OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	スケーラブルなドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法に関する研究
Author(s)	柴野, 伸之
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2106
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

目次

第 1 章　序論 1
1.1　背景と目的 1
1.2　論文の構成 3
第 2 章　没入型視覚ディスプレイの関連研究 4
2.1　はじめに 4
2.2　没入型ディスプレイの定義と分類 8
2.3　没入型ディスプレイの特徴と技術課題 13
2.3.1　複合平面形状没入型ディスプレイ 13
2.3.2　曲面形状没入型ディスプレイ 13
2.3.3　複合平面形状没入型ディスプレイの最新状況 15
2.4　おわりに 15
第 3 章　ドーム形状没入型視覚ディスプレイの設計課題の抽出と有効性の検証 17
3.1　はじめに 17
3.2　ドーム形状没入型視覚ディスプレイの試作 17
3.3　設計課題の抽出 18
3.3.1　映像歪み補正 18
3.3.2　描画領域分割映像生成 21
3.3.3　映像境界部分の整形 23
3.3.4　映像ブレンディング 23
3.4　ディスプレイとしての有効性検証 23
3.4.1　視野範囲 23
3.4.2　映像歪み補正効果 23
3.4.3　映像精度 29
3.4.4　アンケート評価 29
3.5　おわりに 32
第 4 章　ドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法 34
4.1　はじめに 34
4.2　一般的構築手法 34
4.2.1　プロジェクタ投影映像モデル化 34
4.2.2　CADによるドームスクリーン形状作成 38
4.2.3　プロジェクタ配置概略設計 38
4.2.4　プロジェクタ配置詳細設計 40
4.2.5　ドームスクリーン作成・設置 40
4.2.6　プロジェクタ設置 43
4.2.7　PC接続 43
4.2.8　プロジェクタ姿勢推定による微調整 43
4.3　映像歪み補正機能と投影シミュレータの開発 43
4.3.1　映像歪み補正機能 43

4.3.2 映像同期表示機能.....49
4.3.3 投影シミュレータによる調整.....49
4.4 小型ドームディスプレイの構築.....49
4.5 構築手法と小型ドームディスプレイの評価.....54
4.5.1 視野範囲.....54
4.5.2 映像精度.....54
4.5.3 実用性.....55
4.5.4 拡張性.....55
4.5.5 最適なドームスクリーン形状.....55
4.6 おわりに.....65
第 5 章 マルチプロジェクタを用いたドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法.....67
5.1 はじめに.....67
5.2 マルチプロジェクタ対応への考察.....68
5.2.1 プロジェクタ投影映像モデル化.....68
5.2.2 ドームスクリーンサイズ・形状の決定及びCADによる形状作成.....68
5.2.3 プロジェクタ配置概略設計.....69
5.2.4 プロジェクタ配置詳細設計.....69
5.2.5 ドームスクリーン作成・設置.....72
5.2.6 プロジェクタ設置.....72
5.2.7 PC接続.....72
5.2.8 プロジェクタ姿勢推定による微調整.....76
5.2.9 映像境界部分の輝度調整.....76
5.3 映像境界部分の特定と映像輝度補正手法の開発.....79
5.3.1 映像境界部分の特定手法.....79
5.3.2 映像境界部分の輝度補正手法.....83
5.3.3 映像同期表示手法.....83
5.4 大型ドームディスプレイの構築.....83
5.5 構築手法と大型ドームディスプレイの評価.....88
5.5.1 視野範囲.....88
5.5.2 実現性.....88
5.5.3 映像精度.....88
5.5.4 輝度補正.....89
5.5.5 実用性.....89
5.5.6 拡張性.....89
5.6 おわりに.....95
第 6 章 結論.....97
謝辞.....101
参考文献.....102
付録.....109
発表論文リスト.....113

図目次

図 1.1　仮想住宅空間への没入感を伴った体験の姿. 2
図 1.2　高い臨場感を伴った設計・シミュレーションを対象とした応用範囲. 2
図 2.1　高臨場VR技術のコンセプト. 5
図 2.2　眼球構造[14]. 5
図 2.3　水平及び垂直視野の情報受容体特性の分布状態[14]. 6
図 2.4　本研究の目標とする視野範囲. 6
図 2.5　平衡感覚や運動感覚に及ぼす周辺視野の影響測定実験[16]. 7
図 2.6　映像回旋運動による前後方向への身体動揺誘起結果[16]. 7
図 2.7　CAVEの構造[18]. 9
図 2.8　CAVE体験の様子[18]. 9
図 2.9　CABINの構造[19]. 10
図 2.10　COSMOS外観[20, 21]. 10
図 2.11　円柱形状ディスプレイ体験の様子[22]. 11
図 2.12　VisionStation体験の様子. 11
図 2.13　臨場館外観. 12
図 2.14　Ensphered Vision構造図及び体験の様子[26, 27]. 12
図 2.15　CAVEにおける直線の折れ曲がり. 14
図 2.16　曲面形状没入型ディスプレイにおける直線の湾曲. 14
図 2.17　タイル状ディスプレイの表示例[40]. 16
図 2.18　複数プロジェクタの設置調整作業の様子[40]. 16
図 3.1　ドーム形状没入型視覚ディスプレイ設置図面. 19
図 3.2　ドーム形状没入型視覚ディスプレイ体験の様子. 19
図 3.3　ドーム形状没入型視覚ディスプレイシステム構成図. 20
図 3.4　歪みの模式図，及び逆補正の模式図. 20
図 3.5　歪み補正パラメータ生成模式図. 22
図 3.6　ビューフラスタム定義. 22
図 3.7　仮想スクリーン面の定義. 22
図 3.8　境界部分の整形を行わない境界が重なった描画領域の様子. 24
図 3.9　境界部分の整形模式図. 24
図 3.10　境界部分整形結果の様子. 25
図 3.11　映像境界部分の重ね合わせとブレンディング機能の模式図. 25
図 3.12　映像ブレンディング効果の様子. 26
図 3.13　映像歪み補正効果の様子. 27
図 3.14　都市形状を重ね合わせた映像歪み補正効果の様子. 28
図 4.1　ドームディスプレイ構築手順. 36
図 4.2　プロジェクタ投影映像モデルの設計. 37
図 4.3　プロジェクタスペック測定方法. 39
図 4.4　CADを用いた設計. 39

図 4.5　プロジェクタを周辺部に移動する概念. 41
図 4.6　プロジェクタ配置設計. 41
図 4.7　投影シミュレータ画面と入力画面. 42
図 4.8　レーザー墨出し器設置状態. 45
図 4.9　ビューフラスタムと投影フラスタムの定義. 45
図 4.10　ビューフラスタムから投影フラスタムへの変換手法. 46
図 4.11　描画処理のフロー. 47
図 4.12　$P_{i,j}$ →$Q_{i,j}$対応マップを適用した歪み補正前後のグリッド映像. 48
図 4.13　処理シーケンス. 51
図 4.14　投影シミュレータ. 52
図 4.15　基本システム構成. 53
図 4.16　サイバードーム外観. 53
図 4.17　レーザーとグリッド表示との重なり. 56
図 4.18　視差を零とした両目映像の一致性評価. 57
図 4.19　レーザーとグリッド表示との重なり部分拡大. 58
図 4.20　正方形映像と実物正方形との重ね合せ評価. 59
図 4.21　実物廊下写真と廊下イメージとの重ね合わせ評価. 60
図 4.22　ドームスクリーン上の都市空間設計表示例. 61
図 4.23　ドームスクリーン上の住空間設計表示例. 62
図 4.24　内径 3.7m中型ドームディスプレイ体験の様子. 63
図 4.25　中型ドームディスプレイ配置立面図. 63
図 4.26　立体視における輻輳と調節. 64
図 4.27　視点位置とスクリーンとの距離，及び平面スクリーンとの大きさ換算. 64
図 5.1　大型ドームディスプレイ構築手順. 70
図 5.2　ドームサイズと広視野映像体験人数の関係. 71
図 5.3　初期プロジェクタ配置設計と映像遮蔽検討. 71
図 5.4　投影シミュレータ画面と入力画面. 73
図 5.5　大型ドームディスプレイの設計図. 74
図 5.6　墨出し作業風景. 75
図 5.7　ドーム形状精度測定用のレーザー距離計と専用三脚との設置模式図. 75
図 5.8　調整後のドームスクリーン上のグリッド映像. 77
図 5.9　映像境界部分形状とその重ねあわせ映像. 78
図 5.10　複雑に重なり合った映像境界部分. 80
図 5.11　投影位置と視点位置の位置関係による投影映像の形状. 81
図 5.12　映像境界部分の特定手法. 82
図 5.13　各映像境界部分の輝度傾斜. 84
図 5.14　多重映像境界部分の輝度傾斜. 84
図 5.15　輝度補正フィルタと都市空間設計データ重畳. 85
図 5.16　映像境界部分特定手法及び輝度補正手法. 86
図 5.17　基本システム構成. 87

図 5.18　システム体験模式図. 87
図 5.19　視差を零とした両目映像の一致性評価. 90
図 5.20　中段右及び下段右の視差を零とした両目映像の拡大表示. 91
図 5.21　輝度補正効果. 92
図 5.22　ドームスクリーン上の都市空間設計表示例. 93
図 5.23　実用データによる映像境界部分の連続性評価. 93
図 5.24　全球ドームディスプレイの設計. 94

表目次

表 3.1　ドーム形状没入型視覚ディスプレイアンケート評価結果.....30
表 3.2　都市環境設計全体システムアンケート評価結果.....31

第 1 章　序論

1.1　背景と目的

目の前に本物と見分けがつかないほどのリアルな立体映像が提示され，視覚だけではなく聴覚，触覚など人間の感覚系に，現実と同様の動きや反応をフィードバックする仕組みの中では，体験者は現実空間と人工的に作られた仮想空間の区別がつかなくなり，仮想空間を現実と認識する高い没入感を得ると言われている[1].

これは，ＳＦ小説や映画の世界などで登場する設定であって，現実には実現されていない．しかし，このような仕組みが実現されたならば，例えば未来の住宅や都市空間を，臨場感を持って住み心地までも考慮した設計が可能になると期待できる[2].

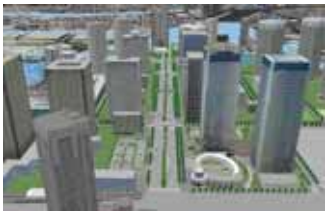
図 1.1 に仮想の住宅空間に入り，住宅空間の機能を確認するといった理想的な体験の姿を示す．実際に製造することなく高い臨場感を伴ったデザインや機能の検討が可能になるといった点では，自動車や船舶，航空機など大型工業製品の設計にも有効である．設計への応用だけでなく，災害発生時の避難シミュレーション仮想体験による防災設計への応用や，実際には体験することが難しい訓練や教育への応用も有効である[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. 図 1.2 に応用可能な対象を示す.

コンピュータの急速な進歩は, 単に CPU の処理能力向上やメモリ量の増大にとどまらず, 近年はグラフィックス処理能力・ネットワーク拡張性に加えて，低コスト化を実現している．10 年前には，スーパーコンピュータやグラフィックススーパーコンピュータでしか実現しなかった様々な処理が，PC（Personal Computer）と呼ばれる個人で所有する安価なコンピュータ上で実現可能となっている．これに対して，映像ディスプレイには大きな変化はなく, ほとんどすべての場合 17～21 インチ程度のパネル型デスクトップモニタが使用され, 3 次元 CAD による建築設計・機械設計においてもパネル型モニタが使用される．わずかにプレゼンテーション分野において，大型スクリーンや複合スクリーンを用いたパネル型モニタを拡張したディスプレイを使用することが増えてきたといった状況である．一方，家庭用のテレビでは，ブラウン管方式から液晶方式・プラズマ方式へ主流が移るという大きな変化が生じ，最大 70 インチ程度まで大型化が進んでいる．しかしながら，これらのパネル型モニタは人間を中心に考えられたとは言えず，ブラウン管の形状や大きさによって製造された，いわば製造方法を中心に考えて発展してきたと言える．液晶テレビやプラズマテレビがブラウン管テレビに置き換わりつつある現状においても，パネル型モニタはブラウン管モニタの形状を踏襲した横長の矩形のままとなっている．人間を中心に考えるとは，人間の感覚系の特徴を把握し，その特徴に適合した仕組みを作ることである.

本研究は，視覚特性に適合した映像表示ディスプレイとして，体験者の周囲を囲み視野を覆うような映像提示を実現するドーム形状没入型視覚ディスプレイを提案し，提示される映像空間に自らが存在するかのような没入感や臨場感を伴う空間体験を実現することを目的とする．コストを重視した構成や多数の体験者に同時に映像提示する構成などの実用システムの構築を通じて，実現における課題を克服する手法を開発し，様々なスケールに対応したドーム形状没入型視覚ディスプレイの構築手法を明確にすることを目的とする.

図 1.1　仮想住宅空間への没入感を伴った体験の姿.

(a)住空間設計



(b)都市設計

(c)商品ﾌﾟﾛﾄﾀｲﾋﾟﾝｸﾞ

(d)照明ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ

(e)災害時避難ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ

(f)人間工学ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ

(g)教育・ｴﾝﾀｰﾃｲﾝﾒﾝﾄ

図 1.2　高い臨場感を伴った設計・シミュレーションを対象とした応用範囲.

1.2　論文の構成

本論文の次章以降の構成を以下に説明する．

第 2 章では，まず，人間の視覚特性についての知見を述べ，次に没入型ディスプレイの定義と関連研究を引用しながらその分類について述べる．そして，ドーム形状ディスプレイの特徴を，他の形式による没入型ディスプレイとの比較から明確にする．

第 3 章では，まず，ドーム形状ディスプレイの長所を活かしたドームディスプレイを実際に試作し，次に試作を通じて，ドーム形状ディスプレイを構築するための課題を抽出する．さらに構築したドーム形状ディスプレイの有効性を検証し，最後に，実用システムを構築するための課題を明確にする．

第 4 章では，第 3 章で示した実用システム構築の課題として，高価なコストと巨大な設置スペースという課題に着目し，低コストでコンパクトな大きさの小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイを構築し，その構築手法について述べる．構築に際して開発の核心であるソフトウェアによる映像歪み補正，及び映像生成技術について述べるとともに，小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの映像表示精度及び実用性について評価する．

第 5 章では，都市空間設計など関係者が複数となる用途においては，多数の体験者が同じ映像を同時に見るという空間共有体験が重要であるため，小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの技術を拡張した新たな大型ドームディスプレイとして，マルチプロジェクションを用いたスケーラブル大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイを構築し，その構築手法について述べる．構築に際して開発の核心であるソフトウェアによる映像輝度補正，及び映像生成技術について述べるとともに，大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの実現性，映像表示精度，実用性，及び拡張性について評価する．

最後に，第 6 章では，本研究で得られた結論を整理するとともに，本研究で得られた成果をもとに今後の展望を述べる．

第 2 章　没入型視覚ディスプレイの関連研究

2.1　はじめに

コンピュータ上に構築した仮想（バーチャル）環境を，単なる映像提示ではなく人間の感覚系に作用するような呈示を実現することによって，まるでその空間に自らが存在するかのような没入感や臨場感を伴う空間体験を実現する技術，すなわち，マルチモーダル高臨場感 VR（Virtual Reality）技術[11]の開発において，本研究の人間の視覚特性に適合したドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法は非常に重要な意味を担う．

すなわち，人間の感覚系の中で視覚によって得られる情報は最も多く，感覚系の 80〜90%を占めると言われている[12]．従って VR における視覚提示は，単に映像を提示するだけでなく，バーチャル空間への没入感を体験者に呈示することが求められる．

マルチモーダル高臨場感 VR 技術のコンセプトを図 2.1 に示す．図 2.1 は，コンピュータで作るバーチャル環境が，視覚をはじめ聴覚・触覚・力感覚・移動感覚など感覚系の特徴に適合した呈示を体験者に行うと，体験者の生理的な反応として，手足や頭部・眼球などが無意識に動く，あるいは脳波や脈拍・筋電や心電などに影響が表れることを示す．この自律神経系応答の変化を計測して，的確な情報処理に基づいた呈示を続けて行うと，体験者はバーチャル環境で高い没入感覚を得ることを示す．

特に，人の視野を覆うような映像提示を行うと，映像との相対的な位置関係が平衡感覚や運動感覚に大きな影響を及ぼし，その映像に没入した感覚を得られるとの生理学的な報告がある[13, 14, 15]．図 2.2 に眼球構造を示し，この構造に基づいた平均的な人間の両眼による視野範囲を，図 2.3 に情報受容体特性の分布として水平方向及び垂直方向の角度として表す．報告によると，最大視野範囲はおよそ水平方向に 210 度，垂直方向に 125 度程度と言われている．人間が視覚より文字や色などの詳細な情報を得ることができる範囲は有効視野と位置付けられ，およそ水平方向に 30 度，垂直方向に 20 度と言われている．視野における映像の占有する範囲が拡大するにつれて，映像が視覚に大きな影響を与える大画面効果は増加するが，ある範囲を超えるとその効果が飽和し，それ以上映像範囲を拡大しても，大画面効果がさほど増えないとされ，この大画面効果が飽和する範囲を誘導視野と定義されている．誘導視野は，水平方向 100 度，垂直方向 85 度程度と報告されている．誘導視野範囲から最大視野範囲までは補助視野とも言われ，強力な刺激の存在に気づく程度の周辺的な範囲とされている．しかしながら，近年の研究では周辺視野は平衡感覚や運動感覚に大きな影響を及ぼすとの報告もある[16, 17]．図 2.5, 図 2.6 には，渦巻きなどの回旋運動の映像を広視野に表示することで，身体動揺の誘起を確認した実験事例を示す．周辺視野の影響を人間の視覚特性に適合するためには，誘導視野を超える広い視野範囲（以下，広視野）に映像提示可能なディスプレイの構築が必須であると考えられる．図 2.4 に本研究の目標とする視野範囲を模式的に示す．

広視野映像であっても，単純に映像を引き伸ばしたような手法では，映像に歪みが生じてしまう．例えば，本来，直線であるはずの映像が折れ曲がって見えたり，建物などの構造物でスケール感覚が異なったりすると，体験者は映像が正しくないと認識してしまう．広視野映像で，しかも歪みのない等身大スケールの立体映像を提示することが可能なディ

スプレイが没入型視覚ディスプレイの要件と言える.

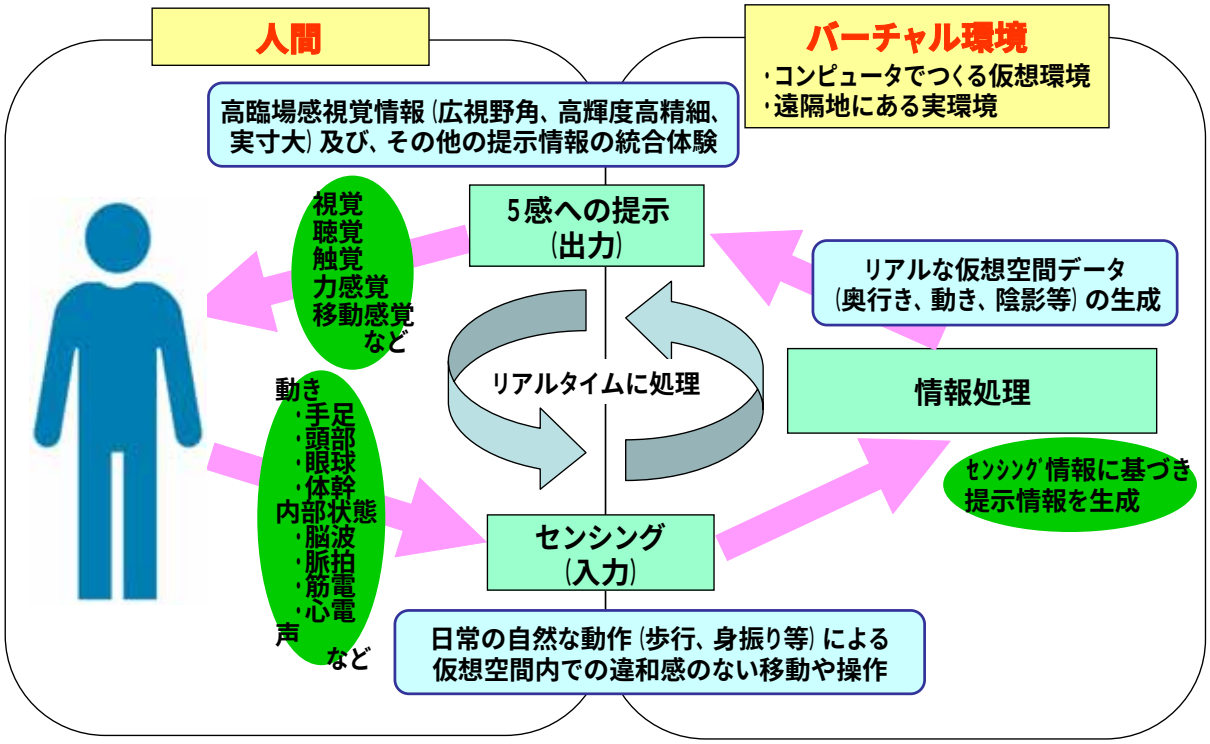


図 2.1　高臨場 VR 技術のコンセプト.

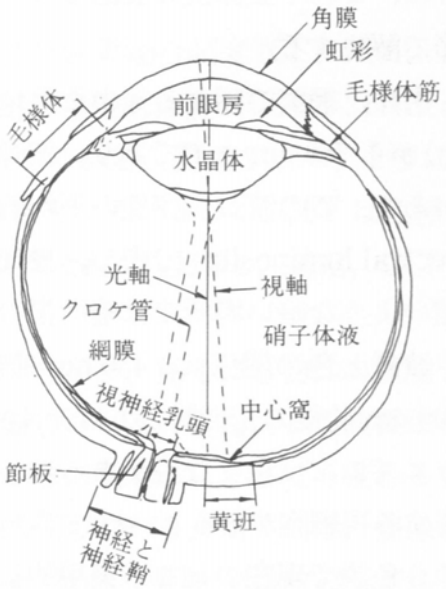
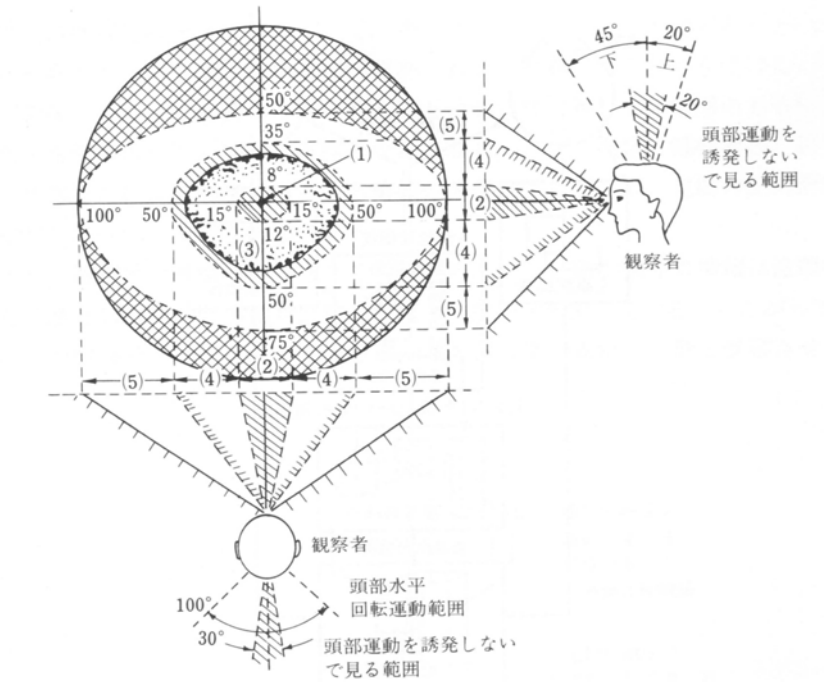


図 2.2　眼球構造[14].



(1) 弁別能力の優れている範囲（数度以内，中央の黒点）．
(2) 有効視野（左右15°，上8°，下12°以内，瞬時に情報受容が可能で，眼球運動のみで注視する範囲，中央の斜線部）．
(3) 安定観察ができる範囲（左右30°～45°，上20°～30°，下25°～40°以内，頭部と眼球運動が協調して無理なく見れる範囲点分布）．
(4) 誘導視野（左右50°，上35°，下50°近傍，臨場感を強く感じ，提示刺激より観察者の座標系が影響を受ける範囲）．
(5) 補助的にしか使われていない範囲（白地）．

図 2.3　水平及び垂直視野の情報受容体特性の分布状態[14].

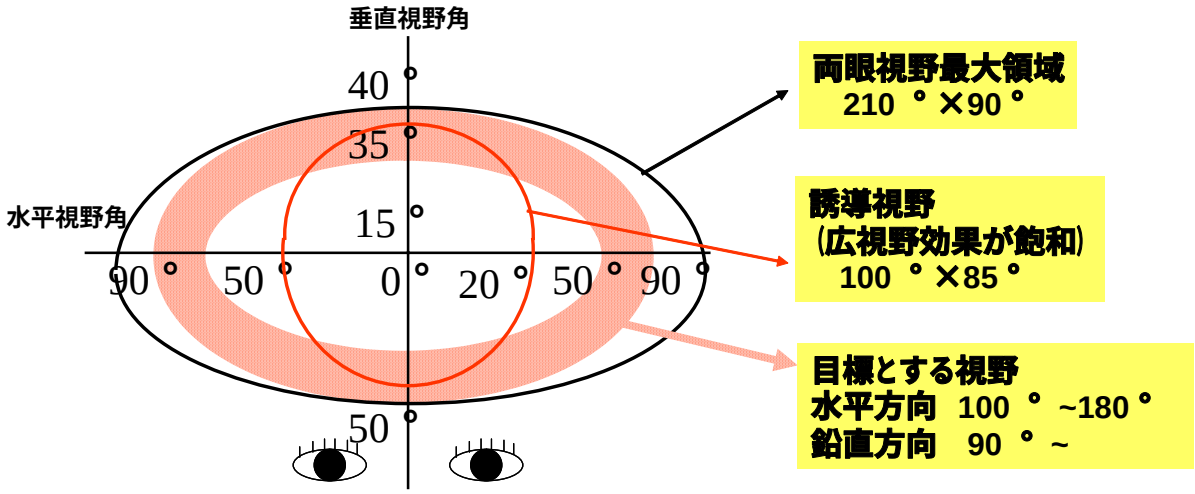


図 2.4　本研究の目標とする視野範囲.

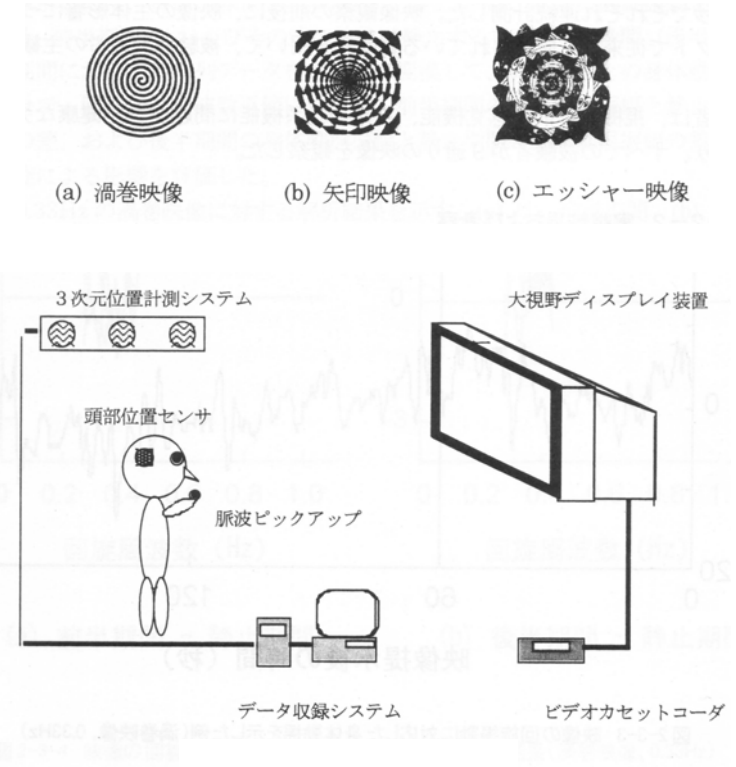


図 2.5　平衡感覚や運動感覚に及ぼす周辺視野の影響測定実験[16].

広視野映像提示ディスプレイに上段の３つの映像を中心回旋運動表示.

被実験はディスプレイ手前 90cm に直立，水平視野角 72 度.

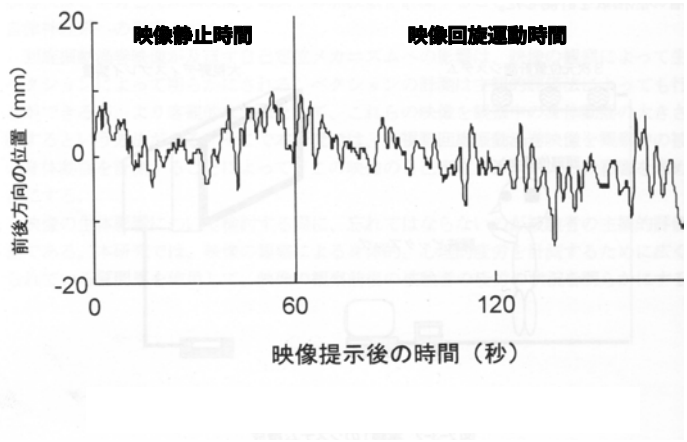


図 2.6　映像回旋運動による前後方向への身体動揺誘起結果[16].

2.2 没入型ディスプレイの定義と分類

大画面で体験者の周囲を取り囲むことにより，広視野で没入感の高い映像を提示するディスプレイは没入型ディスプレイ IPD（Immersive Projection Display）[11]と呼ばれ，それを実現する技術は IPT（Immersive Projection Technology）と呼ばれている．文字通りの IPT 国際シンポジウムが毎年開催され，IPD，IPT は国際的に注目されていると言える．

IPD の最初の試みは，1993 年にイリノイ大学が発表した CAVE（Cave Automatic Virtual Environment）である[18]．CAVE は，正面，左面，右面，下面（床面）の 4 面を平面スクリーンとして，それらに CRT（Cathode Ray Tube）方式プロジェクタで時分割の立体映像を投影するものである．4 面の映像は同期を取って表示されることで，全体として 1 つの立体映像表示空間が生成され，体験者は CAVE の中に入り，時分割に同期した液晶シャッタ方式の眼鏡を装着することで立体映像を体験する．CAVE では，正面，左面，右面の 3 面はリア投影であるが，床面への投影は上方からのフロント投影であるため，体験者の影が床面のスクリーンに映りこむという課題がある．CAVE の構造，及び体験の様子を図 2.7, 図 2.8 に示す．

東京大学 IML（Intelligent Modeling Laboratory）では，CAVE を拡張して上面（天井面）もスクリーンとする CABIN（Computer Augmented Booth for Image Navigation）を開発した[19]．CABIN では床面を含めて 5 面すべてのスクリーンに対してリア投影を行い，特に床面は体験者の体重を支えるために，厚さ 30mm の強化ガラスにスクリーンを張っている．図 2.9 に CABIN の構造図を示す．

また, 岐阜ＶＲテクノセンターには背面を含めた6面すべてをスクリーンとするCOSMOSと呼ばれるシステムが設置されている[20, 21]．COSMOS では背面スクリーンを電動で前後に平行移動させることで，出入り口として開閉させるのが特徴である．図 2.10 に COSMOS の外観を示す．

CAVE，CABIN，COSMOS は，複数の平面スクリーンを多面状に配置して映像投影するため，これらを複合平面形状没入型ディスプレイとして分類する．

これに対して，体験者の周囲を曲面スクリーンで囲み，そこに映像を投影する方式がある．水平方向のみに曲率を与えた円柱形状ディスプレイ[22, 23, 24, 25]，球面形状もしくは球面の一部をスクリーンとする OMNIMAX Theatre・VisionStation・ 臨場館・Ensphered Vision [26, 27], がある. 図 2.11, 図 2.12, 図 2.13, 図 2.14 に円柱形状ディスプレイ, VisionStation, 臨場館，Ensphered Vision の外観もしくは体験の様子を示す．前述の曲面ディスプレイは，すべてフロント投影方式であるが，リア投影という点では，筑波大学の背面投射球面ディスプレイも上げられる[28]．フロント投影と比較して体験者の影がスクリーンに映り込まないという利点がある一方，球面型スクリーンの場合，投影される映像のスクリーンへの入射角度や投影距離がスクリーン中央部分と周辺部分では大きく異なるため，スクリーン全面について輝度を一定に保つことや焦点を合わせることが難しい．このため，描画範囲を細かく分割して多数のプロジェクタで投影を行ことで，入射角度や投影距離の差を小さくするといった対応が必要である．

円柱形状ディスプレイ，OMNIMAX Theatre・VisionStation・臨場館・Ensphered Vision・背面投射球面ディスプレイを曲面形状没入型ディスプレイとして分類する．

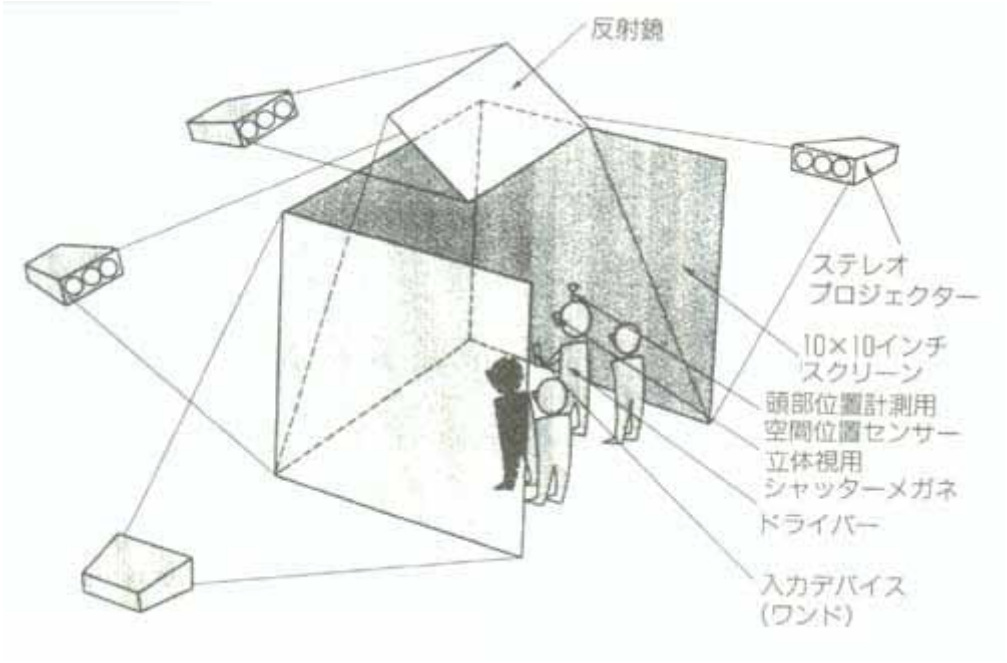


図 2.7　　CAVE の構造[18].

図 2.8　　CAVE 体験の様子[18].

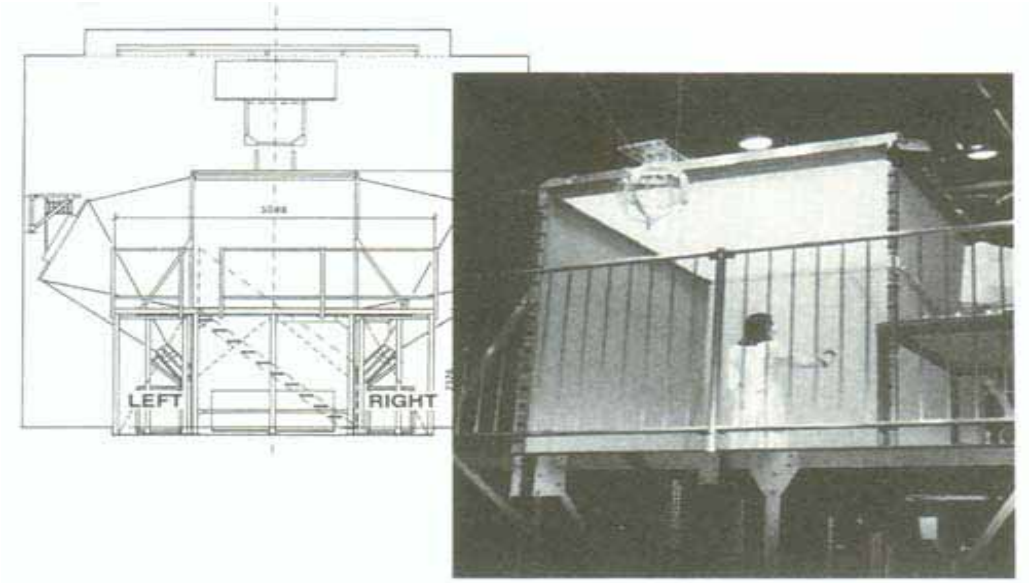


図 2.9　　CABIN の構造[19].

図 2.10　COSMOS 外観[20, 21].

図 2.11　円柱形状ディスプレイ体験の様子[22].

図 2.12　VisionStation 体験の様子.

図 2.13　臨場館外観.

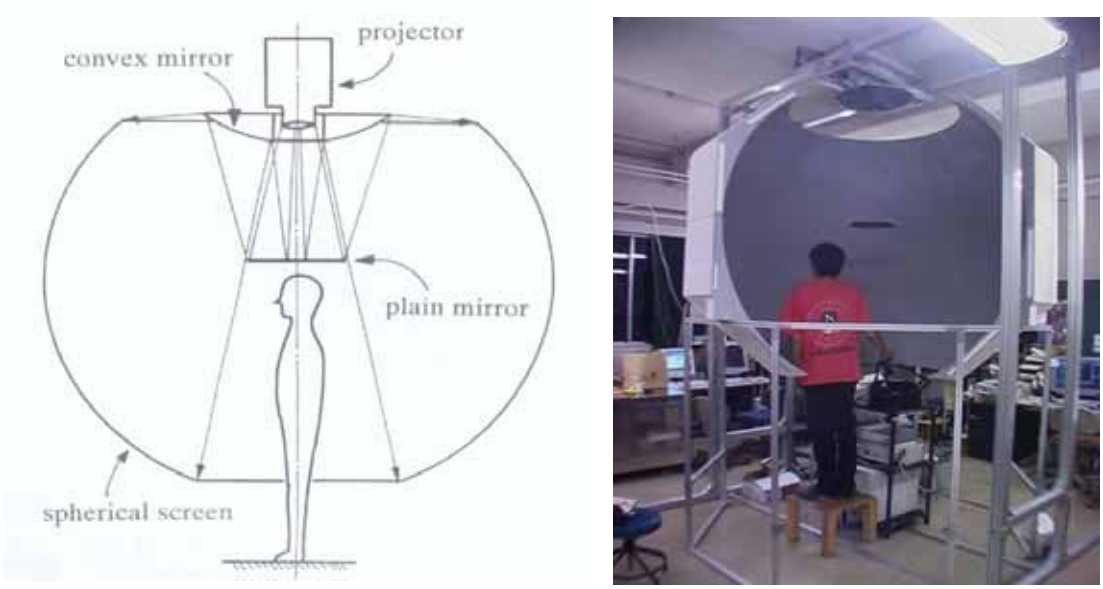


図 2.14　Ensphered Vision 構造図及び体験の様子[26, 27].

2.3　没入型ディスプレイの特徴と技術課題

2.3.1 複合平面形状没入型ディスプレイ

複合平面形状没入型ディスプレイにおいては，基本的に各スクリーン面に対応した各プロジェクタによって映像投影するため，個々のスクリーンとプロジェクタの関係は，単純な平面スクリーン投影と等価であり，構築が比較的容易であるという利点がある．

IPD に正確なスケールや形状の映像を表示するためには, 視点位置追従を伴った表示が必要となり，このような正しい映像表示を得られる体験者は 1 人に限られる．複合平面形状没入型ディスプレイにおいては，視点位置追従による補正が正確でない場合，もしくは体験者が複数になる場合，直線はスクリーンのつなぎ目を頂点とする 2 本の折れ曲がった線分として知覚される．図 2.15 に CAVE における表示例を示す．赤い線は本来直線として表示されるべきであるが，スクリーンの接合面で折れ曲がっている．これはビルなどの構造物に関して梁などが折れ曲がって見えることになるため，空間の知覚に違和感を感じることになることから，複数の体験者が同時に立体映像を見るといった用途には適切ではない．

2.3.2 曲面形状没入型ディスプレイ

曲面形状没入型ディスプレイにおいては，スクリーン間の接合部分や折れ曲がりがないという長所がある．また，体験者が複数になり視点位置の補正が正しく行われない場合においても，表示面の曲率が一定もしくは連続的な変化となるため，直線は連続な曲線として知覚され，ある程度直線が曲線に歪んだとしても，体験者はそれを直線として知覚するため, 複数人の体験者が同時に違和感なく構造物を知覚するという報告がある[29]．図 2.16 にドーム形状没入型ディスプレイの映像を正しい視点位置ではない場所から撮影したイメージを示す．正面の歩道やその両側にある手すりなど，本来直線として表示されるべきものが, 緩やかな曲線となっている．以上に加えて，人間の視野が楕円形状であることから，映像周辺部分が曲線である方が違和感が少なく，視野の中に折れ曲がりが生じない楕円形状もしくは球面形状のスクリーンで視野を覆う方が望ましいと考えられる．

一方，曲面形状スクリーンへの映像提示には，その形状に応じた何らかの映像歪み補正機能を必要とする．OMNIMAX はフィルム映像表示が主であり，この場合は投射系に適合したレンズ系を撮像時に使用して映像を作成する．VisionStation や臨場館では，特殊レンズを用いた光学系で歪み補正を行う．光学系を用いる場合，スクリーンの大きさや曲率などを変更すると，新たな光学系を設計しなければ対応できないという短所があり，コスト面からも特殊レンズは高価になる．

アミューズメント施設などで見受けられる曲面形状スクリーンを用いたシステムの多くは，その曲率が小さいため，歪み補正を行わず，映像の歪みを考慮したものとはなっていないため，より高い表示精度を必要とする設計分野やシミュレーション分野には適さない．

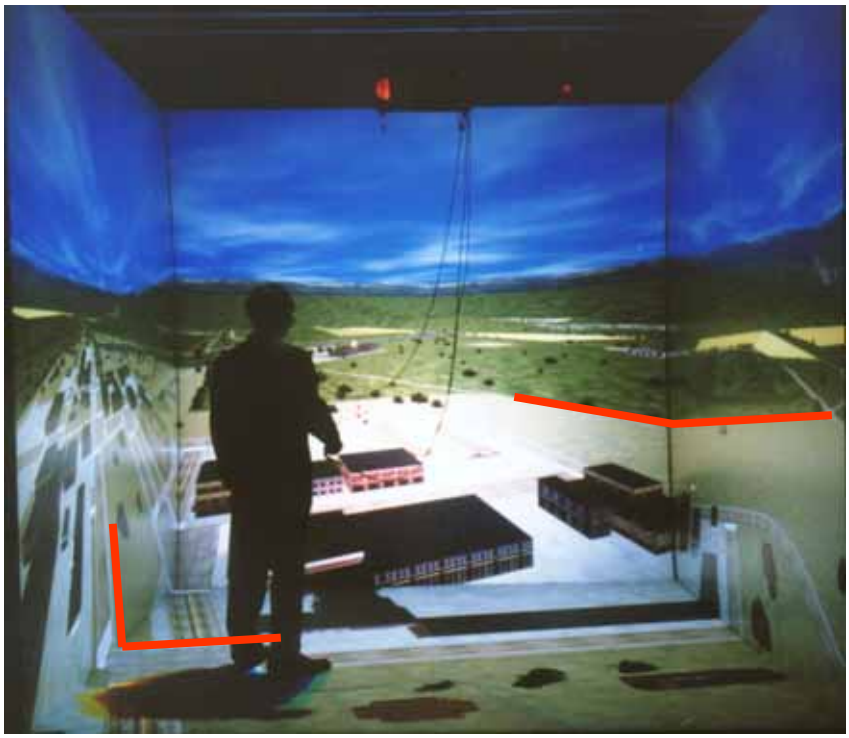


図 2.15　CAVE における直線の折れ曲がり.

図 2.16　曲面形状没入型ディスプレイにおける直線の湾曲.

2.3.3 複合平面形状没入型ディスプレイの最新状況

最近の複合平面形状没入型ディスプレイは, 1990 年代後半から 2003 年にかけて, CAVE, CABIN，COSMOS のような大規模なシステム構成から，汎用的な PC やプロジェクタを用いた構成に進化しつつある．特に，横幅 3m，高さ 2.5m 程度の壁面全体に設置した１つの平面スクリーンに対して，複数のプロジェクタ映像を投影することで，画素密度の高い高精細な映像表示実現に関する研究報告が多数ある．1 台の高性能なプロジェクタを使用するよりも，廉価型のプロジェクタを複数台使用する方が，コストを低減し，しかも光量が増え明るい映像となるからである．複数のプロジェクタを用いて平面に映像投影するシステムは，タイル状ディスプレイと呼ばれている[30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]．図 2.17 にタイル状ディスプレイの表示例を，図 2.18 に複数のプロジェクタを設置調整する作業の様子を示す．

タイル状ディスプレイでは，複数のプロジェクタで映像を投影するため，各映像の境界部分の処理が課題となるが，プロジェクタを水平垂直に高い位置精度で設置するのではなく，設置誤差をある程度許容し，スクリーン上の投影映像を利用して映像補正処理することで，各映像の境界部分を繋ぎ合わせる手法に関する研究報告[38, 39, 40, 41, 42]がある．また, カメラ撮影による投影映像を利用した映像補正処理手法に関する研究報告[43, 44, 45, 46, 47, 48], 及び複数のプロジェクタで投影するための映像を生成するコンピュータにおける同期した映像を生成する手法に関する研究報告[49, 50, 51]，さらに，タイル状ディスプレイを応用した設計事例などに関する研究報告[52, 53, 54, 55, 56, 57, 58]がある．

2.4 おわりに

複合平面形状没入型ディスプレイの最新状況は，マルチプロジェクションを使用し，各映像境界面の接合処理を行うことが主流となっている．しかしながら設置がより困難になるためか，タイル状ディスプレイを用い，しかも体験者を囲む複合平面形状没入型ディスプレイ構築に関する報告は未だない．

本研究では，都市設計を対象とし，複数人が同時に歪みのない広視野立体映像を見るシステムの実現を目指して，曲面形状没入型ディスプレイに分類される大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイを試作する．試作過程において，特殊レンズを用いないソフトウェアによる映像歪み補正手法の開発，ドームスクリーンサイズをスケーラブルに変更可能なドーム形状ディスプレイの実現可能性検討及び有効性の検証を行い，実用システムを構築するための設計課題を抽出する．

図 2.17　タイル状ディスプレイの表示例[40].

図 2.18　複数プロジェクタの設置調整作業の様子[40].

第 3 章　ドーム形状没入型視覚ディスプレイの設計課題の抽出と有効性の検証

3.1　はじめに

前章では，没入型視覚ディスプレイの関連研究について述べ，ドーム形状ディスプレイは，スクリーンの接合部分や折れ曲がりがなく，複数の体験者が歪みを感じない広視野立体映像を同時に見ることが可能であることを示した．

本章では，都市設計を対象とし，複数人が同時に歪みのない広視野立体映像を見るシステムの実現を目指して，ドーム形状没入型視覚ディスプレイを試作し，実現性及びその有効性を検証する．試作過程において，特殊レンズを用いないソフトウェアによる映像歪み補正手法の開発，ドームスクリーンサイズをスケーラブルに変更することが可能なドーム形状ディスプレイの実現可能性検討及び有効性検証を行い，実用システムを構築するための設計課題を抽出する．

3.2　ドーム形状没入型視覚ディスプレイの試作

試作したディスプレイは，主にドームスクリーン・6 台のプロジェクタ・映像生成用グラフィックススーパーコンピュータ・赤外線エミッタより構成し，体験者は液晶シャッタ眼鏡を装着する．以下，それぞれについて簡単に説明する．

ドームスクリーンは，直径 6.8m の半球状とする．これは，正しい形状とスケールの映像を見ることができる体験者はただ 1 人に限られるが，10 人から 15 人程度の体験者がほとんど違和感なく構造物を知覚するための大きさを考慮したためである．球面を作り出す原理として，ハーフドーム型に組んだ鉄骨にスクリーン幕を張り，排気ファンによって内部を減圧にし，スクリーン幕を鉄骨に吸い付けることで，比較的安価で形状精度の高いドームスクリーンを作り出す．スクリーン材質は，国際会議やイベントなどに数多く使用されている特殊軟質塩化ビニルを素材とし，表面はホワイトスクリーンとする．付録 B にスクリーンの種類と特徴をまとめる．

プロジェクタは，フロント投射方式とし，6 台のプロジェクタを水平方向 3 台，垂直方向 2 段に配置する．本システムでは BARCO 社の CRT 方式プロジェクタ，GRAPHICS808S を使用する．1 台あたりの投影角度は水平方向 60 度，垂直方向 45 度である．

グラフィックススーパーコンピュータは，シリコングラフィックス社の Onyx2 InfiniteReality を使用した．3 つのグラフィックスパイプと 8 つの CPU をもつ仕様である．最大で 6 つの XGA 解像度（横 1024 画素，縦 768 画素）の映像を右目用左目用に別々に生成し，その映像信号を交互に 120Hz で 6 つのプロジェクタに送信する．各映像信号の同期制御もこのコンピュータ上で行われる．

赤外線エミッタは，グラフィックススーパーコンピュータより入力した同期信号を赤外線で液晶シャッタ眼鏡に向けて放出する．シャッタ眼鏡の受光部が人の陰などによって遮られないように 6 つのエミッタを配置した．液晶シャッタ眼鏡は，赤外線エミッタから発せられた同期信号を受けて，120Hz でシャッタリングを行い，体験者は立体映像を見ること

ができる．図 3.1 に設置図面，図 3.2 に体験の様子，図 3.3 にシステム構成を示す[59, 60].

3.3 設計課題の抽出

ドーム形状没入型視覚ディスプレイの設計を行い，課題を抽出する．映像投影はフロント投影方式とする．これは，リア投影方式では多数のプロジェクタが必要になり，しかもスクリーン中央部分と周辺部分ではスクリーンへの入射角度や投影距離が大きく異なるため，プロジェクタ間のつなぎ目の輝度調整や焦点調整が難しくなるためである．フロント投影は，ドームスクリーンでは投影距離の差が小さくなるため，スクリーン中央部分と周辺部分における輝度差を少なくし，焦点合わせを容易にする．その一方で，体験者の影がスクリーンに映り込まないようにするために，プロジェクタから投影される映像領域内に近づくことはできない.

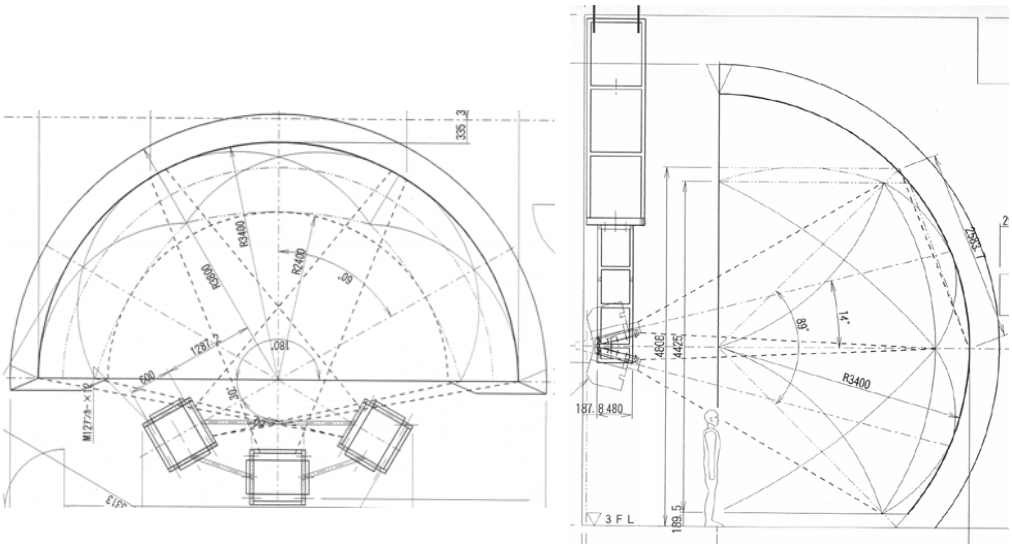
1 台のプロジェクタでドームスクリーン全体に映像表示を行うと，スクリーン面積が大きくなるにつれて映像が拡大され，画素密度と単位面積あたりの輝度が共に低下してしまうことになる．そこで全体の描画領域を 6 つの描画エリアに分割し，6 台のプロジェクタを用いて映像投影する．複数のプロジェクタを用いる場合，映像の歪み補正を実現すると同時に，各映像の境界部分を融合する機能が必要であるが，プロジェクタの位置調整だけで各映像の境界部分を認識できないようにすることは困難である．このため，各映像の境界部分を重ね合わせ，その部分の輝度調整によって重ね合わせ部分を目立たなくさせる映像ブレンディング手段を検討する.

また，ドームスクリーンの大きさや曲率に柔軟性を持たせるため，本研究では，高価な特殊レンズなどの光学系を用いないソフトウェアによる映像歪み補正機能の開発を目指す.

3.3.1 映像歪み補正

図 3.1 に示すように，水平方向において，各プロジェクタの投影の中心軸は，それぞれ球の中心を通るように設置する．左右のプロジェクタは交差するように映像を投影する．鉛直方向においては，上下のプロジェクタの投影中心軸は，球の中心を通らないように見える．しかし，プロジェクタには映像が予め上方向に一定の角度で投影される打ち込み角と呼ばれる固有の特性がある．本プロジェクタは，打ち込み角 8 度の仕様であり，投影映像は実際のプロジェクタ設置位置より 8 度上方に移動した位置から投影されることになる．設置図面では，上下のプロジェクタは反転して設置してあるため，下段のプロジェクタは上方向に，上段のプロジェクタは下方向に 8 度移動すると，鉛直方向においても各プロジェクタから投影される映像は，それぞれ球の中心を通るように設置したことになる.

各プロジェクタの投影の中心軸は，それぞれ球の中心を通るように設置できたが，プロジェクタをすべて球の中心に設置することは困難であり，図 3.1 のようにそれぞれ球の中心より後方に設置することになる．このため球の中心から映像を見た場合，本来矩形の平面画像が，エッジ方向に引き伸ばされた歪みを持つ映像となる．これを補正するためには，



(a)平面図. **(b)立面図.**

図 3.1　ドーム形状没入型視覚ディスプレイ設置図面.

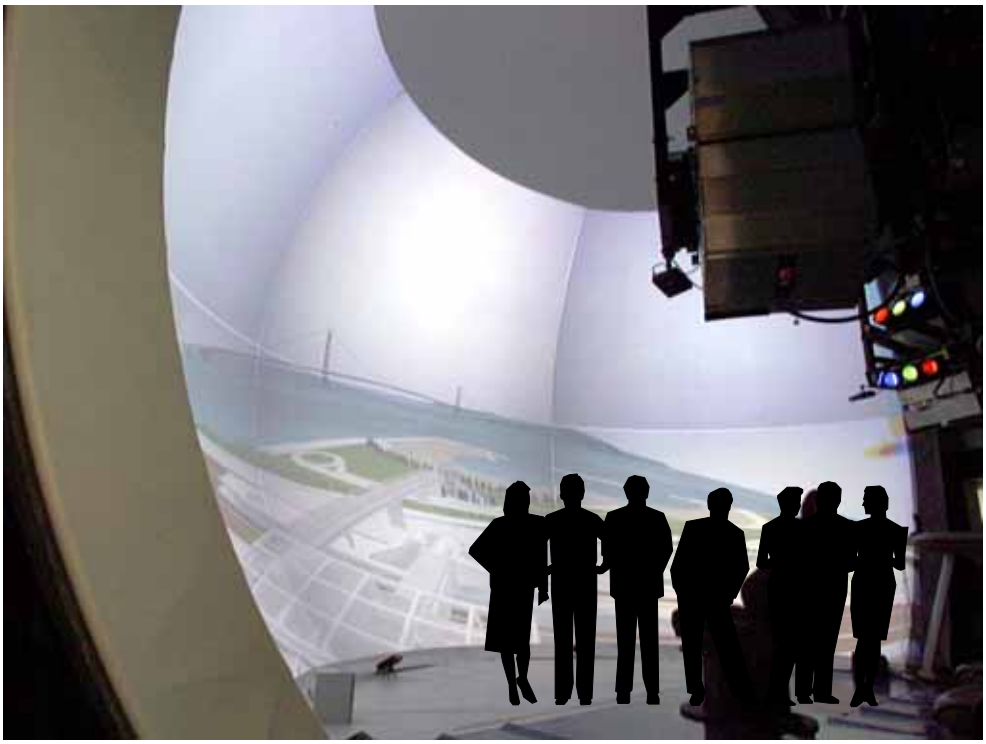
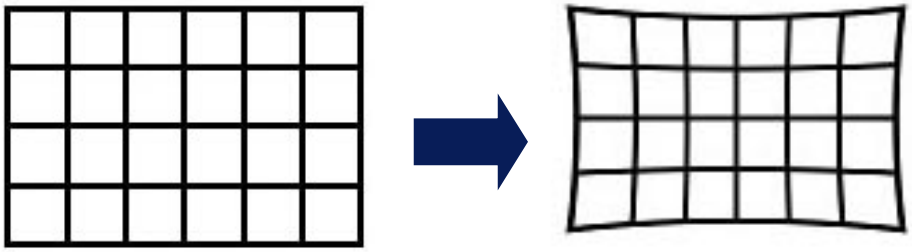
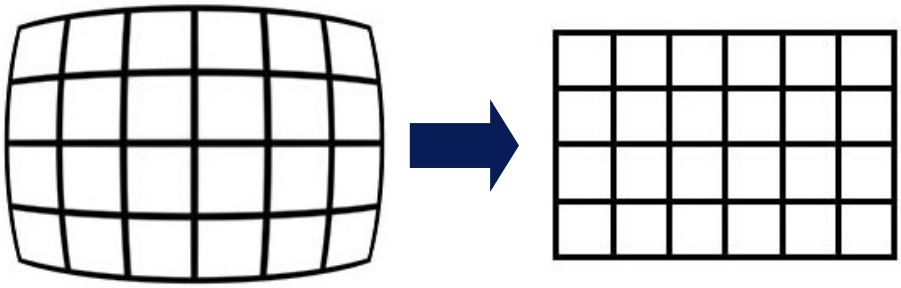


図 3.2　ドーム形状没入型視覚ディスプレイ体験の様子.

図 3.3　ドーム形状没入型視覚ディスプレイシステム構成図.



(a) 平面映像をドームスクリーンに表示した場合.



(b)予め歪みを与えた映像をドームスクリーンに表示した場合.

図 3.4　歪みの模式図，及び逆補正の模式図.

あらかじめ逆補正をかけて歪みを与えた映像を作成し，それを球面に表示することで歪みのない映像表示を実現する．この逆補正を行う機能を歪み補正機能と呼ぶ．図 3.4 に矩形映像を球面スクリーンに投影した際の映像の歪みを表す模式図，及び予め逆補正を与えた映像がドームスクリーン上では歪みがなくなる模式図を示す．

歪み補正パラメータの生成は，ドームスクリーン形状モデルに対して，矩形メッシュパターンをテクスチャマッピング処理により貼り付け，これを平行投影することによって，歪んだ映像を生成し，対応する矩形メッシュポイントを 2 次元座標パラメータとして取得する．図 3.5 に歪み補正パラメータ生成の模式図示す．テクスチャマッピング処理では，歪み補正パラメータを正規化してテクスチャマップ座標として使用する．メッシュポイント間は線形補間される．ここで重要な点は，ドームスクリーン形状，及びテクスチャマッピング処理の際にスクリーンとプロジェクタとの距離がパラメータで定義されていることである．パラメータを変更することで，様々なサイズのドームスクリーン形状に対応して歪み補正を実現することが可能になる．

歪み補正機能をソフトウェアで実現する場合，その処理が複雑になり実時間処理に支障をきたすようになると IPD としては使用できなくなるため，コンピュータの持つハードウェア高速処理を利用するようなソフトウェアを開発することで，以下のような実時間の歪み補正機能を実現した．

すなわち，まず，通常の描画処理を行い，矩形の映像を生成し，フレームバッファに格納する．次に，これをすぐに映像信号として出力せずに，歪み補正パラメータをテクスチャマッピング処理時に付加して，もう 1 度映像を生成し，フレームバッファに格納後，直ちに映像信号として出力する．

本システムで使用するグラフィックススーパーコンピュータは，フレームバッファに格納した映像情報を高速にジオメトリエンジンにコピーするという機能をもつため，歪み補正機能を実現するのに必要な時間コストは，描画処理を 2 回行うということになる．これは歪み補正機能を使用しない場合と比較して，描画時間がたかだか 2 倍程度かかるということになるが，実時間処理として必要な毎秒 15 回以上の描画処理の実現は十分に可能である．

3.3.2 描画領域分割映像生成

全体の描画領域を 6 つの描画エリアに分割するため，各描画エリアに対応した映像生成手法が必須であるが，個別にビューフラスタムを定義することで実現する．一般的な 3 次元空間形状モデルの映像生成処理であるレンダリングプロセスにおいて，仮想視点位置・そこから見た空間の範囲・仮想スクリーン面を定義するが[61]，この仮想スクリーン面を各描画エリアに対応してそれぞれ定義する．図 3.6 にビューフラスタムのイメージ，図 3.7 に及び仮想スクリーン面のイメージを示す．図 3.7 を上下方向に拡張することで 6 つの仮想スクリーン面を定義する．各仮想スクリーン面に描画した矩形映像に対して，前述の歪み補正処理を行うことになる．

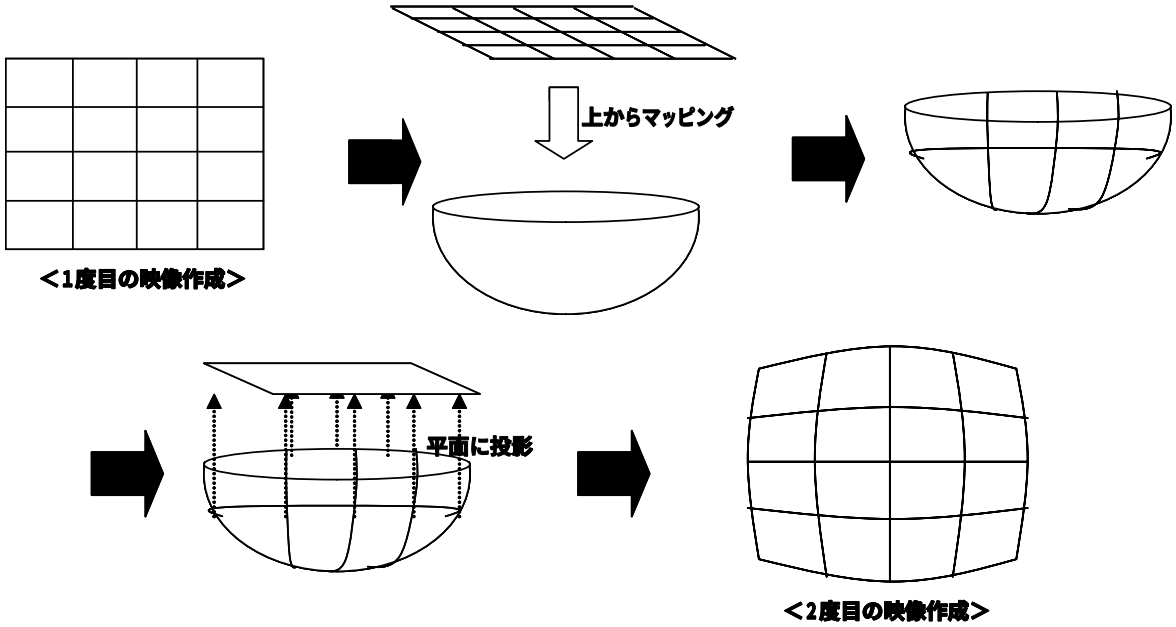


図 3.5　歪み補正パラメータ生成模式図.

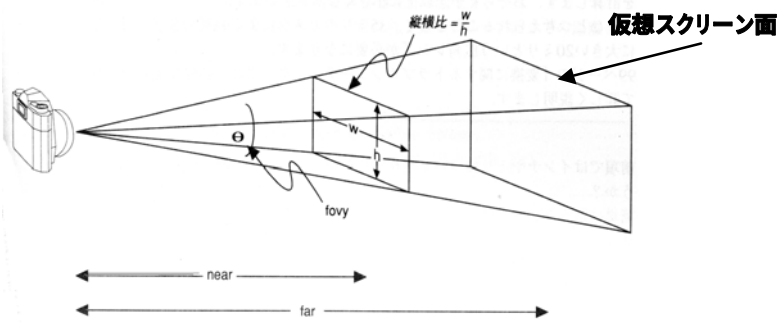


図 3.6　ビューフラスタム定義.

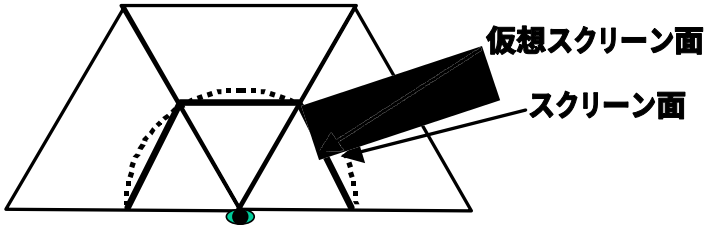


図 3.7　仮想スクリーン面の定義.

3.3.3 映像境界部分の整形

プロジェクタの投影映像をそのままドームスクリーンに表示すると，描画領域が矩形の場合には，図 3.8 のように境界が重なり合ってしまう．本システムで使用している CRT プロジェクタは，この映像境界部分を電気的に整形する機能があるため，プロジェクタの機能によって整形処理を行った．整形処理とは CRT 方式の電子線をアナログ電子回路によって自由に制御できるという特徴を利用したものである．整形処理では，単純に長方形の上辺を縮めると中央の形状のように変形されるので，さらに弧の部分を上方に引き上げる調整を行った. 図 3.9 に整形処理の模式的を示す. 整形処理によって, 図 3.10 に示すように, 映像境界部分を単純な矩形とすることを実現した.

3.3.4 映像ブレンディング

プロジェクタ配置をどんなに精緻に調整しても，図 3.10 に示すようにつなぎ目をなくすことは困難である．そこで，映像境界部分を重ね合わせ，重複した部分の輝度を調整することで境界線を目立たなくする方法が映像ブレンディング機能である．本システムでは，プロジェクタに対応した水平垂直の両方向のブレンディングを実現する特殊なハードウェアを導入した．図 3.11 に 6 つの映像境界部分を重ね合わせ，重ね合わせ部分の輝度を連続的に低下させるイメージを示す．図 3.12 (a)に単純に境界面を重ね合わせたイメージ，図 3.12 (b)にブレンディング効果を示す.

3.4 ディスプレイとしての有効性検証

3.4.1 視野範囲

図 3.1 において，ドーム中心から見た場合，視野範囲は，水平方向 180 度，垂直方向 90 度（但し，下方視野 30 度・上方視野 60 度）となり，広視野立体映像表示を実現した.

また，体験者が映像を見ることができる範囲は，ドーム直径 6.8mに対して，両端から 1m 程度を除いて，左右方向に 5m程度が有効であり，ドーム中心より後方 1.5mから見た場合でも，水平方向 130 度，垂直方向 70 度程度の視野範囲が得られ，一般的に $1m^2$を 2 人で占有すると仮定すると 15 人程度が同時に映像を見ることが可能となる.

3.4.2 映像歪み補正効果

図 3.13 に歪み補正前後のメッシュパターン映像を比較して示す．歪み補正後は，左右のメッシュ映像が違和感なく連続している．補正前後の比較については，メッシュパターン映像だけではなく，都市形状データの描画映像についても図 3.14 に比較して示す．補正前では，境界部分が重ならないだけではなく，本来真っ直ぐであるはずの建物（画面中央から斜め下に向かう建物）が歪んでいるが，補正後はこの直線の歪みが補正されている.

図 3.8　境界部分の整形を行わない境界が重なった描画領域の様子.

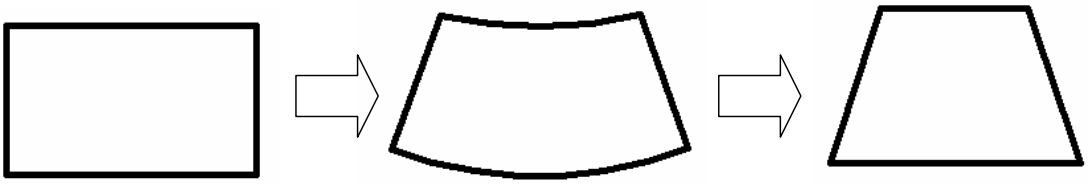


図 3.9　境界部分の整形模式図.

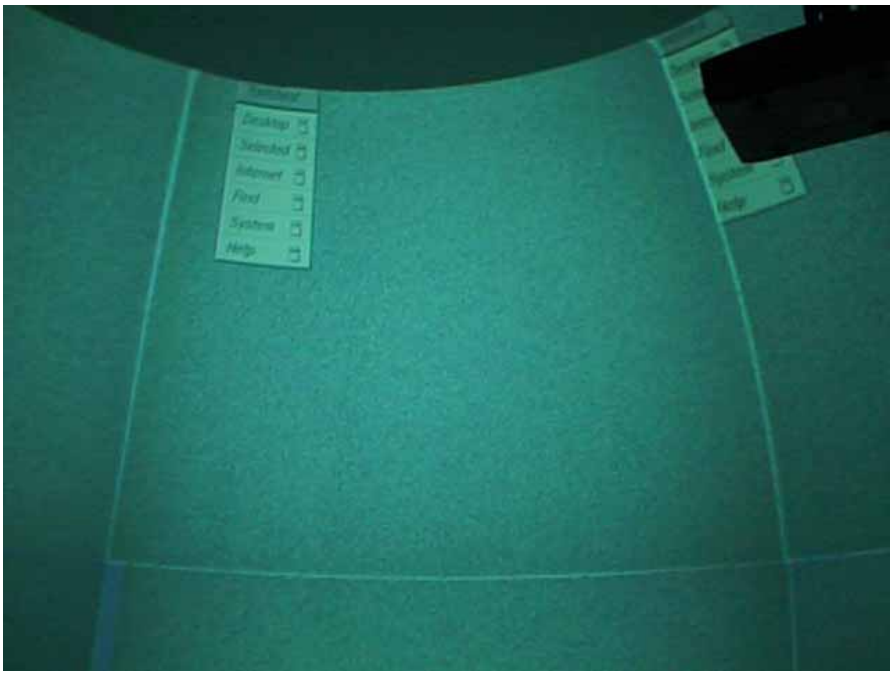


図 3.10　境界部分整形結果の様子.

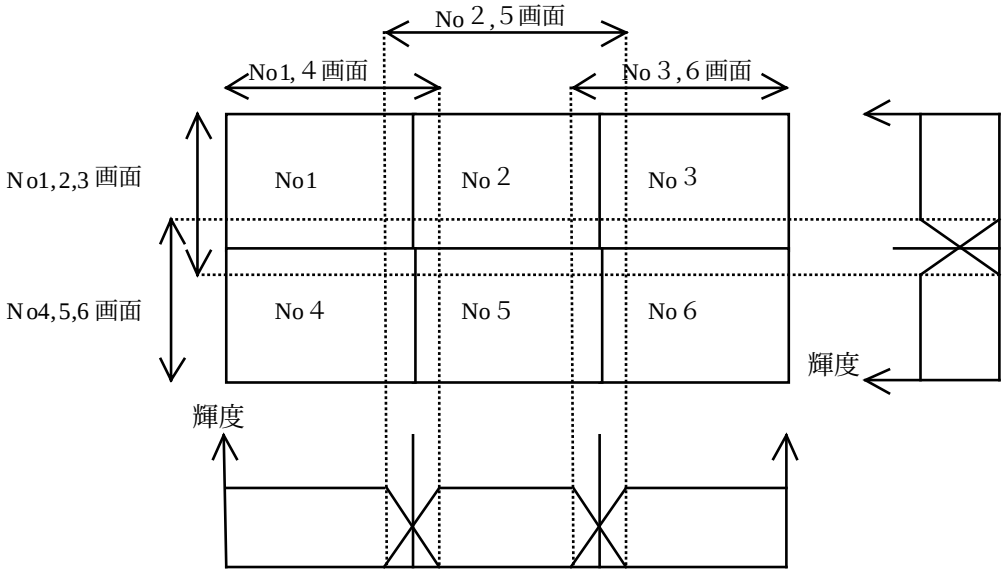
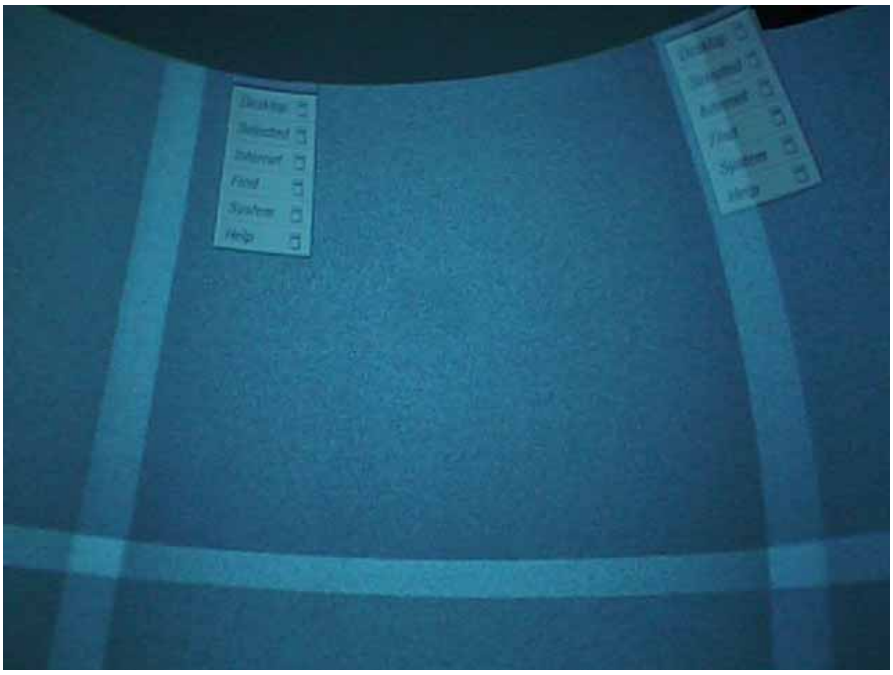
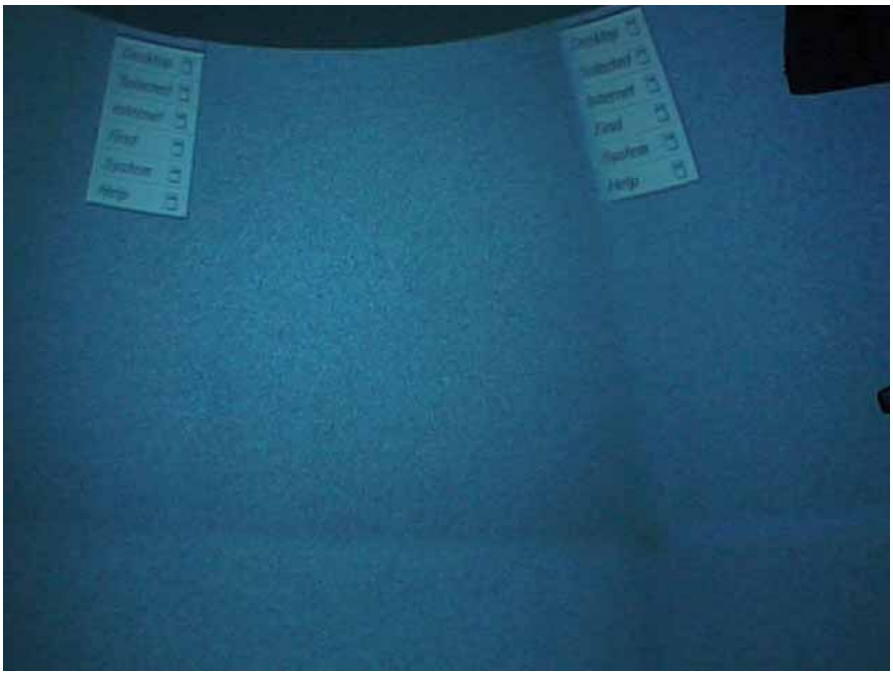


図 3.11　映像境界部分の重ね合わせとブレンディング機能の模式図.

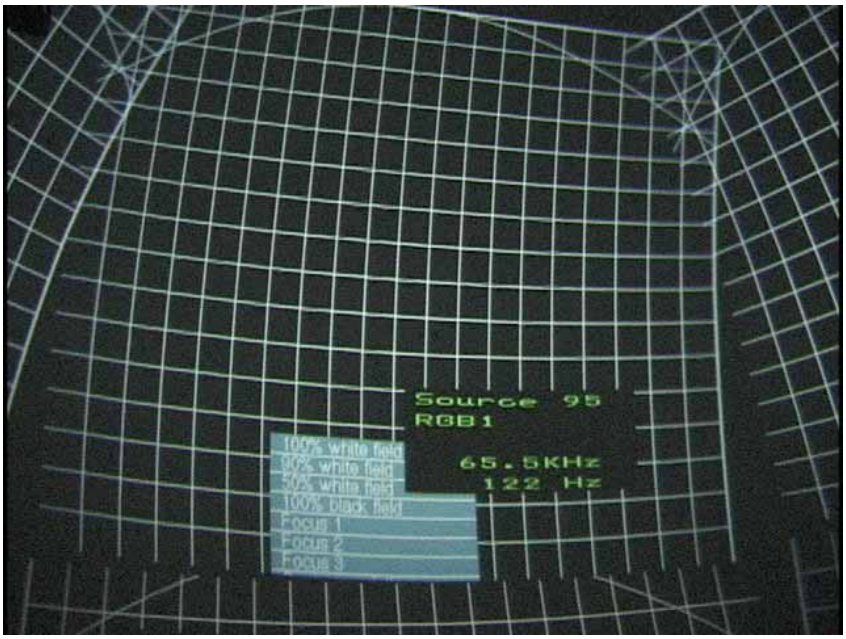


(a)ブレンディングを行わない場合の様子.

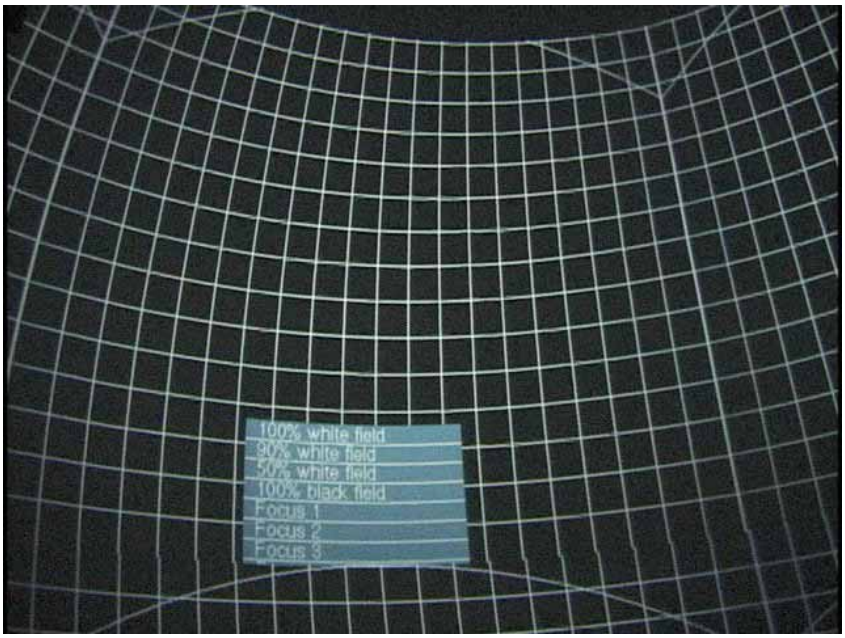


(b)ブレンディングを行った場合の様子.

図 3.12　映像ブレンディング効果の様子.



(a)歪み補正を行わない場合の様子.



(b) 歪み補正を行った場合の様子.

図 3.13　映像歪み補正効果の様子.

(a) 歪み補正を行わない場合の様子.

(b)歪み補正を行った場合の様子.

図 3.14　都市形状を重ね合わせた映像歪み補正効果の様子.

3.4.3 映像精度

スクリーン設置時及び，プロジェクタ調整時に以下の検証を行った．自律的に水平垂直を正確に制御し，レーザー光線を出力できる TOPCON 社の Teodolite 型式 DL-110L を用いて，ドームスクリーン上にガイドポイントを 600 点以上マーキングし，このガイドポイントとテスト用メッシュパターンを比較した．ガイドポイントとテスト用メッシュパターンのずれは，最大で 5mm 以下であった．

この測定結果は，次の条件で行った．

- CRT 方式プロジェクタは，前述の CRT 方式の電子線をアナログ電子回路によって自由に制御できる整形処理機能を持つため，ガイドポイントを基準にテスト用パターンメッシュの位置微調整を先に行う
- 整形処理による位置微調整後に，ガイドポイントとテスト用メッシュパターンのずれを測定する

従って，このずれは整形処理によっても調整しきれなかった表示映像の最終的な誤差を表すものであって，映像歪み補正機能のみの精度評価を行ったものではない．

3.4.4 アンケート評価

ドーム形状没入型視覚ディスプレイの評価として，アンケートによる評価を行った．映像は都市空間データを表示した．対象は，一般の設計者，建築系の学生，CG・VR 等の開発者であり，71 名の回答を得た．各評価項目について，有効かどうかを以下の 5 段階で評価した．評価結果を表 3.1 に示す．

そう思う　　：5 点
ややそう思う　　：4 点
どちらとも言えない　　：3 点
あまりそう思わない　　：2 点
そう思わない　　：1 点

さらに，ドーム形状没入型視覚ディスプレイに対して，ビル風シミュレーション結果表示，力覚デバイスによる風圧体験，火災時の有毒煙拡散シミュレーション結果表示，人間避難行動シミュレーション結果表示と連動させた都市環境設計全体システムについても評価を行った．対象は，上記と同様に一般の設計者，建築系の学生，CG・VR 等の開発者であり，49 名の回答を得た．各評価項目について，有効かどうかを（はい，いいえ，わからない）の 3 段階で評価した．評価結果は，無次元化するためにパーセンテージで表示した．評価結果を表 3.2 に示す．

ドーム形状没入型視覚ディスプレイの外部評価では，5 点満点のうち，平均 4.3 点と良好な結果が得られた．都市環境設計全体システムへの応用についても，有効性が確認できたと考えられる．アンケート結果では，都市環境以外の分野での 3 次元可視化技術としても実用性が高いと言う評価を得ており，幅広い実問題への適用が期待できると考えられる．

表 3.1　ドーム形状没入型視覚ディスプレイアンケート評価結果

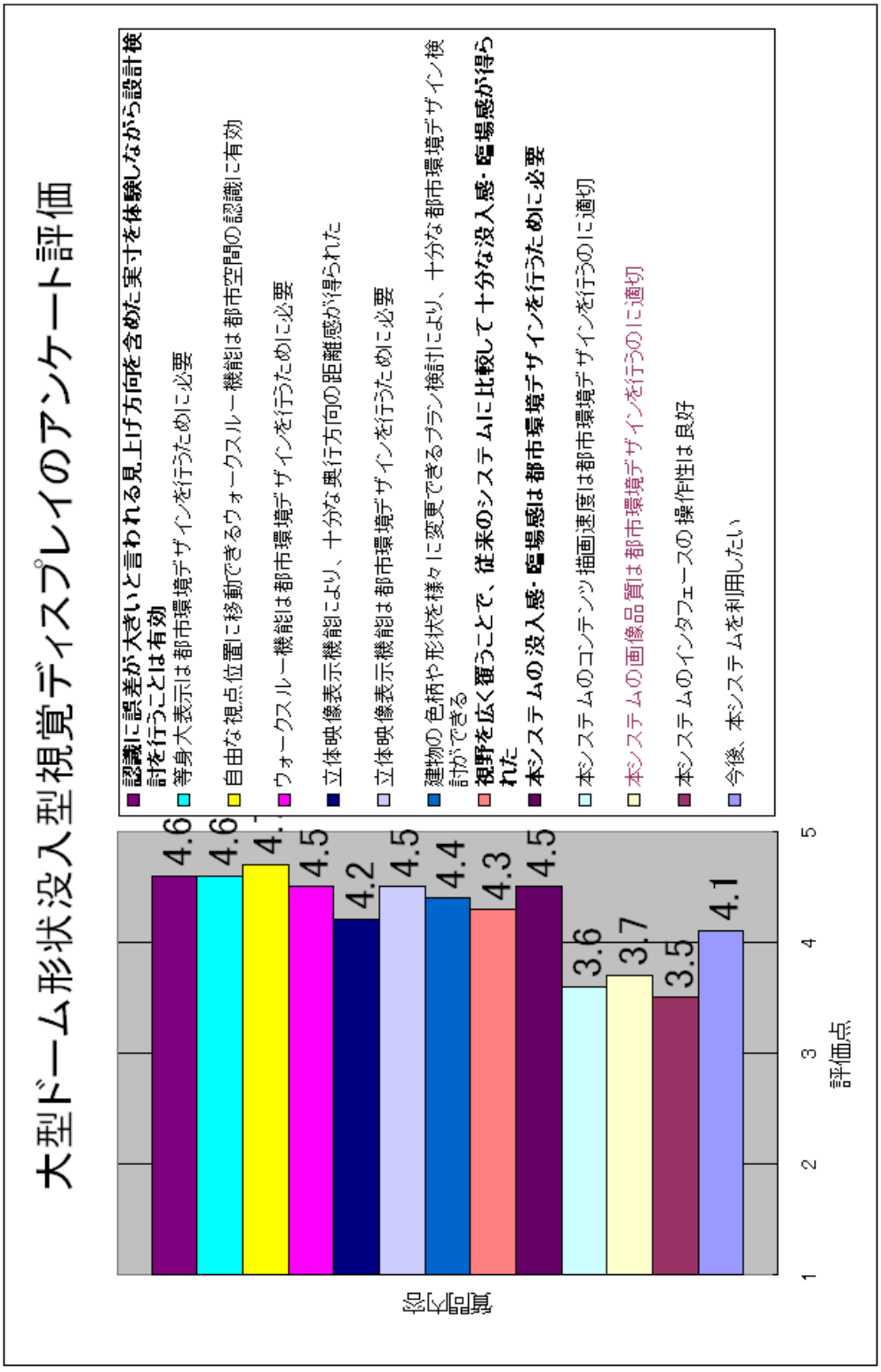
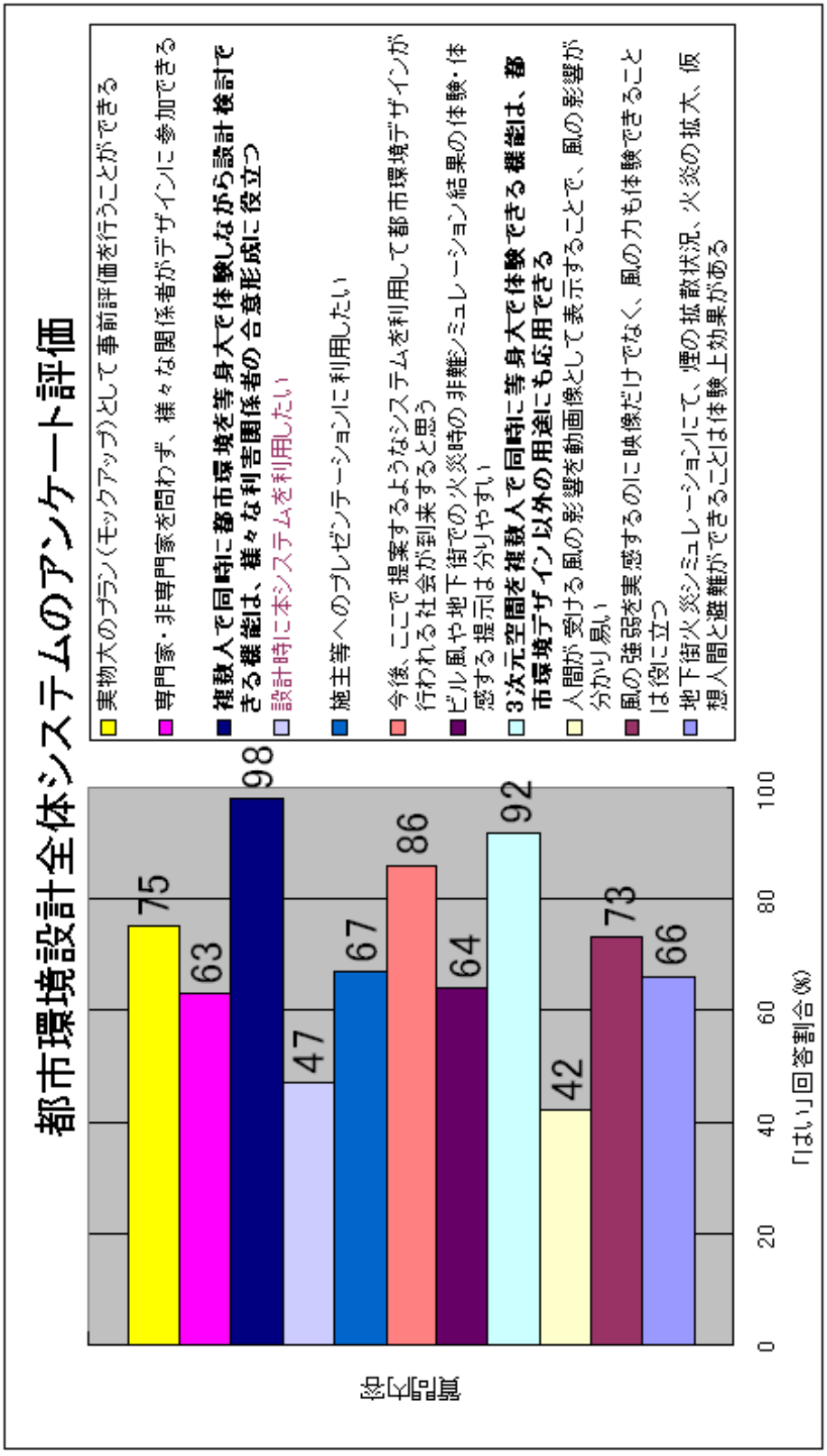


表 3.2　都市環境設計全体システムアンケート評価結果



3.5 おわりに

都市設計を対象とし，複数人が同時に広視野立体映像を見ることが可能なドーム形状没入型視覚ディスプレイを試作した．付録 A に，初期ドームディスプレイとして仕様をまとめ，後述する他のドーム形状没入型ディスプレイと比較した表を示す．

視野のほとんどを映像で覆うことのできるドーム形状没入型視覚ディスプレイの効果は大きく，ほとんどの体験者が映像表示された仮想空間への高い没入感を感じたことをアンケート結果は示している．高い没入感呈示を実現にできたことは，広視野映像表示に加えて，立体映像表示の効果も高いと考えられる．立体映像効果とは，もちろん奥行情報を得られることであるが，それ以上にスクリーンの存在を意識できなくなる効果の方が大きいと考えられる．すなわち，広視野映像のためスクリーン面を見ているにも関わらず，視野には映像のみが映り込み，さらに立体映像のために仮想空間内のオブジェクトがスクリーンの前後で結像するため，スクリーンの位置を特定する基準が見えなくなってしまうからである．

没入感は，既存の 200 インチ平面スクリーン，300 インチ相当の円柱形状スクリーンディスプレイと比較しても，圧倒的に高く感じられ，映像を意図的に速く動かしたり，上下に動かしたりすると，すべての体験者から，体が勝手に揺れているように感じたり，気分が悪くなったりという反応を得た．このため，実際の都市設計では，映像を高速に動かすことをせず，歩行速度程度で移動するか，重要な検討箇所を予め記憶しておき，ボタン操作で瞬時に位置移動させるような工夫を行った．

等身大スケール感覚に対しても高い評価を受け，特に設計関係者においては，ドーム形状没入型視覚ディスプレイの映像を見た方から，ほとんどの場合実際の設計に応用したいという要望を受けた．ドーム形状没入型視覚ディスプレイを使用して，淡路島花博会場設計・道頓堀河川改修設計・大阪住道地区商業施設設計など，実際の設計検討に多数使用され，その中のいくつかは実現されたものがある．

映像歪み補正機能については，本研究の開発成果として，特殊レンズなどを使用しない，ソフトウェアを試作した．この映像歪み補正ソフトウェアは，ドームスクリーンの大きさ，及びプロジェクタとドームスクリーンの距離関係をパラメータで定義するため，スクリーンサイズやプロジェクタ設置距離を自由に変更することを可能にする．

複数のプロジェクタを使用したシステムを構成し，映像の解像度や明るさを低下させることなく，ドームスクリーンサイズを大きくすることができたため，15 人程度が同時に違和感のない広視野立体映像を見ながら，都市設計を進めることを可能にした．

また，本ディスプレイは，実時間処理で歪み補正を行えることから，映像生成のリアルタイム性を損なうことなく，映像をインタラクティブに制御することが可能であり，様々な操作デバイス・体感デバイスを組み込み，Microsoft 社の Joystick，歩行デバイス，力覚デバイス・振動装置付き椅子・音響機器などが映像と連動して動作するシステムとして拡張された．さらに，火災時の有毒煙拡散シミュレーションや人間避難行動シミュレーションと連動させて，火災時の避難行動シミュレータを構築するに至った[62, 63, 64, 65, 66].

様々な長所を持つドーム形状没入型視覚ディスプレイであるが，実用システムの構築を考慮すると，以下の課題も明確になった．

（1） 膨大な構築コスト
（2） 巨大な設置スペース
（3） 表示映像の暗さ
（4） プロジェクタ投影軸がドーム中心を通ることが必要

まず，構築コストの内訳を考えると，全体の 60%がグラフィックススーパーコンピュータ，30%がプロジェクタ及び映像ブレンディング機器，10%がドームスクリーンであった．構築コストを下げるには，グラフィックススーパーコンピュータを PC に置き換える必要がある．プロジェクタについては，CRT 方式は高価であり，液晶方式等への置き換えを検討する必要がある．また，映像ブレンディング機器等の特殊な機器は使用せずに，同等の機能をソフトウェアで置き換える必要がある．ドームスクリーンに関しては，大きさを考えるとコストは妥当であると考えられる．

設置スペースについては，本システムは幅 9m，奥行 6m，天井高さ 9m 以上の部屋を必要とする．もちろん，体験する人数によってある程度の大きさは必要になるが，汎用性を考えると，通常のオフィスにも設置可能なサイズの構築も必要である．

表示映像の暗さについては，使用しているプロジェクタの明るさが 200ANSI ルーメンと暗いことが原因である．完全な暗室に設置しているにも関わらず，映像の鮮明さは感じられない．設計関係者からは使用したいという要望を受けるが，その他の方々の意見を総括すると，映像の暗さがネックとなって使用を躊躇するとのことであった．完成当時，すでに液晶方式プロジェクタでは 2000ANSI ルーメンの明るさが実現されており，コストも CRT 方式プロジェクタより低価格であった．付録 C に，プロジェクタの種類と仕様を示す．

プロジェクタ投影軸がドーム中心を通らなければならないことについては，プロジェクタの配置制限が厳しくなり，ドームスクリーンサイズをスケーラブルに変更することに対する大きな制限となる．特に，ドームスクリーンサイズを小型化する場合には，改善が必要である．

実用システムの構築には，上述の 4 つの課題克服が必須である．そこで，次章以降では課題を解決した小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの開発と，さらにその技術を拡張したドーム形状没入型視覚ディスプレイの開発について述べる．

第 4 章　ドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法

4.1　はじめに

前章では，直径 6.8m のドーム形状スクリーンを用いて，およそ水平方向 180 度，垂直方向 90 度の視野を映像によって覆い，歪みのない映像を等身大スケールで立体的に提示するドーム形状没入型視覚ディスプレイを試作した．視野のほとんどを立体映像で覆うことで，特に都市空間設計においては，まるで実際の都市空間を歩いているような没入感や臨場感を伴った空間体験が実現されることを確認した．また，複合平面形状没入型ディスプレイと比較して，ドーム形状没入型視覚ディスプレイはスクリーン間の接合部分やそこでの折れ曲がりがないという長所を持つことを確認した．

一方，試作したドームディスプレイでは，大きな設置スペースを必要とし，高価なグラフィックススーパーワークステーションと CRT 方式プロジェクタを用いたため，構築コストが非常に高い，表示映像が暗い，プロジェクタの投影中心軸がドーム中心を通らなければならないという課題が明確になった．

本章では，まず，ドーム形状没入型視覚ディスプレイの一般的構築手法について述べる．次に，プロジェクタを中心部より周辺部に移動しながら，この移動によって生じる映像の歪みを正確に補正する球面に対する映像歪み補正機能と投影シミュレータについて述べる．この映像歪み補正機能は，前章の課題であったプロジェクタ投影中心軸がドーム中心を通らなければならないという映像歪み補正機能を改良した本開発の核心部分である．実際に小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイを構築し，映像提示の評価として，映像精度・実用性について評価を行う．最後に得られた知見，課題についてまとめる．

4.2　一般的構築手法

図 4.1 に示すように 8 つの手順によって，ドームディスプレイを構築することが可能となる．以下，順に構築手順を説明する．

4.2.1 プロジェクタ投影映像モデル化

まず，第一に，プロジェクタの詳細スペックを入手，もしくは測定し，プロジェクタの投影映像をモデル化する．プロジェクタは，液晶方式・DLP 方式・CRT 方式の 3 つに分類されるが，本構築手法では近年技術革新が急速で明るく比較的安価な液晶方式及び DLP 方式の利用を主に想定する．液晶方式及び DLP 方式のプロジェクタは映像素子が矩形であるため，標準的なレンズを用いた投影映像は矩形となる．出力可能な映像解像度は素子の画素数によって決定されるが，主に SXGA すなわち水平方向解像度（以下 H）1280 画素及び垂直方向解像度（以下 V）1024 画素，もしくは XGA（H：1024，V：768）となる．

モデル化とは，どのポイントからどの方向へどのような広がりの映像を投影するのかに

ついて，数値パラメータで定義することである．図 4.2 に示すように，映像投影ポイントはバックフォーカスポイントと呼ばれ，プロジェクタ及びレンズの設計上で設定される点である．液晶方式プロジェクタや DLP 方式プロジェクタは，このバックフォーカスポイントから映像が四角錐体に投影されると仮定することができ，以下の 5 種類のパラメータで投影映像をモデル化する．

①バックフォーカスポイント（単位・長さ）　：x,y,z
②プロジェクタ姿勢（単位・角度）　：head,p,r
③映像水平垂直投影角（単位・角度）　：Θ,Φ
④水平垂直レンズシフト（単位・長さ）　：h,v
⑤水平垂直映像解像度（単位・画素数）　：H,V

実際の設置時には，バックフォーカスポイントはレンズ表面の中心位置など測定可能な点より推定する．レンズシフトとは，レンズ位置を内部で移動することにより映像の投影方向を変更するものであり，ほとんどのプロジェクタが有する機能である．上記のパラメータ以外にも，空間的な設置可能性を検討するためのプロジェクタサイズ（W,D,H），明るさ，立体映像への対応可否についてモデル化の際に把握する．

プロジェクタの詳細スペックが入手できない場合には，以下のようにして測定する．図 4.3 に示すように，平面スクリーンに対してプロジェクタ投影中心軸が垂直になるようにプロジェクタを位置Aに配置し，スクリーン上における水平方向の映像長さW_1を測定する．次にプロジェクタを位置Bに移動し，同様に映像長さW_2を測定する．ここで，位置Aにおけるプロジェクタのレンズ表面とスクリーンとの距離をD_1，レンズ表面からバックフォーカスポイントまでの距離をx，バックフォーカスポイントとスクリーンとの距離をL_1とする．同様に，位置Bにおけるプロジェクタのレンズ表面とスクリーンとの距離をD_2，バックフォーカスポイントとスクリーンとの距離をL_2とすると，以下の数式 4.1,4.2,4.3,4.4 の関係からxを求める．

$$L_2 = D_2 + x \tag{4.1}$$

$$L_1 = D_1 + x \tag{4.2}$$

$$L_1 : W_1 = L_2 : W_2 \tag{4.3}$$

$$x = \frac{W_1 D_2 - W_2 D_1}{W_2 - W_1} \tag{4.4}$$

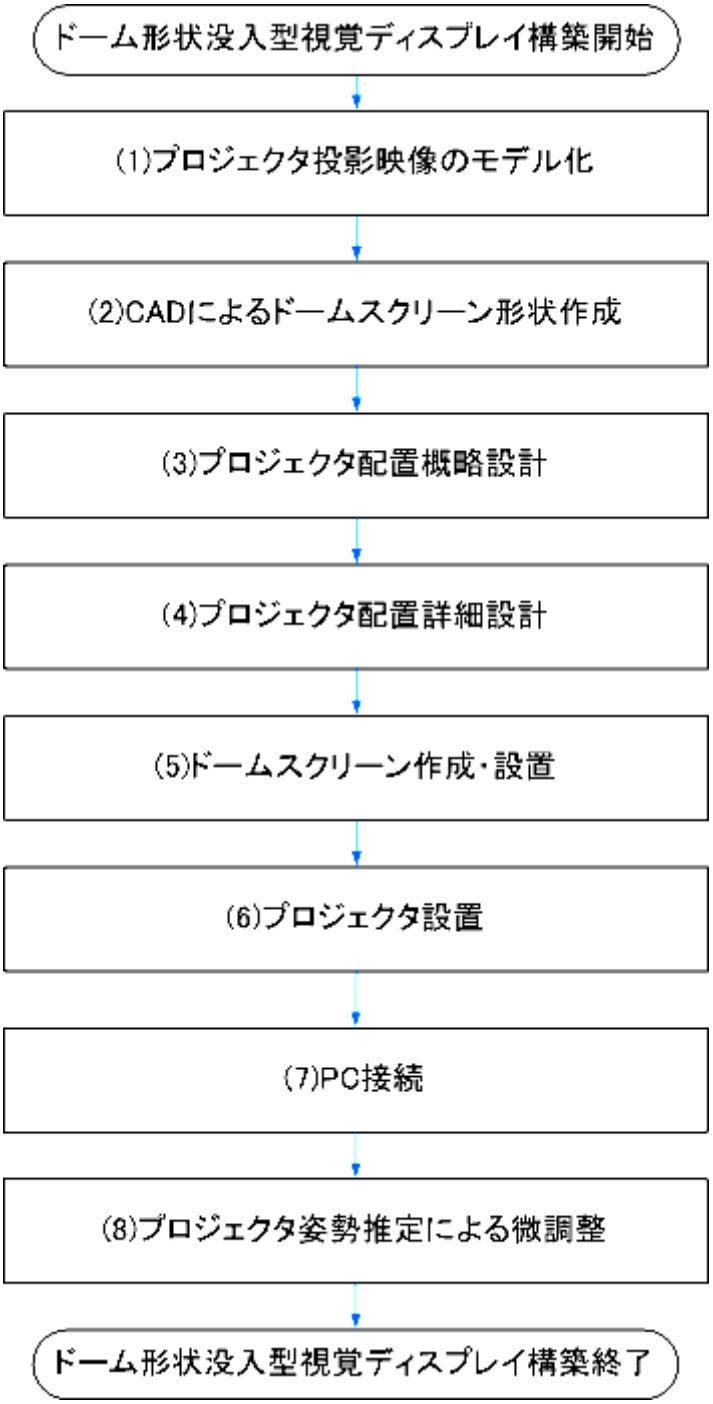


図 4.1　ドームディスプレイ構築手順.

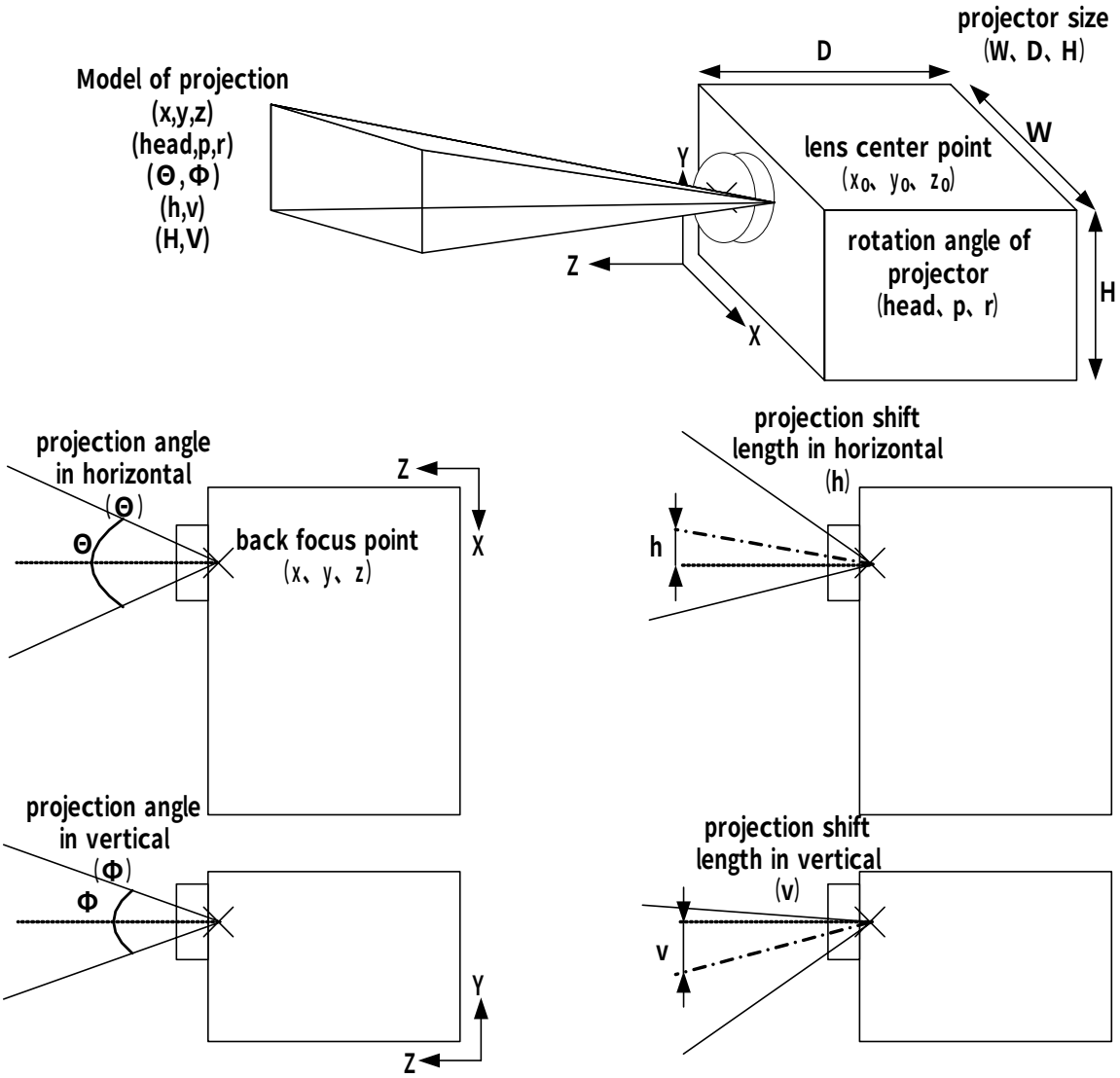


図 4.2　プロジェクタ投影映像モデルの設計.

バックフォーカスポイントxの精度を高めるために,実際の測定では3つ目の位置C（L_3, D_3）においてW$_3$を測定し，AとBから求めたx_{12}と，AとCから求めたx_{13}と，BとCから求めたx_{23}を使用して，x_{12} x_{13} x_{23}の平均x_{123}を求める．そして，以下の数式 4.5 ように各x_{12} x_{13} x_{23} とx_{123}の差が 1%以下になることを確認する．もし，1%以下にならない場合には，再度設置位置等を見直して再測定を行う．誤差を 1%以下としたのは，このような測定方法では 1%以下を実現するのが限界であった．プロジェクタメーカから入手した詳細スペックを使用する場合には，誤差 0.1%以下を実現した．付録Dに使用可能と判断したプロジェクタのスペック表を示す.

$$\frac{|X_{12} - X_{123}|}{X_{12}} < 0.01 \text{ かつ } \frac{|X_{13} - X_{123}|}{X_{13}} < 0.01 \text{ かつ } \frac{|X_{23} - X_{123}|}{X_{23}} < 0.01 \quad \textbf{(4.5)}$$

4.2.2 CAD によるドームスクリーン形状作成

第二に，CAD を用いてドームスクリーンの 3 次元形状データを作成し，設計を進める．図 4.4 に CAD を用いた設計結果を示す．座視した体験者の視点高さをドームスクリーンの中心高さに近づけるために，スクリーン中心高さを 1.2m とし，ドームディスプレイ全体の高さが 2.4m 以下となるようにドーム直径を 1.8m として，スクリーンを支えるフレームを構築する．

4.2.3 プロジェクタ配置概略設計

第三に，初期プロジェクタ配置を設計する．本配置設計のポイントは，体験者への最適な映像提示を最優先とする設計概念にあると考える．すなわち，まず体験者の視点位置とスクリーンとの最適な位置関係を定め，体験者が映像を遮ることによって生じる影が，スクリーンに映り込まないようにプロジェクタを中心部より周辺部へ移動し，この移動によって生じる映像の歪みをソフトウェアで正確に補正するというものである．図 4.5(a)(b)(c)に概念を示す．多くのプロジェクタは前述のレンズシフトを持つため，これを利用した図 4.5(d)及びミラーを利用した図 4.5(e)を示す.

図 4.6 に本開発における設置設計を示す．プロジェクタ A が，スクリーンに対して通常映像投影する際に設置される位置になる．もちろんこの位置では映像に体験者の影が映り込むことから，影を落とさないようにするためにプロジェクタ B の位置に移動する．設置スペースをよりコンパクトにし，フレーム上部に固定する際の設置方法を容易にするための平面鏡を追加することによって，最終の設置位置をプロジェクタ C とする．偏光方式での立体視を実現するために,図 4.6 に示すように横方向に 2 台のプロジェクタを配置する．このような設置によって，影を落とさずに体験者がスクリーンに近づくことを可能にする．

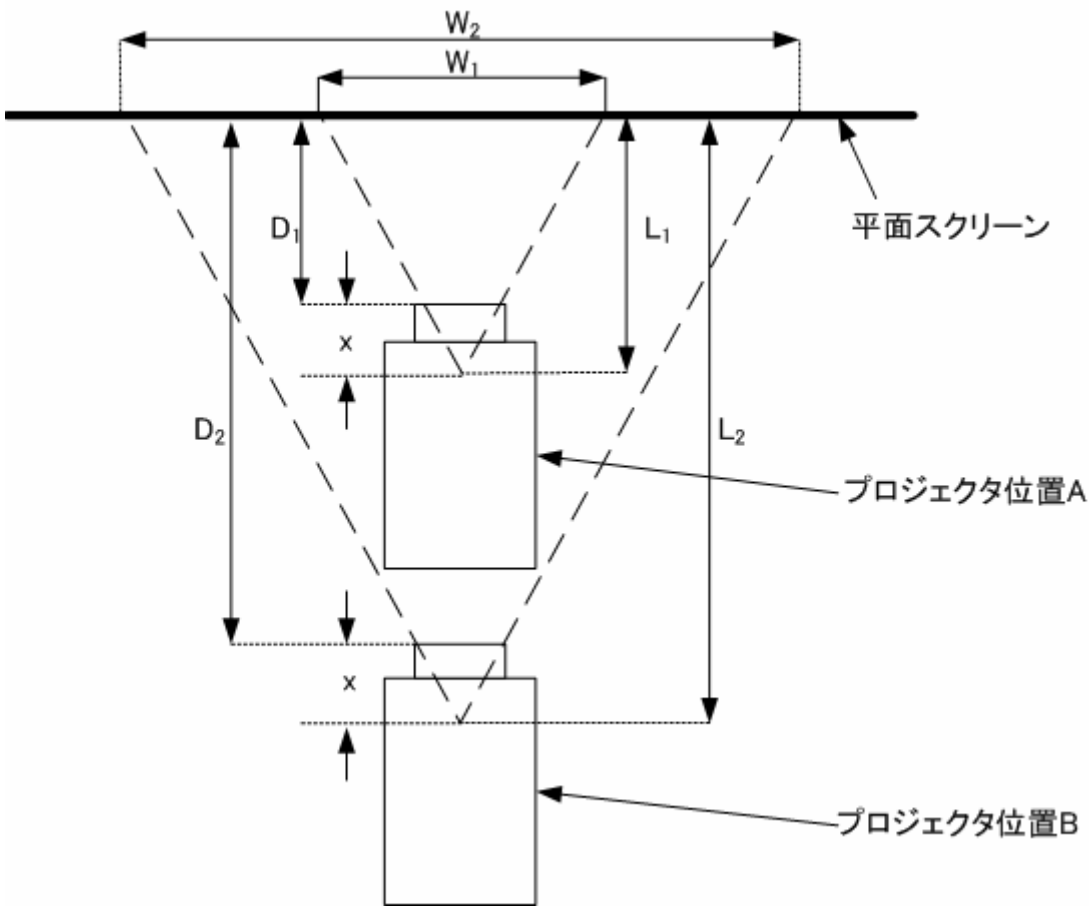


図 4.3　プロジェクタスペック測定方法.

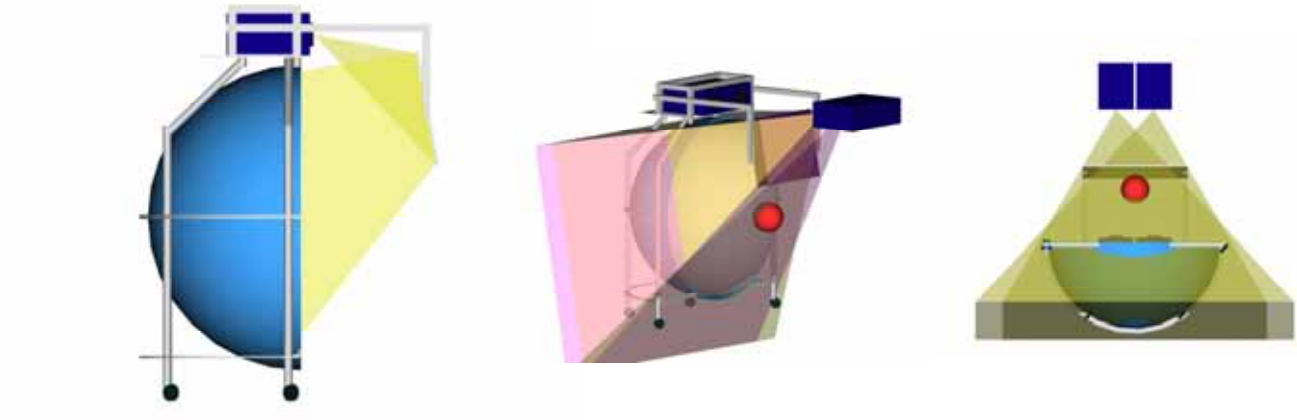


図 4.4　　CAD を用いた設計.

4.2.4 プロジェクタ配置詳細設計

第四に，投影シミュレータを開発し，プロジェクタの詳細な配置設計を行う．投影シミュレータは，ドームスクリーン投影による映像歪み補正とプロジェクタ位置変更による映像位置補正機能を包含したソフトウェアであり，ドームスクリーン上に表示される映像の位置及び形状を正確にリアルタイムにシミュレーションし，その結果と実際に設置した際の投影映像とが一致することを保証するものである．入力はドームスクリーン形状データ，モデル化したプロジェクタ投影映像パラメータ，プロジェクタ設置位置，平面鏡の位置及び回転軸パラメータ，そして体験者視点位置データである．初期値として，前述のプロジェクタ配置設計結果を使用する．図 4.6 において，実際の配置はプロジェクタ C であるが，歪み補正に必要なプロジェクタ設置位置は鏡像関係にあるプロジェクタ B に相当する．プロジェクタ配置の位置・回転データ及びミラー位置・回転角度を徐々に変更させながらドームスクリーン全体に映像が投影される配置を決定する．図 4.7 に投影シミュレータの画面と赤線で囲んだ 4 箇所の検討ポイント，及びパラメータ入力画面を示す．4 つの検討ポイントのうち，左右及び下部の検討ポイントでは映像が映らない，いわば穴が開かないかどうかを確認し，穴が開く場合には，プロジェクタとドームスクリーンの位置関係を調整し，距離を広げて表示映像を大きくするなどの調整を行う．上部の検討ポイントでは，映像の表示されない範囲を予め確認する．すなわち，表示映像は SXGA の解像度として横長の矩形として生成するため，映像の水平方向をドーム横幅に合わせると，上下方向には映像が表示できない部分が生じるためである．

4.2.5 ドームスクリーン作成・設置

第五に，ドームスクリーンを実際に構築する．ドームスクリーンは材質の点から 2 つに分類される．一方はハードスクリーンと呼ばれるタイプで，鋼板もしくは FRP などを用いる．もう一方はソフトスクリーンと呼ばれるタイプで，膜状の素材を用いる．本研究では，小型・中型サイズのドームスクリーンでは FRP のハードタイプを構築し，大型サイズでは塩化ビニルを素材としたソフトスクリーンタイプを構築する．本開発で構築したドームスクリーンは FRP のハードスクリーンである．ドーム形状の精度を高めるために，NC 加工で生成した型に FRP を圧着し，自重による歪みが生じないように開口部周囲及び赤道上に鉄板の骨材を入れて乾燥・硬化させて構築する．ドーム形状の精度として，0.1%以下を実現した．

ドーム形状精度の測定は，次のようにして行う．レーザー距離計 Leica 社製 DISTRO classic4 を，専用三脚と回転雲台を使用してドーム中心部分に設置し，専用三脚の角度メモリを使用して，水平方向にレーザー距離計を回転しながらドームスクリーンとの距離を順次測定する．次に，レーザー距離計を予め上下方向に角度をつけた状態で中心部分に設置し，同様に水平方向に回転しながらドームスクリーンとの距離を測定する．DISTRO classic4 の性能は，およそ 30m の測定距離に対して 5mm の誤差以内であり，誤差率は 0.017%である．

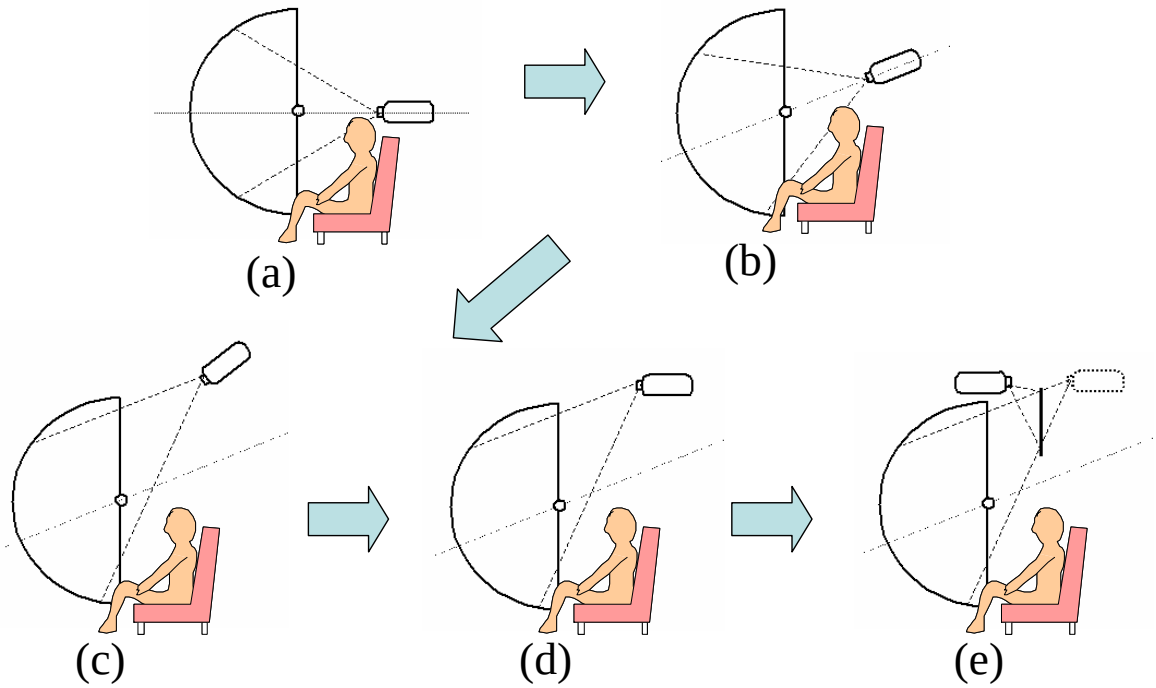


図 4.5　プロジェクタを周辺部に移動する概念.

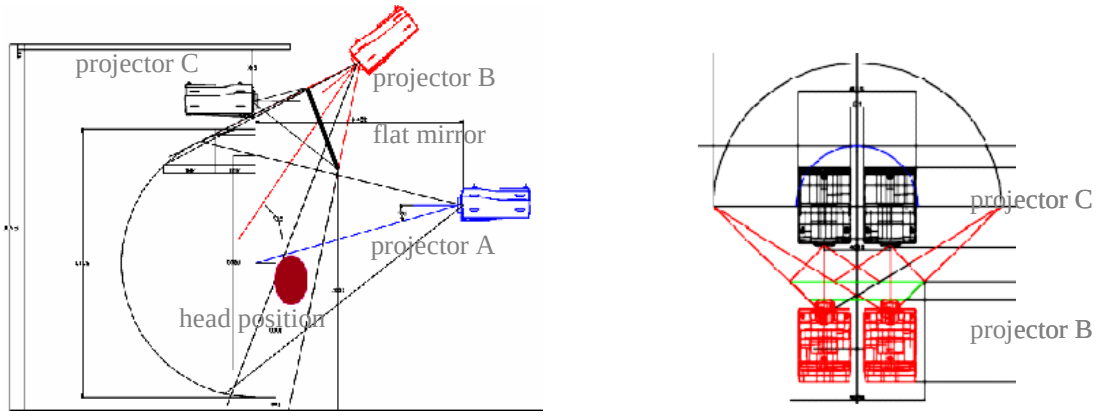
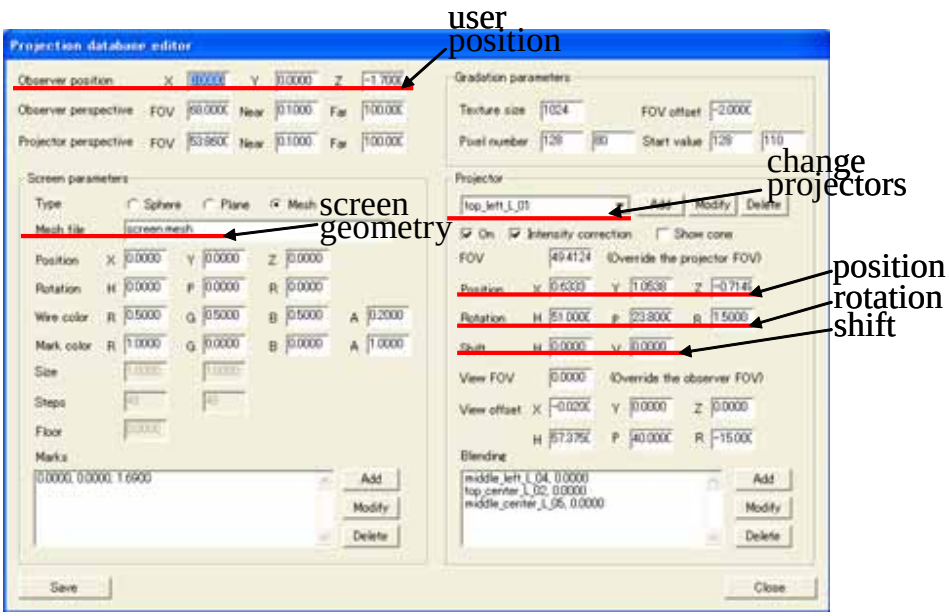
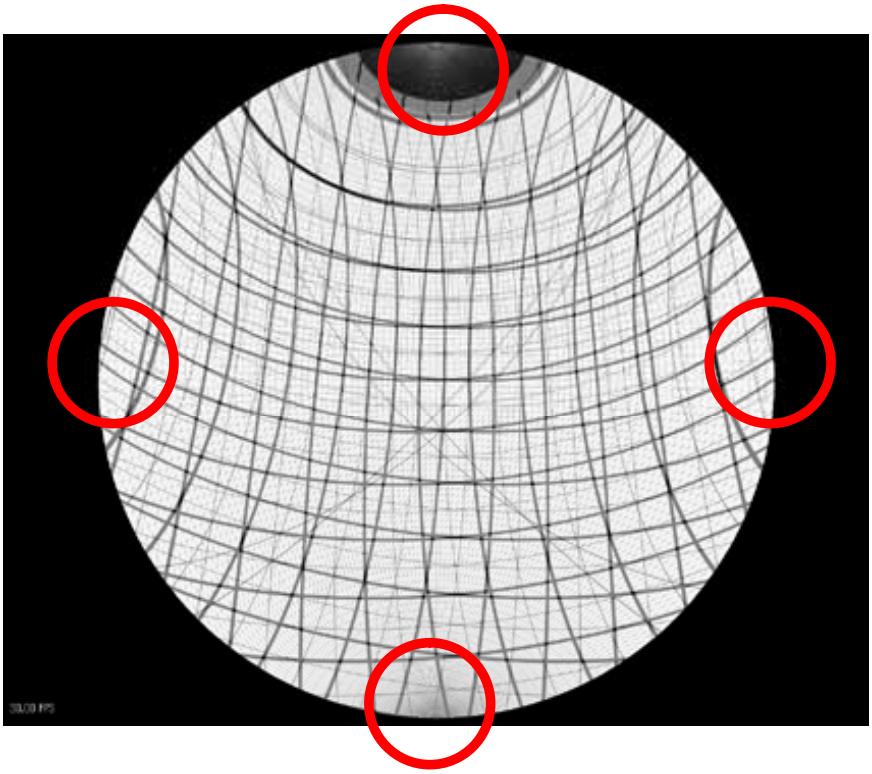


図 4.6　プロジェクタ配置設計.



(a) 投影シミュレータ入力画面.



(b)投影シミュレータ画面.

図 4.7　投影シミュレータ画面と入力画面.

4.2.6 プロジェクタ設置

第六に，前述の配置設計に基づいて，プロジェクタを設置する．ドームスクリーン上部にフレームに接合したプロジェクタ設置架台を設ける．設置精度は，位置 1mm 以下，回転 1 度以下を実現する．

4.2.7 PC 接続

第七に，PC を接続する．プロジェクタ 1 台につき，1 つの映像生成用 PC を割り当てるため，本開発では映像生成用 PC2 台を使用する．加えて映像同期・制御用 PC（以下，マスターPC）1 台の合計 3 台の PC クラスターを構成する．

4.2.8 プロジェクタ姿勢推定による微調整

第八に，プロジェクタ姿勢の微調整を行う．本システムでは回転角度 1 度の誤差がドームスクリーン上で 17mm の誤差に相当する．このため，ドームスクリーン上での誤差を 1mm 以下とするためには，位置 1mm 以下，回転角度 0.05 度以下のプロジェクタ設置精度が必要となり，人為的な設置方法では，そのような回転精度を達成することは困難である．そこで，投影映像を利用したプロジェクタの位置及び回転角度の推定が必須であり，その推定として前述の投影シミュレータを用いる．

レーザー墨出し器・タジマツール社製オートレーザーAL-TYE2 をドーム中心で水平線垂直線が交差するように設置する．図 4.8 に設置状態を示す．映像生成 PC 及びマスターPC の 3 台を用いて，ドームスクリーン上に投影シミュレータのグリッド映像を表示し，プロジェクタの姿勢パラメータを投影シミュレータのパラメータ入力画面で調整しながら，レーザーラインを基準にシミュレーション映像と実際の投影映像のずれを修正し，最終的なプロジェクタ姿勢パラメータを確定する．

以上の構築手順によって，小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの構築を完了した．投影シミュレータを使用した具体的な調整方法は，映像歪み補正手法について述べた後に説明する．

4.3 映像歪み補正機能と投影シミュレータの開発

小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの実現において，球面に対する映像歪み補正技術，及びすべての映像が同期した映像生成技術が要求され，本システムでは，これらすべてをソフトウェアによって実現した[67, 68].

4.3.1 映像歪み補正機能

球面に対する映像歪み補正機能として，図 4.9 に示すように体験者視点位置よりビューフラスタム，及びプロジェクタ投影位置より映像投影フラスタムを定義する．ビューフラスタムは, 視点位置としての頂点をP_0, 底面を($P_{0,0}$, $P_{m,0}$, $P_{m,n}$, $P_{0,n}$)とする四角錐で表現され,

投影フラスタムはプロジェクタバックフォーカス位置としての頂点をQ_0, 底面を($Q_{0,0}$, $Q_{m,0}$, $Q_{m,n}$, $Q_{0,n}$)として表現される．ここで，m, nは映像解像度を表すものとし，映像信号がSXGAの場合は，m=1279, n=1023 である．底面は仮想スクリーン面とも呼ばれる．

簡易表現のため，m=iにおけるy-z二次元断面から見た模式図を図 4.10 に示す．仮想スクリーン面内に点$P_{i,j}$を想定し，ベクトル$P_0P_{i,j}$とドームスクリーンとの交点$R_{i,j}$を求める．次にベクトル$Q_0R_{i,j}$と投影フラスタムの仮想スクリーン面との交点$Q_{i,j}$を求める．i,jを 0≦i≦m, 0≦j≦nで変更すると，$P_{i,j}$→$Q_{i,j}$対応マップを作成することができ，この対応マップが映像の歪みに対する逆補正となる．図 4.11(a)に通常の描画処理，図 4.11(b) に映像歪み補正処理を加えた描画処理のフローを示す．まずビューフラスタムに基づいて通常の映像生成を行い，次にこの画素データをフレームバッファメモリより映像データとして取り出し，この映像データに$P_{i,j}$→$Q_{i,j}$対応マップを利用したテクスチャマッピング座標を適用して再度映像生成を行い，映像信号として表示することで，映像歪み補正を実現する．図 4.12(a) に示すグリッド映像に，$P_{i,j}$→$Q_{i,j}$対応マップを適用した歪み補正後の映像を図 4.12(b)に示す．

実際の映像生成時には，横 1280 個・縦 1024 個の合計 100 万要素以上もの対応マップを使用するのではなく，間引いて使用する．1 秒間に 30 回以上の映像更進を必要とする，いわゆるリアルタイム描画においては, 100 万要素以上のテクスチャマッピング座標をリアルタイムで処理することができず，現状は横 200 個・縦 200 個の 4 万要素を使用し，各要素間は線形補間される．

本手法は，スクリーンの形状を制限しない．すなわち，ドームスクリーンだけではなく，スクリーン面が測定可能もしくは解析的な特定ができれば，それを CAD データとして表現することで，平面を組み合わせた複合平面スクリーン，及び曲率が連続的に変化する楕円球面スクリーンなどに対して映像歪み補正を適用可能である．

図 4.8　レーザー墨出し器設置状態.

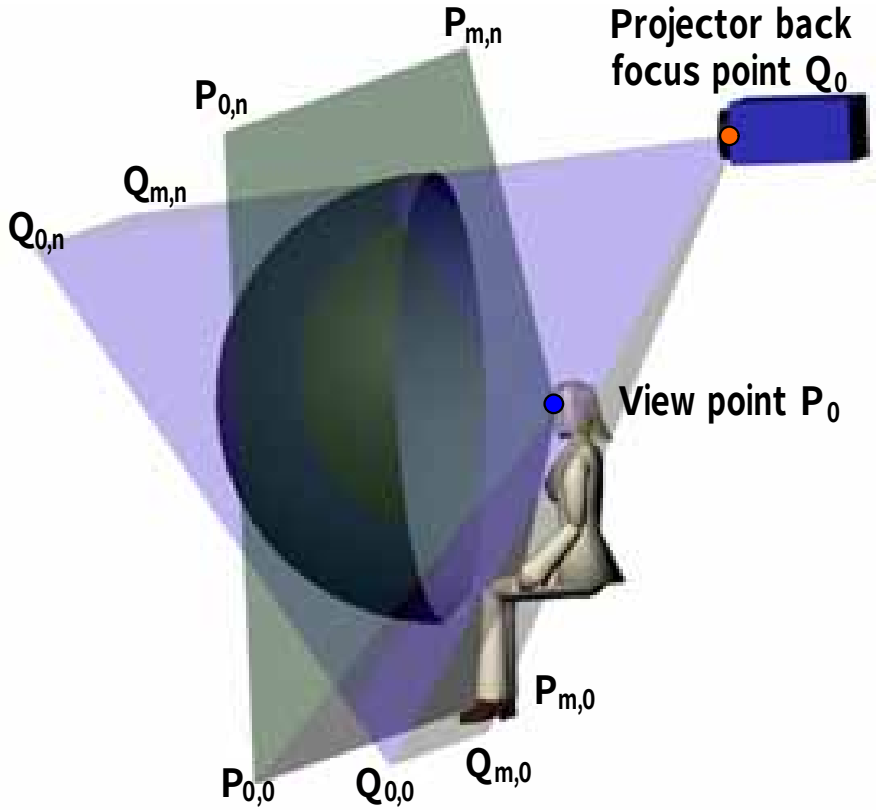


図 4.9　ビューフラスタムと投影フラスタムの定義.

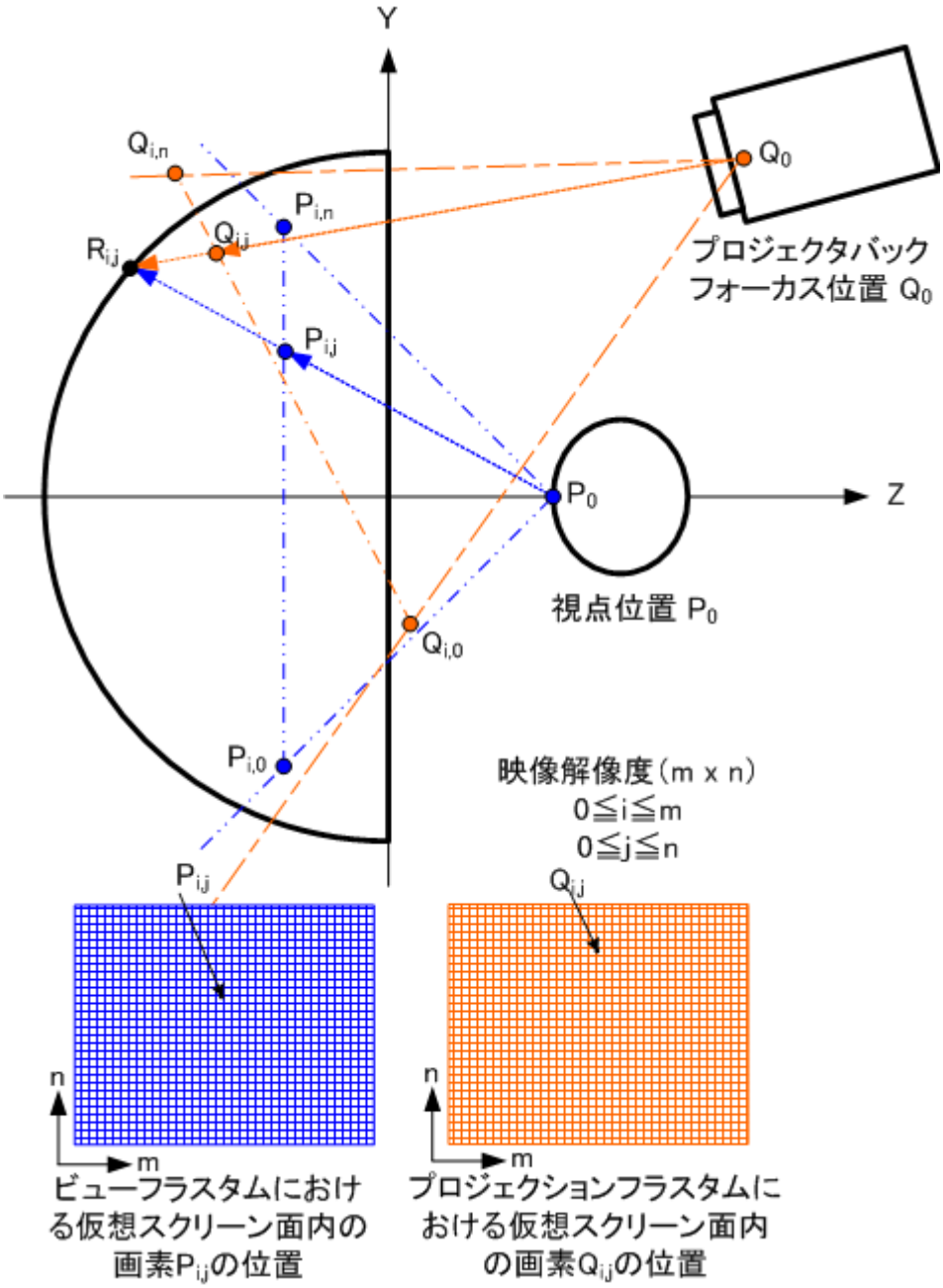
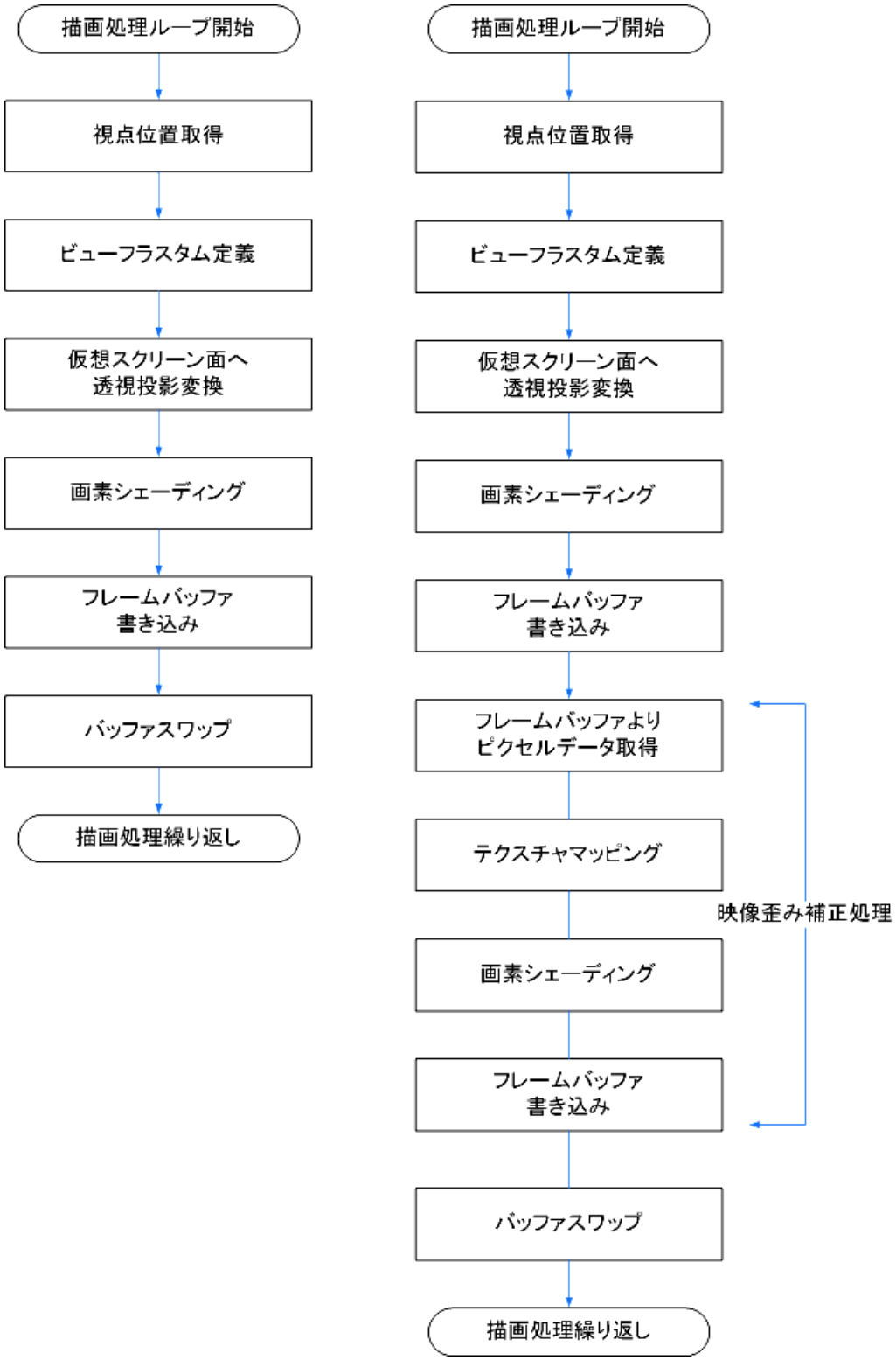
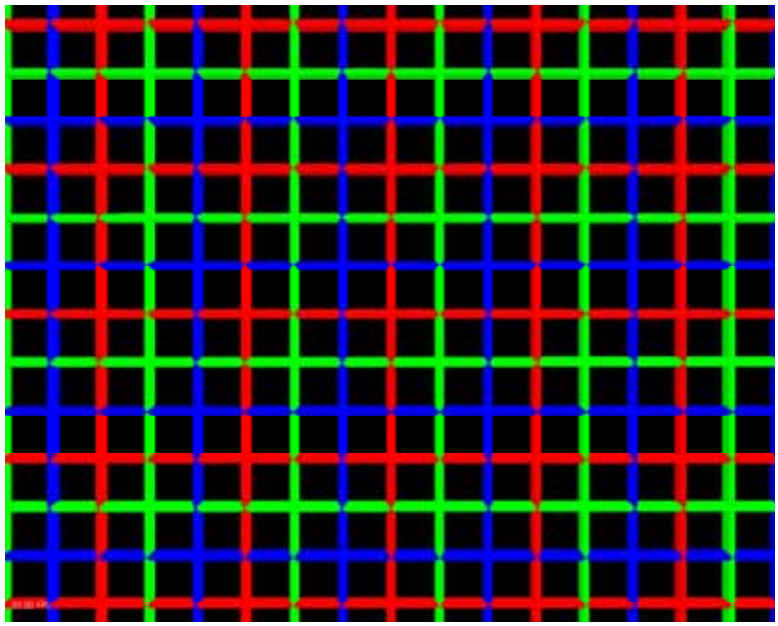


図 4.10　ビューフラスタムから投影フラスタムへの変換手法.

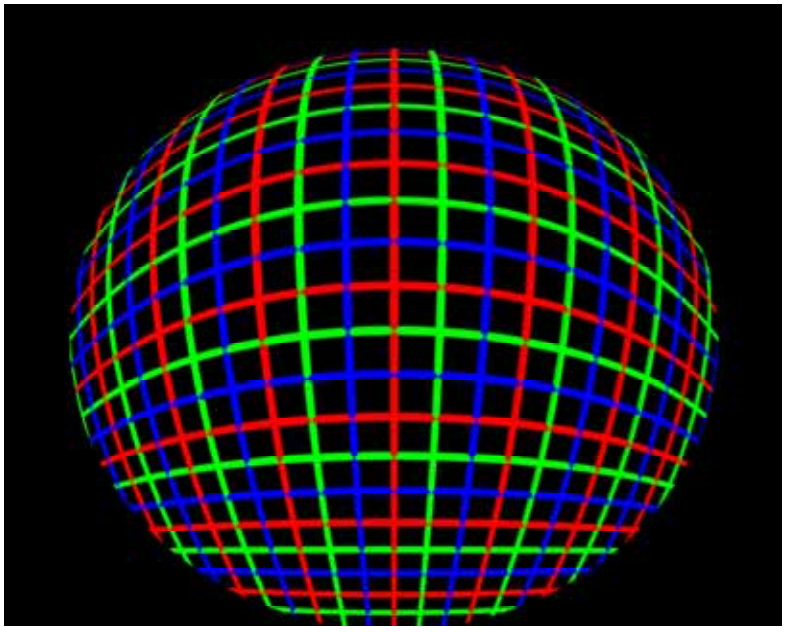


(a)通常の描画処理　　**(b)映像歪み補正処理を加えた描画処理**

図 4.11　描画処理のフロー.



(a) 歪み補正前のグリッド映像



(b) 歪み補正後のグリッド映像

図 4.12　$P_{i,j}$ →$Q_{i,j}$対応マップを適用した歪み補正前後のグリッド映像.

4.3.2 映像同期表示機能

すべての映像が同期した映像同期表示機能は，複数の PC による映像生成のタイミングをネットワークを通じて同期させるものである．本システムでは，映像生成のタイミングを 3 台の PC で毎秒 30 回の頻度で同期させることに成功した．3 台の PC とは，プロジェクタ 2 台に対応した映像生成用の PC2 台に加えて，映像同期管理用マスターPC を意味する．映像生成プロセスに加えて，映像歪み補正プロセスの負荷は大きいため，同期管理を専門に行うマスターPC を構築することによって，初めて映像同期表示が安定した．

図 4.13 に処理のシーケンスを示す．同期は，スワップバッファ命令のタイミングで取ることになる．2 台だけで同期を取る図 4.13(a) の場合，起こり得る問題は，LeftPC の描画準備が終了し，RightPC の描画準備が終了していなかった場合，LeftPC は新しい映像が表示されるが，RightPC には表示されないことが起き，左右の映像がばらついた同期が取れていない原因となる．3 台で同期を取る図 4.13(b)の場合，MasterPC がすべての描画用 PC の描画準備終了通知を受けてから，スワップバッファ命令を出すことになり，また，左右の描画用 PC は処理内容が等しくなることから，左右の映像表示のタイミングがずれることはなくなる．

そこで，図 4.13(a) に RightPC から LeftPC への描画準備終了通知を加えた場合を考えると，LeftPC の描画準備が先に終了すると，ただちに左右映像が同期して表示されるが，RightPC の描画準備が先に終了すると LeftPC を待つことになり，描画タイミングが一定しない．さらに，ユーザからの割り込み処理などが発生すると，図 4.13(a)では同期が取れない原因となり，一方，図 4.13(b)では割り込み処理が発生しても同期が取れることになる．

4.3.3 投影シミュレータによる調整

図 4.14 に示すように，投影シミュレータでは，図 4.14(a) のプロジェクションフラスタムを使用した映像から，図 4.14(b) のビューフラスタムを使用したシミュレーション映像を生成する．この図 4.14(b) の映像と，図 4.14(c) のドームスクリーン上の実際の投影映像とを比較し，その差を少なくする．ガイドとなるのは，映像中心 A 及び A’，ドーム中心 B 及び B’であり，A’と B’の位置関係を A と B でも実現するようにプロジェクタ姿勢パラメータを調整する．投影シミュレータでは，パラメータを変更すると，A と B の位置関係が直ちに変更されて画面上に表示される．この調整によって，プロジェクタ姿勢を 0.01 度単位で調整することができ，表示映像の精度を実現することが可能になる．

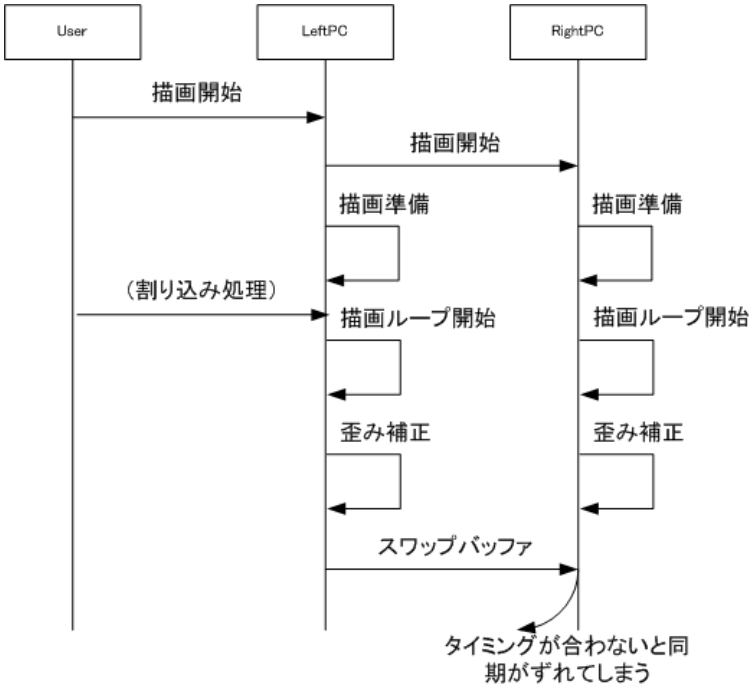
4.4 小型ドームディスプレイの構築

構築手法に基づいて，実際に小型ドームディスプレイを構築する．汎用の PC 及びプロジェクタを使用した安価な構成とし，通常のオフィスに設置できる程度に小型化する．汎用的なプロジェクタとして，液晶方式プロジェクタ，もしくは DLP 方式プロジェクタを選択する．

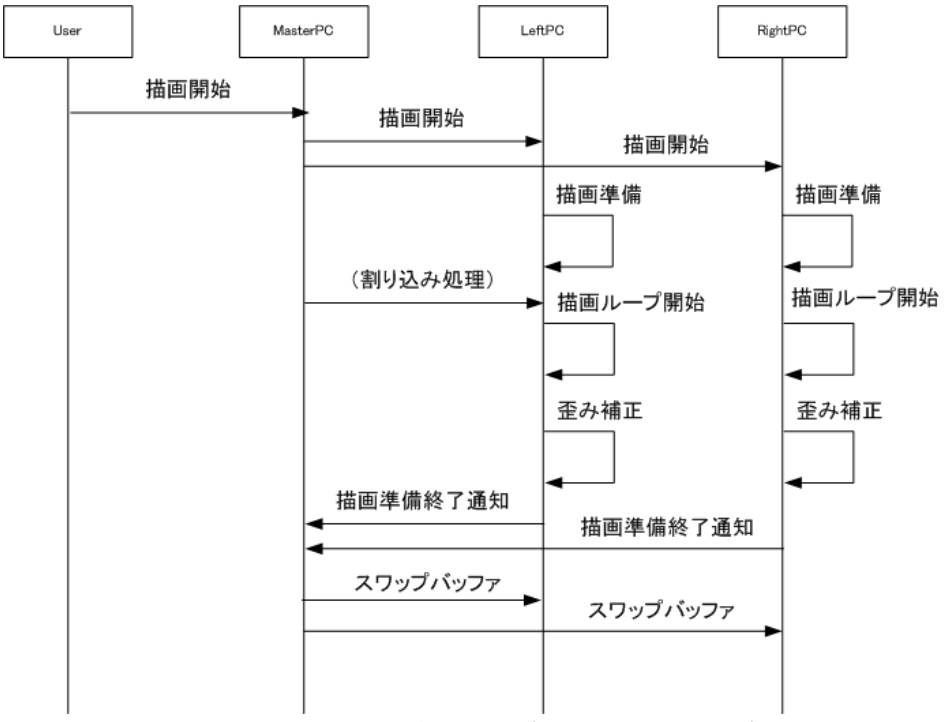
付録 C に示すように，CRT 方式プロジェクタと比較して，液晶プロジェクタは安価でし

かも 10 倍程度の明るさを持つ．明るさの点では，DLP 方式プロジェクタも十分明るく，汎用であると考えられるが，RGB 各色分離フィルタを持つ 3 板 DLP 方式プロジェクタは付録 C に示すように高価であり，用途に応じて採用する．RGB 色を分離しない単板 DLP と呼ばれる DLP 方式プロジェクタは，安価である反面，RGB フィルタを回転して順に時系列に表示するため，色むらが生じ，立体映像表示には適切ではない．

小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイは，基本構成としてドームスクリーン・2 台の液晶方式プロジェクタ・3 台の映像生成用 PC よりなり，設置スペースをよりコンパクトにするために平面鏡を使用する．必要に応じて映像操作デバイス・音響デバイスなどを追加する．システム構成として，図 4.15(a)に機器構成図，(b)に配線系統図を，に図 4.16 システム外観を示す．また，スクリーン素材としては付録 B に示すシルバースクリーンを用いる．

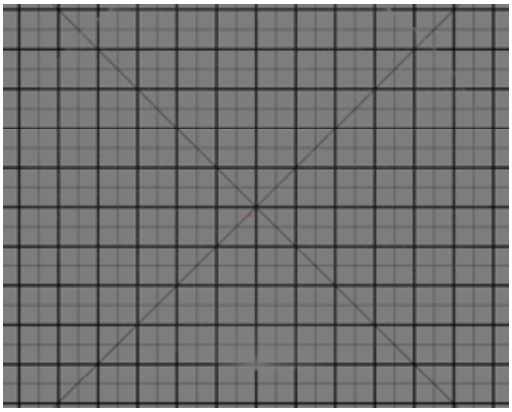


(a)2 台で同期を取る場合.

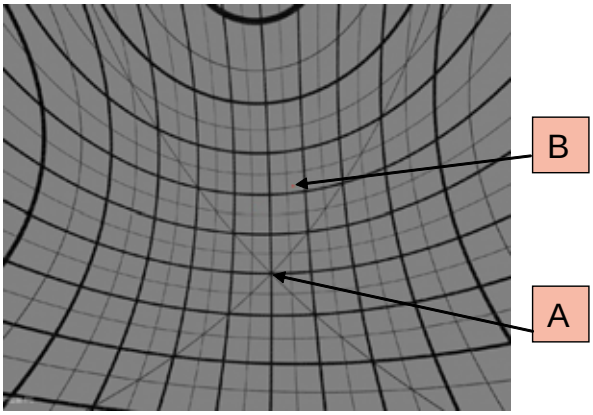


(b)マスターPC を加えた 3 台で同期を取る場合.

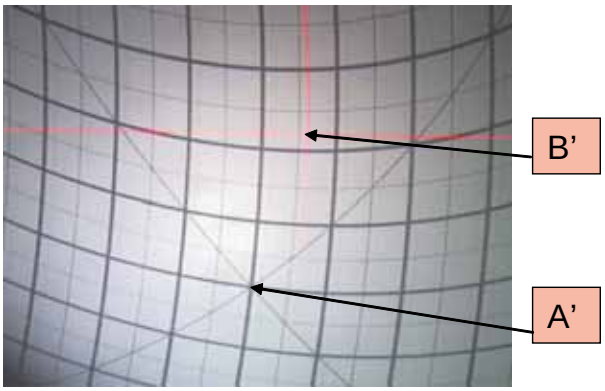
図 4.13　処理シーケンス.



(a)プロジェクションフラスタム映像.

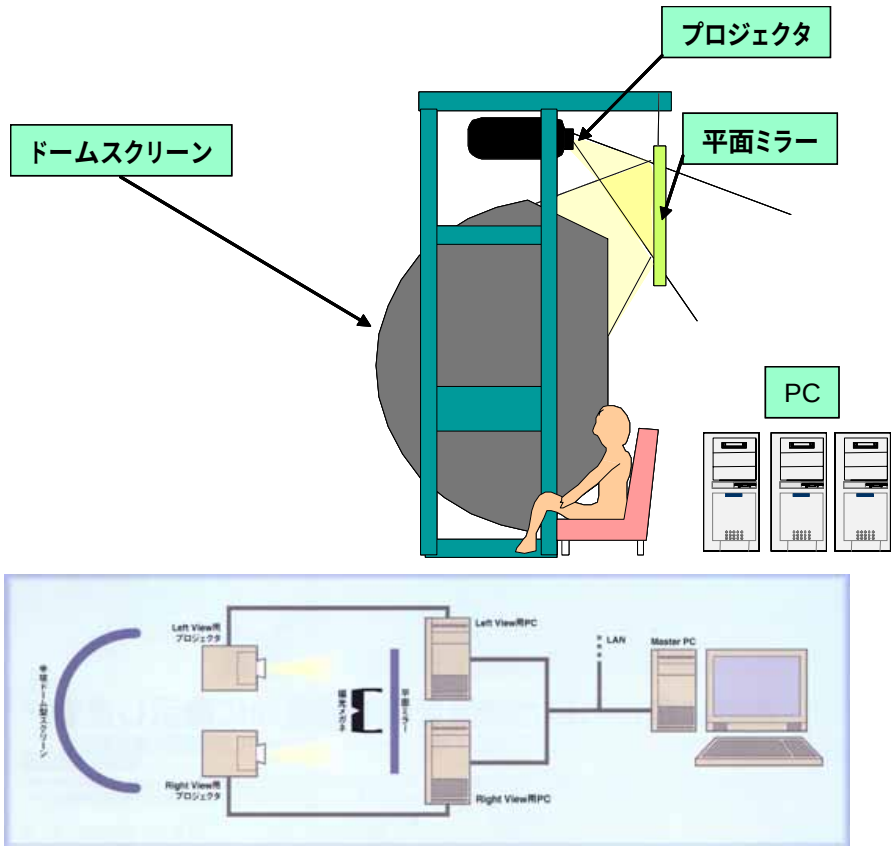


(b)ビューフラスタム映像.



(c)ドームスクリーン上の映像

図 4.14　投影シミュレータ.



(a)上段，機器構成図.　　(b)下段，配線系統図.

図 4.15　基本システム構成.

図 4.16　　サイバードーム外観.

4.5　構築手法と小型ドームディスプレイの評価

本構築手法の評価として，小型ドームディスプレイの視野範囲・精度・実用性・拡張性，及び最適なドームスクリーン形状の観点から考察する．

4.5.1 視野範囲

視野範囲は，最大でおよそ水平方向 140 度，垂直方向 90 度を実現した．視点位置は，ドーム中心より 32cm 後方とし，体験者が映像領域を遮らない場合を想定する．

4.5.2 映像精度

図 4.17 にレーザーとグリッドの重なりを示す．さらに，図 4.18 に調整後の左右両目用のグリッド映像を視差ゼロにして重ねた映像を示す．2 つの別々のプロジェクタから投影された映像が，ほぼ完全に重なっていることを示す．

図 4.19 に図 4.17（c）映像の中央及び左端を拡大したものを示す．グリッド線は 4 画素程度で描画されており，特に中央でグリッド半分 2 画素分のずれを認識する．直径 1.8m の本システムに SXGA の解像度の映像を表示していることから，1 画素は 2.2mm に相当するため，直径を基準とした精度は 0.3%以下を実現したことになる．

また，2 つの別々のプロジェクタから投影された映像の重なり精度は，1 画素以内であると判断されることから，直径を基準とした精度は 0.12%を実現したことになるが，精度の低い方を取って，映像精度は，0.3%以下と言える．

次に，実スケール表示を評価するために，以下の 2 種類のデータを作成する．評価方法は，小型ドームスクリーンに表示した映像と実物を重ね合わせ，体験者の視点位置に設置したカメラによる写真撮影によって重なり程度を評価した．

（１）単純で実測可能な形状データ

図 4.20(a)に示すような一辺が 10cm の正方形データを作成する．視点位置からスクリーン正面に対して垂直な方向を視線方向とし，その視線上に正方形の中心を位置させる．視点位置から正方形の中心までの距離は可変とする．次に，一辺が 10cm の実物の正方形を作成し，指定した位置にクリップで固定する．図 4.20 (b)は仮想空間上の正方形と平板の正方形を共に視点位置から 30cm の距離に設定した場合の重なりを撮影したものである．重なりはほとんど一致してしまうため，　図 4.20(b)ではクリップではさんだ実物を少しだけずらして撮影したものを示す．測定は順次距離を変更して行い，どの距離でもよく重なることを確認した．

（２）実際の空間をモデリングした形状データ

より複雑で奥行方向の精度を評価するために，実際の廊下を例にとって形状データを作成した．スクリーン上の廊下データの映像撮影及び，実際の廊下撮影の際は，視点位置を一致させる．図 4.21(a)(b)に実際の廊下撮影写真と小型ドームに投影した廊下データの撮影写真を示す．さらに図 4.21(c)に２つの写真を画像処理によって重ね合わせたものを示す．写真下部の廊下形状はほとんど一致することが確認された．重ね合わ

せ映像評価より誤差は，全体スケールの 1%以下と考えられ，実スケール表示の精度は十分使用できるレベルであると考えられる．

4.5.3 実用性

実用性については，設計関係者が本研究成果のディスプレイを用いて次々と都市空間設計や住空間設計を進めていることから実証されたと言える．図 4.22, 図 4.23 に設計データの表示例を示す[69, 70, 71, 72, 73, 74].

4.5.4 拡張性

ドームスクリーンサイズ，及びプロジェクタ投影位置を変更したドームディスプレイを別途構築し，パラメータ変更のみで対応できることを確認した．ドームスクリーン内径は 3.7m であり，中型ドーム形状没入型視覚ディスプレイである．図 4.24 及び図 4.25 に体験の様子及び配置図を示す.

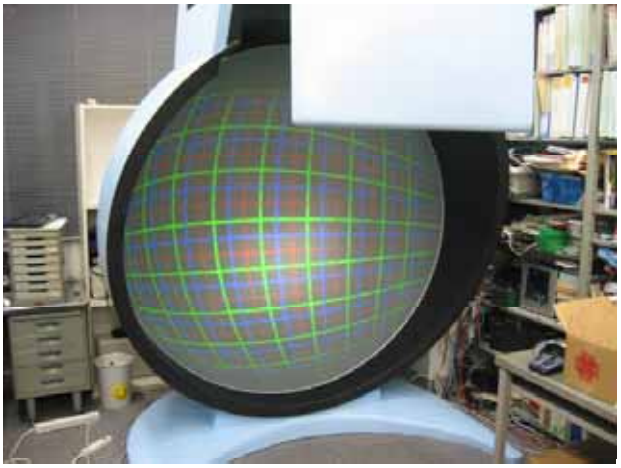
4.5.5 最適なドームスクリーン形状

ドームスクリーン形状の長所として，視野を映像で覆うことが可能である点に加えて，視点位置とスクリーン面との距離を適切に保持できる点が挙げられる．視差を利用した立体映像を見る場合，視点位置とスクリーン面との距離は，1m から 10m 程度の範囲とする必要がある．

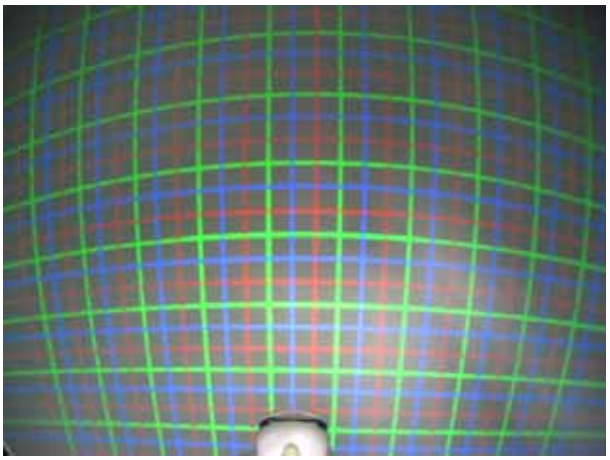
物体との距離を判別する人間の視覚特性として，図 4.26 に示す輻輳と調節がある．輻輳とは物体が視点に近づくにつれて，目玉が中心方向に寄る自律反応を表すものであり，調節とは，眼球のレンズの厚みを変更して，ピントを合わせる自律反応を表す．輻輳においては，実物の物体を見る場合と映像としての物体を見る場合に輻輳角の差異はない．しかしながら，調節においては，実物の物体の場合は距離Dにピントを合わせるのに対して，映像としての物体の場合はスクリーン距離D_Sにピントを合わせるため，差異が生じる．視点位置とスクリーン面との距離が短くなるにつれて，輻輳と調節の異なった距離判別結果が違和感を与え，およそ 1m以下になると立体映像として知覚することが難しくなるためである[14].

小型ドームスクリーンでは, 最も重要な視野中心部分で 1m 以上を確保することが可能である. 半球形状を変形し, 球の一部として中心弧度を 180 度以下とすることは問題ないが, 水平視野範囲を 140 度に保つためには，視点位置をスクリーンに近づけることになり，視点位置とスクリーン面との距離を適切に保つことができる範囲に留める必要がある．

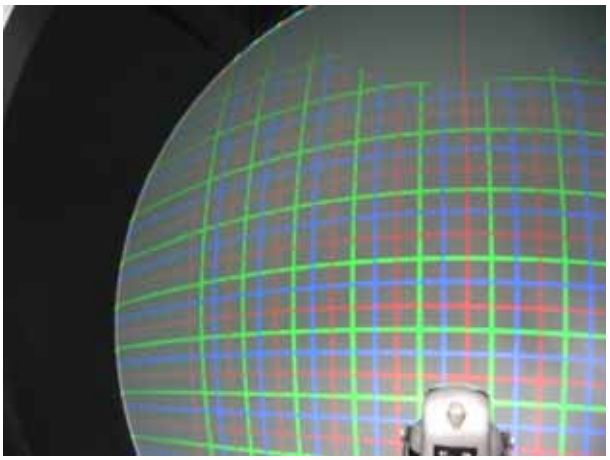
図 4.27 に示すように，平面スクリーンとの大きさ換算を示す．水平視野範囲 140 度の場合，ドームスクリーン最深部に平面スクリーンを設置すると，337 インチの換算となる．視点位置から 1m の距離に設置した場合には，274 インチとなる．



(a)ドームスクリーン上のグリッド映像表示例.



(b)レーザとグリッド映像とのずれ.



(c) レーザとグリッド映像とのずれ（左上半分）.

図 4.17　レーザーとグリッド表示との重なり.

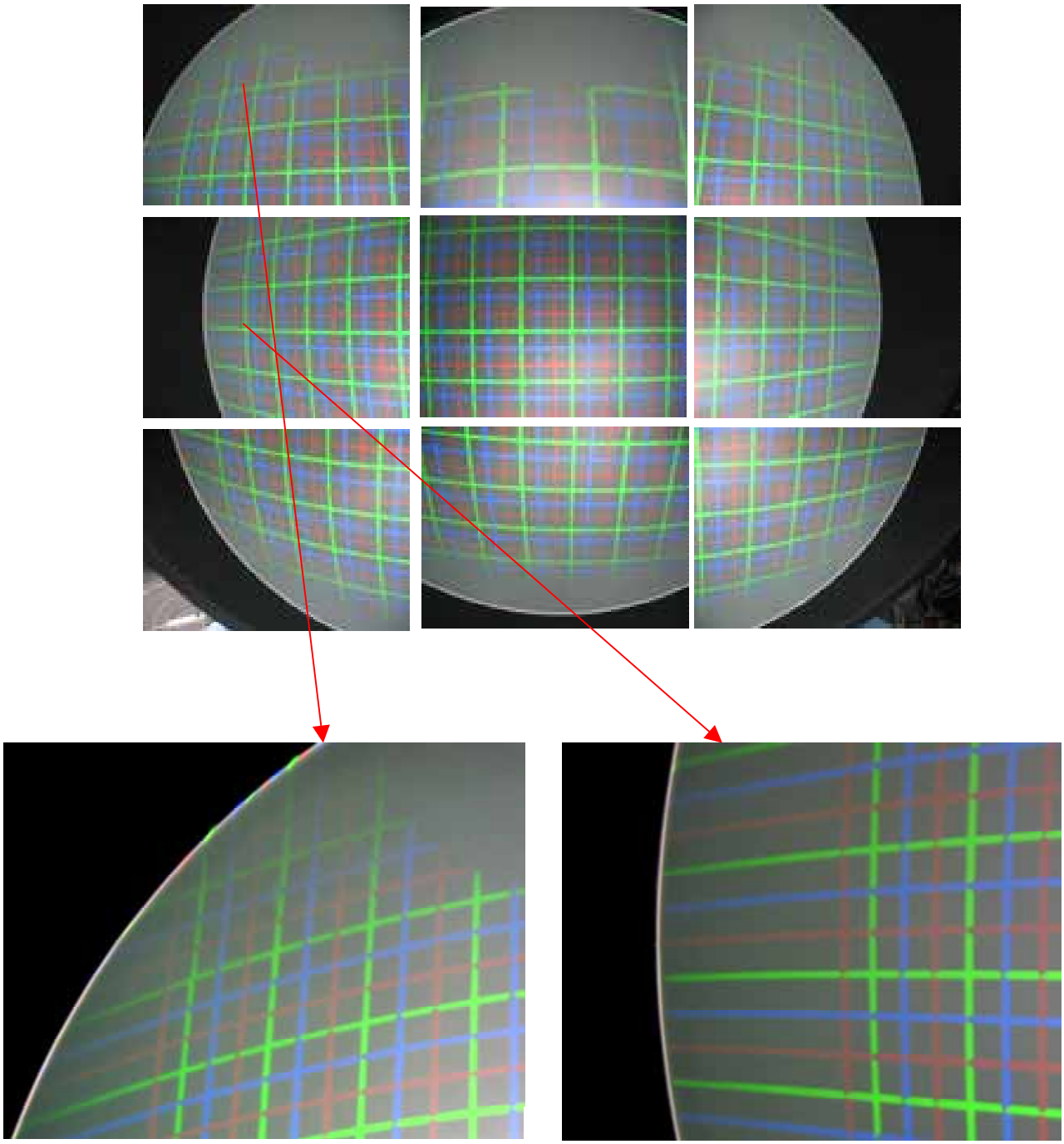


図 4.18　視差を零とした両目映像の一致性評価.

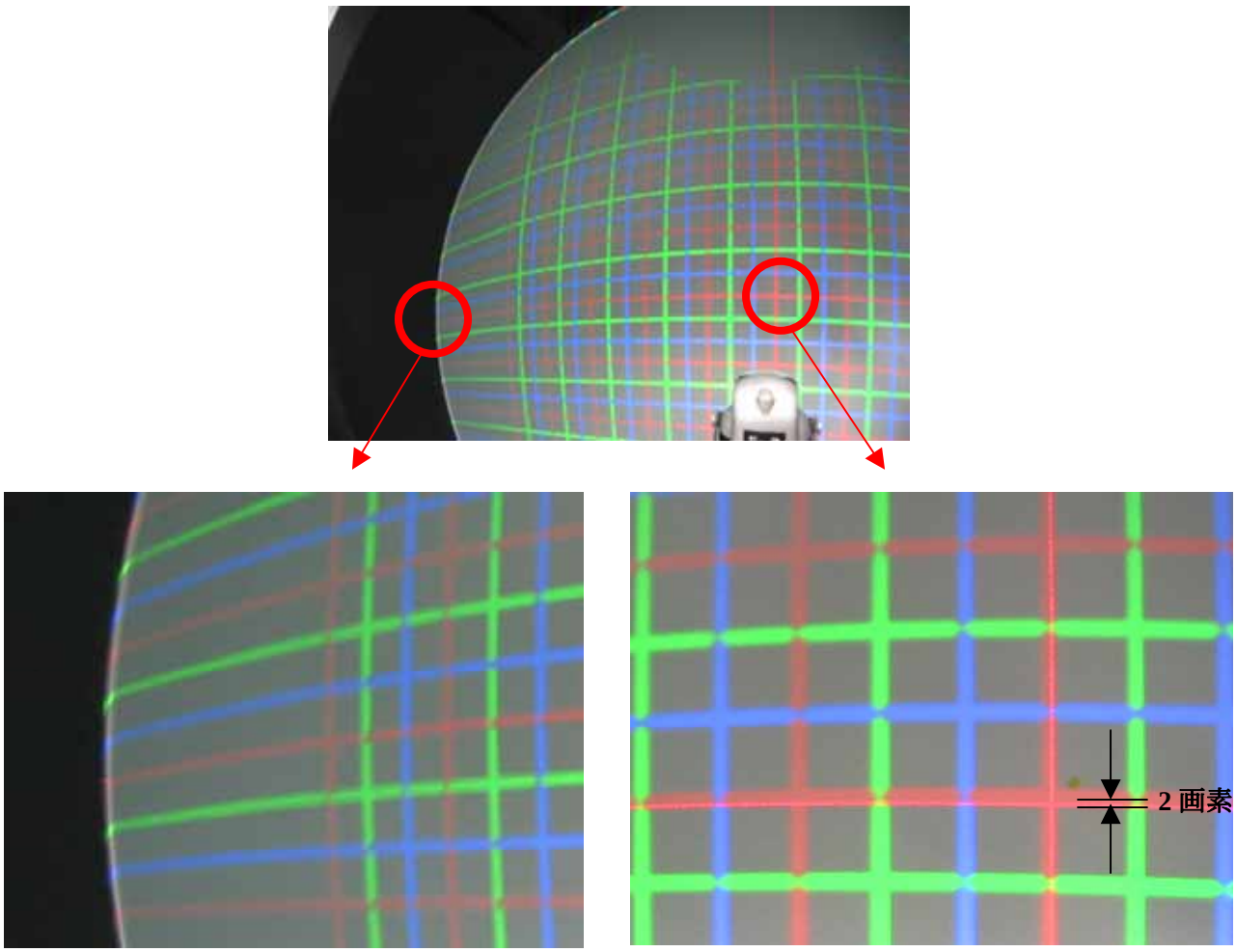
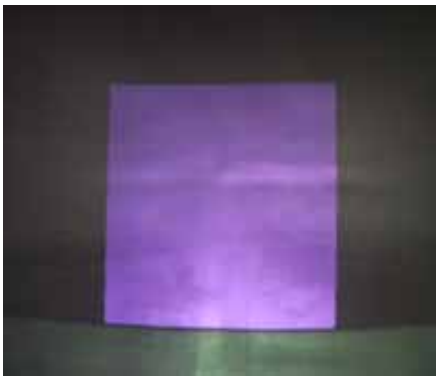


図 4.19　レーザーとグリッド表示との重なり部分拡大.



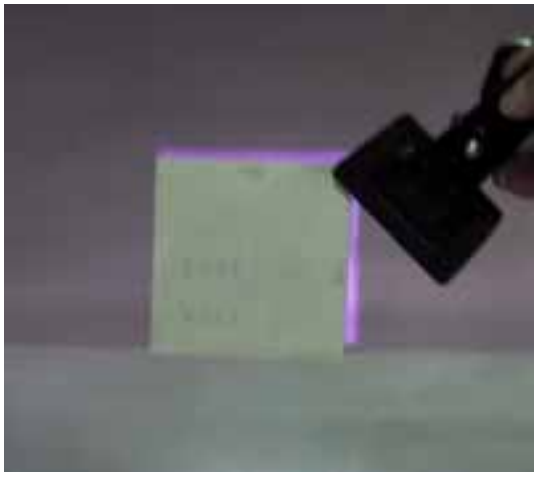


図 4.20　正方形映像と実物正方形との重ね合せ評価.

(a)奥行を持つ実空間を写真撮影

(b)CAD により形状データ作成, ドームスクリーン上の投影映像を写真撮影

(c)2 つの写真映像の重ね合わせ

図 4.21　実物廊下写真と廊下イメージとの重ね合わせ評価.

図 4.22　ドームスクリーン上の都市空間設計表示例.

図 4.23　ドームスクリーン上の住空間設計表示例.

図 4.24　　内径 3.7m 中型ドームディスプレイ体験の様子.

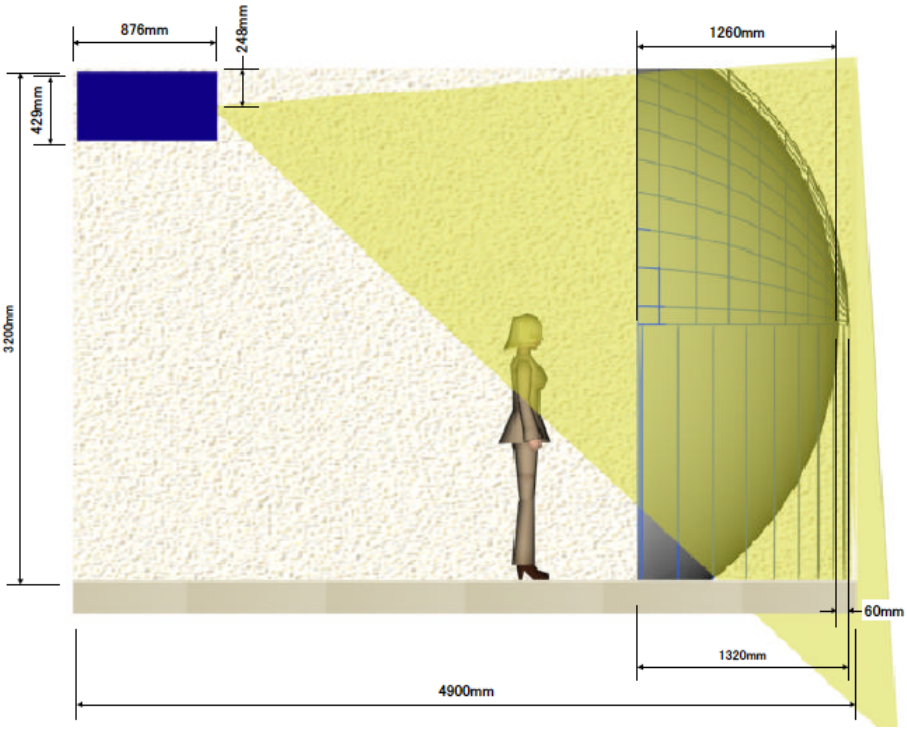


図 4.25　　中型ドームディスプレイ配置立面図.

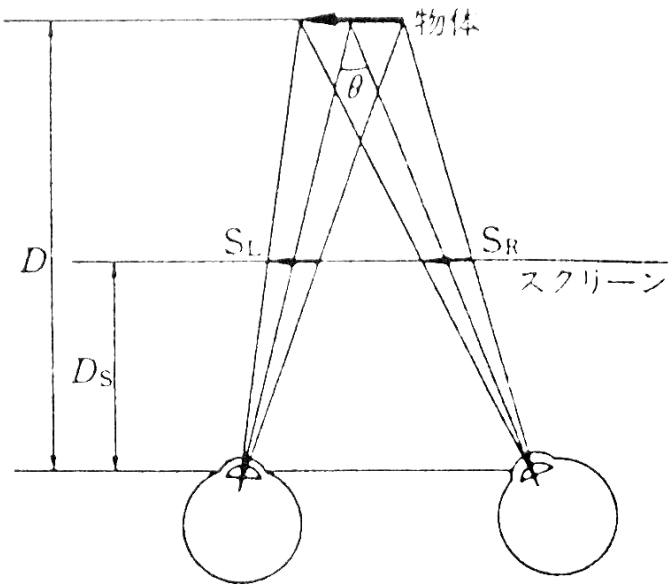
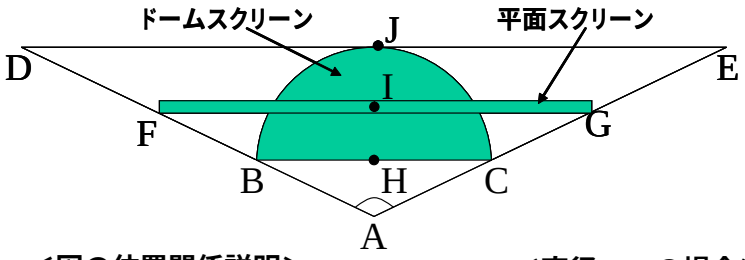


図 4.26　　立体視における輻輳と調節.



＜図の位置関係説明＞

A：**体験者観察位置**
B：**ドームスクリーン左端**
C：**ドームスクリーン右端**
H：**ドームスクリーン中心**
D：**ドームスクリーン延長線上左端**
E：**ドームスクリーン延長線上右端**
F：**平面スクリーン左端**
G：**平面スクリーン右端**
I：**平面スクリーン中心**
J：**ドームスクリーンと線分DEの交点**

＜直径1.8mの場合＞

角度A=140 °
距離BC=1.80 (m)
距離HJ=0.900 (m)

距離AH=0.328 (m)
距離DE=6.75 (m)
⇒337.5 (インチ)
=(6.75*(5/4)*100/2.5)
距離AI=1.00 (m)
距離FG=5.49 (m)
⇒274.7 (インチ)

図 4.27　　視点位置とスクリーンとの距離，及び平面スクリーンとの大きさ換算.

4.6　おわりに

本章では，第 3 章で試作したドーム形状没入型視覚ディスプレイにおいて明確になった構築コストの低減，設置スペースの縮小，表示映像の明るさ改善，プロジェクタ投影軸がドーム中心を通るという制限改良という課題に取り組んだ．まず，ドーム形状没入型視覚ディスプレイの一般的構築手法を示し，第 3 章で述べた歪み補正機能を改良して，新たな補正パターン生成手段を開発し，プロジェクタの投影中心軸がドーム中心からずれた場合においても，映像歪み補正を実現するという課題を克服した．ドームスクリーンサイズを小さくすると，プロジェクタ設置位置と体験者の観察位置が近接し，投影映像がドーム中心を通るようなプロジェクタの設置は困難となるためである．プロジェクタを中心部より周辺部に移動させることで，体験者への最適な映像提示を最優先とする設計概念を同時に実現することができた．

また，本研究の開発成果として，投影シミュレータを開発した．これは，ドームスクリーン投影による映像歪み補正とプロジェクタ位置変更による映像位置補正機能を包含したソフトウェアであり，ドームスクリーン上に表示される映像の位置及び形状を正確にリアルタイムにシミュレーションし，その結果と実際に設置した際の投影映像とが一致することを保証するものである．歪み補正に必要なパラメータ，ドームスクリーン形状データ，プロジェクタ投影映像パラメータ，プロジェクタ設置位置，平面鏡の位置及び回転軸パラメータ，そして体験者視点位置データを入力として，ドームスクリーン上の投影映像を確認しながらリアルタイム・インタラクティブに歪みを変更できるため，ドームスクリーンの設計ツールだけにとどまらず，構築時の調整ツールとして，必須なソフトウェアとなった．

実際に構築した小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイにおいては，映像生成に高価なグラフィックススーパーワークステーションを使用するのではなく, PC を使用することで, 高速でしかも安定した描画性能を実現し，大きなコスト低減を実現した．設置スペースに関しては，ドームスクリーンサイズを 1.8m として，平面鏡を組み合わせて標準的オフィスに設置可能な大きさとした．プロジェクタは，暗い CRT 方式ではなく，明るい液晶方式プロジェクタを用いることで映像品質を改善し，同時にコスト面についても，ドーム形状没入型視覚ディスプレイと比較して，25 分の 1 への低減を可能にした．付録 A に，第 3 章で試作したドームと比較して仕様を示す．

小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの実現に際しては，さらに映像同期表示という課題を克服する必要があった．すなわち，グラフィックススーパーワークステーションが担っていた右目用左目用という複数映像の生成とその同期を PC 上で実現する必要があった．映像生成に関しては，PC で映像生成を行う場合，高速なグラフィックスカード専用の AGP バスが１つしかないというアーキテクチャを考慮すると，PC の持つ描画性能を最大化するためには，1 台の PC では 1 つの映像のみを生成するのが良い．立体映像を生成するためには，右目用左目用の映像生成を 2 台の PC で別々に行い，PC 間でネットワークを使用した同期機能の開発に取り組み，3 台の PC を標準的に使用することで映像同期処理の課題を解決した．

第 3 章では不十分であった映像の表示精度の検討として，レーザー墨出し器による基準

線との比較，及び形状モデルデータ作成による実物・実空間との比較を行った．映像表示の誤差は，最大 1%程度であったことから，小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの映像表示性能として，歪みのない映像表示及び等身大スケール映像表示を実現したと言える．

本章では，特殊なレンズなどを用いた光学的補正を行うのではなく，ソフトウェアによる映像歪み補正機能によるドーム形状没入型視覚ディスプレイの一般的構築手法を提案し，実際に小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイを構築して，その有効性を検証した．しかしながら，都市設計においては，第 3 章で述べたように多人数が同時に設計検討を行う空間共有体験が重要であり，本研究で実現した映像歪み補正機能や複数 PC の映像同期表示など映像生成技術をさらに拡張して，汎用的な PC 及び液晶方式プロジェクタの構成による大型ドーム没入型視覚ディスプレイ開発に取り組む必要がある．次章では，第 3 章とは異なったマルチプロジェクタを用いたドーム形状没入型視覚ディスプレイの開発に取り組み，歪み補正機能や複数 PC の映像同期などを拡張した映像生成技術を示し，その構築手法を示す．

第 5 章　マルチプロジェクタを用いたドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法

5.1　はじめに

前章では，直径 1.8m の小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイ[67][68]において，およそ水平方向 140 度，垂直方向 90 度の視野をドーム形状スクリーンによって覆い，そこに歪みのない映像を等身大スケールで立体的に提示する手法を実現した．すなわち，プロジェクタによる投影映像と被投影スクリーン，さらに体験者視点位置の関係をモデル化し，スクリーンに投影される映像の歪みを推定し，その逆補正の歪みを生成して，表示映像をリアルタイムに歪み補正する手法である．

本手法の特長は，体験者への最適な映像提示を最優先とする設計概念にあると考える．すなわち，まず体験者の視点位置とスクリーンとの最適な位置関係を定め，体験者が映像を遮ることによる影を生じないようにプロジェクタを中心部より周辺部へ移動し，これによって生じる映像の歪みをソフトウェアで正確に補正するというものである．歪み補正は，プロジェクタ投影映像，スクリーン形状，視点位置によって決定するため，プロジェクタ位置・種類及びスクリーン形状・サイズの変更に対して，パラメータ調整で対応が可能となる．従って本研究の構築手法では，魚眼レンズ等の特殊で高価なレンズや特殊なハードウェアを必要としない．

一方，都市空間設計のような関連者が複数にわたる場合には，多数の体験者が同じ映像を同時に見るという空間共有体験が重要であると考えられる[32]．しかしながら，小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイでは，多数の体験者に同時に広視野の映像を提示することは困難である．

多数の体験者に同時に映像提示するためにはドームスクリーンサイズを拡大すればよいが，単純に投影される映像を引き伸ばしただけでは，映像は暗く粗くなる．そこで，一台の投影手段で映像を拡大して表示するのではなく，複数の領域に分割して，領域ごとに映像データを生成し，各領域に対応する複数の投影手段で映像提示するという第 3 章で示した手法の長所を活かし，第 4 章で実現した明るい映像品質で構築コスト面に優れる PC 及び液晶方式プロジェクタの構成とし，歪み補正機能や複数 PC の映像同期などを拡張した映像生成技術を開発し，多人数に映像提示可能な高解像度でしかも高輝度な高精細映像を提示するマルチプロジェクションを用いた大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの構築を目指す．

マルチプロジェクションによる映像投影において課題となるのは，各映像のつなぎ目となる境界部分の処理である．特にドームスクリーンのように非平面形状のスクリーンでは，境界部分は複雑な曲面形状となるため，新たな処理手法を開発する必要がある．

本章では，まず，マルチプロジェクタ対応への考察について述べる．次に，本開発の核心部分である重なり合った映像境界部分の特定とその輝度補正処理について手法を示し，この手法に基づいて実際に構築した大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイ，及びその提示映像の評価を述べる．最後に得られた知見，課題についてまとめる．

5.2　マルチプロジェクタ対応への考察

図 5.1 に示すように 9 つの手順によって，マルチプロジェクタへの対応が可能となる．以下，順に構築手順を説明する．

5.2.1 プロジェクタ投影映像モデル化

まず，第一に，前章と同様に，プロジェクタの詳細スペックを入手，もしくは測定し，プロジェクタの投影映像をモデル化する．

5.2.2 ドームスクリーンサイズ・形状の決定及び CAD による形状作成

第二に，ドームスクリーンにおける体験人数と設置スペースの条件よりドームスクリーンサイズ及び形状を設計する．

ドームスクリーンの半径をR，体験人数をN，1m^{2}当たりの人数を$n_{density}$とすると，すべての体験者の水平視野θを 180 度覆うことができる人数は，ドームスクリーン直径上に並ぶ場合となり，一辺 1mの正方形の対角線上に$n_{density}$の人数が並ぶと考える．通常$n_{density}$は数式 5.1 のように考えられ，$n_{density}$=2 の場合は，簡易な椅子を使用して座視することが可能であり，$n_{density}$=4 の場合は，肩が触れ合わない程度の満員電車と考えられ，立位で映像を見ることになる．

$$1 \# n_{density} \# 4 \tag{5.1}$$

$$N = 2R / \left(\frac{\sqrt{2}}{n_{density}} \right) \tag{5.2}$$

図 5.2 に示すように，水平視野を小さくしたθ<180 の場合，すべての体験者に対して水平視野θを可能にするエリアの面積をS_A（図中グレー色の部分），S_A を円弧と見なした際の大円半径をrとすると，数式 5.3, 5.4, 5.5 の関係となる．

$$r = R / \sin(180 - i) \tag{5.3}$$

$$S_A = \pi r^2 \frac{\{180 - i\}}{180} - r^2 \sin(180 - i)\cos(180 - i) \tag{5.4}$$

$$N = S_A n_{density} \tag{5.5}$$

従って，R=4，$n_{density}$=2 とすると，θ=180 の場合，N　11，θ=120 の場合，N　26 となる．反対に 20 人以上が水平視野範囲 120 度以上で映像を見ることができるドームスクリーンは直径 7m 以上となる．

実際に構築したドームスクリーンの設置スペース制限は，幅 5.1m，奥行 12.8m，高さ 9.7m であるため，スペース全体を活用した最大のドームスクリーンとして直径を 8.9m とした．

CAD を用いてドームスクリーンの 3 次元形状データを作成し，さらに設計を進める．体験者視点高さをドームスクリーンの中心高さに近づけるため観覧台を設置し，その一方では，観覧台の階段段数を減らす目的からドームスクリーン下部の一部を切断し，観覧台への通路を確保するため，球の中心より 1.8m スクリーンを切り取った底浅形状のドームスクリーンとした．スクリーン開口部分は水平方向最大 8.25m となる．

5.2.3 プロジェクタ配置概略設計

第三に，初期プロジェクタ配置を設計する．すでにモデル化しているプロジェクタ投影映像により，スクリーン上の映像表示領域の分割方法を設計する．プロジェクタを水平方向に 3 台，垂直方向に 3 段配置し，立体映像表示のために左目用右目用を上下にスタック配置し，全体で 18 台の配置設計を行った．図 5.3 に示すように，プロジェクタと投影される映像の光路を 3 次元形状として作成し，ドームスクリーン形状に合成する．その際，体験者及び観覧台が映像光路領域を遮ることによる影を生じないように考慮する．実際の構築では，特に観覧台による映像遮蔽が厳しく，下段のプロジェクタをスクリーンに近づけることによって遮蔽を防ぐことにしたが，このために映像表示領域が小さくなり，それを補うために中段・上段の映像領域を広げる必要性が生じた．そこで，上段・中段のプロジェクタの配置設計において，映像を左右で交差投影させ，さらに上段下段で映像を交差投影させるように配置することで，投影距離を大きく取れる工夫をした．

5.2.4 プロジェクタ配置詳細設計

第四に，筆者らの開発した投影シミュレータを用いてプロジェクタの詳細な配置設計を行う．投影シミュレータは，球面スクリーン投影による映像歪み補正とプロジェクタ位置変更による映像位置補正機能を包含したソフトウェアであり，ドームスクリーン上に表示される映像の位置及び形状を正確にシミュレーションし，その結果が実際に設置した際の投影映像と一致することを保証するものである．入力は，図 5.4(a)に示すように，前述のモデル化したプロジェクタ投影映像パラメータ，ドームスクリーン形状データ，そして体験者視点位置データである．

初期値として，前述のプロジェクタ配置概略設計結果を使用する．プロジェクタ配置の位置・回転データを徐々に変更させながら映像境界部分の重なり程度を調整する．変更結果はリアルタイムに投影シミュレータに反映されるため，投影シミュレーション画面を確認しながら隙間部分を生じさせず，しかも重なり部分を最小化した最適なプロジェクタ配置を決定することが可能となる．図 5.4(b)に投影シミュレータの画面及び赤線で囲んだ 4 箇所の検討ポイントを示す．4 箇所の検討ポイントは，隙間が生じてしまうと，映像が表示

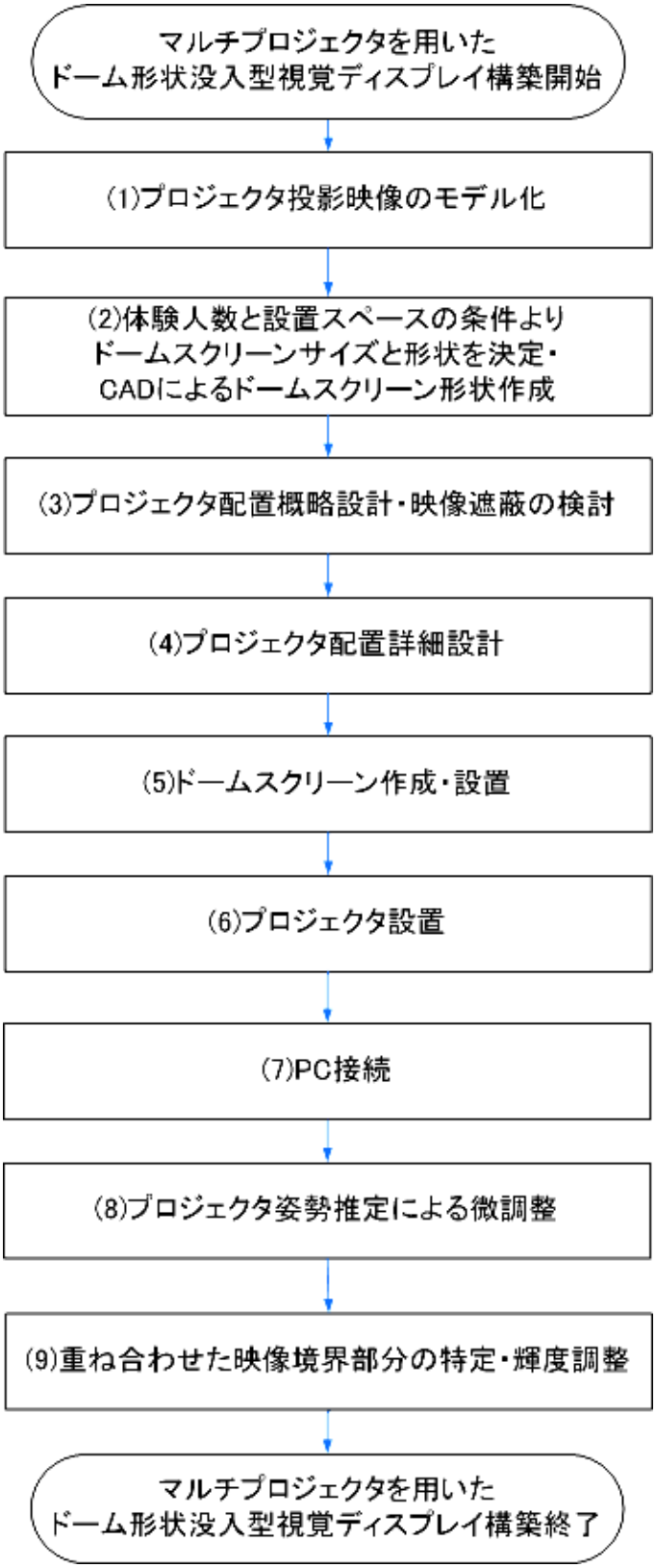


図 5.1　大型ドームディスプレイ構築手順.

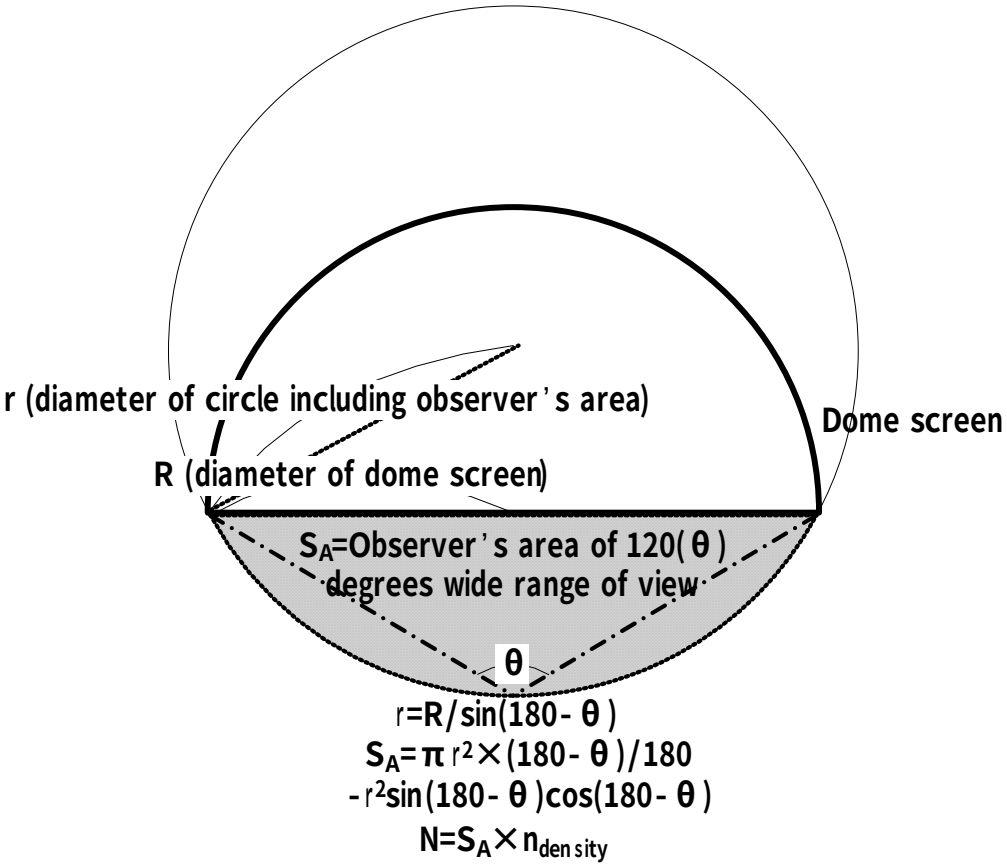


図 5.2　ドームサイズと広視野映像体験人数の関係.

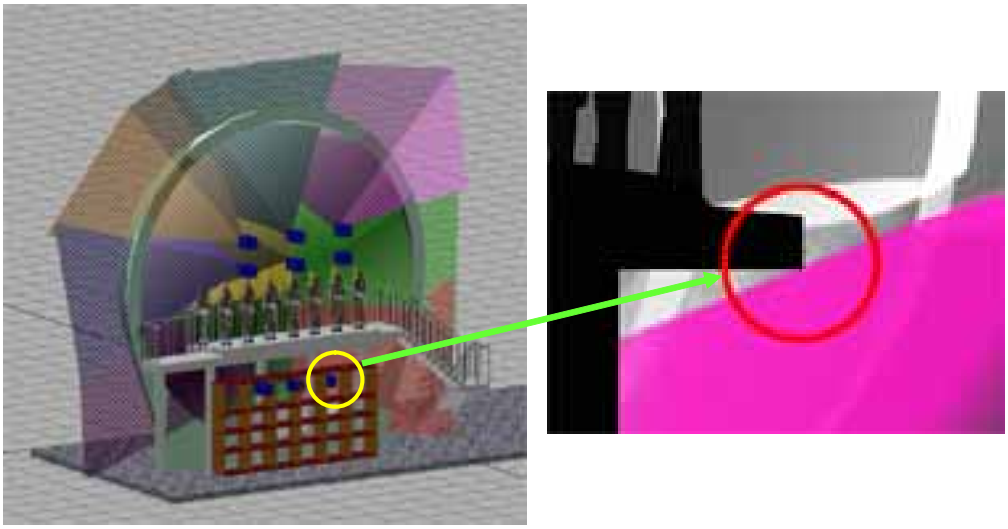


図 5.3　初期プロジェクタ配置設計と映像遮蔽検討.

赤丸部分に投影映像が観覧台によってわずかに遮蔽されている様子を示す.

されない穴が開いてしまうことになるため，特に注目をしながら配置設計を進める．この設計作業によって，より少ないプロジェクタ台数でも隙間を生じさせないことが可能かどうかに関しても検討でき，最終的なプロジェクタ総数・配置を決定する．本試作では，設置スペースの幅が狭く投影距離を伸ばせないこと，及び観覧台による映像遮蔽の影響が大きいことにより，ドームスクリーンを映像で覆うために，片目分 9 台が必須であることが明確になった．図 5.5 にドームスクリーン，観覧台，マルチプロジェクタ配置等の設計完了図を示す．

5.2.5 ドームスクリーン作成・設置

第五に，ドームスクリーンを実際に構築する．前章に述べたように，大型では塩化ビニルを素材としたソフトスクリーンを構築する．実際に構築したドームスクリーンの構造は次の通りである．鉄骨で組んだ骨組みをスクリーンで覆い，ポンプ吸引によって内部を負圧にすることでスクリーン面を骨組みに吸着させる．その際にスクリーン面は周囲以外には骨組みに触れさせないことによって，折れ曲がりや凹凸のないドームスクリーンを実現する．ドーム形状の精度は，0.1～0.3%以下である．設置時に床面及び壁面に測量による高い精度の墨出しを行い，プロジェクタ設置時のガイドとして使用する．

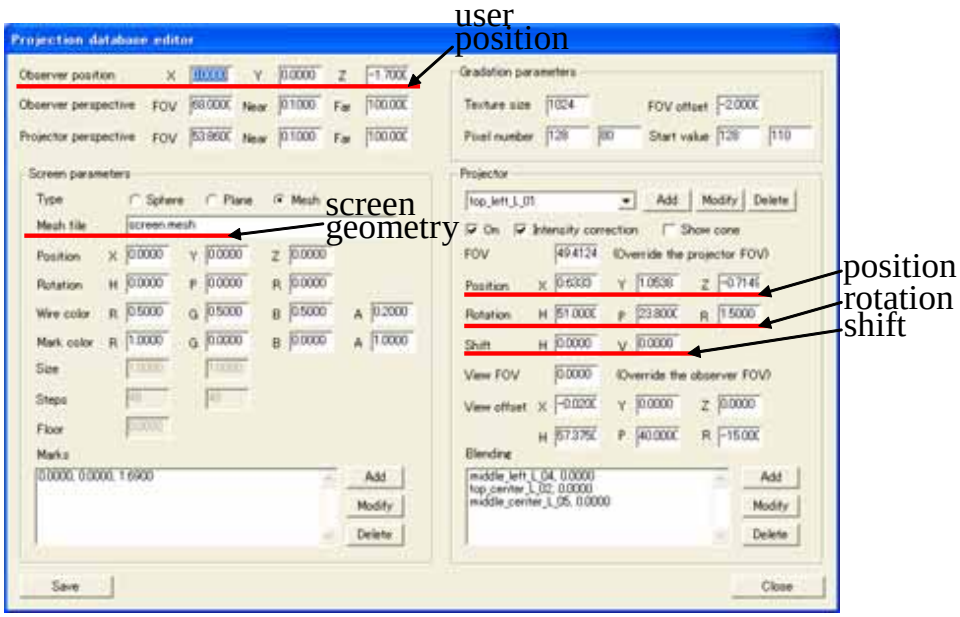
ドーム形状精度の測定は，前章と同様にレーザー距離計 Leica 社製 DISTRO classic4 と，専用三脚と回転雲台を使用して行う．レーザー距離計をドーム中心部分に設置し，専用三脚の角度メモリを使用して，水平方向にレーザー距離計を回転しながらドームスクリーンとの距離を順次測定する．図 5.6 に墨出し作業風景と図 5.7 にレーザー距離計を専用三脚に設置した模式図を示す．

5.2.6 プロジェクタ設置

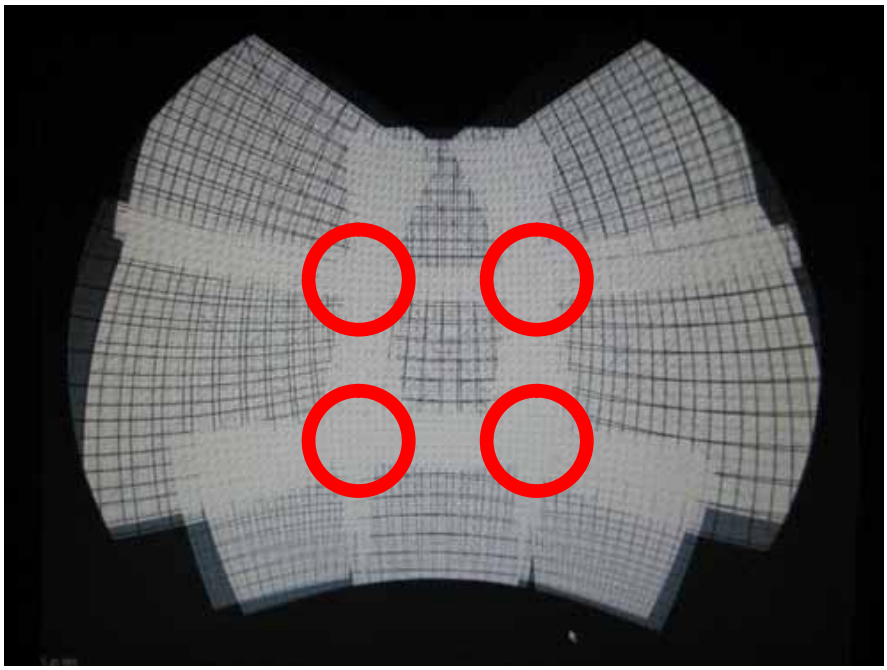
第六に，前述の配置設計に基づいて，プロジェクタを設置する．上段・中段には梁から吊り下げた吊りボックスを設け，位置・回転方向を 6 自由度で調節できる架台にプロジェクタを設置する．実際の設置精度は，配置設計と比較して，位置方向 5mm，回転方向 3 度程度の誤差を持つ．

5.2.7 PC 接続

第七に，PC を接続する．プロジェクタ 1 台につき，1 つの映像生成用 PC を割り当てるため，本試作では映像生成用 PC18 台を使用する．加えて映像同期・制御用 PC（以下，マスターPC）1 台，データベースサーバ PC，操作デバイス管理 PC など合計 28 台の PC クラスターを構成する．



(a) 投影シミュレータ入力画面.

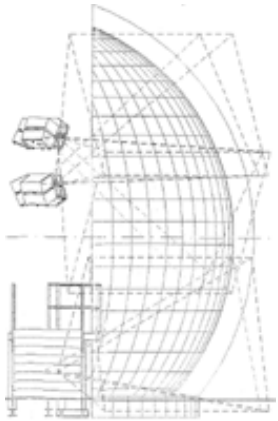


(b) 投影シミュレータ画面.

図 5.4　投影シミュレータ画面と入力画面.

(a)透視投影図.

(b)正面図.



(c)立面図.

図 5.5　大型ドームディスプレイの設計図.

(a)墨出し作業.

(b)床面上の墨.

図 5.6　墨出し作業風景.

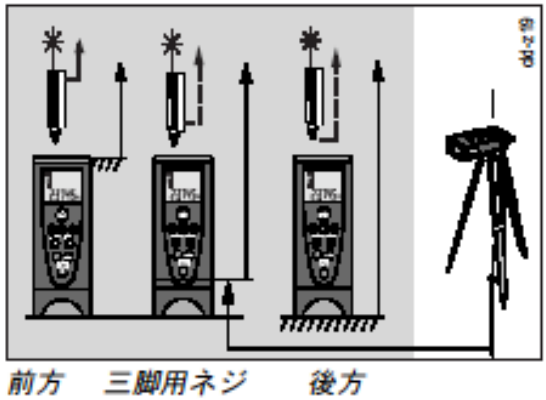


図 5.7　ドーム形状精度測定用のレーザー距離計と専用三脚との設置模式図.

5.2.8 プロジェクタ姿勢推定による微調整

第八に，プロジェクタ姿勢推定による微調整を行う．目標精度として目視で認識できない程度のスクリーン面上で 10mm 以下達成を目指す．回転方向 1 度の誤差がドームスクリーン上で 70mm の誤差に相当するため，プロジェクタ設置精度は回転方向 0.1 度以下が必要であり，投影映像を利用したプロジェクタの位置及び回転角度の推定が必須となる．推定には前述の投影シミュレータを用いる．

映像生成 PC 及びマスターPC の 19 台を用いて，映像歪み補正を付加したグリッド映像を表示し，レーザー墨出し器を用いてドーム中心より水平垂直に基準となるレーザーラインを重ねて表示する．投影シミュレータにおけるパラメータ変更によって，レーザーラインを基準に投影映像のずれを調整し，最終的なプロジェクタ配置情報を確定する．

図 5.8 に調整が完了したドームスクリーン上のグリッド映像を示す．スクリーンが大きいため，9 つの分割された領域ごとに写真撮影を行ったものである．調整は，以下の順番に進める．

（1） 中心部分（中央中段）の左右映像を，レーザーラインをガイドとしながら一致させる．レーザーラインとグリッド映像の水平垂直中心線が重なるように調整する．特に設置時にロール方向の回転がプロジェクタに微妙に加えられている場合があるため，確認と調整を行う．

（2） 次に，中段左右の水平方向の映像を調整する．レーザーラインの水平線をガイドとし，中心部分の映像と連続するように特に映像境界部分のグリッド間隔に着目して，ヘディング方向及びピッチ方向を調整する．

（3） 同様に，上段中央・下段中央の映像を，レーザーラインの垂直線をガイドとし調整する．

（4） 最後に，上段左右・下段左右の映像を調整する．ここにはレーザーによるガイドラインがないため，隣り合う左右上下の映像をガイドとして調整する．この部分の映像は，中心部分との映像境界部分も存在するため，すべての回転方向を 0.01 度単位で変更する微妙な位置調整を要する．

5.2.9 映像境界部分の輝度調整

第九に，映像境界部分の輝度調整を行う．映像が重なった境界部分はその分明るく輝くことになる．そこで後述する手法により，映像境界部分を特定し，その部分の輝度調整を行うことによって，映像境界部分と境界部分以外の映像領域の輝度を均一化する．

調整途中の映像境界部分の形状と輝度補正処理がより明確に認識できるように図 5.9 を示す．図 5.9(a) のように，境界部分は複雑な形状であり，これを図 5.9(b) のように重ね合わせて境界部分の輝度補正を行う．

以上の構築手順によって，大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの構築を完了した．球面対応歪み補正機能及び映像境界部分輝度補正機能によって，分割された各領域に複数のプロジェクタで映像投影しながら，ドームスクリーン全体に一つの連続したシームレスな立体映像表示を実現した．

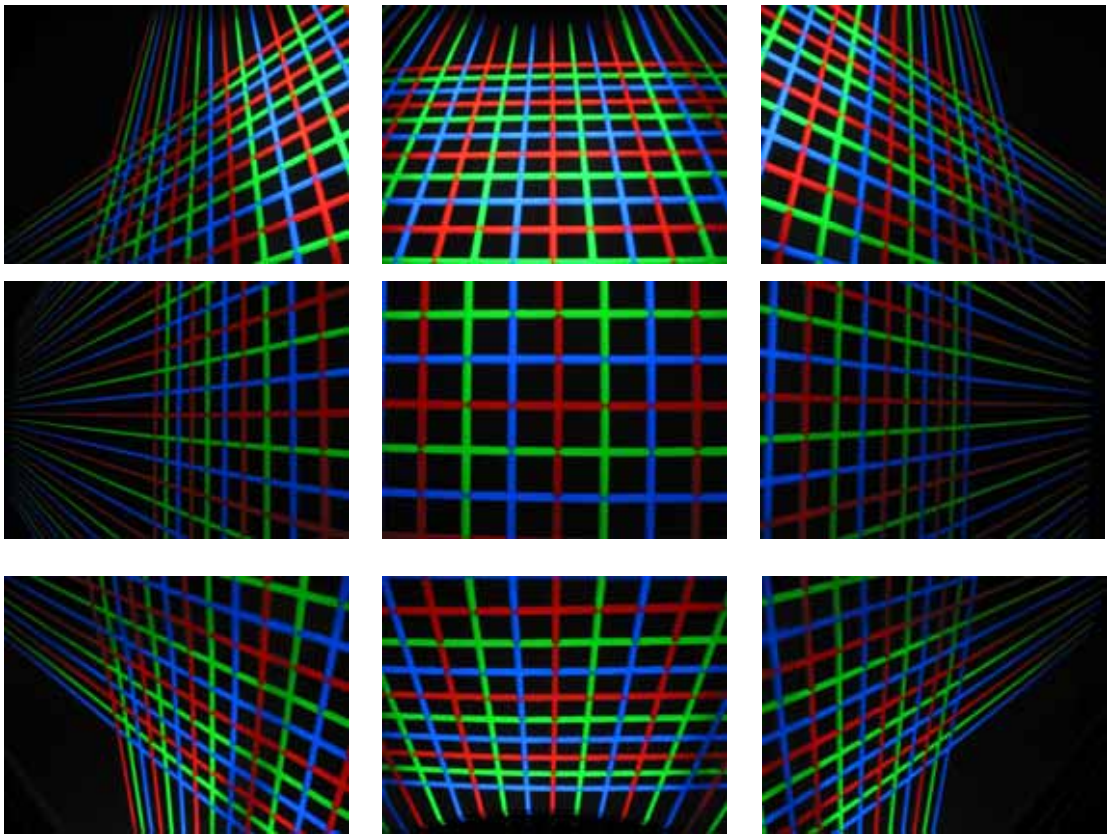


図 5.8　調整後のドームスクリーン上のグリッド映像.

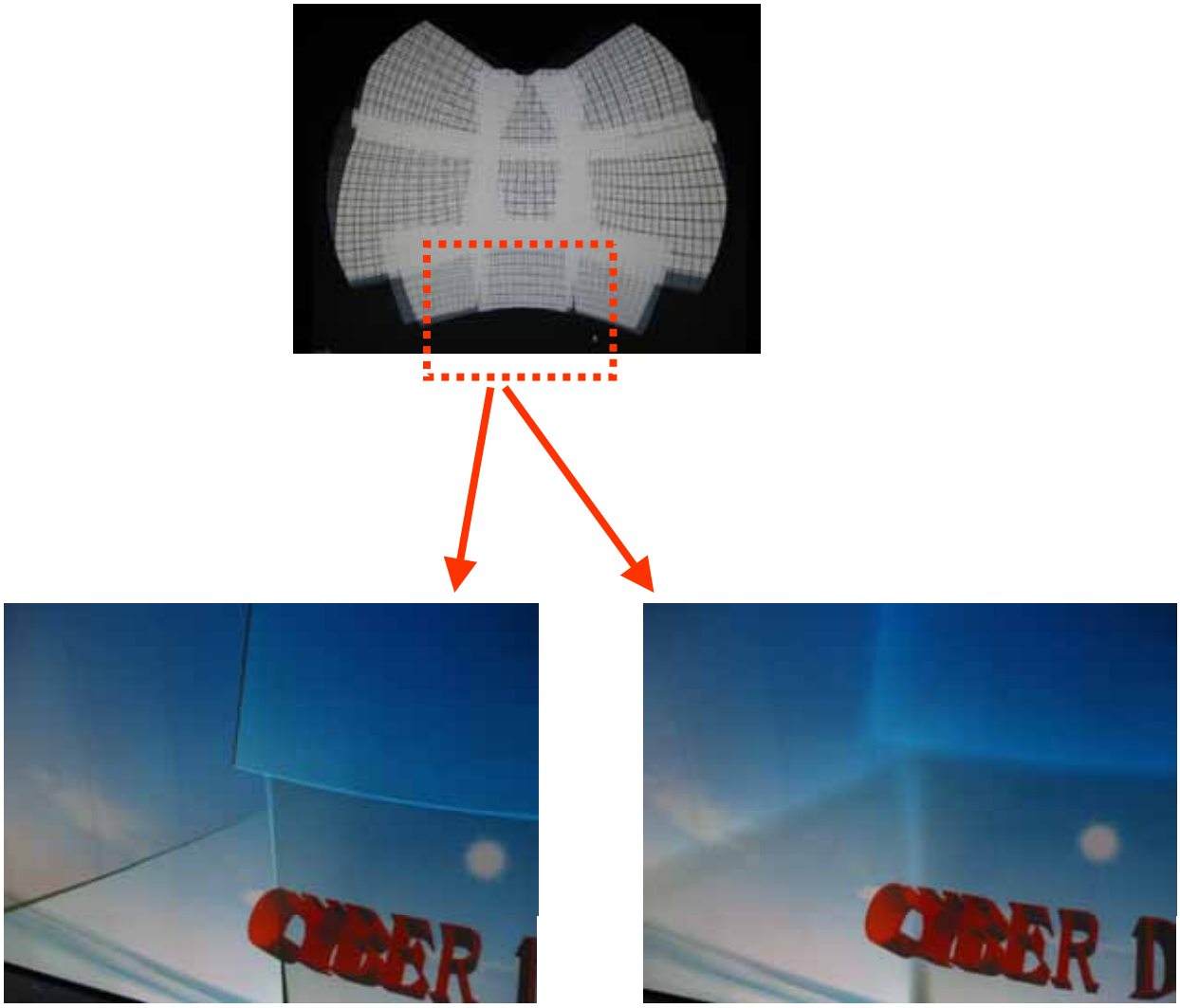


図 5.9　映像境界部分形状とその重ねあわせ映像.

5.3　映像境界部分の特定と映像輝度補正手法の開発

マルチプロジェクションによる大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイにおいて，シームレスな立体映像表示を実現するためには，球面に対する映像歪み補正技術，映像境界部分の特定と輝度補正技術，及びすべての映像が同期した映像生成技術が要求され，本研究において，これらすべてをソフトウェアによって実現した．

映像境界部分の特定と輝度補正技術は，本開発の中心となるものである．スクリーン上に映像の表示されない隙間部分が生じないように映像を重ね合わせるため，図 5.10 のように，映像が重なった部分は光量が増え明るく輝くことになる．しかも境界部分は矩形とならず，複雑な曲面形状となることから，境界部分を正確に特定し，輝度補正を行う手法を提案する．

5.3.1 映像境界部分の特定手法

まず，対象となるプロジェクタを選び，その投影フラスタムとドームスクリーンとの交差面を求める．ここで投影位置に視点位置を一致させることで投影フラスタムとビューフラスタムを重ねると，視点位置から見た交差面の形状は，図 5.11 に示すように，スクリーン形状に関係なく矩形形状となることに着目する．ビューフラスタムを定義して，映像描画処理（以降，レンダリング処理）を行い，交差面をフレームバッファに蓄積する．

次に，対象プロジェクタと境界部分を共有する周囲プロジェクタを選び，このプロジェクタの投影フラスタムとドームスクリーンとの交差面を上記の視点位置のままでレンダリング処理し，結果をフレームバッファに蓄積する．二つのレンダリング処理の際に，同一アドレス部分を取り出し，対象プロジェクタによる投影映像の映像境界部分として設定する．周囲プロジェクタが複数ある場合は，順に同一の処理を行い，対象プロジェクタのすべての境界部分を特定する．図 5.12 に処理手順の模式図を示す．この際に，三重以上の複数に交差する境界部分も求めることができる．この処理を，対象プロジェクタを順に変更して実施し，すべてのプロジェクタによる投影映像の映像境界部分をそれぞれ特定する．

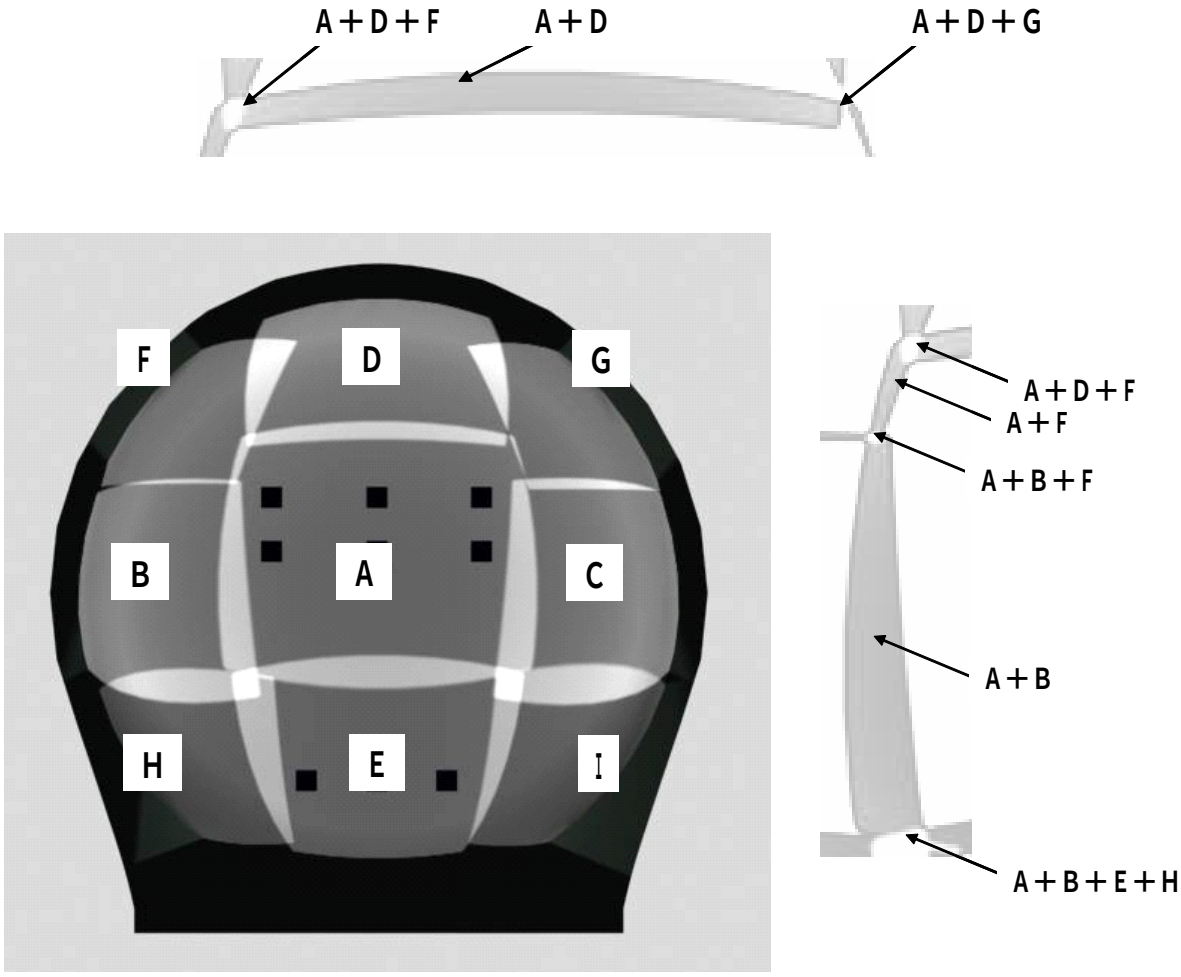
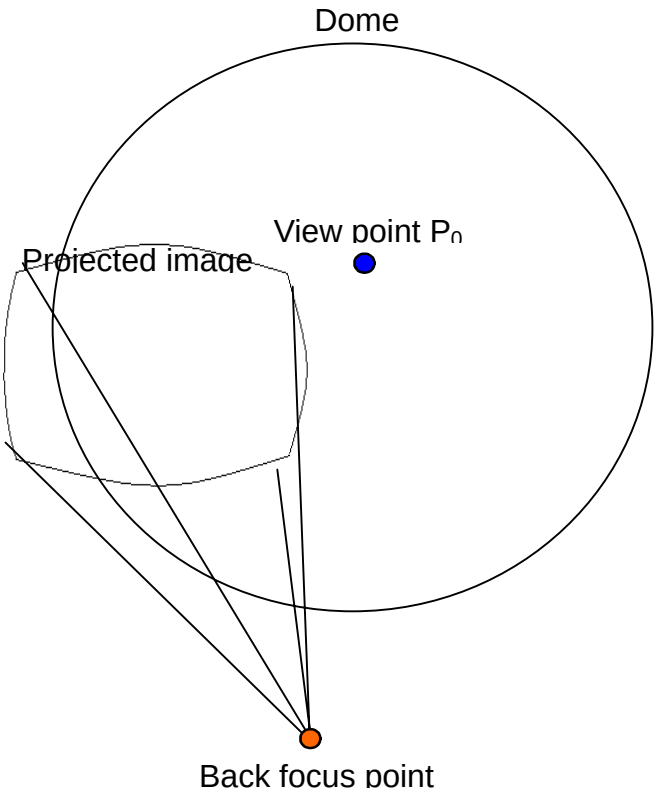
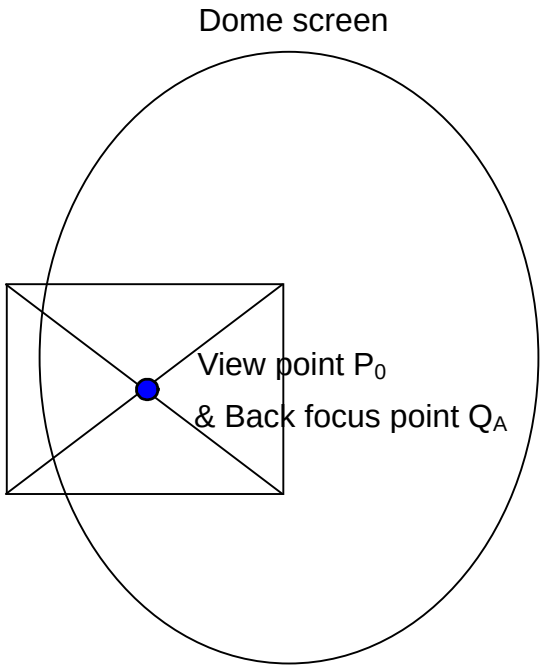


図 5.10　複雑に重なり合った映像境界部分.

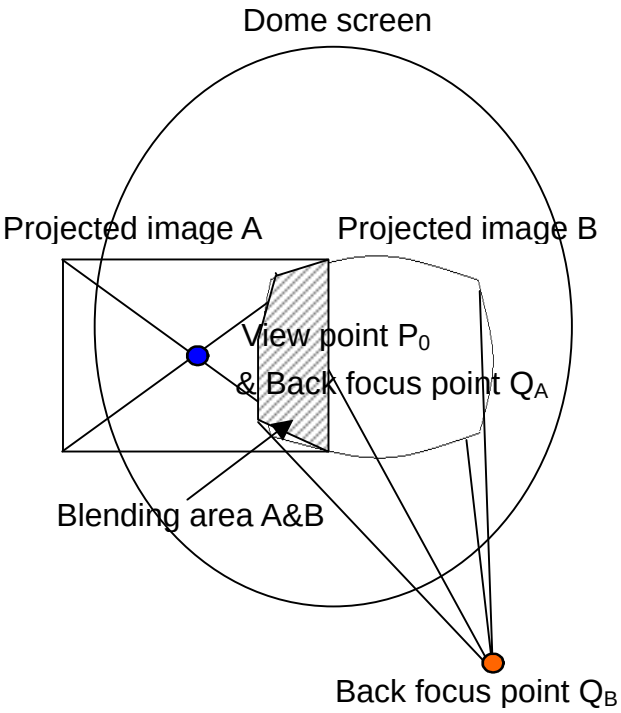


(a) ドームスクリーンへの投影映像の歪み.

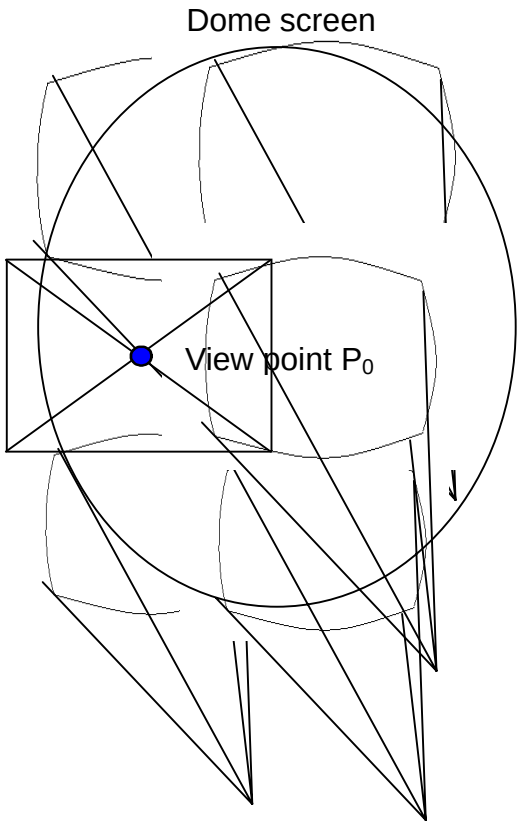


(b)投影位置に視点位置を重ねると歪みのない矩形.

図 5.11　投影位置と視点位置の位置関係による投影映像の形状.



(a)描画処理によって映像境界部分を特定.



(b)境界部分を共有するすべてのプロジェクタとの特定処理.

図 5.12　映像境界部分の特定手法.

5.3.2 映像境界部分の輝度補正手法

特定された境界部分の輝度を低下させる．映像境界部分の開始点から終了点に向かって傾斜をつけて低下させた輝度補正を行う．図 5.13 に輝度傾斜を示す．三重以上の複数映像境界部分では，図 5.14 に示すように，二重の映像境界部分の傾斜を利用して点線から実線の輝度傾斜を生成する．

輝度補正結果に基づいて輝度補正フィルタを生成するが，前述の投影シミュレータに，ドームスクリーン形状データ，モデル化したプロジェクタ投影映像パラメータを入力すると，図 5.15(a)に示す輝度フィルタを生成する．

最後に，得られた輝度補正フィルタを映像生成の際に重畳することで，輝度補正を実現する．輝度フィルタ及び重畳した映像を図 5.15(b)に示す．図 5.16 に映像境界部分特定手法及び輝度補正手法のフローを示す．

5.3.3 映像同期表示手法

すべての映像が同期した映像表示技術は，前章で述べたように複数の PC による映像表示のタイミングをネットワークを通じて同期させるものである．本開発では，小型ドームで実現した同期手法を拡張し，映像表示のタイミングを 19 台の PC で毎秒 30 回の頻度で同期させることに成功した．19 台の PC とは，プロジェクタ 18 台に対応した映像生成用の PC18 台に加えて，映像同期管理用マスターPC を意味する．図 4.13 の シーケンス図の手法では，PC 台数の上限数はネットワークの制限と同等となり，同一セグメント内の 250 台程度である考えられる．ただし，ネットワーク内にコリジョン等の障害が発生すると，同期表示が困難になるため，ルーター設定によりネットワーク外部からのパケットの侵入を排除する．すべての PC から描画準備終了通知を受けると，マスターPC はブロードキャストによって，描画用 PC に対して一斉にスワップバッファ命令を送信する．

5.4 大型ドームディスプレイの構築

構築手法に基づいて，汎用の PC 及びプロジェクタを使用した大型ドームディスプレイを構築する．大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイは，基本構成としてドームスクリーン・複数プロジェクタ・映像生成用複数 PC よりなり，必要に応じて映像操作デバイス・体験者の観覧台などを追加する．図 5.17 に基本システム構成を，図 5.18 にシステム体験の模式図を示す．また，スクリーン素材としては付録 B に示すシルバースクリーンを用いる．

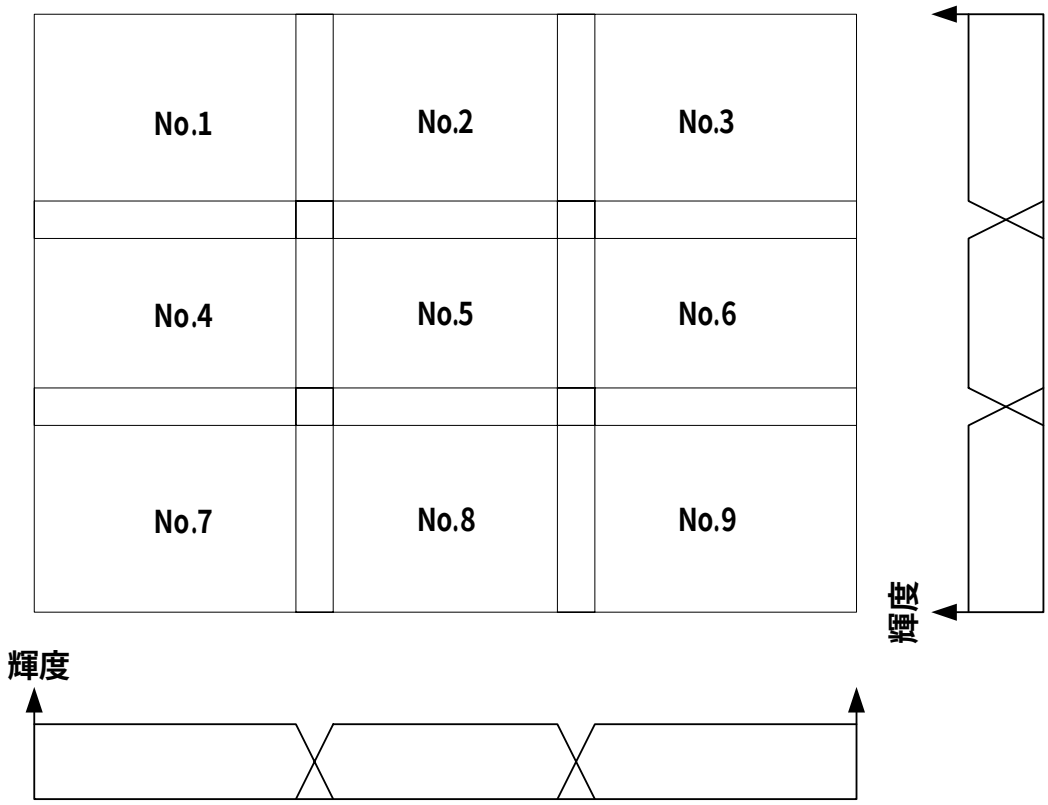


図 5.13　各映像境界部分の輝度傾斜.

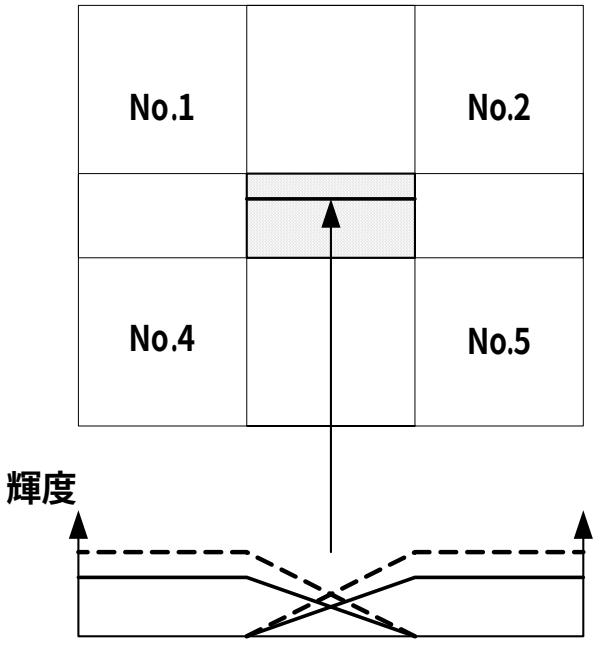
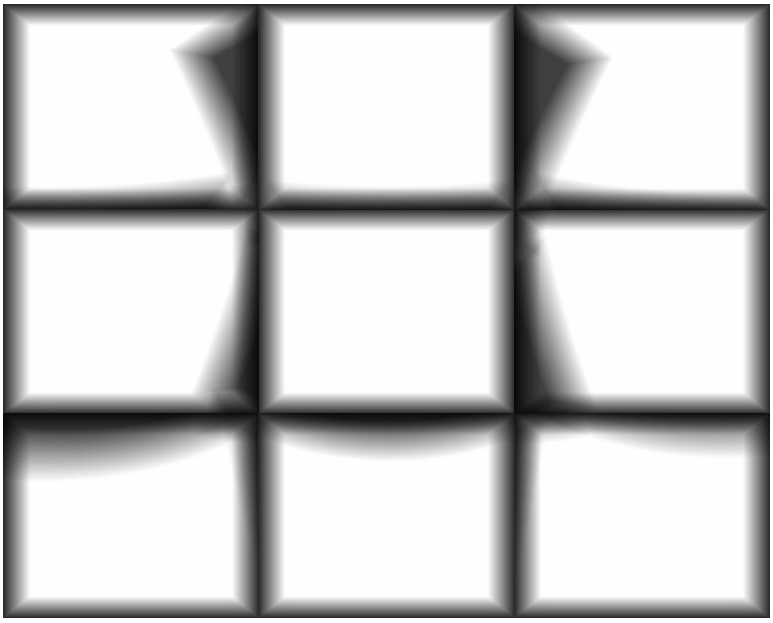
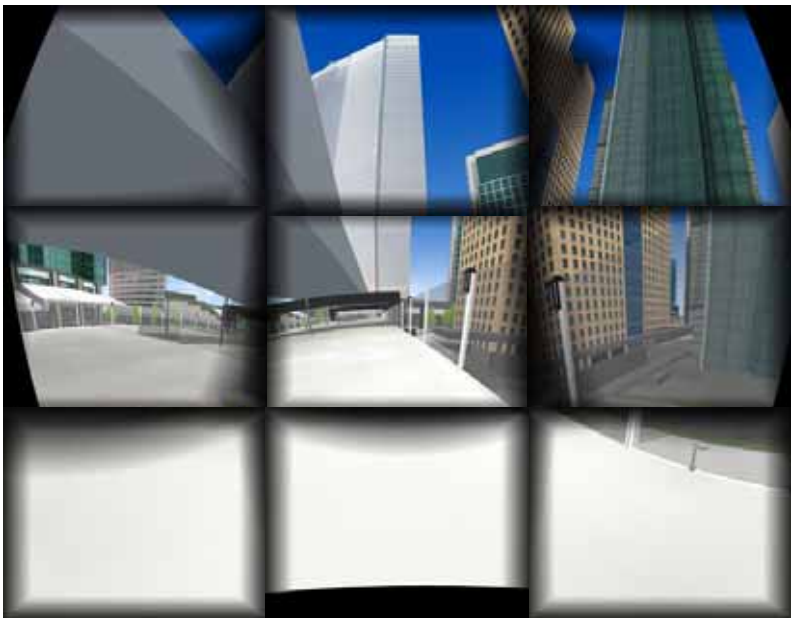


図 5.14　多重映像境界部分の輝度傾斜.



(a) 輝度補正フィルタ.



(b)都市空間設計データ重畳.

図 5.15　輝度補正フィルタと都市空間設計データ重畳.

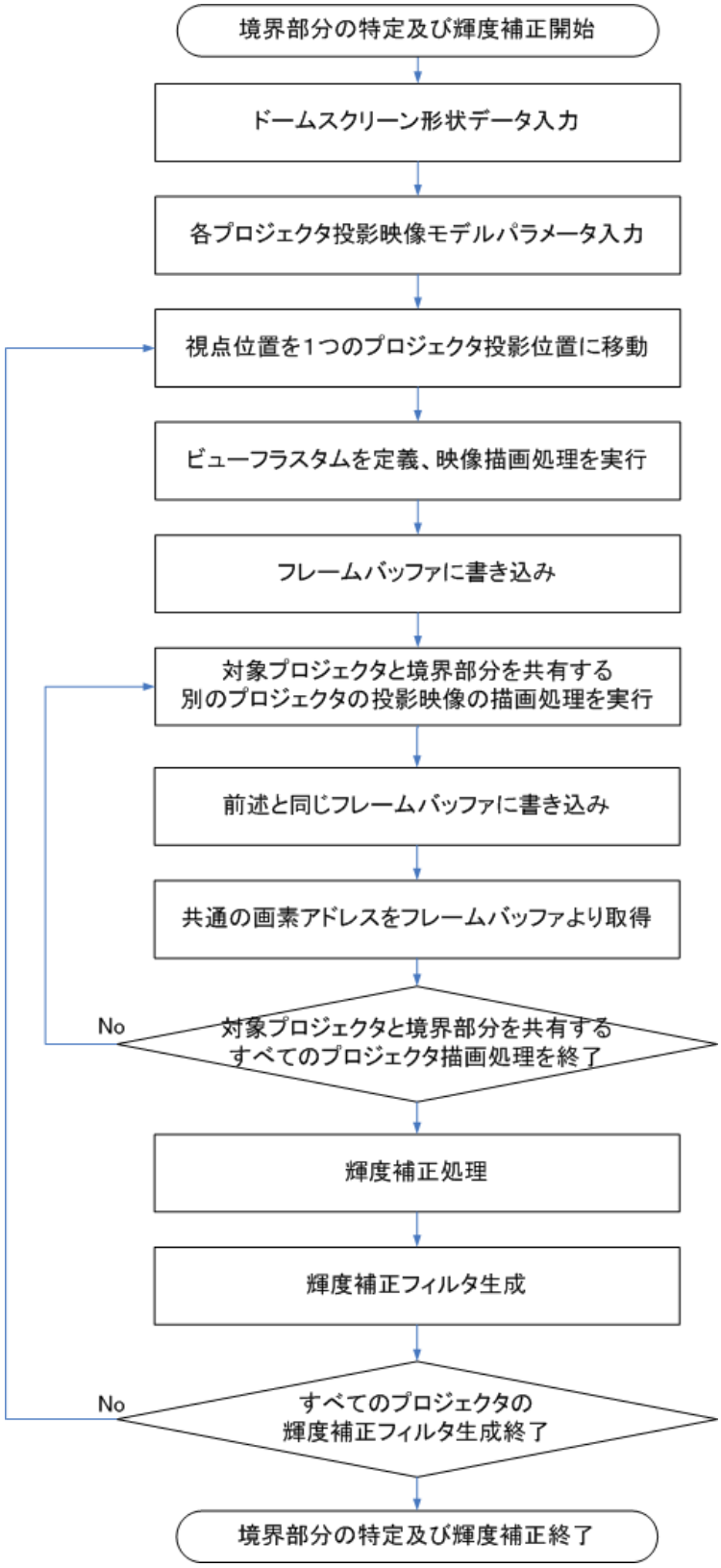


図 5.16　映像境界部分特定手法及び輝度補正手法.

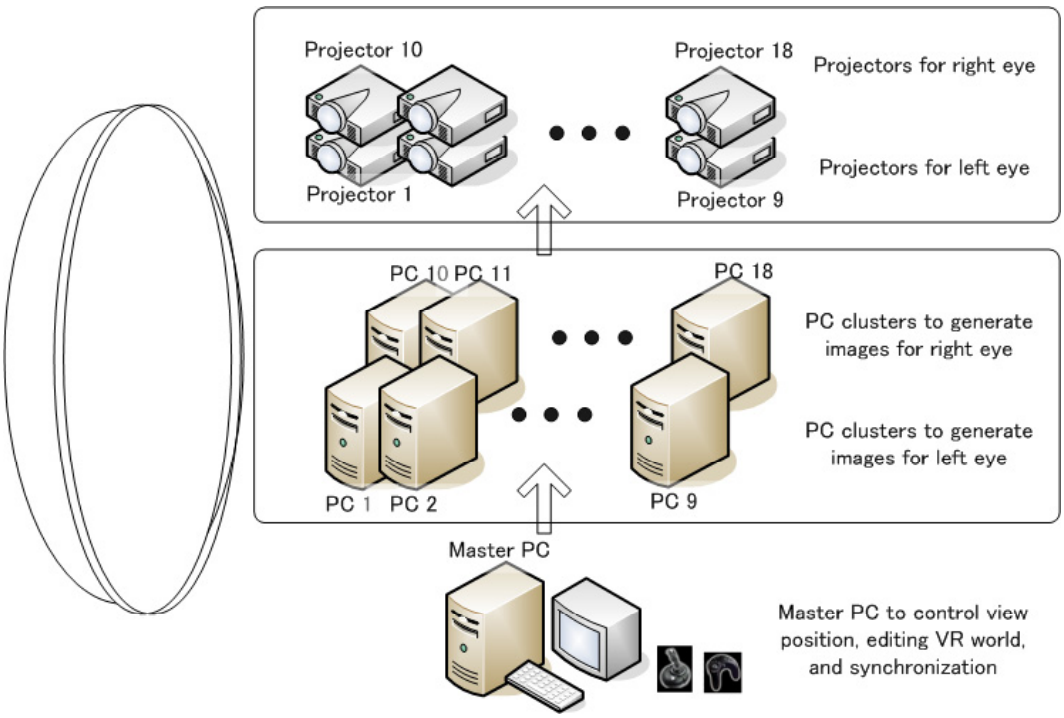


図 5.17　基本システム構成.

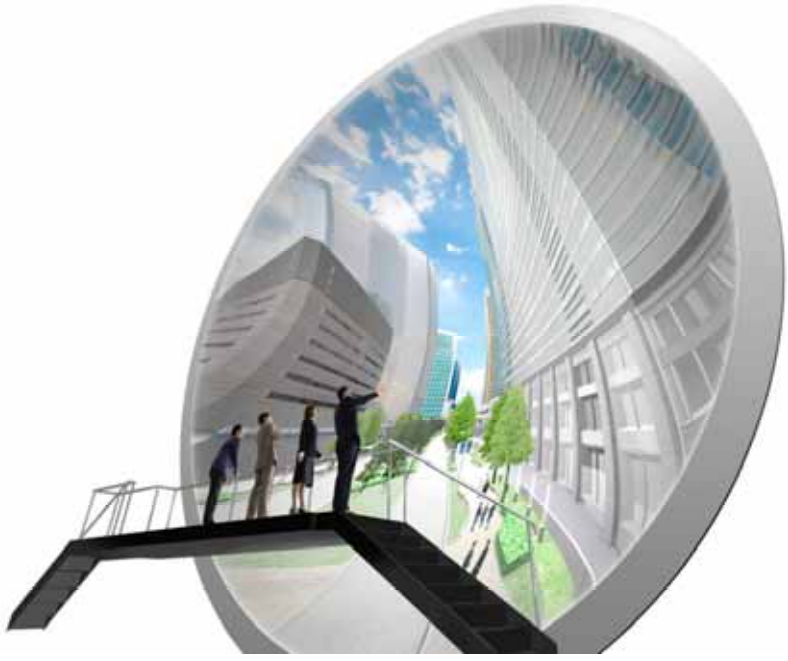


図 5.18　システム体験模式図.

5.5　構築手法と大型ドームディスプレイの評価

本構築手法の評価として，視野範囲・実現性・精度・実用性・拡張性の観点から考察する．

5.5.1 視野範囲

視野範囲は，最大でおよそ水平方向 180 度，垂直方向 150 度を実現した．およそ 30 人が水平視野角 120 度以上・垂直視野角 90 度以上の広視野立体映像を同時に見ることを実現した．

5.5.2 実現性

類似の映像システムとしては，単体フィルム投影機を使用するアミューズメント施設や高価で輝度の低い CRT プロジェクタを複数使用したもの，もしくは映像信号を加工する特殊なハードウェアを組み込んだものが一部存在する．しかし，マルチプロジェクションによって，繋ぎ目のないシームレスな映像表示を実現するには，プロジェクタの映像投影及び設置，スクリーン設置などに高い精度が要求され，非平面スクリーンに立体映像を投影するディスプレイの報告はない．

本研究の成果として，実際に 18 台のプロジェクタとドームスクリーンによる立体映像表示ディスプレイを構築したことで，実現性を立証した．

5.5.3 映像精度

映像の精度については，理想的な映像位置と実際の投影映像位置とを測定し比較した．レーザー墨出し器を用いて，ドーム中心を通る水平・垂直線をレーザーで表示し，グリッド映像の対応する線とのずれを測定した．中央の映像においては，差を認識できず，中央を囲む上下左右の映像においても，ほとんどの部分では差を認識できないが，周辺部分において，80mm 程度の差を確認した．水平垂直線以外では，誤差の測定方法を確立していない．これは，ドームスクリーン上の任意な箇所の正確な位置を取得することが著しく困難なためである．

そこで，左目用右目用の視差のない映像を表示し，その一致の度合いを測定した．視差を零とした映像を表示し，9 つの領域をそれぞれ撮影した写真を図 5.19 に示す．図 5.20 には中段右と下段右の写真を拡大して示す．本システムでは，ドームスクリーン上の 1 画素は，画素密度からおよそ 3.0mm となる．グリッド映像は 6 画素で表示されているため，誤差は最大でグリッド 4 本分，すなわち 72mm のずれとして表示される．中段の左右映像及び下段の右映像において，特に水平方向の周辺部分に誤差を確認するが，その他の領域では大きな映像の不一致は見られないことが確認できる．十分な精度を持つ映像歪み補正技術は確立されたと考える．

尚，周辺部分における映像の不一致には，以下の要因が考えられる．

（1） ドームスクリーン形状の精度：0.1～0.3%以下，本試作ドームスクリーン開口サイ

ズ 8.25m で映像上の誤差換算 25mm 以下

（２） プロジェクタ映像投影の精度：映像水平投影角 0.2%以下，本試作で使用するプロジェクタにおいて 49 度の角度で 0.1 度以下，映像上の誤差換算 7mm 以下

（３） プロジェクタ設置精度：位置 5mm 以下，回転 3 度以下，ただしこれについては投影シミュレータを用いて姿勢推定による微調整を行い改善

5.5.4 輝度補正

映像境界部分特定による輝度補正効果については，図 5.21 に比較して示す．特に中央の描画エリアと左側描画エリアの映像境界部分を拡大して示す．図 5.21(a)は，輝度補正効果なしの単純に境界部分を重ね合わせた場合におけるドームスクリーン上の映像である．図 5.21(b)は，輝度補正効果ありの場合におけるドームスクリーン上の映像である．境界部分と境界部分以外の映像輝度差は，ミノルタ社製色彩輝度計 CS100 を用いた測定で 5%以下程度であり，ほとんどの映像では繋ぎ目を認識できないという点から，輝度補正効果は非常に有効であることが確認された．

ただし，スクリーン面の素材がアルミナを中心としたシルバースクリーン仕様であるため，プロジェクタの映像入射角度のわずかな違いが輝度の違いとなって大きく表れ，今後輝度補正効果の精度を高めるためには，スクリーン素材仕様に対する検討が必要であることが判明した．

5.5.5 実用性

実用性については，複数の設計関係者（施主・設計者・施工業者・設備業者等）が本試作のディスプレイを用いて，すでに次々と都市空間設計や住空間設計を進めていることから実証されたと言える[75]．図 5.22，図 5.23 に設計データの表示例，及び映像境界部分の連続性を示す．本試作で採用した液晶方式のプロジェクタでは，立体映像を表示するのに左右両目用に別々の映像投影が必要になるが，一方では偏光メガネの映像透過効率が高く減色が抑えられ色再現性の高い表示を実現した．

5.5.6 拡張性

拡張性については，球面に対する映像歪み補正技術，映像境界部分の特定と輝度補正技術には，ドームスクリーンサイズやプロジェクタ総数の制限がなく，映像が同期した映像生成技術についても 50 台程度の PC では問題ないと予想される．また，投影シミュレータ上で，50 台のプロジェクタ及び PC を使用した直径 13.3m の全球ドームスクリーンを設計し，実現可能との結論に至っている．図 5.24 に全球ドームディスプレイの設計を示す．従って，本構築手法は，小型から大型までスクリーンサイズに制限のないスケーラブルドームディスプレイ構築が可能であり，拡張性に優れると言える．

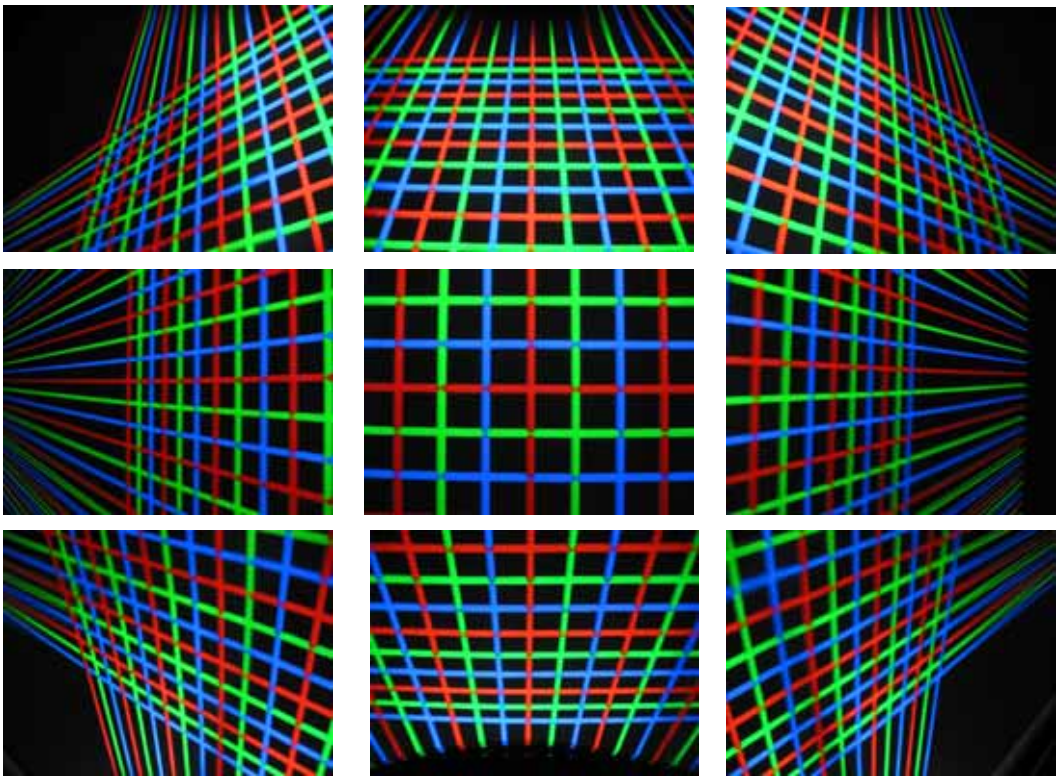
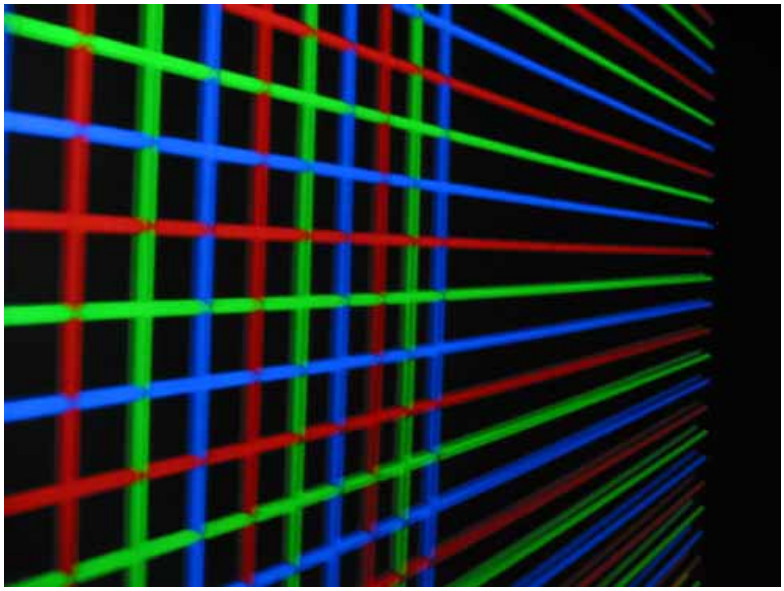
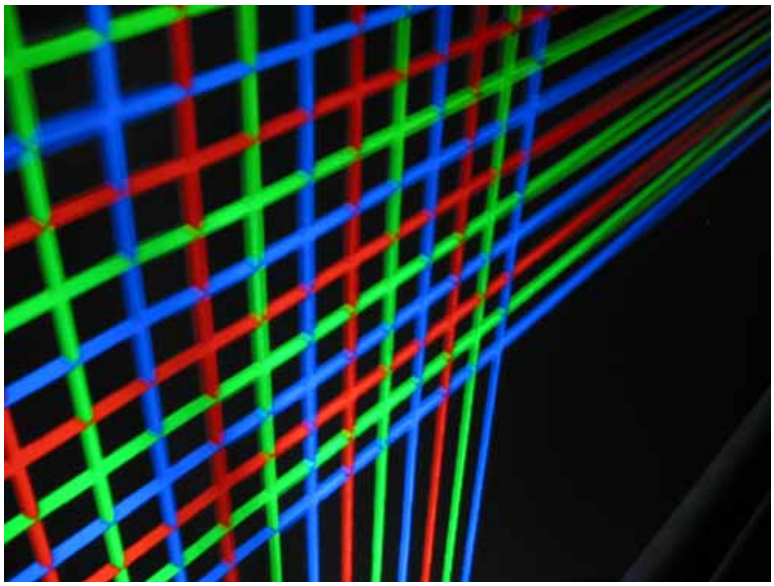


図 5.19　視差を零とした両目映像の一致性評価.

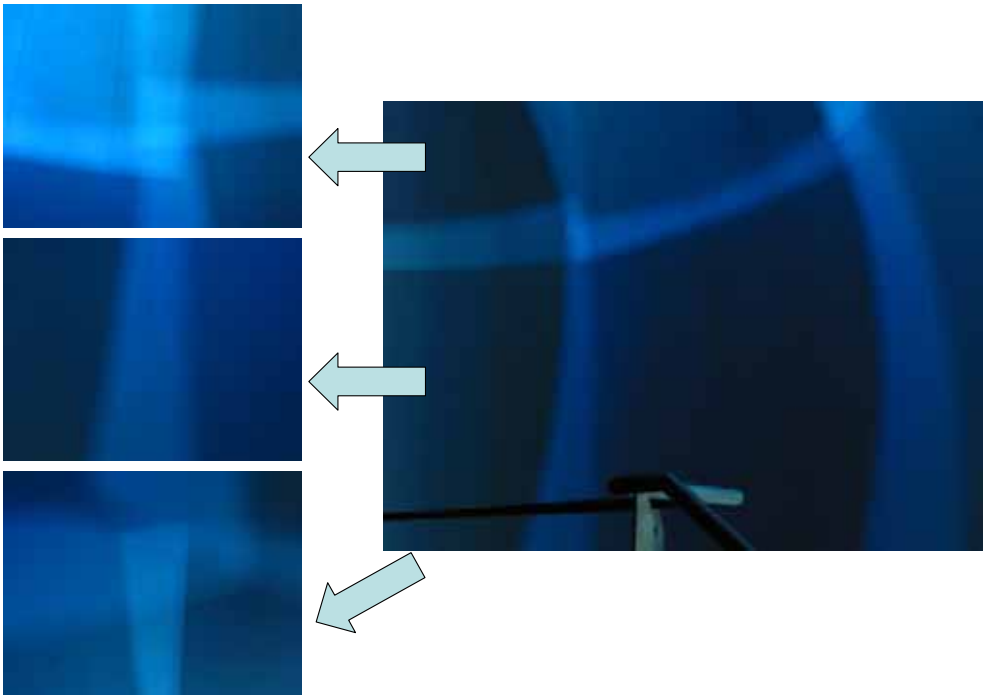


(a)中段右映像の拡大



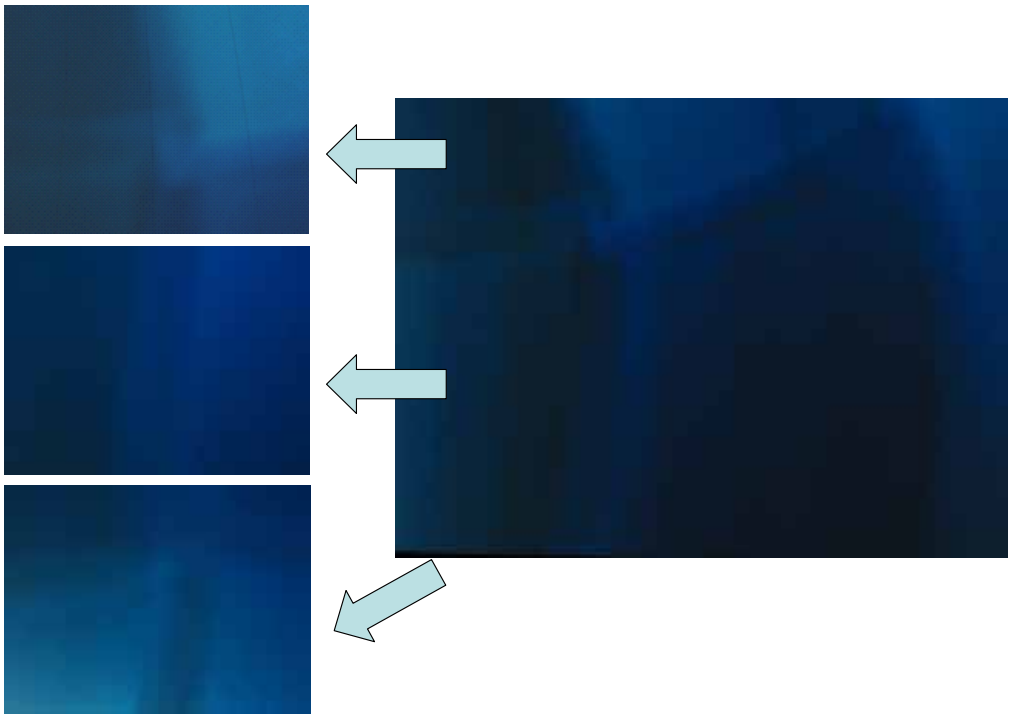
(b)下段右映像の拡大

図 5.20　中段右及び下段右の視差を零とした両目映像の拡大表示.



(a)輝度補正効果なしのドームスクリーン上の映像,

中央描画エリアと左側描画エリアを拡大表示.



(b) 輝度補正効果ありのドームスクリーン上の映像.

中央描画エリアと左側描画エリアを拡大表示.

図 5.21　輝度補正効果.

図 5.22　ドームスクリーン上の都市空間設計表示例.

図 5.23　実用データによる映像境界部分の連続性評価.

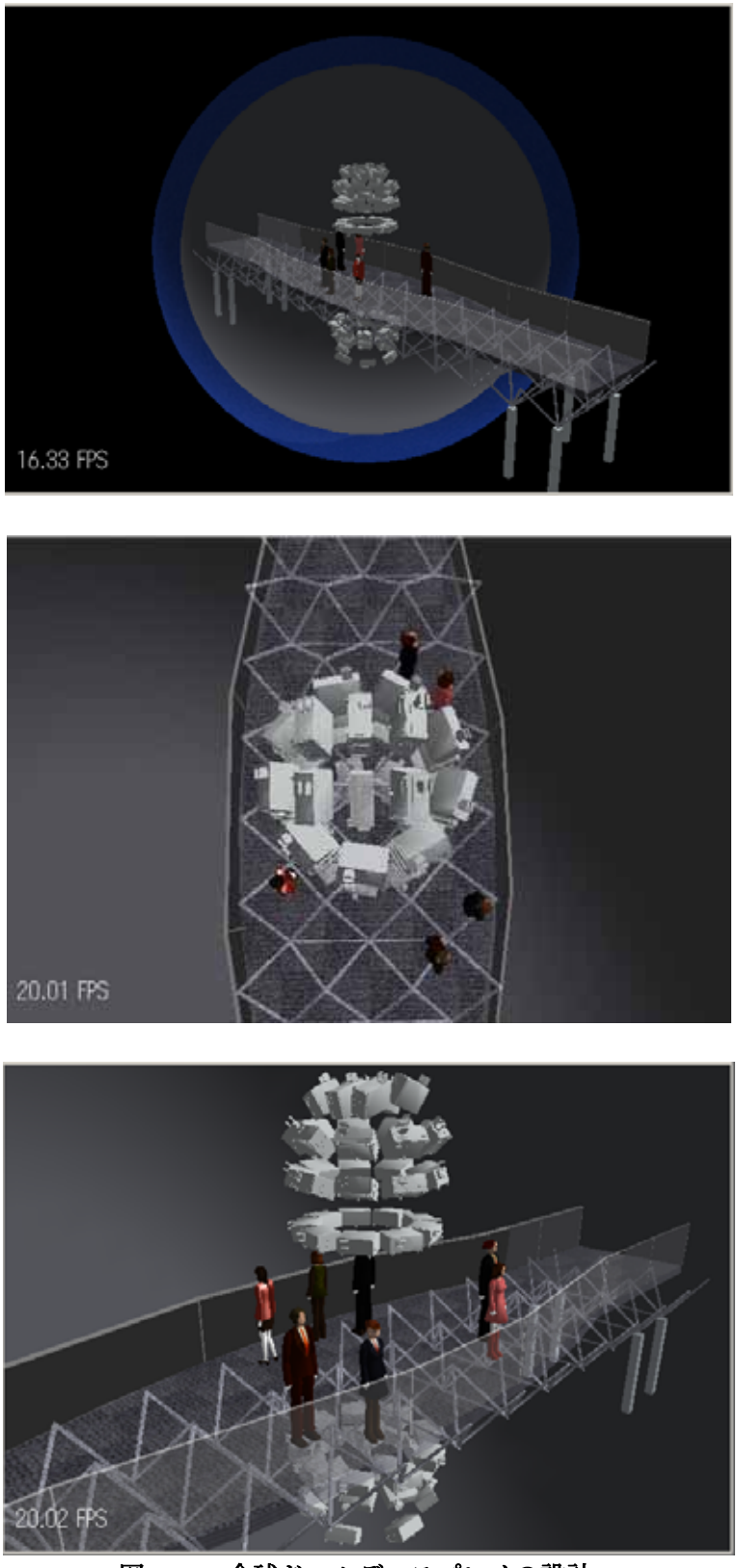


図 5.24　全球ドームディスプレイの設計.

5.6 おわりに

本章では，第 4 章で実現した小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイでは困難である多人数が同時に広視野立体映像を見ることによって空間共有体験を実現するという課題に取り組んだ．人数に応じてドームスクリーンサイズを拡大し，表示映像の画素密度や明るさが低下しないように複数のプロジェクタを用いた構成にするといった点は，第 3 章で実現した初期のドーム形状没入型視覚ディスプレイの設計概念と共通する．しかし，小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの開発において，高価なグラフィックススーパーコンピュータの代わりに低コストな PC を使用することを可能にし，明るい映像品質の液晶方式プロジェクタを CRT 方式プロジェクタの代わりに使用することを可能にしているため，この構成を引き継ぎながら，必要なほとんどすべての機能をソフトウェアで実現した大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの開発に取り組んだ．

小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイの開発において改良された映像歪み補正機能は，ドームスクリーン，プロジェクタ，及び体験者位置の 3 次元的な位置関係などのパラメータを入力することで，体験者に精度の高い等身大立体映像を提示することを可能にする．この映像歪み補正機能は，複数のプロジェクタを使用するマルチプロジェクションであっても，ドームスクリーンと各プロジェクタの位置関係をパラメータとして正確に入力すれば，各描画エリアで投影映像の歪みを補正する．

しかしながら，小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイでは存在しなかった各映像の境界領域を処理するという課題を克服する必要があった．第 3 章では，CRT 方式プロジェクタの持つ境界領域整形機能を使用した．映像境界領域を矩形に整形することができれば，重なり合った映像領域の特定と輝度補正は容易である．映像ブレンディング処理は，単純に指定された縦横方向の画素数に基づいた矩形領域を輝度補正することになるからである．これに対して液晶方式では，定められた矩形状の液晶パネルをバックライトと呼ばれる光源からの光を透過させることによって映像を表示するため，プロジェクタ側で境界領域を自由に整形することは困難である．従って，ドームスクリーンに対して，様々な位置から矩形映像を投影すると，重なり合った各映像の境界部分の形状は，複雑な曲面形状となり，単純な縦横方向の画素数で表現することは困難である．

本研究では，重なり合った映像境界部分を正確に特定する手法として，映像生成のレンダリング処理を応用し，映像表示メモリであるフレームバッファの各画素を映像境界部分の重なり判定に使用する手法を考案し，実際に重なり合った映像境界を特定するソフトウェアを構築した．ここで，最も重要な考え方は，レンダリング処理における仮想視点位置の設定をプロジェクタの投影位置に移動するということである．プロジェクタからの映像が矩形である場合，プロジェクタの投影位置から見た投影映像の形状は，スクリーン形状に関係なく矩形になるからである．重なり合った境界部分を正確に特定し，その部分に対して輝度補正を行うことで，マルチプロジェクタを用いながら，ドームスクリーン全体に継ぎ目のないシームレスな映像表示を実現した．

本研究では，小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイで実現した 3 台の PC のネットワーク通信による映像同期を拡張して，プロジェクタ 18 台に対応した映像生成用のスレーブ PC18 台に加えて，映像同期管理用マスターPC1 台の合計 19 台の PC において，毎秒 30 回

の頻度で同期させることに成功した．付録 A に第 3 章及び第 4 章で構築したドームディスプレイと比較して仕様を示す．

本研究の評価として，実現性・映像精度・実用性・拡張性の観点から考察を行った．実際に構築したこと，すでに多く都市設計提案に使用していることから，高い実用性が確認されたと考えられる．映像精度に関しては，中心部では表示誤差を認識できず，わずかに周辺部で最大 1%程度の表示誤差が測定されたことから，やはり高い実用性が確認されたと考えられる．拡張性については，球面に対する映像歪み補正技術，映像境界部分の特定と輝度補正技術にはドームスクリーンサイズやプロジェクタ総数の制限がなく，50 台のプロジェクタ及び PC を使用した全球ドームスクリーンであっても実現可能との結論に至っている．本構築手法は，小型から大型までスクリーンサイズに制限のないスケーラブルドームディスプレイを構築可能であり，拡張性に優れると考えられる．

本章では，マルチプロジェクタに対応したドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法を示し，その有効性を検証した．

第 6 章　結論

本研究では，視覚特性に適合した映像表示ディスプレイとして，ドーム形状没入型視覚ディスプレイを提案し，コストを重視した構成や多数の体験者に同時に映像提示する構成などの実用システムの構築を通じて，その実現における課題を克服する手法を開発し，様々なスケールに対応したドーム形状没入型視覚ディスプレイの構築手法を示した．

以下，本論文の各章で得られた結論を整理する．

第 2 章では，まず人間の視覚特性について，生理学的知見から視野の特徴を示し，誘導視野と呼ばれる水平方向 100 度，垂直方向 85 度以上に映像提示を行うと，その映像に没入した感覚を得られるとの既往の研究報告を示した．国際的には，広視野で没入感の高い映像を提示する没入型ディスプレイは IPD もしくは IPT として位置づけられ，映像に高い没入感を得るためには，大画面で体験者の周囲を取り囲み，広視野に高精細な映像提示が必要であると認知されていることを示した．

没入型ディスプレイを，大きく複合平面形状ディスプレイと曲面形状没入型ディスプレイに分類し，曲面形状没入型ディスプレイは，スクリーン形状に対応した映像の歪み補正が必要である反面，スクリーン間の接合部分や折れ曲がりがないという長所をもつことを示した．特に水平方向だけではなく垂直方向にも曲率を持つドーム形状没入型視覚ディスプレイは，形状として人間の視野範囲に適合し，視野を覆うためには最適であると考え，ドーム形状没入型視覚ディスプレイ試作への取り組みを示した．

第 3 章では，ドーム形状没入型視覚ディスプレイの試作として，複数人が同時に歪みのない広視野立体映像を見ることで空間共有体験を実現することを目指して設計を進め，主にドームスクリーン，6 台のプロジェクタ，映像生成用グラフィックススーパーコンピュータ，赤外線エミッタ，液晶シャッタ眼鏡で構成したことを示した．

開発の核心部分であるドームスクリーン形状に対応した映像歪み補正機能を持つソフトウェアを開発し，ドームスクリーンの大きさ及びプロジェクタとドームスクリーンとの距離関係をパラメータとして定義することで，ドームスクリーンサイズやプロジェクタ設置距離を設計に合わせて変更可能な映像生成技術を実現した．ただし，複数のプロジェクタを使用することによって生じる映像境界部分の融合や繋ぎ合わせに対しては，ソフトウェアで実現することができず，CRT 方式プロジェクタの持つ特性と映像ブレンディング処理を行う特殊な機器を使用することで，映像境界部分が連続した映像全体として一つのシームレスな映像表示を実現したことを示した．

映像から得られる高い没入感覚や等身大スケール表示機能について，特に建築設計者から高い評価を受け，実際の設計に応用されて，淡路島花博会場設計・道頓堀河川改修設計などが実現されたことから，有効性を検証した．

一方，試作によって明確になった課題を抽出した．実用システム構築の観点から，膨大な構築コスト・巨大な設置スペース・暗い表示映像・映像歪み補正ソフトウェアの適用制限という 4 つの課題克服が必須であることを示した．

第 4 章では，第 3 章で試作したドームディスプレイの長所を活かしながら，実用システムを実現する上で明確になった，コスト低減・汎用的な設置スペース・映像品質向上という課題を克服した一般的ドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法を示した．すなわち，

ソフトウェアによる映像歪み補正機能を開発し，プロジェクタ投影映像，スクリーン形状，及びそれらと体験者視点位置との位置関係をパラメータで表現し，これらのパラメータによって映像歪み補正を制御することによって，汎用的なプロジェクタや PC を用いながら，視野を覆うドームスクリーンに歪みのないシームレスな映像を表示するドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法を示した．さらに，ドームスクリーン投影による映像歪み補正とプロジェクタ位置変更による映像位置補正機能を包含した投影シミュレータを開発し，ドームスクリーン上に表示される映像の位置及び形状を正確にリアルタイムにシミュレーションすることで，設計及び設置調整を高い精度で実施することを可能にした．コスト面からは，映像生成をグラフィックススーパーコンピュータから PC へ置き換え，映像投影を CRT 方式プロジェクタから液晶方式プロジェクタへ置き換える設計を行い，汎用的な設置スペースという面からは，ドームスクリーンサイズを小型化し，通常のオフィスにも設置できる程度の設計を行った．

以下に確立した一般的な構築手順を示す．まず，第一に，プロジェクタの特徴を投影映像という点からパラメータとして表現し，第二に，CAD によってドームスクリーン形状を作成し，投影シミュレータの入力データを生成しながら，システムの全体サイズ設計を行う．第三に，体験者への最適な映像提示を最優先とする設計概念に基づいてプロジェクタの配置設計を行う．第四に，投影シミュレータを用いた詳細なプロジェクタ配置設計を行う．入力はドームスクリーン形状データ，モデル化したプロジェクタ投影映像パラメータ，プロジェクタ設置位置，平面鏡の位置及び回転軸パラメータ，そして体験者視点位置データである．第五に，形状精度の高いドームスクリーンを構築し，第六にプロジェクタ配置，第七に PC クラスターを構成する．第八に，ドームスクリーン上の表示映像と，投影シミュレータのパラメータ調整により，プロジェクタ姿勢を推定し微調整を行う．調整には，レーザー墨出し器を用いて基準となるガイドラインを表示し，投影シミュレータ上のプロジェクタ設置パラメータを変更することでグリッド映像とのずれを調整する．レーザとグリッドのずれがなくなり，さらに別々のプロジェクタから投影される左右両目用のグリッド映像を視差ゼロにして映像がほぼ完全に重なっていることを確認して，構築は終了する．

本構築手法の評価として，直径 1.8m の小型ドームスクリーン・2 台のプロジェクタ・3 台の PC という構成の小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイを構築し，映像精度と実用性の観点からの考察を示した．映像精度に関しては，2 種類の評価用データを作成し，実物とドームスクリーン上の表示映像の写真撮影から実スケール表示の精度を評価し，1%以下であることを示した．実用性に関しては，実際に都市空間設計や住空間設計への応用を進めたことから実証されたと言える．

第 5 章では，都市空間設計のような関係者が複数にわたる場合には，多数の体験者が同じ映像を同時に見るという空間共有体験が重要であるのに対して，第 4 章で構築した小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイでは，多数の体験者に同時に広視野の映像提示することは困難であることから，明るい映像品質で構築コスト面に優れる汎用的な PC 及び液晶方式プロジェクタを用いたマルチプロジェクタによるドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法を示した．すなわち，ソフトウェアによる重なり合った映像境界部分の特定機能と輝度補正機能を開発し，投影シミュレータに組み込むと共に，ドームスクリーン全体に継ぎ目のないシームレスな映像表示を実現するマルチプロジェクタを用いたドーム形状没入

型視覚ディスプレイ構築手法を示した．

以下に確立した一般的な構築手順を示す．まず，第一に，プロジェクタの特徴を投影映像という点からパラメータとして表現する点は第 4 章と同様である．第二に，大型ドームスクリーンにおける体験人数と設置スペースの条件よりドームスクリーンサイズ及び形状を設計し，CAD によってドームスクリーン形状を作成する．第三に，体験者及び観覧台が映像を遮ることによる影を生じないように考慮したプロジェクタの配置設計を行う．第四に，投影シミュレータを用いた詳細なプロジェクタ配置設計を行う．プロジェクタ配置の位置・回転データを徐々に変更させながら映像境界部分の重なり程度を調整し，シミュレーション映像を確認しながら隙間部分を生じさせず，しかも重なり部分を最小化した最適なプロジェクタ配置を決定する．第五に，ソフトスクリーンと呼ばれるタイプのドームスクリーンを構築し，第六に 18 台のプロジェクタ配置，第七に 28 台の PC クラスターを構成する．第八に，ドームスクリーン上の表示映像と，投影シミュレータのパラメータ調整により，各プロジェクタ姿勢を推定し微調整を行う．調整には，レーザー墨出し器を用いて基準となるガイドラインを表示し，投影シミュレータ上のプロジェクタ設置パラメータを変更することでグリッド映像とのずれを調整する．レーザとグリッドのずれがなくなり，さらに 2 つの別々のプロジェクタから投影される左右両目用のグリッド映像を視差ゼロにして映像がほぼ完全に重なっていることを確認する．第九に，映像境界部分を特定し，その部分の輝度調整を行うことによって，映像境界部分と境界部分以外の映像領域の輝度を均一化する輝度調整を行い，構築は終了する．

本構築手法の評価として，内径 8.25m の大型ドームスクリーン・18 台のプロジェクタ・26 台の PC という構成の大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイを構築し，映像精度・実現性・実用性・拡張性の観点からの考察を示した．映像精度に関しては，ドーム中心を通る水平垂直線をレーザーによる基準ガイドラインで表示し，グリッド映像との測定結果を示した．ドーム中心軸以外の領域では，左目用右目用の視差のないグリッド映像を表示し，その一致度合いを示し，大きな映像の不一致が見られないことを示した．また，映像境界部分特定による輝度補正効果については，境界部分と境界部分以外の映像輝度差は輝度計測定で 5%以下程度であり，ほとんどの映像では繋ぎ目を認識できないという点から非常に有効であることを示した．

汎用的なプロジェクタや PC を用いながら，少人数向けから多人数まで対応可能な様々なサイズのドーム形状スクリーンに歪みのないシームレスな立体映像を表示するドーム形状没入型視覚ディスプレイ構築手法を確立したが，一方では，光学的な補正には触れていない．すなわちレンズ収差や投影距離の違いによる焦点ぼけへの対応は実現されていない．またスクリーン素材による反射特性に関しても触れていない．より高い映像品質表示を実現するためには，これらの課題に対する検討も必要である．

今後は，コンピュータグラフィックスによる生成映像の表示だけでなく，カメラ撮影による実写映像や DVD などメディアへの記録映像を歪み補正・同期再生するソフトウェア機能を実現する予定である．カメラ撮影による映像生成は，映像データ作成のコストを考えると非常に有効であり，臨場感通信・遠隔通信・高度医療手術等への応用が考えられる．課題としては，汎用的なカメラでは撮影可能な画角が小さいため，表示系を考慮した撮像系を用いなければ，ドームディスプレイ上では単に拡大表示することになり，立体映像表

示や等身大スケール表示は困難である点が考えられる．表示系に適合した撮像系を構築し，評価する予定である．

謝辞

本研究をまとめるにあたり，大阪大学サイバーメディアセンター 竹村治雄教授には多大なご指導及びご鞭撻を賜りました．特に在学期間及びそれ以前の国家プロジェクトにおきましても，プロジェクトリーダーとして本研究の方向性を示していただきました．ここに謹んで感謝の意を表する次第であります．

本論文をまとめるにあたり，御多忙中にも関わらず，貴重な御指導を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科岸野文郎教授，ならびに大阪大学大学院基礎工学研究科佐藤宏介教授，ならびに大阪大学産業科学研究所八木康史教授に深く感謝致します．

本研究は，著者が勤務する松下電工株式会社において，1989 年より受託開発を開始した通商産業省工業技術院主導の新工業化住宅開発プロジェクトに端を発し，その後，同様に受託した通商産業省ヒューマンメディアの研究開発プロジェクト，及び引き続き受託した経済産業省スケーラブル没入型シミュレータ開発プロジェクトにおける研究開発と深く関連します．これら様々なプロジェクトを主導し，社内外双方にわたってご指導及びご鞭撻を賜りました同社システム技術研究所 澤田一哉博士に深く感謝の意を表します．

様々な国家プロジェクトを同社代表として主導され，貴重な研究開発の機会を賜りました同社情報機器分社分社長・専務執行役 野村淳二博士に深く感謝の意を表します．

本研究を遂行するにあたり，多大な御理解および御配慮を賜りました同社システム技術研究所 寺田元治所長，及び同研究所 寺田康和技監に深く感謝致します．

本論文をまとめるにあたり，ご多忙中にもかかわらず丁寧な校閲をしていただき，貴重な御指導と御助言を頂きました大阪大学サイバーメディアセンター　清川清助教授に深く感謝致します．

本研究を遂行するにあたり，貴重なご意見を賜りました東京工業大学精密工学研究所 佐藤誠教授，ならびに東京工芸大学工学部メディア画像学科 畑田豊彦教授，ならびに，京都大学大学院情報学研究科松山隆司教授に深く感謝致します．

本研究を遂行するにあたり，システムの構築に深く関連していただきました有限会社セル・グラフィックス 三品豪社長，百宝堂株式会社 百海善市郎社長，日本ビクター株式会社 ILA センター 渡邉勝部長，株式会社東京現像所 青山学取締役，同社 三好心様，高島株式会社 立川壮史マネージャー，株式会社スリーディー 加納裕取締役，株式会社リアルビズ 田島操副社長，並びに関連者の方々に深く感謝致します．

また，著者が勤務する松下電工株式会社システム技術研究所サイバースペースグループ，LED 調光特品開発事業部，東京特需営業所の方々に深く感謝致します．特に，柏木正徳副参事，Hareesh P.V.君，星野洋君には本研究に対する御協力及び御助言をいただきました．心より感謝致します．

最後に，家庭において，常に心の支えとなり，応援してくれた妻の美奈，長女の真由子，両親ほか家族に深く感謝致します．

参考文献

[1] David Zeltzer, “Autonomy Interaction and Presence, ”PRESENCE, Vol.1, No.1, pp.127-132, 1992.

[2] 野村淳二他, “人工現実感によるシステムキッチン体験システム”, JSEP-57-08, pp.44-47, 1991.

[3] 舘暲, 荒井裕彦, “テレイグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価”, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.4, pp.314-326, 1989.

[4] 岩田洋夫編著, “人工現実感生成技術とその応用”, サイエンス社, 1992.

[5] 舘暲, “人工現実感”, 日刊工業新聞社社, 1992.

[6] 廣瀬通孝, “バーチャルリアリティ”, オーム社, 1995.

[7] 野村淳二, 澤田一哉編著, “バーチャルリアリティ”, 朝倉書店, 1997.

[8] 財団法人イメージ情報科学研究所, “ヒューマンメディアの研究開発成果報告書”, 平成 9 年度産業科学技術研究開発制度 新エネルギー･産業技術総合開発機構委託事業, 1998.

[9] 財団法人イメージ情報科学研究所, “ヒューマンメディアの研究開発成果報告書”, 平成 10 年度産業科学技術研究開発制度 新エネルギー･産業技術総合開発機構委託事業, 1999.

[10] 財団法人イメージ情報科学研究所, “ヒューマンメディアの研究開発成果報告書”, 平成 11 年度産業科学技術研究開発制度 新エネルギー･産業技術総合開発機構委託事業, 2000.

[11] 澤田一哉, “高臨場感ディスプレイ”, 映像情報メディア学会誌, Vol.53, No.7, pp.927-931, 1999.

[12] 河本康太郎, “カラー表現による可視化技術”, フジ･テクノシステム社, pp.159-163, 1996.

[13] 畑田豊彦, “視野効果による人工現実感”, 精密工学会誌, Vol.57, No.8, pp.22-26, 1991.

[14] 増田千尋, “3次元ディスプレイ”, 産業図書, 1990.

[15] 谷千束編著, “高臨場感ディスプレイ”, 共立出版, 2001.

[16] 近江政雄他著, “映像デジタルコンテンツ評価システムの開発に関するフィージビリティスタディ”, 財団法人機械システム振興協会, 2001.

[17] 鵜飼一彦著他, “映像デジタルコンテンツ評価システムの開発に関するフィージビリティスタディ”, 財団法人機械システム振興協会, 2002.

[18] C.Cruz-Neira et al., “Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, ” Computer Graphics , Proc. ACM SIGGRAPH’93, pp.135-142, 1993.

[19] 廣瀬通孝, “CABIN システム”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.7, pp.920-924, 1998.

[20] Yamada T., Hirose M., Iida Y., “Development of Complete Immersive Display COSMOS, ” Proc. of VSMM98, pp.522-527, 1998.

[21] 山田俊郎, 棚橋秀樹, 小木哲朗, 廣瀬通孝, “完全没入型6面ディスプレイ COSMOS の開発と空間ナビゲーションにおける効果”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.3, pp.531-538, 1999.

[22] 柴野伸之, 四宮葉一, 榎本範子, 澤田一哉, 野村淳二, “VR を応用した多人数参加型住環境疑似体験システムの開発”, 第 10 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.377-382, 1994.

[23] Shibano N., Shinimiya T., Enomoto N., Sawada K., Junji N., “The Virtual House using Multi Display Large Screen, ” VIRTUAL REALITY ENVIRONMENTS IN ARCHITECTURE AND DESIGN, Computer Graphics Society U.K., 1994.

[24] Shinimiya T., Shibano N., Sawada K., Junji N., “Soundproof Simulation using Virtual Reality, ” VIRTUAL REALITY ENVIRONMENTS IN ARCHITECTURE AND DESIGN, Computer Graphics Society U.K., 1994.

[25] 柴野伸之, 四宮葉一, 榎本範子, 澤田一哉, 野村淳二, “ＶＲを応用した住空間温熱空気環境疑似体験システムの開発”, 第 11 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.527-533, 1995.

[26] 岩田洋夫, “シームレス全球面ディスプレイ”, 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.

[27] 橋本渉, 岩田洋夫, “凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ：Ensphered 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.

[28] 岩田洋夫, 橋本渉, “背面投射型球面ディスプレイ”, Human Interface News and Report, Vol.12, No.2, pp.119-124, 1997.

[29] 竹村治雄, 野村淳二, “都市環境ヒューマンメディアの研究開発”, システム制御情報学会誌, Vol.42, No.5, pp.260-267, 1998.

[30] W. Krueger, M. Berndtgen, C. Bohn, B. Froehlich, H. Schueth, T. Sikora, J. Speier, W. Strauss, G. Wesche, J. Ziehm, “The Responsive Workbench: A Virtual Working Environment for Architects, Designers, Physicians, and Scientists,” SIGGRAPH 1994 Visual Proceedings, pp. 200-201, 1994.

[31] E. Lantz, S. Bryson, D. Zeltzer, M. Bolas, B.Chapelle, D. Bennett, “The Future of Virtual Reality:Head Mounted Displays Versus Spatially Immersive Displays,” SIGGRAPH 1996 Conference Proceedings, pp. 485-486, 1996.

[32] U. Obeysekare, C. Williams, J. Durbin, L. Rosenblum, R. Rosenberg, F. Grinstein, R. Ramamurthi, A. Landsberg, W. Sandberg, “Virtual Workbench – A Non-Immersive Virtual Environment for Visualizing and Interacting with 3D Objects for Scientific Visualization,” IEEE Visualization, pp.345-349, 1996.

[33] A. Majumder, Z. He, H. Towles, and G. Welch, “Achieving Color Uniformity Across Multi-Projector Displays,” IEEE Visualization 2000, pp.117-124, 2000.

[34] A. Fox, B. Johanson, P. Hanrahan, and T. Winograd, “Integrating Information Appliances into an Interactive Workspace,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol 20(3), pp.54-65, 2000.

[35] M. Hereld, I. R. Judson, and R. L. Stevens, “Introduction to Building Projection-based Tiled Display Systems, ” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 20(4), pp.22-28, 2000.

[36] R. Stevens, M. Papka, J. Ahrens, K. Li, D. Reed, “Next-Generation Visualization Displays: The Research Challenges of building Tiled Displays,” IEEE Visualization, pp.527-528, 2000.

[37] D. Schikore, R. Fischer, R. Frank, R. Gaunt, J. Hobson, B. Whitlock, “High-Resolution Multiprojector Display Walls, ” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.20(4), pp. 38-44, 2000.

[38] K. Li, H. Chen, Y. Chen, D. Clark, P. Cook, S.Damianakis, G. Essl, A. Finkelstein, T. Funkhouser, A.Klein, Z. Liu, E. Praun, R. Samanta, B. Shedd, J. Singh, G. Tzanetakis, J. Zheng, “Building and Using A Scalable Display Wall System, ” IEEE Computer Graphics and

Applications, Vol 20(4), pp 29-37, 2000.

[39] Y. Chen, D. Clark, A. Finkelstein, T. Housel, and K. Li, “Automatic Alignment of High-Resolution Multi-Projector Displays Using An Un-Calibrated Camera,” IEEE Visualization 2000, pp.125-130, 2000.

[40] H. Chen, R. Sukthankar, G. Wallace, T. Cham, “Calibrating Scalable Multi-Projector Displays Using Camera Homography Trees,” Computer Vision and Pattern Recognition 2001 (technical sketch), 2001.

[41] H. Chen, Y. Chen, A. Finkelstein, T. Funkhouser, K. Li, Z. Liu, R. Samanta, and G. Wallace, “Data Distribution Strategies for High-Resolution Displays, ” Computers & Graphics Journal, Special Issue on Mixed Realities - Beyond Conventions, 2001.

[42] Y. Chen, H. Chen, D.Clark, Z.Liu, G.Wallace, K.Li, “Software Environments for Cluster-based Display Systems, ” IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid, pp.202-210, 2001.

[43] R. Raskar, G. Welch, H. Fuchs, “Seamless Projection Overlaps Using Image Warping and Intensity Blending, ” Proceedings of 4th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, 1998.

[44] A. Majumder, G. Meenakshisundaram, W. B. Seales, H. Fuchs, “Immersive Teleconferencing: A New Algorithm to Generate Seamless Panoramic Video Imagery, ” Proceedings of the 7th ACM International Conference on Multimedia, pp.169-178, 1999.

[45] R. Raskar, M. S. Brown, R. Yang, W. Chen, G. Welch, H. Towles, B. Seales, H. Fuchs, “Multi-Projector Displays Using Camera-Based Registration,” IEEE Visualization 1999, pp.61-168, 1999.

[46] R. Raskar, “Immersive Planar Display using Roughly Aligned Projectors, ” IEEE Virtual Reality 2000, pp.109-116, 2000.

[47] R. Yang, D. Gotz, J. Hensley, H. Towles, M. Brown, “PixelFlex: A Reconfigurable Multi-Projector Display System, ” IEEE Visualization 2001, 2001.

[48] Zhiyun Li, Amitabh Varshney., “A real-time Seamless Tiled Display System for 3D Graphics, ” 7th annual Immersive Projection Technology (IPT) Symposium, pp.269-277, 2002.

[49] G. Humphreys, M. Eldridge, I. Buck, P. Hanrahan “Distributed Rendering for Scalable Displays, ” IEEE Supercomputing 2000, pp.60-60, 2000.

[50] G. Humphreys, M. Eldridge, I. Buck, G. Stoll, M. Everett, P. Hanrahan, “WireGL: A Scalable System for Clusters, ” SIGGRAPH 2001 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pp.129-140, 2001.

[51] R. Samanta, J. Zheng, T. Funkhouser, K. Li, J. Singh, “Load Balancing for Multi-Projector Rendering Systems,” SIGGRAPH/Eurographics Workshop on Graphics Hardware, pp.107-116, 1999.

[52] R. Raskar, G. Welch, H. Fuchs, “Spatially Augmented Reality, ” Proceedings of 1st International Workshop on Augmented Reality, 1998.

[53] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin, H. Fuchs, “The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays, ” SIGGRAPH 1998 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pp.179-188, 1998.

[54] R. Raskar, G. Welch, W. Chen, “Table-Top Spatially-Augmented Reality: Bringing Physical Models to Life with Projected Imagery, ” Proceedings of 2nd International Workshop on Augmented Reality, pp.64-71, 1999.

[55] B. Wei, C. Silva, E. Koutsofios, S. Krishnan, and S. North, “Visualization Research with Large Displays, ” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.20(4), pp.50-54, 2000.

[56] W. Buxton, G. Fitzmaurice, R. Balakrishnan, G. Kurtenbach, “Large Displays in Automotive Design, ” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.20(4), pp.68-75, 2000.

[57] G. Bishop, G. Welch, “Working in the Office of ‘Real Soon Now’,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.20(4), pp.76-78, 2000.

[58] E. Mynatt, T. Igarashi, W. Edwards, and A. LaMarca, “Designing an Augmented Writing Surface, ” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.20(4), pp.55-61, 2000.

[59] 柴野伸之, 畑中智行, 中西弘泰, 星野洋, 長濱龍一郎, 澤田一哉, 野村淳二, “都市環境ヒューマンメディアにおける球面型没入ディスプレイ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.3, pp.549-554, 1999.

[60] Hatanaka T., Nakanishi H., Shibano N., Nagahama R., and Sawada K., “Development of Semi-Spherical Screen VR System for Exploring Urban Environment, ” ICAT’98, pp.95-101,

1998.

[61] Jackie Neider, Tom Davis, Mason Woo, “OpenGL Programming Guide, ” 1993.

[62] 柴野伸之, 中西弘泰, Hareesh P.V., 柏木正徳, 澤田一哉, 竹村治雄, “仮想都市構築支援マルチモーダルプレゼンテーションシステム”, 平成 12 年電気関係学会関西支部連合大会, 2000.

[63] Hareesh P.V., Shibano N., Nakanishi H., Kashiwagi M., Sawada K., “Evacuation Simulation: Visualization Using Virtual Humans in a Distributed Multi-user Immersive VR System, ” VSMM2000, pp.283-289, 2000.

[64] 柴野伸之, 中西弘泰, Hareesh P.V., 柏木正徳, 澤田一哉, 竹村治雄, “仮想都市構築支援マルチモーダルプレゼンテーションシステム”, 日本バーチャルリアリティ学会サイバースペース研究会, VR 学研報 Vol.5, No.2, pp.1-4, 2001.

[65] Nobuyuki Shibano et al., “Development of VR Multi-Modal Presentation System for Urban Environment Human Media, ” IEEE VIRTUAL REALITY 2001 Workshop, 2001.

[66] Shibano N., Hareesh.P.V., Kashiwagi M., Sawada K., Takemura H., “Development of VR Experiencing System with Hemi-Spherical Immersive Projection Display for Environment Design, ” 7th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, pp.499-505, 2001.

[67] 柴野伸之, Hareesh P.V. , 星野洋, 河村亮, 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 回大会論文集, pp.393-396, 2001.

[68] Shibano N., Hareesh.P.V., Kashiwagi M., Sawada K., Takemura H., “Development of VR Experiencing System with Hemi-Spherical Immersive Projection Display, ” Asia Display/IDW01, Proceedings of the 21st International Display Research Conference in conjunction with the 8th International Display Workshop, pp.1369-1372, 2001.

[69] 長濱龍一郎, 福田知弘, 笹田剛史, “パブリックデザインのための強調設計支援システム(1)：研究の枠組み”, 日本建築学会第 20 回情報･システム･利用技術シンポジウム論文集, pp.331-336, 1997.

[70] 福田知弘, 長濱龍一郎, 笹田剛史, “パブリックデザインのための強調設計支援システム(2)：デザインツールの整備”, 日本建築学会第 20 回情報･システム･利用技術シンポジウム論文集, pp.337-342, 1997.

[71] 福田知弘, 長濱龍一郎, 八鍬朝子, 笹田剛史, “パブリックデザインのための強調設計支援システム(3):システムの構築と運用”, 日本建築学会第 21 回情報･システム･利用技術シンポジウム論文集, pp.319-324, 1998.

[72] 福田知弘, 柴野伸之, 長濱龍一郎, 笹田剛史, “パブリックデザインのための強調設計支援システム(4):ドーム型 VR システムの統合とシステムの運用”, 日本建築学会第 22 回情報･システム･利用技術シンポジウム論文集, pp.169-174, 1999.

[73] 福田知弘, 長濱龍一郎, “まちづくり支援システムの開発と実践”, 平成13年度第34回照明学会全国大会講演論文集, pp.136-137, 2001.

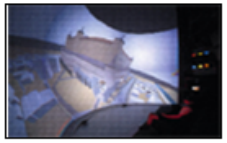
[74] 財団法人イメージ情報科学研究所, “スケーラブル没入型シミュレータの研究開発成果報告書”, 平成 13 年度次世代バーチャルリアリティ等推進事業, 2002.

[75] 財団法人イメージ情報科学研究所, “スケーラブル没入型シミュレータの研究開発成果報告書”, 平成 14 年度次世代バーチャルリアリティ等推進事業, 2003.

付録

A　ドーム形状没入型ディスプレイ性能比較表

ドーム形状没入型ディスプレイ性能比較表

分類	初期ドーム形状没入型視覚ディスプレイ	小型ドーム形状没入型視覚ディスプレイ	大型ドーム形状没入型視覚ディスプレイ
イメージ			
スクリーン大きさ	6.8m	1.8m	8.5m
設置スペース	(W)8m×(D)6m×(H)7m	(W)2m×(D)15.m×(H)2.4m	(W)9.5m×(D)5m×(H)9m
体験者人数	15人	1～2人	30人
ハードウェア構成	CRT方式プロジェクタ×6台 グラフィックススーパーコンピュータ ブレンディング機器	液晶プロジェクタ×2台 PC×3台	液晶プロジェクタ×18台 PC×19台
概算コスト(百万円)	170	7	150
ソフトウェア機能	簡易映像歪み補正機能	映像歪み補正機能 映像同期表示(3台PC)	映像歪み補正機能 映像同期表示(19台PC) 映像境界部分特定・輝度補正
光束(lm)	1,200	4,000	36,000
換算明るさ(lx)	33.1	785	681
立体視時1/2(lx)	16.6	392.5	341
画素数	(H)1920×(V)960	(H)1280×(V)1024	(H)3840×(V)3072
角度分解能	5′ 38″	6′ 33″	2′ 48″
視力換算	0.18	0.15	0.36
視野角	(H)180° ×(V)90°	(H)140° ×(V)90°	(H)180° ×(V)150°

B　スクリーンの種類と特徴

スクリーンの種類と特徴

分類	ホワイトスクリーン	シルバースクリーン	ビーズスクリーン
反射特性	拡散反射 （入射光をあらゆる方向に反射）	拡散反射 （入射光に対して正反射）	拡散反射 （入射光と同一方向に反射）
反射の模式図			
表面形状			
生成方法	白色塗料を塗布、表面に艶消処理	アルミナ粉末を塗布、表面に艶消処理	ガラスレンズ球を散りばめた生地使用
特徴	拡散性が強く、どの方向からも 均一な映像鑑賞可能	指向性が強く、映像鑑賞位置によって 映像に明暗のむらが生じる	指向性がやや強いが、ホワイト スクリーンよりも明るい
偏光反射特性	偏光を損なう	偏光を損なわずに反射	偏光を損なう
3D映像の表示	時分割シャッタリング眼鏡による 立体映像表示に使用	偏光眼鏡による 立体映像表示に使用	3D映像ではあまり使用されない

C　プロジェクタの種類と性能比較表

プロジェクタ表示方式による比較表

表示方式	CRT		液晶		DLP
機種・メーカー	909S・バルコ社	808S・バルコ社	DLA-M2000L・ビクター社	Reality6400・バルコ社	RoadsterS4・クリスティ社
イメージ					
解像度	SXGA	SXGA	SXGA	SXGA	SXGA
明るさ(lm)	300	200	2000	**3400**	**4000**
価格(万円)	1000	600	**260**	**250**	1000
コントラスト	**高(1000:1)**	**高(1000:1)**	中(350:1)	中(350:1)	中(350:1)
歪み補正	**機能あり**	**機能あり**	なし	なし	なし
ブレンディング	**機能あり**	**機能あり**	なし	なし	なし

プロジェクタのスペック表

プロジェクタ名	BARCO SIM6 MKII	Victor DLA-SX21SD	Panasonic TH-L6600JL	SANYO LP-EF31	Victor M200L
概観図					
方式	液晶	液晶(D-ILA)	液晶	液晶	液晶
解像度	SXGA(1,280×1,024)	SXGA(1,400×1,050)	SXGA(1,280×1,024)	SXGA(1,280×1,024)	SXGA(1,280×1,024)
明るさ(ANSIルーメン)	3400	1500	3600	5800	2000
価格(万円)	250	180	180	180	450
短焦点レンズ	0.86:1	1:1	0.7:1	0.8:1	1:1
レンズシフト	水平・垂直	なし	垂直	なし	なし
3D対応	○	○	○	○	○
寸法(mm), 重量(Kg)	371×269×527, 17.7	298×124×360, 5.9	494×179×495, 13.8	439×230×605.5, 21.0	530×200×569, 19.8
水平投影角度(度)	61.50	54.00	62.00	61.40	48.54
バックフォーカス(mm)	72.00	44.40	62.00	67.30	73.20

発表論文リスト

博士論文に関するもの

Ⅰ．学術雑誌論文

１．柴野伸之，畑中智行，中西弘泰，星野洋，長濱龍一郎，澤田一哉，野村淳二，“都市環境ヒューマンメディアにおける球面型没入ディスプレイ”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.4，No.3，pp.549-554，1999．

２．柴野伸之，澤田一哉，竹村治雄，“マルチプロジェクタを用いたスケーラブル大型ドームディスプレイ CyberDome の開発”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.9，No.3，掲載予定，2004．

Ⅱ．国際会議

１． Shibano N., Shinomiya Y., Enomoto N., Sawada K., Nomura J., “The Virtual House using Multi Display Large Screen, ” VIRTUAL REALITY ENVIRONMENTS IN ARCHITECTURE AND DESIGN, Computer Graphics Society U.K., 1994.

２． Shinomiya Y., Shibano N., Sawada K., Nomura J. , “Soundproof Simulation using Virtual Reality, VIRTUAL REALITY ENVIRONMENTS IN ARCHITECTURE AND DESIGN, ” Computer Graphics Society U.K., 1994.

３． Hatanaka, T., Nakanishi H., Shibano N., Nagahama R., and Sawada K. , “Development of Semi-Spherical Screen VR System for Exploring Urban Environment, ” ICAT’98, pp.95-101, 1998.

４． Hareesh P.V., Shibano N., Nakanishi H., Kashiwagi M., Sawada K. , “Evacuation Simulation: Visualization Using Virtual Humans in a Distributed Multi-user Immersive VR System, ” VSMM2000, pp.283-289, 2000.

５． Shibano N., Nakanishi H., Hareesh.P.V., Kashiwagi M., Sawada K. , “Development of VR Multi-Modal Presentation System for Urban Environment Human Media, ” IEEE VIRTUAL REALITY 2001, Workshop, 2001.

６． Shibano N., Hareesh.P.V., Kashiwagi M., Sawada K., Takemura H. , “Development of VR Experiencing System with Hemi-Spherical Immersive Projection Display, ” Asia

Display/IDW01,Proceedings of The 21st International Display research Conference in conjunction with The 8th International Display Workshop, pp.1369-1372, 2001.

7． Shibano N., Hareesh.P.V., Kashiwagi M., Sawada K., Takemura H. , “Development of VR Experiencing System with Hemi-Spherical Immersive Projection Display for Environment Design, ” 7th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, pp.499-505, 2001.

8． Shibano N., Hareesh.P.V., Hoshino H, Kawamura R, Yamamoto A, Kashiwagi M., Sawada K., Takemura H. , “A New System for Interactive VR Applications Using a Compact Hemi Spherical IPD (CyberDome), ” 6th Virtual Reality International Conference, IEEE VRIC 2004 proceedings, pp.101-107, 2004.

受賞

1． Industrial Design and Simulation Award, “A New System for Interactive VR Applications Using a Compact Hemi Spherical IPD (CyberDome)”, 6th Virtual Reality International Conference, IEEE VRIC 2004

III．国内研究会・学会

1．柴野伸之，四宮葉一，榎本範子，澤田一哉，野村淳二，“VR を応用した多人数参加型住環境疑似体験システムの開発”，第 10 回 HIS 論文集，pp.377-382，1994.

2．柴野伸之，四宮葉一，榎本範子，澤田一哉，野村淳二，“VR を応用した住空間温熱空気環境疑似体験システムの開発”，第 11 回 HIS 論文集，pp.527-533，1995.

3．柴野伸之，畑中智行，中西弘泰，星野洋，長濱龍一郎，澤田一哉，野村淳二，“都市環境ヒューマンメディアにおける大ドーム型 VR 体験システムの開発”，日本バーチャルリアリティ学会第３回大会，pp.145-148，1998.

4．柴野伸之，中西弘泰，Hareesh P.V.，柏木正徳，澤田一哉，“仮想都市構築支援マルチモーダルプレゼンテーションシステム”，平成 12 年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集，pp.S35，2000.

5．柴野伸之，柏木正徳，澤田一哉，“バーチャル見本市プロジェクトにおける分散協調ＶＲシステムの開発”，（社）計測自動制御学会 SICE2000 講演論文集，pp.101-102，2000.

6．柴野伸之，中西弘泰，Hareesh P.V.，柏木正徳，澤田一哉，“仮想都市構築支援マルチモーダルプレゼンテーションシステム”，日本バーチャルリアリティ学会サイバースペ

ース研究会，VR 学研報 Vol.5，No.2，pp.1-4，2001.

７．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回大会論文集，pp.393-396,2001.

８．柴野伸之，澤田一哉，竹村治雄，“サイバードーム視覚ディスプレイシステムの開発”，日本バーチャルリアリティ学会第８回大会論文集，pp.87-90，2003.

Ⅳ．解説記事

１．柴野伸之，“照明に彩られた仮想空間を疑似体験する”，照明学会誌，Vol.83，No.1，pp.46-51，1999.

Ⅴ．著書

１．柴野伸之他著，“カラー表現による可視化技術”，谷田好通監修，pp.434-443，フジテクノシステム，1996.

Ⅵ．出願特許

国内出願

1. 柴野伸之：仮想環境体験装置，特願平 11-044226，1999.

2. 柴野伸之：仮想空間における煙の表示方法，特願 2000-192284，2000.

3. 柴野伸之：避難仮想体験システム，特願 2000-304058，2000.

4. 柴野伸之：没入感生成装置，特願 2000-341050，2000.

5. 柴野伸之：画像表示システム，プログラムおよび画像表示システム用画像補正サービス方法，特願 2001-199824，2001.

6. 柴野伸之：商品仮想体験システム，特願 2002-072945，2002.

7. 柴野伸之：加齢効果予測人体モデル生成システム，特願 2002-251204，2002.

8. 柴野伸之：没入感生成装置，特願 2003-085579，2003.

9. 柴野伸之:インタラクティブ三次元バーチャル空間調光装置, 特願 2003-085577, 2003.

国際出願

1. N.Shibano: METHOD FOR CREATING BRIGHTNESS FILTER AND VIRTUAL SPACE CREATION SYSTEM, PCT/JP2004/004239, 2004.

2. N.Shibano: SIMULATION METHOD, PROGRAM, AND SYSTEM FOR CREATING A VIRTUAL THREE-DIMENSIONAL ILLUMINATED SCENE, PCT/JP2004/004234, 2004.

登録

1. 柴野伸之：没入感生成装置，特許第 3387487 号，2003.

それ以外の論文

Ⅰ．学術雑誌論文

1. R.YAMAZAKI, Y.HORIKAWA, N.SHIBANO, K.YOSHIDA: “Graphite coating by fluidized-bed CVD, Advanced Powder Technol., Vol.2, No.2, pp.111-118, 1991, VSP and Society of Powder Technology

Ⅱ．国際会議

該当なし

Ⅲ．国内研究会・学会

1. 柴野伸之他：“たばこ煙挙動の数値シミュレーションモデルについて”，空気調和衛生工学会論文集，pp.777-780，1989.