 性能評価

(a) 投影範囲

投影範囲については、ほぼシミュレーションと同じ俯角・仰角を得ることができた。平面鏡による凸面鏡反射光の遮断は発生しているが、シミュレーション設計の時点で避けることができなかったため、これは設計範囲内ということになる。なお、プロジェクタによる凸面鏡反射光の遮断は起こっていない。ただし、プロジェクタ投影光が凸面鏡のフレームにかする部分が存在しており、これは凸面鏡フレームが設計時点で想定していたものよりも大きくなったことが原因と考えられる。この場合、光線数が少なくなり、スクリーン上での明るさが減少するが、この影響はスクリーン上ではほとんど認識されない範囲であった。

(b) 有効画素数と領域使用率

実際の全有効画素数とプロジェクタ画像領域使用率の比較が表 1 である。図 12 の上から 2 つ目以降に示した補正テーブル調整後のプロジェクタ画像では、有効画素数が 1930000[pixel]となった。これは 3840 x 1024 の解像度での全ピクセルが 3932160[pixel]ということから、全体の領域使用率は約 49%となる。シミュレーション中ではこの領域使用率は 49.5%であったことから、プロジェクタ入力画像に関しては、ほぼシミュレーションと同じような性能であるといえる。従来 EV との比較では、従来 EV の有効画素は約 550000[pixel]であり、新 EV では水平視野角 360° あたりの有効画素数が従来 EV の約 3.5 倍となった。

表 1：全有効画素数とプロジェクタ画像領域使用率

Table.1 Amount of valid pixel and use efficiency

	従来 EV	新 EV
全有効画素数	約 55 万[pixel]	約 193 万[pixel]
プロジェクタ 画像領域使用率	約 42[%]	約 49[%]

(c) スクリーン上での画素の大きさ

投影された 1 画素のスクリーン上での結像状態について表 2 に示す。従来 EV が 5~17[mm]であったのに対し、新 EV ではスクリーン俯角部で最小 2[mm]、スクリーン仰角部で最大の 3[mm]程度となっていた。本球面ディスプレイの方式では通常俯角部で良好な結像状態が得られ、スクリーン俯角部でのピクセルの大きさが 2[mm]という値はシミュレーション通りであった。さらに今回は焦点距離を短くするレンズを使用していないことや凸面鏡の曲率半径を大きくとれたことから、結像状態が悪化する仰角部でも俯角部とほぼ変わらない 3[mm]という性能を出せたと考えられる。

表 2：球面スクリーン上での表示画素の大きさ（実測値）

Table.2 Pixel size on the spherical screen (actual measurement)

1 画素の大きさ	従来 EV	新 EV
仰角部	9~17 [mm]	2~3 [mm]
赤道部	5~8 [mm]	2 [mm]
俯角部	5 [mm]	2 [mm]

(d) 投影映像の状態

従来の EV ではスクリーンの材質に発泡スチロールを用いていた。発泡スチロールはどんなに粒を細かくしても人間の眼にはスクリーン上の粒による凹凸が認識されてしまう。このことは没入型ディスプレイの性質上、スクリーンの存在を意識させないことが重要であるため非常に問題となる。そこでこの新 EV では FRP によるスクリーンを採用している。FRP を用いることで表面をなめらかにでき、没入感を高めることに成功している。ただし、表面がツルツルした材質になった反面、スクリーンでの反射が確認されやすくなっており、仰角で発生した反射光が俯角部で再度反射され、そのとき緑や青といったある周波数成分の光のみが眼で確認された。この反射光は高い輝度値を持つ投影イメージによっては問題となる可能性がある。

数人の被験者に映像を観察してもらったところ、従来の EV に比べて色がはっきり表示されている、コントラストが改善されている、文字など細かい描写が認識しやすくなったとの感想が聞かれた。

(e) 立体視

立体視を正しく行うためには補正テーブルのキャリブレーションをまず厳密に行う必要がある。そこで、どの程度の精度が必要かを見積もるために、立体視を行うときと同じように画像を投影し、スクリーン上で 2 つの画像に左右方向のずれがどれだけ生じるとスクリーンから浮き出して見えるかという実験を行った。結果はおおよそ 10[mm]程度であった。これは正しく立体視をするためには 2 組のプロジェクタ間でのキャリブレーション精度を 10[mm]以下に抑える必要があることを意味する。なお文献[10]での従来 EV での実験結果では 15[mm]となっている。

また、画像の視差を 0 の状態からつけていった場合、どのくらいの浮き出し量で像が融像せず二重に見えてしまうかを被験者 3 人で実験したところ、スクリーンからおおよそ 60[cm]の距離で融像が破綻するという結果になった。なお同じく文献[10]での従来 EV での結果は約 53[cm]となっている。

林・中泉・矢野・岩田：複数プロジェクタを用いた立体視可能な全周球面没入型ディスプレイの開発

5. まとめ

プロジェクタ計6台、平面鏡、凸面鏡、FRP製球面スクリーン、メカニカルシャッターで構成されるEnspsheredVision方式による立体視を考慮した高解像度な全周球面没入型ディスプレイの開発を行った。立体視をするためのメカニカルシャッターにはタイミングベルトと回転シャッターを用いて、スクリーンに投影される3組のプロジェクタの映像を同期させた。解像度性能面ではプロジェクタ画像・スクリーン上での結果ともに、水平360度あたりのプロジェクタ数1台であった従来のEVと比較して3倍以上の向上が見受けられる。立体視性能についてはより詳細な評価が必要であるが、立体視にも対応できる高解像度化をEV方式で実現したといえる。

参考文献

- [1]C. Cruz-Neira, D. Sandin and T. DeFanti : Surround-Screen Projection- Based Virtual Reality: The design and Implementation of the CAVE, *Proceeding of SIGGRAPH' 93*, pp.135-142 (1993)
- [2]廣瀬通孝, 小木哲郎, 石綿昌平, 山田俊郎: 没入型多面ディスプレイ (CABIN) の開発, 日本バーチャルリアリティ学会第2回論文集, pp.137-140 (1997)
- [3]Toshio Yamada, Michitaka Hirose, Yoshihiro Iida : Development of Full Immersive Display: COSMOS, 4th International Conference on Virtual System and MultiMedia, pp.522-527 (1998)
- [4]Kenji Tanaka, Junya Hayashi, Yutaka Kunita, Masahiko Inami, Taro Maeda, Susumu Tachi : The Design and Development of TWISTER II: Immersive Full-color Autostereoscopic Display, *Proceedings of the ICAT2001*, 56-63 (2001)
- [5]柴野伸之, 柏木正徳, 澤田一哉, 竹村治雄: 小型半球面スクリーンを用いた没入型視覚ディスプレイの開発, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会 (2001)
- [6]岩田洋夫: 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大会論文集 Vol.3 (1998)
- [7]橋本、岩田: 凸面鏡を用いた全方向球面ディスプレイの光学設計、日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 Vol.3 No.2 (1998)
- [8]林、矢野、岩田: 球面没入型ディスプレイの画質改善、日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集 (2004)
- [9]藤本、佐野、関谷: 遠隔作業インタフェースとしての

背面投射型球面ディスプレイの開発、精密工学会誌、68巻5号, pp. 671-675 (2002)

- [10]橋本、高柳、岩田: 全方向球面ディスプレイにおける立体映像の生成、ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol.4 No.3 (2002)
- [11]Point Grey Research Inc. : Ladybug 、
<http://www.ptgrey.com/products/ladybug/>
- [12]StereoGraphics Corporation : Z-Screen 、
<http://www.stereographics.com/index.htm>
(2005年1月14日受付)

[著者紹介]

林 隆伯 (正会員)



2003年筑波大学工学システム学類卒。2005年筑波大学大学院理工学研究科修了, 同年三菱プレジジョン株式会社入社。没入型ディスプレイに関する研究に従事。

中泉 文孝 (正会員)



2003年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了, 同年筑波大学理工学研究科ベンチャービジネスラボラトリー非常勤研究員。2005年ATRメディア情報科学研究所研究員。没入型ディスプレイに関する研究に従事。博士(工学)。

矢野 博明 (正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD), 99年筑波大学システム情報工学研究科講師, 現在に至る。力覚呈示, 移動感覚呈示に関する研究に従事。博士(工学)。

岩田 洋夫 (正会員)



1986年東京大学大学院工学系研究科修了, 同年筑波大学構造工学系助手, 現在筑波大学システム情報工学研究科教授。ハプティックインタフェース, ロコモーションインタフェース, 没入型ディスプレイの研究に従事。博士(工学)。