

DA
2363
1999
④

力覚と視覚を統合した
情報呈示環境に関する研究

工学研究科
筑波大学

2000年 3月

橋本 渉

寄贈
橋本渉氏

00003591

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	内容梗概	3
第2章	力覚呈示に関する要素技術	5
2.1	力覚呈示	5
2.2	既存の力覚呈示手法	5
2.3	力覚マッピング	7
2.4	力覚呈示装置の概要	10
2.5	人間の刺激入力特性	11
2.5.1	トルクマッピングの刺激入力特性	12
2.5.2	勾配マッピングの刺激入力特性	13
2.5.3	粘性マッピングの刺激入力特性	14
2.6	力覚マッピングによるモデル呈示実験	15
2.6.1	分布探索モデル実験	15
2.6.2	形状把握モデル実験	16
2.6.3	指示精度モデル実験	17
2.6.4	モデル呈示実験における考察	18
2.7	近接感覚マッピング	20
2.7.1	近接覚とは	20
2.7.2	危険領域の力覚表現	21
2.7.3	実装方法	23
2.7.4	呈示性能実験	26
2.7.5	危険領域の力覚表現によるナビゲーション実験	29
2.7.6	近接覚呈示における考察	31

第 3 章	視覚呈示に関する要素技術	32
3.1	没入型ディスプレイ	32
3.2	菱形 12 面体ディスプレイ	34
3.2.1	12 面体ディスプレイの概要	34
3.2.2	12 面体ディスプレイ用コンピュータ画像生成	36
3.2.3	アナグリフ方式による立体視	38
3.3	背面投影型球面ディスプレイ	41
3.3.1	多面体ディスプレイと球面ディスプレイ	41
3.3.2	球面ディスプレイの問題点	41
3.3.3	球面ディスプレイの設計	42
3.3.4	試作球面ディスプレイ	44
3.3.5	球面歪みの補正	48
3.3.6	球面歪み補正の具体的手法	50
3.3.7	複数画面での球面歪み補正	56
3.3.8	球面歪み補正に関する問題点	57
3.3.9	背面投射球面ディスプレイの問題点	58
3.4	全方向球面ディスプレイ	59
3.4.1	球面ディスプレイの拡張	59
3.4.2	全方向球面ディスプレイの設計手法	62
3.4.3	実際の設計計算	64
3.4.4	試作機の性能	69
3.4.5	ソフトウェアによる歪み映像生成	72
3.4.6	楕円鏡による歪み映像生成	74
3.4.7	Virtual Projector を用いた他の構成例	77
3.5	まとめ	78
第 4 章	力覚と視覚による統合呈示環境	80
4.1	力覚と視覚による情報呈示の問題点	80
4.2	統合環境の構築方針	83
4.3	統合環境の全体概要	84
4.4	統合環境の実装	86
4.5	統合環境の性能評価	88

第5章	医療データを用いた統合呈示環境の評価	90
5.1	医療データ呈示の目的	90
5.2	空間データ呈示方法論	91
5.3	空間データの実装	92
5.3.1	視覚表現	92
5.3.2	力覚表現	94
5.3.3	医療データの統合呈示	94
5.4	評価実験	97
5.4.1	実験条件	97
5.4.2	ナビゲーションモードにおける操作性評価	99
5.4.3	触診モードにおける操作性評価	101
5.4.4	考察	103
第6章	展望	105
6.1	力覚呈示に関する技術的問題と展望	105
6.2	没入型ディスプレイに関する展望	106
6.3	力覚と視覚の統合システムに関する展望	107
6.4	VR技術の応用に関する展望	107
第7章	結論	109
	謝辞	111
	参考文献	112
	著者文献	115
付録A	HapticMasterの機構的入出力特性	117
A.1	可動領域	117
A.2	計測誤差	118
A.3	最大出力	119
A.3.1	最大呈示並進力	119
A.3.2	最大呈示モーメント	120
付録B	力覚マッピングの作用点拡張	121
B.1	力覚マッピングの整理	121

B.2 作用点の拡張 123

目 次

1.1	視覚と力覚の統合によるミクロの決死圏	3
2.1	各呈示方法の概念図	8
2.2	HapticMaster	10
2.3	調整法による刺激量測定実験環境	11
2.4	調整法によるトルク刺激の等価値	12
2.5	調整法による並進力刺激の等価値	13
2.6	調整法による粘性刺激の等価値	14
2.7	探索に要した時間	15
2.8	形状把握に要した時間	16
2.9	指示精度	18
2.10	近接感覚表現	20
2.11	操作点近傍の格子テーブル	22
2.12	生成される力覚	22
2.13	危険領域への距離と呈示反力	25
2.14	本実験で用いた危険領域	26
2.15	軌跡と危険領域の壁面 (波長 24mm)	27
2.16	危険領域の表面波長と表面に対する操作点の距離	28
2.17	危険領域の表面波長と表面に対する軌跡との相関関係	28
2.18	危険領域の可視化	29
2.19	ナビゲーション実験における危険領域と操作点との距離	30
3.1	菱形 12 面体ディスプレイの構造	34
3.2	菱形 12 面体ディスプレイ	35
3.3	12 面スクリーンの位置	36
3.4	生成した画像	38
3.5	アナグリフ方式による生成画像	39

3.6	スクリーンの視野角	45
3.7	完成した球面スクリーン(壁型)	46
3.8	デスク型スクリーンによる配置構成図	47
3.9	完成した球面スクリーン(机型)	47
3.10	球面スクリーン投影時の歪み	48
3.11	球面スクリーン投影時の歪み補正	49
3.12	視点が曲率中心にあるときの視体積	51
3.13	視点が移動したときの視体積	52
3.14	プロジェクタの視体積	54
3.15	補正前の原画像	55
3.16	歪み補正を施した画像	55
3.17	2画面のスクリーンに拡張した場合の視点の移動と視体積	56
3.18	SGI Onyx(InfiniteReality)における補正処理能力	57
3.19	光源と観察者の理想的な配置	60
3.20	プロジェクタの配置	60
3.21	全方向球面ディスプレイ	61
3.22	プロジェクタの結像	62
3.23	凸面鏡による反射	63
3.24	光線追跡	64
3.25	光学設計のためのパラメータ	66
3.26	バーチャルプロジェクタ	67
3.27	シミュレーションによる照度分布	69
3.28	試作した全方向球面没入型ディスプレイ	70
3.29	スクリーン上の照度分布	71
3.30	視野角 θ の映像の球面歪み補正	72
3.31	角度の対応テーブル	73
3.32	テクスチャの原画と最終出力画像	74
3.33	近似曲面とそれによる誤差	75
3.34	実写映像の撮像系	76
3.35	撮影された実画像	76
3.36	ドーム型スクリーンの側面図	77
3.37	拡張されたドーム型スクリーンの側面図	78
4.1	力覚と視覚の情報入出力	81
4.2	力覚と視覚の統合呈示システム	84

4.3	性能評価用アプリケーション	88
5.1	ナビゲーションモードと触診モード	92
5.2	ボリュームによる視覚表現	93
5.3	等値面による視覚表現	93
5.4	統合環境による医療データ呈示の様子	95
5.5	本環境による医療データの呈示例(1)	96
5.6	本環境による医療データの呈示例(2)	96
5.7	本環境による医療データの呈示例(3)	96
5.8	本研究で提案する呈示環境	98
5.9	従来 of 典型的な VR 呈示環境	98
5.10	ナビゲーションにおけるタスク	99
5.11	ナビゲーションに要した時間	100
5.12	ナビゲーション時に侵入を許さない領域を侵した時間割合	100
5.13	触診モードにおけるタスク	101
5.14	触診モードにおける目標指示の精度	102
5.15	触診モードにおける目標指示に要した時間	102
A.1	HapticMaster の可動範囲 俯瞰図	117
A.2	最大呈示並進力の分布上面図 平面 $z=10$ (左右 x -前後 y)	119
A.3	最大呈示トルクの分布俯瞰図 $z=10$ (左右 x -前後 y)	120
B.1	作用点の拡張による仮想の工具	122
B.2	座標系の概念図	124
B.3	作用具の並進力、モーメント	125

表 目 次

2.1	呈示された形状に対する回答	17
2.2	監視領域の大きさと力覚更新速度の関係	24
3.1	DLA-G10 の光学仕様 (実測値)	65
3.2	選定されたパラメータ	68
3.3	全方向球面ディスプレイの表示画素の大きさ	70
3.4	ドーム型スクリーンの仕様	78
4.1	統合環境を構成するモジュール	87
4.2	本環境における視覚、力覚更新速度	89
A.1	HapticMaster の把持部における誤差	118

第1章 序論

1.1 研究の背景

20世紀中頃に登場した電子計算機は、開発当初の目的である科学技術計算にとどまらず、様々な分野に恩恵を与えてきた。その性能は、半導体の集積技術にともなって年々指数的に上昇しており、人間が知的作業をおこなう上で不可欠な道具となってきた。その反面、計算機の動作原理はその誕生からほとんど変わっていないといつてよい。すなわち計算機で扱われる情報は、本質的にはビットの集合体であり、人間にとってほとんど意味のなさない羅列で表されている。このため、初期の計算機では人間との媒介として極めて解読困難であるコードを強いられていた。やがて記号や文字が用いられるようになり、今日では画像、動画を視覚ディスプレイに表示したり、マウスやタブレットなど空間的な情報を対話的に入力できるにまで至っている。このように人間と計算機を結ぶ情報の経路は、その利用形態や用途に応じて、人間での負担を減らす方向で進化してきている。

計算機で扱われる情報を人間に入出力する部分(インタフェース)に着目すると、なんらかの人間の感覚を媒介としていることになる。本来、人間には五感が備わっており、外界とのやり取りに対して生得的に情報を得ることができる。この感覚チャンネルを積極的に増やして人間—計算機間の情報の流れを増大させる試みが、人工現実感の分野で活発に取りくまれてきた。多種の感覚情報を導入する場合のメリットは、文字や記号にたよらず、呈示対象物の直感的な理解をうながすことである。対象となる情報も、現実に存在するものだけでなく、計測やシミュレーションの結果に基づいた架空かつ現実の情報を表現することも可能である。本研究は、計測やシミュレーションなどの無機的な空間データを、人間の感覚を用いて直感的に把握させることを目的としている。

1.2 本研究の目的

人工現実感技術の大きな特徴は、現実には存在しえないものを感覚的にわかりやすく表現できる、という可能性を持っていることである。計測やシミュレーションが生み出すデータは無機的なものが多く、記号や文字として表現することが難しい。データをいかに表現するか、という方法論は人工現実感技術をもってしてもいまだに模索段階である。

視覚表現に限っていえば、可視化 (Visualization) はこの分野で大きく成功した例である。データを RGB 情報などに変換し、人間の視覚に訴えるものである。典型的なものとしては CT や MRI 画像の可視化であろう。患者の頭部断層データは本来、開頭手術をしなければ見ることのできない情報である。計測でえられた数値データを元に、あるルールに基づいて作成された画像を利用して、人間に理解可能な情報に変換する。こうした画像はいわば虚構の世界である。しかしこの画像は、医療専門家たちが患者の生死にかかわる重要な判断を下すほど有益な情報をもたらすのである。

視覚呈示を用いた情報の呈示表現手法は、対象を理解させる上で威力を発揮するものである。しかし、人間の感覚器に情報を呈示するという観点から考えた場合、本研究では以下の2点で不十分であるとしている。本研究で言及するのは以下の2点である。

第1点は視覚特性における奥行き情報の欠落である。人間の視覚をセンサとして捕らえると、3次元の情報を2次元の網膜に投射しており、両眼の像から3次元として再構成する、という仕組みになっている。また奥行き知覚は、3次元として再構成する処理で得られるが、生得的ではなく日常経験的によるところが大きいといわれている。したがって、中身がつまったデータや遮蔽されたデータに対して内部を把握することは難しい。仮に半透明で立体的に表示しても、本来、実体を持たないデータを表現しているわけだから、奥行き手がかりとして経験的に得られたものが利用できないことになる。

2点目は周辺視の問題である。一般に人間の視野には中心視の他に周辺視が存在し、その有効範囲は水平 200 度以上、垂直 170 度以上とされている。周辺視には瞬時に視線を変更できる有効視野 (水平 40 度以内)、頭部運動によって視線を変更できる安定注視野 (水平 180 度以内)、自己の空間座標系に影響を及ぼす誘導視野 (水平 180 度)、空間的広がりを補助する補助視野 (水平 200 度) がふくまれている [3]。現行の視覚呈示装

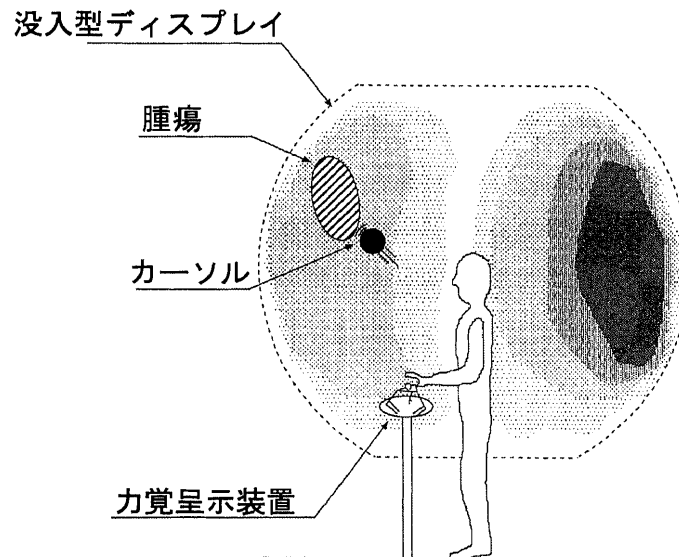


図 1.1: 視覚と力覚の統合によるミクロの決死圏

置、CRT ディスプレイや頭部搭載型ディスプレイ (HMD) ではこれらの視野を全てカバーすることは難しく、周辺情報の損失につながりかねない。

本研究は、第1の問題に対する解法として力覚情報を導入すること、第2の問題に対して没入型ディスプレイを導入すること、を提案するものである。こうした導入によって、人間の周囲に配される映像と、力覚付きの操縦桿による空間情報の呈示を行うことができる。例えば、映画にもなった「ミクロの決死圏」のように人体の中をミクロ化した視点で観察し、力覚によって患部とのインタラクションをおこなう、といった応用も可能になる(図 1.1)。最終的にはこのような応用例を実装することを目標とし、力覚系と視覚系との融合を図ることを本研究の目的としている。

1.3 内容梗概

本論文は「力覚と視覚を統合した情報呈示環境に関する研究」と題し、次の7章からなっている。

第1章は「序論」である。

第2章は「力覚呈示に関する要素技術」と題し、空間情報を人間の手先の力感覚を

介して呈示するための方法論、およびその呈示における効果について述べている。ここでは無機的な空間データを力覚にマッピングする方法として、トルク、勾配、および粘性という概念を利用している。まずこれらの各刺激量において、人間の感覚を刺激を及ぼし得るかについて調べる。次に、各刺激に対し人間にどのような意味をもたらすか、どのマッピングがどのような操作に向いているかについて調べる。また近接覚マッピングは、危険と定義されたデータに物理的に近寄らせないもので、これを用いてデータ内をナビゲーションするといった実験をおこなっている。

第3章は「視覚呈示に関する要素技術」と題し、情報を人間の視覚を介して呈示するための手段として、周囲を映像で覆う方式の没入型ディスプレイに関して述べている。没入型ディスプレイの構築例として、菱形12面体ディスプレイ、背面投射球面ディスプレイと改良を重ねてきたが、最終的な結果として全方向ディスプレイを設計試作している。本章ではこれらの設計方法、および実際に映像を呈示する方法について述べている。

第4章は「力覚と視覚による情報呈示環境」と題し、力覚と視覚の両感覚を人間に呈示するための計算機側の環境について述べている。2章の力覚呈示と3章の視覚呈示を統合し両立させる目的で構築しているが、さらに生産性、汎用性の点を配慮に入れて統合環境としている。

第5章は「医療データによる統合呈示の実例」と題し、医療画像を実装して呈示をおこなうための方法論について述べている。ミクロの決死圏のような医療データの呈示環境を目標とし、モデルデータを用いて、2章、3章で提案する呈示方法論の導入が妥当であるかどうかの検討をおこなう。

第6章は「展望」であり、本研究における技術課題と将来的な可能性について述べる。

第7章は「結論」である。

第2章 力覚呈示に関する要素技術

2.1 力覚呈示

人間の力覚とは、生理学的には深部感覚というカテゴリーに属している。深部感覚は人間の運動に密接に関係しており、例えば触るという行為では手先の運動と触知覚が大きく関与していることを意味している。このように、感覚系と運動系によって外界の認識がおこなわれるという観点に立つ研究分野はハプティクス (haptics) と呼ばれている。なお、haptic という言葉を辞書 [5] で調べると、ギリシャ語の haptesthai (=touch) に由来した形容詞で、1. 触る感覚に関するもの、触る感覚に基づくもの、2. 触る感覚に対して偏愛を示す性質のもの (a haptic person) となっている。

人間の力覚に計算機情報を呈示するためには、感覚刺激を呈示する装置、動作入力できる装置、そしてこの装置を制御して刺激量を統制する処理が必要となる。動作の入力をしながら力感覚刺激を呈示できる装置は、力覚ディスプレイまたはフォースディスプレイと呼ばれている。最近では、フォースディスプレイが商品として販売されるほどに普及しつつあり、力覚呈示への関心が高まってきている。フォースディスプレイ自体の研究開発も現在進行形であるが、特に呈示における制御方法、つまりアルゴリズムの方法論はいまだに確立されておらず、端緒についたばかりである。本章では、既存のフォースディスプレイを用いて、情報呈示をおこなうためのアルゴリズムについて述べるものである。

2.2 既存の力覚呈示手法

力覚呈示に関するレンダリング技術は、現在のところ決定的な方法論に欠き模索段階にあるが、大きくサーフェスレンダリング (haptic surface rendering) とボリュームレンダリング (haptic volume rendering) の2つに分類することができる。

サーフェスレンダリングとは表面の硬さを呈示するもので、計算機に表面の法線方向やばね、ダンパ等の性質を持つサーフェスモデルを用意することで表現できる。こうしたサーフェスレンダリングに関する研究は、仮想空間の力学系に導入されやすいため、研究例としては枚挙にいとまがない。最近ではサーフェスの変形ということに着目しているグループもあり、例えば自律的に変形する自由曲面を計算機上で表現し、力覚によるインタラクションを可能にしたもの [6] や、仮想の臓器の表現を想定しサーフェスの内部に弾性モデルを適用した例 [7] 等がある。

一方、ボリュームレンダリングとは、元来可視化の分野で用いられてきた言葉であり、可視化分野は様々な呈示技法が研究されてきている [8]。空間データのスカラ値やベクトル値を力覚表現するもので、空間データを計算機内のデータテーブルに置き、それらを参照しながら力覚刺激量として呈示する。なお、サーフェスレンダリングのデータはボクセル化 (voxelization) を施すことでボリュームデータに、ボリュームデータは Marching Cube [9] に代表される等値面化 (isosurfacing) を施すことでサーフェスデータに変換することができる [10]。

サーフェスレンダリングとボリュームレンダリングとの大きな相違点は、干渉処理の形態にある。すなわち、サーフェスレンダリングでは呈示する全てのデータを必要とするのに対し、ボリュームレンダリングではただかその時点で作用している格子データのみを必要とする。したがって、ボリュームレンダリングではデータ量と呈示処理量との間に相関がほとんどないため、膨大な空間データの力覚呈示に適している。

このボリュームレンダリングについてのルーツを調べると、まず Galyean らのボリュームモデリングに力覚を適用した例が 1991 年に発表されている [11]。彼らの目的はデザインであり、ボリュームデータを削ったりする場合に力覚を用いている。岩田らは 1993 年に科学技術データの可触化 (haptization) という目的で、力覚を導入している [12][13]。ここでは、ボリュームデータに対する力覚のマッピング方法について言及されており、スカラマッピングやベクトルマッピングの手法に分類している。Avila らは可視化の延長上に力覚を導入するものとして、1996 年にその導入方法についてを発表している [14]。彼らはボリュームデータの表面を触るための手法として、データの等値面を抽出しサーフェスデータ化する方法を提案している。Mor らは人間の膝の医用データに力覚を導入するに際し、データのセグメンテーション化をおこなっている [15]。さらに

データを平滑化するものとして、ガウス分布や線形補完する手法について整理している。同じ研究グループで、Sarahらは膝のデータに対して変形を加えるための手法について言及している[16]。ここではボリュームデータに3D-ChainMailという概念をとり入れ、3次元に結ばれた鎖が変形する仕組みをデータの格子にあてはめている。

本章の目的は、このボリュームレンダリングを利用して空間データの力覚呈示をおこなうものであるが、研究の位置づけとしては[12]と[15]の応用に近い部分になる。[12]におけるスカラーマッピングとは、空間スカラー値を力覚刺激強度にマッピングするもので、例えば、データ値が低いほど呈示される刺激強度が小さく、高いほど大きくなる。またベクトルマッピングとは、データからベクトルを抽出しそのまま並進方向に呈示するものである。本研究ではスカラーマッピングに注目し、力覚をマッピングする方法とその導入効果について調べている。また[15]の延長上として、データのセグメンテーション化によって、空間的に侵入不可能な領域を定義することができる。これを利用した近接覚の呈示について述べている。

2.3 力覚マッピング

空間データを力覚情報に変換する場合、データに対してどのような法則でマッピングするか、ということは重要な問題である。触診シミュレーションなどを目的とする場合は、言うまでもなくリアリティの高い力学モデルを導入しなければならない。その一方、密度のかたまりを探したい、形状を知りたい、というような普遍性の高い呈示が目的の場合、それぞれの目的に適した力覚マッピングを模索することになる。ここでは、密度の固まりを探すといった分布探索、形状を理解するといった形状把握、分布の特異点を把握指示するといった空間指示、を呈示の目的として、各目的に適した力覚マッピング方法について考察している。

力覚マッピングにおける必要条件は、人間にとって理解可能な意味を伴っていることである。機械的に発生する物理量が人間の感覚に呈示されるが、この時の感覚がいかに直感的なメタファであるかが呈示のポイントとなる。本研究ではこのメタファとして、図2.1のような日常的にありふれた感覚を導入している。

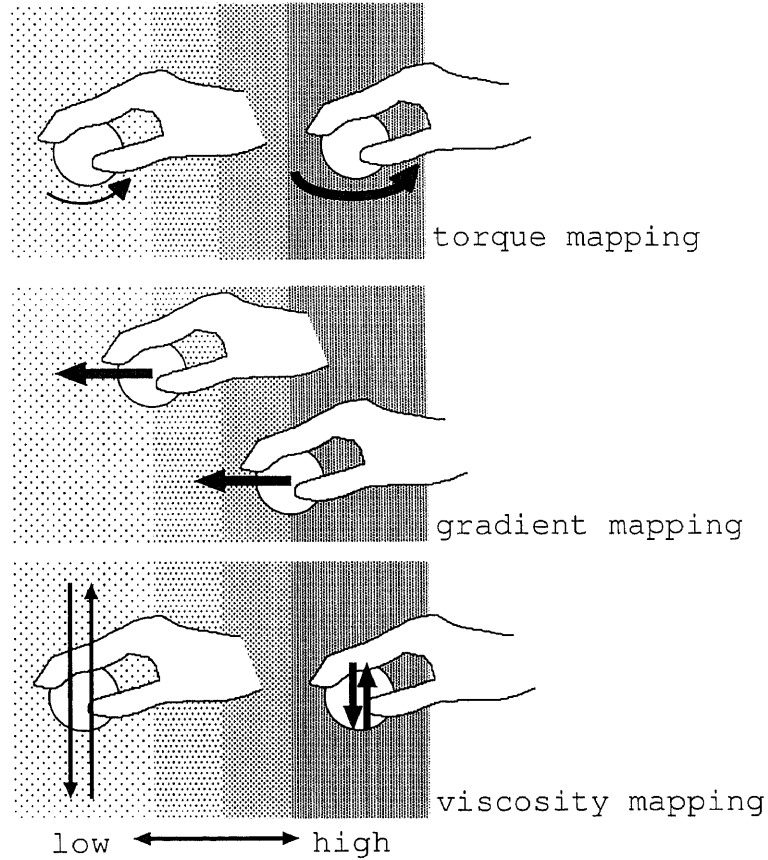


図 2.1: 各呈示方法の概念図

(a) トルクマッピング

トルクマッピングでは、スカラーデータの大小を回転力の強弱に割り当てる。データの強弱刺激を一定位置で受けることができるため、データ値の高低に関する特異点を正確に指示するのに適していると考えられる。これは医用データにおける腫瘍の位置を指し示す用途を想定している。

(b) 勾配マッピング

勾配マッピングでは、スカラーデータを空間的に偏微分し、算出された勾配ベクト

ルを並進力に割り当てる。データの変化に関する刺激を受容できることから、データの分布の大まかな形状を認識するのに適していると考えられる。これは医用データにおいて分布が劇的に変化する部分、例えば骨と脂肪の間に生ずる勾配を利用して、その形状を呈示することを想定している。実際にデータを力覚にマッピングする場合は、作用点の周囲のデータより作用点上の勾配を求める必要がある。

(c) 粘性マッピング

粘性マッピングでは、スカラーデータの大小を粘性力に割り当てる。粘性マッピングが先のマッピングと本質的に異なる点は、能動的な動作が必要となることで、操作範囲にざっと手を通してデータの分布の大まかな配置を認識するのに適していると考えられる。これは医用データにおいて分布が明らかに異なる部分、例えば切除された部分や中身が詰まった部分の空間的位置の見当をつけることを想定している。

以上のメタファを用いて、想定している目的に対してどの程度有効であるか、という比較実験をおこなう。こうした感覚量を機械的に発生させる場合、最初に確認すべきことは力覚呈示装置がどの位の物理量を出力できるか、また人間がどの位の物理量を感じ量として認識できるか、である。本研究では比較実験をおこなう前に、力覚呈示装置の出力特性について、人間側の感覚特性について考察している。その後、導入した力覚マッピングが想定された呈示目的に対してどの程度効果があるか、比較実験を通しておこなっている。

2.4 力覚呈示装置の概要

本研究で利用した力覚呈示装置は日商エレクトロニクス社の HapticMaster(図 2.2) で、把持部による 6 自由度の位置入力、力覚出力が可能である。把持部の可動範囲は半径 20[cm] のドーム型である。HapticMaster に関する機構的な入出力特性の詳細については付録 A の通りである。領域全体を利用すると機構的に出力の損失が大きくなるため、ここでは一辺 10[cm] の立方体を呈示領域として定義している。この領域での機構的出力は並進力呈示能力が 1100[g]、トルク呈示能力は 5100[g·cm](鉛直軸まわり) を保証している。また呈示力の分解能は最大呈示力に対して 1/120 程度である。一方、位置精度は A/D の量子化誤差に依存し一軸あたり ± 0.25 [mm] 程度である。したがって、今後用いるボリュームデータの格子間隔はこの量子化誤差より大きくとり、呈示領域において 1[mm] 間隔の $100 \times 100 \times 100$ としている。なお HapticMaster の制御には A/D ボードが装着された PC/AT 互換機を用いる。サーボレートは呈示内容や計算機環境によって異なるが、100~3000[Hz] 程度である。粘性などの時間成分を必要とする計測には、このサーボレートより逆算している。



図 2.2: HapticMaster

2.5 人間の刺激入力特性

機械的な出力特性は定量的に測定できるが、人間の入力特性は心理実験を通してその能力を調べる必要がでてくる。本章は2.3で述べてきたマッピング方法において2.4の装置を用いた場合、人間がどの程度入力刺激を弁別できるかを測定するものである。

ここで用いた手法は調整法と呼ばれるものである[17]。これは、標準刺激と明らかに刺激強度が異なる比較刺激を呈示し、被験者によって主観的に等しくなるように比較刺激の強度を変更してもらう方法である。この比較刺激と標準刺激のばらつき度合いが主観的等価値とされる。等価値が小さいほど弁別がするどいことを意味している。

実験は呈示領域の左半分を標準刺激、右半分を比較刺激として被験者に呈示し、キーボードを用いて比較刺激を変更してもらうというものである(図2.3)。比較刺激には標準刺激に対して明らかに大きいもの(下降系列)、小さいもの(上昇系列)をそれぞれ呈示する。結果は、標準刺激と調整された比較刺激の値という形で記録される。

結果をまとめる際には上昇系列と下降系列間で分散分析をおこなう。観測された分散比がF境界値を超えている場合は、系列間で有意、つまり尚早反応のため別の分布になったものとしてグラフに表記している。

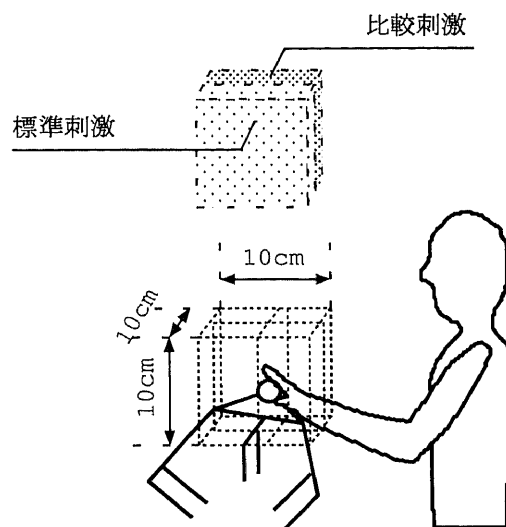


図 2.3: 調整法による刺激量測定実験環境

2.5.1 トルクマッピングの刺激入力特性

標準刺激は鉛直上向きベクトルの偶力 1200, 2400, 3600[g·cm] で、比較刺激を変更できる分解能は5[g·cm]とした。また、比較刺激の初期値は標準刺激に対して±1000[g·cm]とし、この刺激強度を力覚呈示装置で出力できること、違いを確実に弁別できることを予備実験にて確認している。被験者は学生7名で、3種類の標準刺激に対し上昇、下降の2系列を3度ずつランダムな順序に呈示した。

図2.4はトルクによる標準刺激とそれに対する被験者の回答のばらつき具合を示している。分散分析の結果、上昇、下降系列間で有意差があり尚早反応が観察された。そのため、グラフでは上昇系列、下降系列の各平均と、それぞれの散布度を表す確率誤差 ($2\sigma/3$) を示している。このグラフより、トルクは0を含めて絶対的に3段階程度の刺激強度を弁別できることが確率的にいえる。なお、一般に刺激強度と弁別の間には Weber-Fechner の法則や Stevens の法則が成り立つことが知られているが、相関関係は見られなかった。

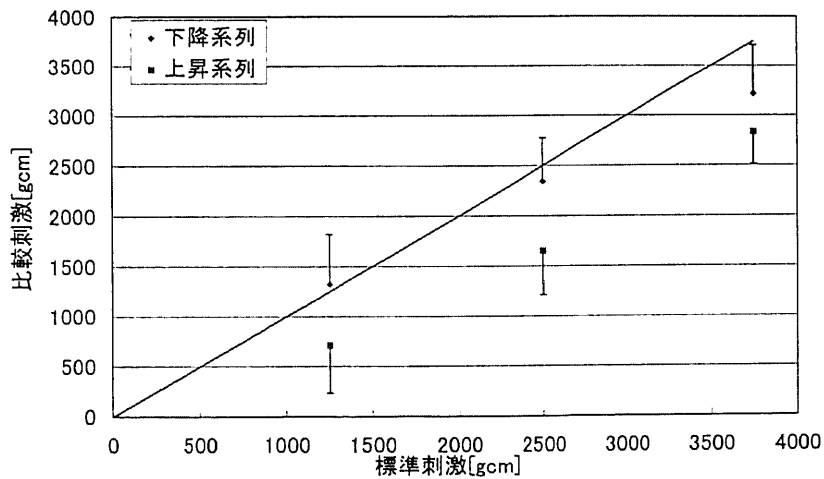


図 2.4: 調整法によるトルク刺激の等価値

2.5.2 勾配マッピングの刺激入力特性

勾配呈示では最終的に並進力が弁別の対象となる。標準刺激は被験者手前方向の並進力 250,500,750[g] で、比較刺激を変更できる分解能は 5[g] としている。また比較刺激の初期値は標準刺激 ± 250 [g \cdot cm] とし、確実に弁別できる刺激量である。これらの数値は呈示装置の出力特性と予備実験によって決定している。被験者は学生 7 名で、3 種類の標準刺激に対し上昇、下降の 2 系列を 3 度ずつランダムな順序に呈示する。

図 2.5 は並進力による標準刺激とそれに対する被験者の回答のばらつき具合を示している。分散分析の結果、上昇、下降系列間で有意差があり尚早反応が観察されたため、トルクの場合と同様に表記している。このグラフより、並進力は 0 を含めて少なくとも 4 段階以上の刺激強度を弁別できることが確率的にいえる。

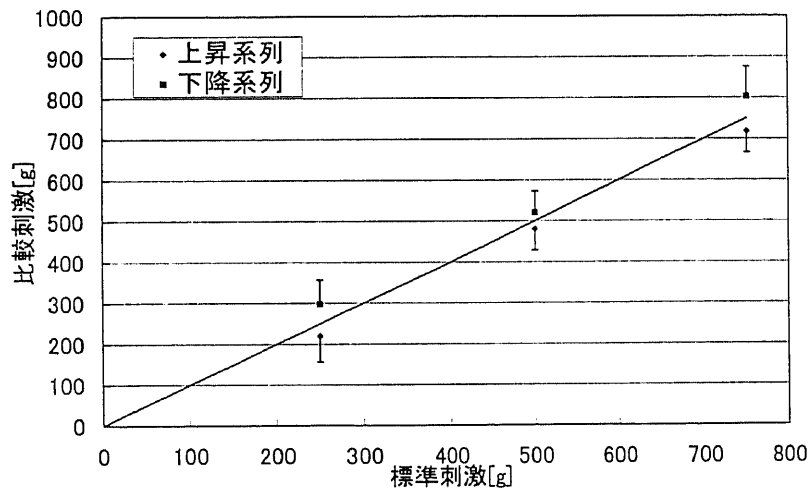


図 2.5: 調整法による並進力刺激の等価値

2.5.3 粘性マッピングの刺激入力特性

標準刺激は、-1000,0,1000,2000,4000[g/s] で、比較刺激の変更できる分解能は 3.3[g/s] としている。負数は操作方向に力が加わって加速する、負の粘性を意味している。被験者は学生 9 名で、上昇下降 2 系列についてランダムに呈示する。

分散分析の結果、上昇系列、下降系列間で有意差がなかったため、グラフ (図 2.6) では系列をまとめた平均と、確率誤差を示している。標準刺激に対する回答は、いずれの刺激強度においても大きめに見積もられる傾向にあった。このグラフより、粘性力は 0 を含めて少なくとも 6 段階以上の刺激強度を弁別できることが確率的にいえる。なお、標準刺激の強度と弁別閾の関係に相関が見られ、 $2\sigma/3$ を弁別閾の測度とした場合の Weber 比は 0.34 であった。

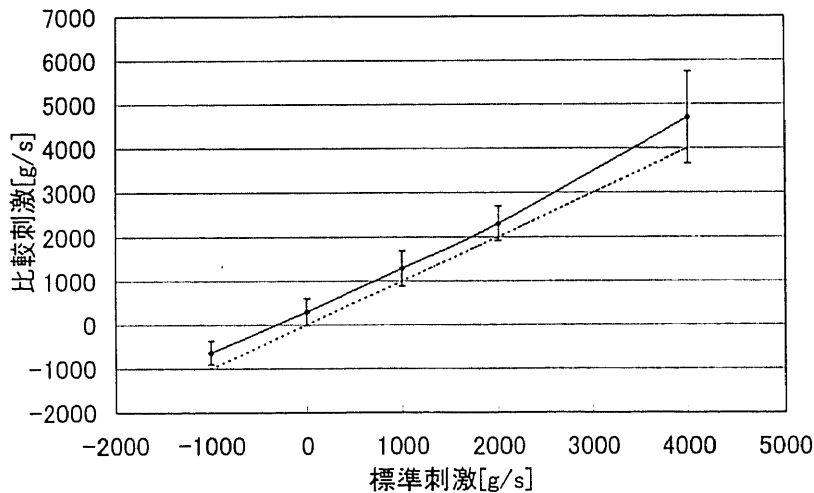


図 2.6: 調整法による粘性刺激の等価値

2.6 力覚マッピングによるモデル呈示実験

これまでとりあげてきた各マッピング方法には、導入の際にそれぞれ想定した呈示目的があった。本章ではモデル実験を通じて、各マッピング方法がその呈示目的に適しているかどうかを、各マッピング間の比較という形で考察する。

2.6.1 分布探索モデル実験

分布探索モデル実験では、データにおいて周囲と分布が明らかに異なる部分、例えば医用データにおける腫瘍を探索することを想定している。直径20[mm]の球形の分布を探索し、発見したらその領域内で把持部のスイッチを押すというもので、探索開始からスイッチが押されるまでの時間を評価の対象としている。力覚のマッピング方法は、20[mm]球の分布を持つボリュームデータを用意し、その領域が各呈示の最大刺激強度(トルク5.1[kg·cm]、粘性4.0[kg/s]、周囲が0)となるようにしている。また勾配の場合は境界で最大強度(1.1[kg])を発生するようにしている。被験者は学生5名で、分布の位置をランダムに変えながら各マッピング方法について5回ずつ、各人で計15試行おこなった。

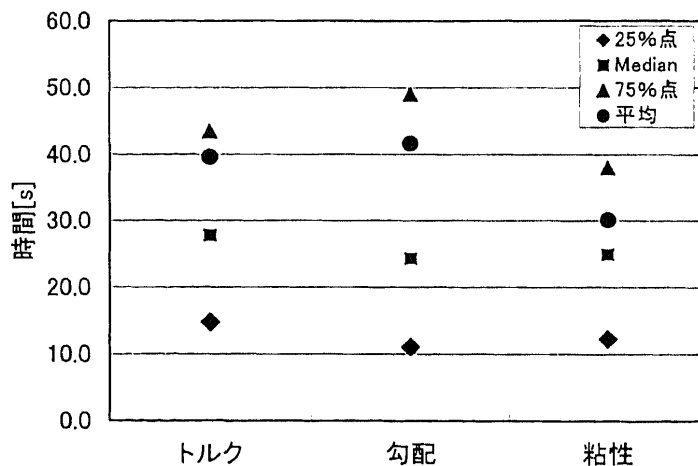


図 2.7: 探索に要した時間

探索に要する時間をヒストグラムより解析した結果、ランダム到着にもとづいた指

数分布にしたがっていることがわかった。図 2.7 は探索に要した時間の分布の四分位点と平均を表している。遭遇する確率としては3つとも同じであるはずなので、遭遇はしても発見できなかった、見失ったといった理由で差がついていることになる。

なお主観的に探索しやすい順序を被験者にたずねたところ、わかりやすい順に(トルク > 粘性 > 勾配)が2名、(勾配 > トルク > 粘性)、(勾配 > 粘性 > トルク)、(粘性 > トルク > 勾配)がそれぞれ1名であった。

2.6.2 形状把握モデル実験

形状把握モデル実験では、データにおいて分布が劇的に変化する部分、例えば医用データにおける骨-脂肪間の形状を呈示することを想定している。ここでは球や円柱、直方体などをボリュームデータで呈示し、形状を把握したらキーボードによってその形状を回答してもらう。把握までの時間とその回答を記録の対象とする。力覚マッピングの方法は(1)と同様で、プリミティブは一辺4[cm]の立方体、その大きさにすっぽり収まる円柱と球である。被験者は学生5名で、プリミティブの種類と各マッピング方法について2回ずつ、各人で計18試行おこなった。

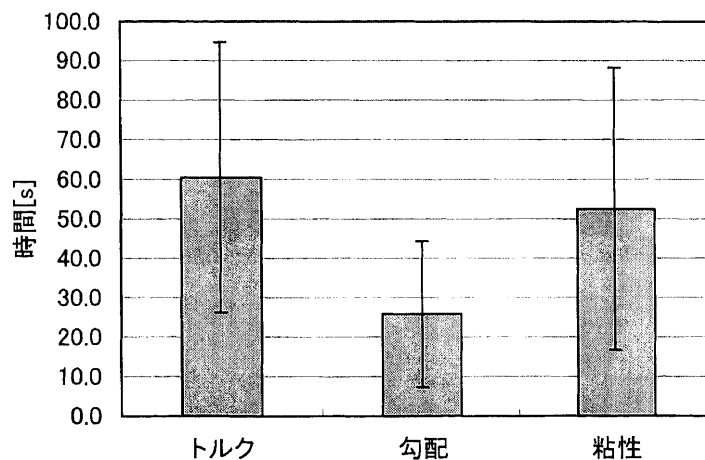


図 2.8: 形状把握に要した時間

形状把握に要する時間を解析した結果、おおむね正規分布にしたがっていることがわかった。各マッピングにおける形状把握の平均時間および標準偏差を図 2.8 に示す。

また各マッピングによって呈示された形状に対する回答を表2.1に示す。これによると勾配が最も早く正確に回答できることがわかる。把握時間に関して、各呈示間で平均の差の検定をおこなったところ、トルクと勾配の間、勾配と粘性の間で5%の有意差があったが、トルクと粘性の間ではみられなかった。またトルクマッピングでは、立方体を円柱、円柱を球と回答する傾向にある。平面を呈示しても曲面と把握されやすいようである。なお、主観的に把握しやすい順序を被験者にたずねたところ、5名とも(勾配 > 粘性 > トルク)という順序であった。

トルク		回答形状		
		立方体	円柱	球
呈示形状	立方体	4	2	4
	円柱	1	4	5
	球	1	0	9

勾配		回答形状		
		立方体	円柱	球
呈示形状	立方体	10	0	0
	円柱	0	10	0
	球	0	0	10

粘性		回答形状		
		立方体	円柱	球
呈示形状	立方体	9	1	0
	円柱	3	5	2
	球	3	7	0

表 2.1: 呈示された形状に対する回答

2.6.3 指示精度モデル実験

指示精度モデル実験では、データの特異点、例えば医用データにおける腫瘍などを正確に指示することを想定している。周囲にいくほど比例的に値が小さくなるようなボリュームの球を呈示し、その領域の中心とおぼしき部分を指示するもので、中心からの位置誤差を評価の対象としている。探索の手順をなくすため、呈示領域内で把持部のボタンを押すと把持部の前方1[cm]に指示目標となるボリュームの球がつけられ

る。球の直径は10[mm]で、(1)と同様に各呈示の最大刺激強度が球の中心に、周囲が0となるようにマッピングしている。被験者は学生5名で、各マッピング方法について5回ずつ、各人で計15試行おこなった。

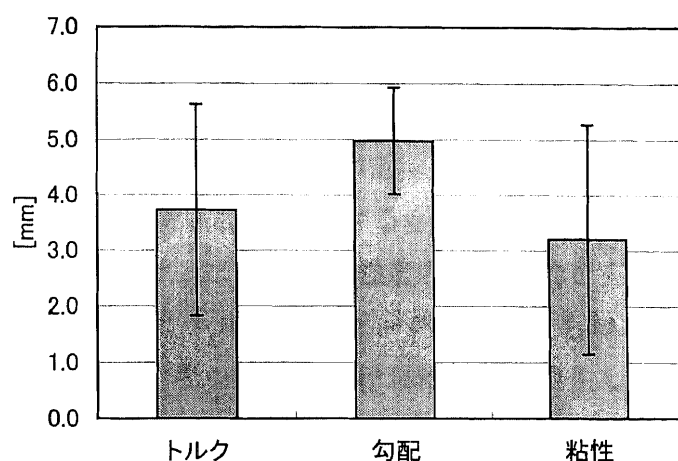


図 2.9: 指示精度

解析の結果、指示誤差はおおむね正規分布に仕上がっていることがわかった。図 2.9 は指示誤差の平均と標準偏差を示している。各呈示間で平均の差による検定をおこなったところ、トルクと勾配の間、勾配と粘性の間で5%の有意差があったが、トルクと粘性の間ではみられなかった。

なお、主観的に把握しやすい順序を被験者にたずねたところ、(トルク > 勾配 > 粘性)が3名、(トルク > 粘性 > 勾配)が2名であった。

2.6.4 モデル呈示実験における考察

本研究では、2.3で述べたように密度の分布探索では粘性マッピング、形状の把握では勾配マッピング、データの正確な指示にはトルクマッピングが適しているという想定であった。

分布探索モデル実験では、探索に要した時間を評価項目として、粘性が探索に秀でていることがわかった。しかし、トルクや勾配のほうが探しやすいといった被験者の感想も得られた。粘性の場合、特異点にさしかかると移動を妨げられる力が働くため、

その場にとどまりやすく、特異点を探索しやすい。一方、勾配やトルクでは特異点でドラスティックに力覚が発生するため、被験者にとって特異点が感じられやすい。こうした理由から以上のような結果が得られたものと考えられる。

形状把握モデル実験では、形状把握に要した時間とその回答を評価項目とした。その結果、時間的にも正答率の面からも、さらに被験者の感想からも勾配マッピングがもっとも形状把握に秀でていることがわかった。また、トルクマッピングで直線的な形状を呈示する場合、対象が曲面であると誤認識されやすいことも明らかとなった。

指示精度モデル実験では、分布指示における空間的精度を評価項目とした。その結果、粘性マッピングとトルクマッピングが同程度の指示能力を有していることがわかった。一方、全被験者が主観的にトルクマッピングがもっともわかりやすいと答えていた。粘性マッピングは本質的に手を動かさなければ粘性が発生しないため、刺激強度がわからないはずである。しかし本力覚呈示装置では、手を固定したつもりでもリンクのポテンシオメータの誤差からわずかな移動量が検出される。そこで発生する微小移動量が微少な粘性を生み、モータに出力される。この出力は非常に小さいため、モータのバックラッシにより、リンクは動かないがギヤが微少量振動し、ノイズ音や振動として出力されてしまう。このノイズは粘性が高いほど音量が大きい。こうした聴覚や振動情報などの付加的情報が指示精度を高めたものだと考えられる。

2.7 近接感覚マッピング

これまで述べてきた力覚マッピングは、空間データの分布や形状、指示などの、データに対するインタラクションが主な目的であった。本節ではこれまでの力覚マッピングの目的と異なり、データより侵入してはならない領域を割り出し、物理的に侵入できなくするという目的のマッピング方法について述べている。このマッピング方法は、データに近づくと反力を還すという、近接覚を表現するものである。

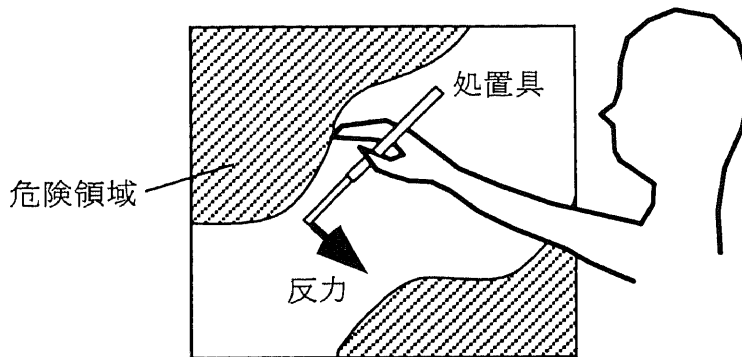


図 2.10: 近接感覚表現

2.7.1 近接覚とは

外科手術に計算機を利用する際、画像誘導外科と呼ばれる手技が活用されている。これは患者の医用画像より仮想空間を生成し、施術者にとって直感的で有益な情報を提供したり、適切な判断を引き出すものである。このイメージ空間を構成するための必要条件として、伊関らはイメージ空間と実空間との間で位置の対応づけ (registration) による融合が重要であると指摘している [18]。術中において患部とモニターを交互に見ているようでは都合が悪いというわけである。本研究では、このような手術環境を想定し、視覚情報だけでなく力覚情報を導入することを提案している。ここでは力覚情報を危険領域の表現に用いることを試みている。すなわち、処置具の先端が近づいた場合に反力が還ってくることによって、接触する前に危険を感じることができわけである (図 2.10)。このような力覚呈示を行うことにより、術時の安全性が向上する

ことが期待できる。またこの手法は手術計画や訓練用シミュレータへの応用も有効であろう。

2.7.2 危険領域の力覚表現

ここでは危険領域の力覚呈示を目的としていることから、前述の呈示をおこなうことは必ずしも最適とはいえない。本研究では実画像から危険領域を2値化することと、危険領域への干渉処理を力覚の作用点周囲で監視する方法に着目し、効率的な呈示方法を模索した。

(a) 危険領域の2値化

通常のボリュームレンダリングでは元データを忠実に再現するという性質上、情報を損なうことなく3次元格子空間に格納していく。しかし本研究は危険領域の呈示を目的としているため、必ずしも全データを格納する必要はない。むしろ危険領域かそうでない領域かを明確に区別しておくほうが計算機上の処理効率の点から望ましい。したがって画像データから危険領域に該当する部分を抽出し、2値画像として3次元格子空間に格納すればよいことになる。局所的な干渉処理をおこなう限り、格子空間を大きくしても処理速度に影響はないという点を利用すれば、格子の解像度を力覚呈示装置の位置精度程度に設定できる。元画像の解像度が低い場合には2値化処理前に内挿しておく必要がある。

(b) 操作点周囲の干渉処理

ユーザの操作点が、(a)で設定した危険領域に近づいてくると、危険領域を避ける方向に反力を呈示し、被験者に警告を与えなければならない。そこで、操作点から危険領域の監視をおこなうために、操作点の周囲に球状の格子テーブルを用意しておき、この格子に危険領域が重なった場合、力覚が生成されるようにすればよいことになる。

また操作点が危険領域に近づくほど、操作点が領域を侵す危険が増すわけであるから、反力もそれに応じて大きくすることによって、危険領域の近接を表現することも可能となる。これに対しては操作点近傍の格子に重みを付けておくことで実現できる(図 2.11)。

この監視領域の重み付け格子を、作用点の中心が(0,0,0)となるようにとる。作用点

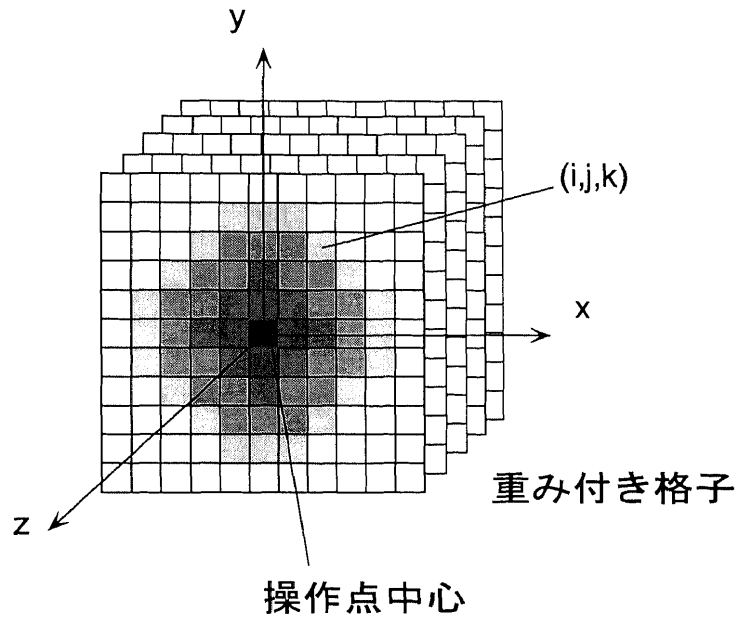


図 2.11: 操作点近傍の格子テーブル

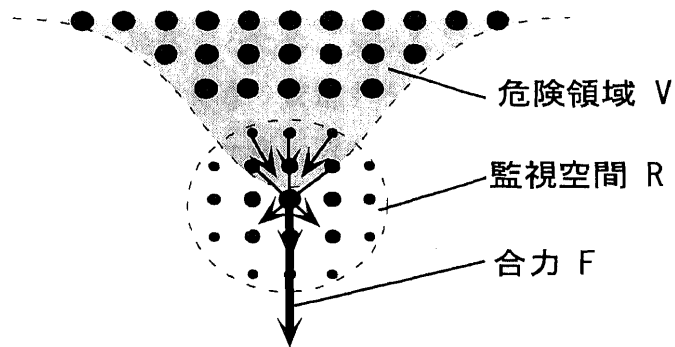


図 2.12: 生成される力覚

の中心から R_{in} の距離に監視が及ぶものとする、

$$R : (i \cdot \vec{e}_x)^2 + (j \cdot \vec{e}_y)^2 + (k \cdot \vec{e}_z)^2 \leq R_{in}^2$$

となる監視領域 R が定義される。 $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ は格子の間隔を表わすベクトルである。このときの重みは、作用点からの距離によって減衰するガウス分布に従い、

$$D(i, j, k) = A \cdot \exp\left(-\frac{(i \cdot \vec{e}_x)^2 + (j \cdot \vec{e}_y)^2 + (k \cdot \vec{e}_z)^2}{r}\right)$$

である。 A, r は監視領域の重みをあらかず減衰定数を示す。ここで生成された監視領域は、作用点の位置に応じてデータ空間上を移動する。例えば、データ空間上 V において作用点がデータ空間上の格子 (l, m, n) にあるとき、格子テーブルによって生成される力覚 \vec{F} は、

$$\vec{F} = -k_p \cdot \sum_{R \in (i, j, k)} D(i, j, k) \cdot V(l + i, m + j, n + k) \cdot \frac{(i \cdot \vec{e}_x, j \cdot \vec{e}_y, k \cdot \vec{e}_z)}{\sqrt{i^2 + j^2 + k^2}}$$

で表される。 V は危険領域を 1 で表わす 2 値画像のデータ空間で、 k_p は最大反力に関する定数である。図 2.12 は危険領域と監視領域によって生成される力覚の平面的な模式図である。

この操作点周囲で監視する範囲 R とそれにとまなう定数については、呈示の精度と危険とのトレードオフにある。つまり、監視半径を小さくすることは呈示精度の向上につながるが、危険領域との距離の余裕が小さくなるため、侵襲が生じやすくなる。短距離で極端な反力の変化が発生するため、発振も生じやすい。逆に監視半径を大きくすると危険領域との距離が大きくなり安定するが、呈示精度が低くなる。格子テーブルの格子数は監視半径の 3 乗のオーダで増加するため、更新速度の点から自ずと監視半径の上限値が制限される。このトレードオフについては実装環境と呈示データに依存するため、実装段階で妥協点を見いだす必要がある。

2.7.3 実装方法

ここでは前節で述べてきた方法を実装するにあたって、本システムで安定した呈示を実現するための具体的な方法について述べる。

(a) 格子空間の設定

最初に危険領域を定義する格子空間の大きさと格子間隔について決める。本研究で用いた力覚呈示装置の位置精度から格子間隔を1[mm]とし、実際にデータが存在する操作空間を200×200×200[mm]の20[cm]四方とした。

(b) 監視領域の大きさの決定

2.7.2で述べたように、監視領域の大きさを決めるためには精度と安全性、計算機の処理能力から妥協点を探る必要があった。そこでまず、監視領域をどの程度まで大きくする必要があるかを調べた。監視領域が小さすぎると、ガウス分布による重み付けが意味をなさなくなるため、定数の調整の余地がなくなってくる。つまり定数に関わらず、必ず危険領域に侵入したり撃力によって発振したりする状態ができるわけである。監視領域の重み付けには、危険領域と操作点との間で緩衝的の役割が求められるため、この状態は避けなければならない。ここでは実際に壁面状のモデルデータを用いて、監視領域の半径を1mmから徐々に大きくしていき、定数を調整しながら呈示の状態を観察した。著者による試行の結果、監視領域の半径が[3mm]程度あれば定数調整の余地があり、重み付けが緩衝の役割を果たすことがわかった。

次に本実装システムでの処理能力を測定するため、監視領域の大きさと力覚更新速度の関係性を調べた。表2.2は監視領域の半径の大きさと、そのときの格子点数、力覚更新速度の実測値である。

半径 [mm]	格子数 [個]	力覚更新速度 [Hz]
1	7	117
2	33	115
3	123	110
4	257	109
5	515	102
6	925	101
7	1419	97
8	2109	89

表 2.2: 監視領域の大きさと力覚更新速度の関係

監視領域の大きさの上限は、設計課題の力覚更新速度の点から、100[Hz]程度を更新速度の許容できる下限値とし、この値から最大値として半径6[mm]を導いた。結果と

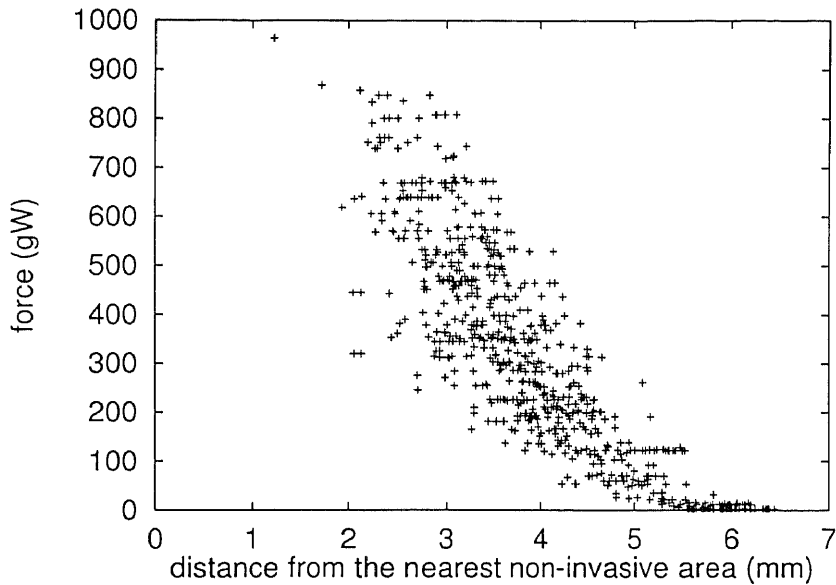


図 2.13: 危険領域への距離と呈示反力

して、監視領域の半径は3[mm]から6[mm]の間であればよいことになる。監視領域が大きいほど緩衝地帯が大きくなるため、危険領域への侵入が生じにくくなる。安全面を鑑み、呈示精度は後に改めて計測することにして監視領域を6[mm]とした。

(c) 反力の定数の設定

これまでの試行は著者の操作によるものであったが、著者以外の操作でも、また実データに対しても、危険領域に侵入しない安定した呈示が求められる。そこで、研究室の学生3名に実際のデータを呈示し、最大反力などのパラメータを繰り返し変更しながら、監視空間の重み付け定数を算出した。素材としたデータは人間の頭部のCTデータで、2値化の際危険領域として空洞部を除く頭部全体を定義した。図 2.13 は試行によって淘汰された定数 ($r = 35.0$ 、 $A = 0.017$ 、 $K_p = 500$) を利用し、比較的なだらかな頭部外周部をなぞった時に生じた反力で、横軸は操作点と最も近い危険領域との距離、縦軸は発生している反力ベクトルの大きさである。危険領域に近づくほど大きな反力が発生している。

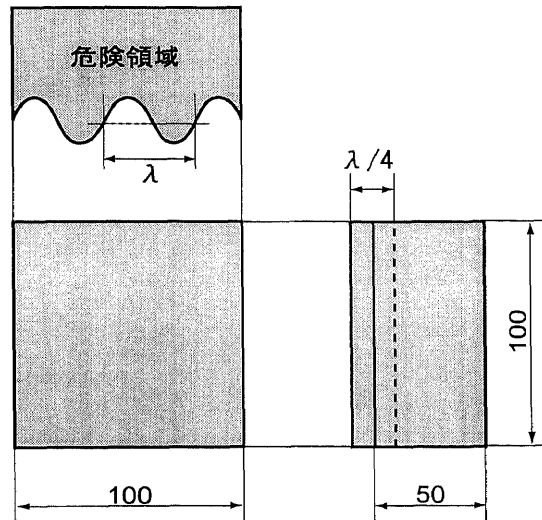


図 2.14: 本実験で用いた危険領域

2.7.4 呈示性能実験

実験目的

先に決定してきた定数を利用すると、比較的なだらかな表面をもつ危険領域に対して侵襲しないように力覚を呈示することが可能となった。しかし、監視領域の大きさがあるため精度の面から問題が出てくる。つまり尖った形や細かい形は鈍って呈示されたり、わずかな力で誤って危険領域に侵入してしまうからである。ここでは前章で決定してきたパラメータ等を用いて、どの程度の空間周波数をもつ形状を安全に呈示できるかを測定することを目的としている。

実験方法

実験は、断面が正弦波である図 2.14 のような危険領域のデータをあらかじめ用意しておき、被験者の正面に呈示して表面をなぞってもらうというものである。

データには半径 6[mm] の監視領域に対し、波長が 12,18,24,30,36[mm] で振幅が波長の 1/4 の正弦波を用い、正弦波を境界として危険領域を格子空間に格納する。被験者には実験前に危険領域呈示の主旨を伝えておき、反力に逆らったなぞりかたをなるべく避けるように心掛けてもらう。学生 8 名の被験者に、5 種類の壁面に対して順番を変えながら 3 度ずつ呈示した。

実験結果

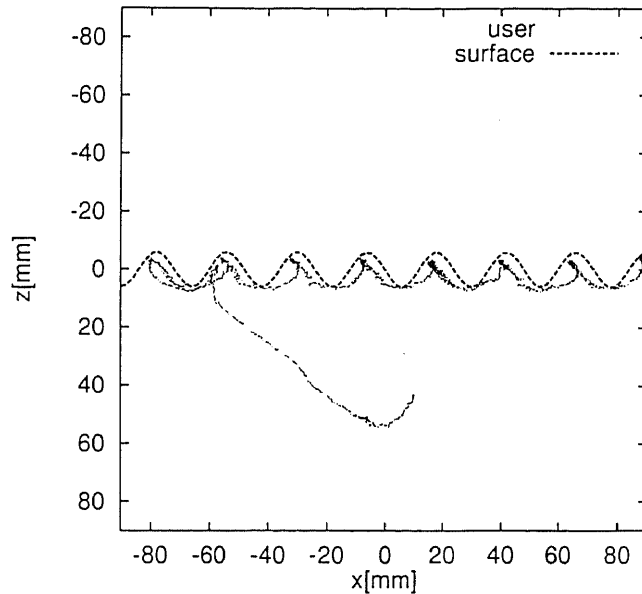


図 2.15: 軌跡と危険領域の壁面 (波長 24mm)

図 2.15 は波長が 24[mm] のときの軌跡データと呈示領域を表わしている。この図は危険領域の壁面の俯瞰図で、点線より Z 軸負方向に危険領域が定義されている。この被験者の場合、危険領域に侵入することなく表面をなぞっていることが観察できる。

図 2.16 は危険領域を被験者がなぞっているときの危険領域までの距離の平均と標準偏差を示している。なお、監視領域が危険領域と干渉せず安全な方向に大きく離れている場合は、力覚には関係ないためデータより除いている。標準偏差は波長が大きくなるほどわずかに小さくなる傾向にあった。これは表面形状がなだらかになると、力の変化が緩やかになり、操作点が境界に対して安定して移動できることを意味している。また波長が大きくなるにつれて危険領域への侵入確率が小さくなることがグラフから読み取れる。安全性の指標となる 3σ (49.865%点) を用いると、平均から 3σ の位置はいずれの波長においても 0.0 以上であり、確率的には安全であることが確認できた。

危険領域への侵入の安全性は確認できたが、危険領域の境界をどの程度認識し、境界に沿って正確になぞれたか、という評価も安全性を議論するために必要な項目である。図 2.17 は操作点の軌跡と壁面表面の形状の相関係数である。解析に用いた操作点の軌跡は、監視領域が危険領域に干渉し始めてから試行が終了するまでを含んでいる。

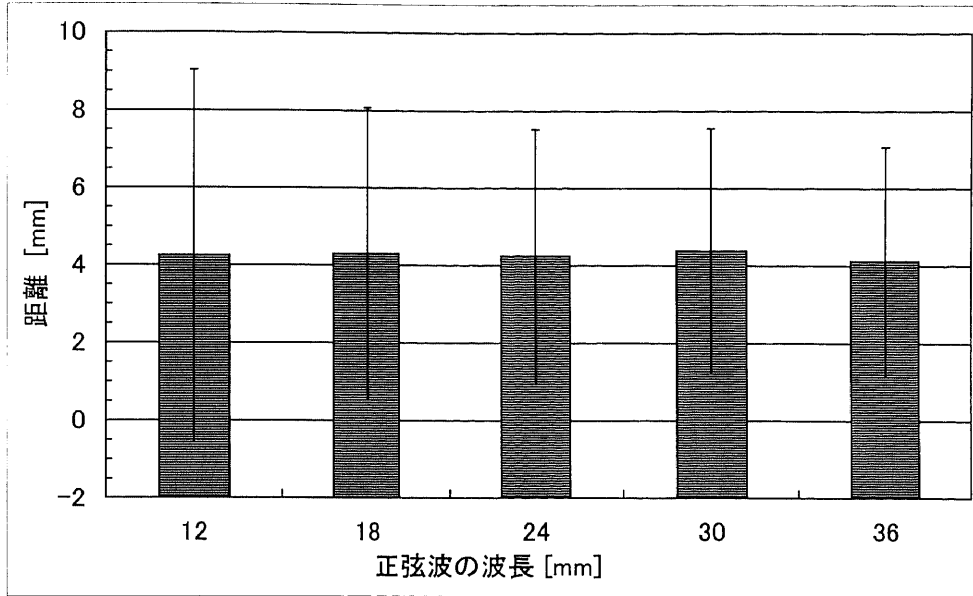


図 2.16: 危険領域の表面波長と表面に対する操作点の距離

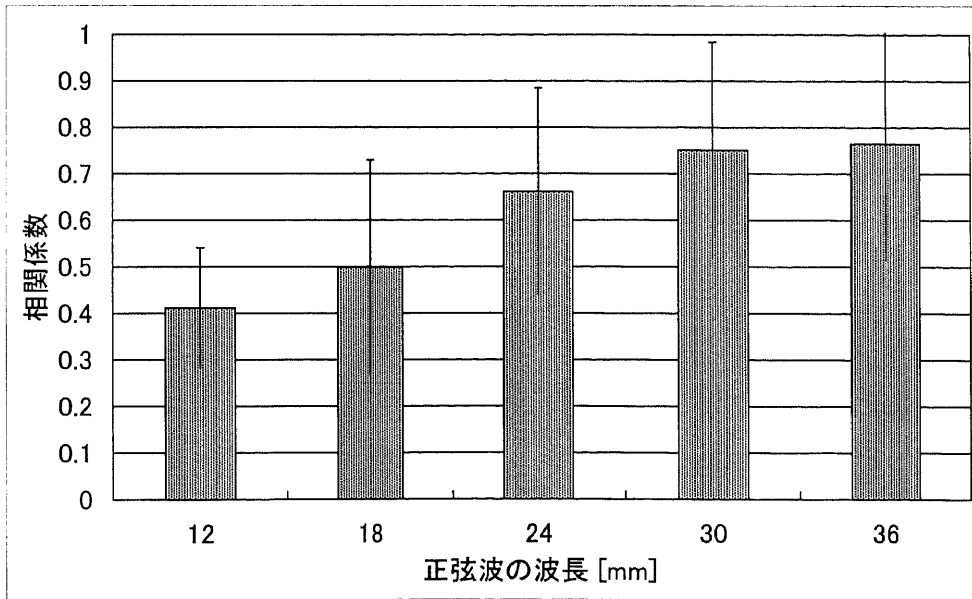


図 2.17: 危険領域の表面波長と表面に対する軌跡との相関関係

ピアソン相関係数 r は、軌跡の位置を (x_i, z_i) 、表面の位置を (x_i, Z_i) とするとき、

$$r = \frac{n \cdot \sum_i (z_i \cdot Z_i)^2 - \sum_i z_i \cdot \sum_i Z_i}{\sqrt{n \cdot \sum_i z_i^2 - \sum_i Z_i^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum_i Z_i^2 - \sum_i z_i^2}}$$

で算出できる。波長が大きくなるほど正の相関が強くなり、特に波長が 30[mm] 以上の時には相関係数が 0.7 以上であることから強い相関があると言える。つまり表面波長が大きくなるにしたがって、危険領域の境界をなぞりやすくなることを意味している。

2.7.5 危険領域の力覚表現によるナビゲーション実験

実験目的

危険領域を力覚表現することによって得られるメリットは、危険領域を侵すことなく安全に所定の位置に処置具を移動できることにある。これは実際の手術時、手術計画、手術シミュレータにおいて有効な手法になると考えられる。ここでは人間の脳の CT データを用いて、口から食道にかけての空洞部分を誘導するというナビゲーション実験をおこない、危険領域を力覚表現することの有意性を検証している。

視覚呈示

ナビゲーション実験では力覚呈示に加え視覚呈示もおこなった。危険領域を表す 2 値画像から、ボリュームグラフィックスの技法を応用して危険領域の様子を立体的に可視化するものである。図 2.18 はその表示画面例である。中央に表示されている黒丸が操作点で、操作点を中心とする周辺部分が局所的に表示されるようになっている。これ

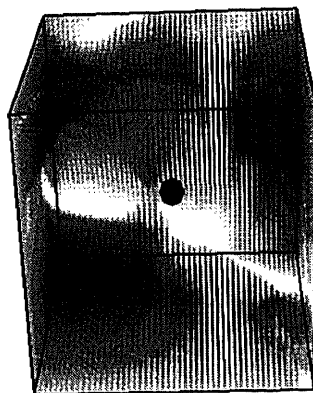


図 2.18: 危険領域の可視化

はあたかも操作者が小さくなって患部を立方体のセルで切出し、操作点を俯瞰する視点に似ている。なおボリュームグラフィクスによる視覚呈示は計算機に負荷を与えるため、局所的な表示は力覚更新速度の低下をおさえるのにも都合が良い。実験ではこの可視化情報を立体視で呈示する。

実験方法

実験に用いた素材データは2.7.3で用いたものと同じ頭部CT画像である。画像の精度に対して本装置の呈示精度が低くなるため、頭部の一部を拡大し、元データから線形補間することで、格子空間の解像度を得ている。ナビゲーション実験に利用した経路には人間の口から食道にかけての空洞部で、被験者には実験前にあらかじめ経路の説明をしておく。被験者は学生5名で力覚と視覚によるナビゲーションと、比較対照実験として用意した視覚のみによるナビゲーション実験とを交互に3度ずつ試行してもらった。

実験結果

5人の被験者による操作経路を解析し、最も近い危険領域までの距離を平均したものを図2.19に示す。

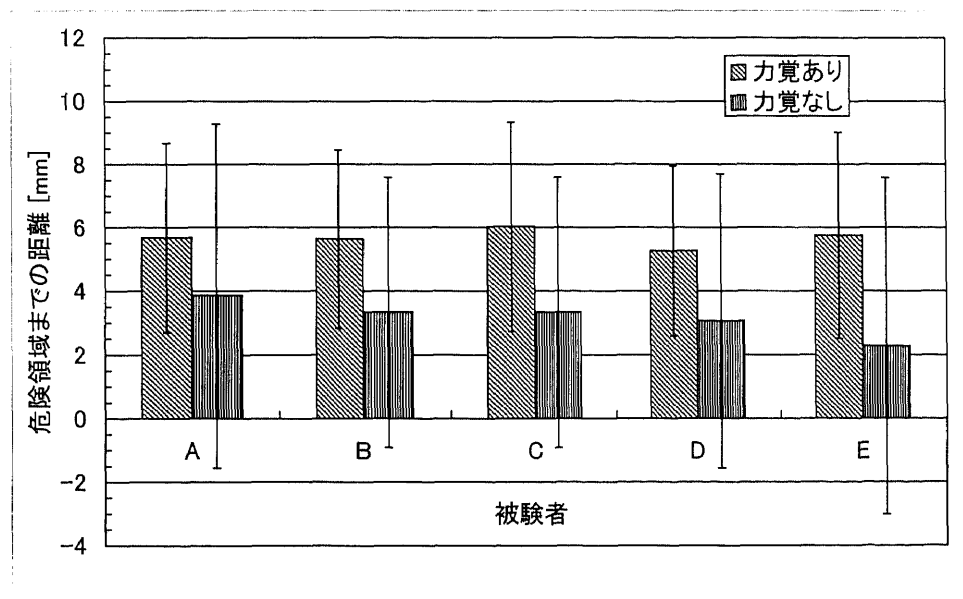


図 2.19: ナビゲーション実験における危険領域と操作点との距離

力覚と視覚呈示によるナビゲーションでは、5名の被験者全員が危険領域に侵襲する確率が明らかに小さくなっていることがわかる。逆に視覚呈示のみによるナビゲーションでは、危険領域までの距離にばらつきがみられ、侵襲確率が大きくなっている。なお力覚がある状態とない状態での距離の平均の検定をおこなったところ、 t 値は8.88、危険率1%の t 値が3.74であり、有意差が見られた。

2.7.6 近接覚呈示における考察

ボリュームデータから近接覚表現することの利点は、サーフェスモデルでは定義できないような複雑な形状を呈示することができるという点である。本研究では医学上の危険領域の表現という目的で呈示をおこなってきた。しかし医療応用分野に限らず、複雑な形状の力覚呈示を必要とする分野は少なからずあるはずである。例えばデザインに応用する場合、危険領域の表現を物体として表現し、2値画像を作用するような仮想の工具を作るだけで、自由自在に3次元の形状を作ることができるだろう。

第3章 視覚呈示に関する要素技術

3.1 没入型ディスプレイ

人工現実感における視覚呈示要素技術は、HMD(頭部搭載型ディスプレイ)をイメージリーダとして向上しつつある。数年来、軽量化や高解像度化などの技術的ハードルをクリアし、空間センサと組み合わせることによって本格的な実用化がすすんできた。HMDは頭に装着するという性質上、装着者がどの方向を向いても一定範囲の映像を提供することができる。しかしその反面、装着が煩わしく同時に複数人で利用できないといった欠点もある。人間の視野角は周辺視を含めると水平で200度、垂直で170度あるといわれており [3]、これらの周辺視をカバーするようなHMDを製作するには、現在の技術水準では至難の業である。

これらの問題に対して、大型のスクリーンで人間の周囲を覆うという映像呈示方式が提案されてきた。この方式は、空間没入型ディスプレイと呼ばれており、イリノイ大学のCAVE[19]を代表として盛んに研究されつつある。CAVEでは立方体の前、左右、下の4面スクリーンから構成されており、それぞれのスクリーンに対して背面からプロジェクタによって映像を投影している。これによって立方体の中にいる観察者の全立体角の2/3を覆うことができる。また、東京大学の廣瀬らは、前、左右、上の4面で構成されるはいれるテレビ[20]を開発し、さらに評価検討を重ねて5面(前、左右、上下)からなるCABIN[21]を設計、開発している。

没入型ディスプレイにおける最も深刻な問題は、プロジェクタからスクリーンに投影するためのバックヤードをいかに小さくするかである。スクリーンが大きくなるほど投射距離が長くなるため、その分バックヤードを大きくとる必要がでてくる。当研究室ではスペースユーティリティーの点から、最も投影効率のよい形状を模索し、全天周菱形12面体ディスプレイを設計、開発した[22]。著者はこの開発にソフトウェア面で携わり、12面体ディスプレイにコンピュータ映像を投影するためのシステムを開

発した。

12面体ディスプレイでは、観察者の視点がちょうど多面体の幾何中心に来るように設計されるが、12面体には4本の稜線が集まる頂点が存在し、その部分で画像の不連続による不自然さが発生することがわかった。また周りを見回す動作をおこなう場合、目からスクリーンまでの距離は一定であることが、眼球の調整系にとっても望ましく、これらの要求を満たす形状は必然的に球面となる。そこで次の段階として、球面によるディスプレイシステムを開発した。球の一部分からなるスクリーンの背面、つまり凸面側からプロジェクタで映像を投射し、観察者は凹面側で映像に臨む、というものである。球面の外側からプロジェクタで映像を投射すると、曲面への投射による歪みが生じ、正常な映像を投影するにはあらかじめ元の画を歪ませなければならない。

さらにこれを改良して、1台のプロジェクタから全天周スクリーンに投影するシステムを開発した。プロジェクタの映像を凸面鏡によって反射させ、球面スクリーンに結像するように光学設計をおこない、全天周型球面ディスプレイを製作した。

本章では3.2節で菱形12面ディスプレイ、3.3節で背面投射球面ディスプレイ、3.4節では全天周型球面ディスプレイについて述べていく。

3.2 菱形12面体ディスプレイ

3.2.1 12面体ディスプレイの概要

菱形12面体は互いに合同な12枚の菱形からなっており、没入型ディスプレイとしてはピクセル効率、容積効率の点から優れた形状である[22]。ピクセル効率とは、プロジェクタが投影するアスペクト比4:3の映像を、スクリーンに対してどれくらいの割合が有効に利用されるかというものである。スクリーンが正方形の場合だと75%、菱形だと71%となる。容積効率とは、スクリーンに囲まれている有効容積(多面体の容積)と、プロジェクタの光路のスペースとなる無効容積の総和との比を表している。スクリーンの縦の長さを1とするときの、スクリーンとプロジェクタとの距離を D とすると、立方体の場合は $0.5/D$ 、菱形12面体の場合はおよそ $0.867/D$ となる。

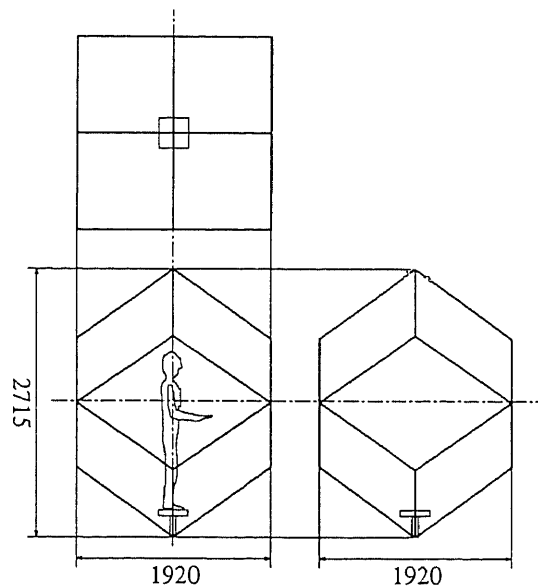


図 3.1: 菱形12面体ディスプレイの構造

図 3.1 は菱形12面体による全立体角ディスプレイの概略図で、図 3.2 は試作された菱形12面体ディスプレイの概観である。菱形の一辺の長さは1200[mm]で、全18本のアルミアンゲル材を用いて菱形のフレームを構成している。フレームには菱形に切り出したトレーシングペーパーを貼り付けてあり、これをスクリーンとしている。スクリーン中央には透明アクリル製の台があり、その上に人が立ってスクリーンを一望

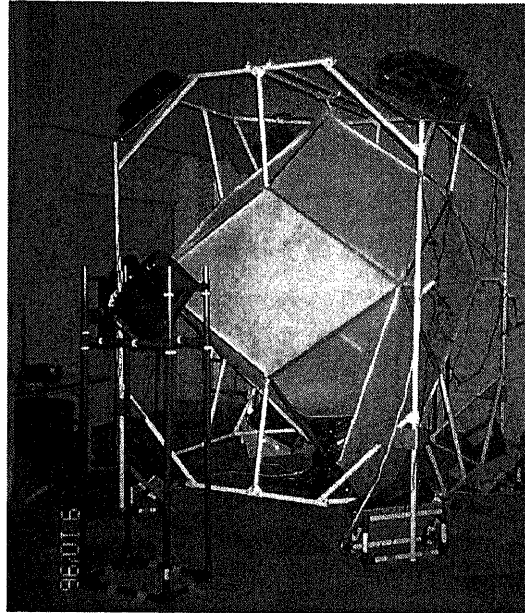


図 3.2: 菱形 12 面体ディスプレイ

できるようにしている。スクリーンのフレームやプロジェクタは、周りに組んである外枠によって固定されている。映像を投影するプロジェクタはカシオの FV600(画素数 250000) で、各面に対して垂直かつ面の中心に光軸が来るように配置されている。投影効率を最も良い状態にするため、菱形の長辺がプロジェクタの対角になるよう、光軸周りに $\tan^{-1}(\frac{3}{4})$ 、約 36.8 度だけ傾けて投影している。

各スクリーンに投影される映像は、描画用のコンピュータによって生成される。描画にはコンピュータの機種依存性の少ない OpenGL を用いている。複数のスクリーンに同時に画像を生成する方法としては、複数台のコンピュータで同期をとりながら画像を生成するのが一般的であるが、ここで利用したプロジェクタの解像度が低いことから、1 台のコンピュータで 12 面分の映像を生成することになっている。12 面分の映像は、CRT 前面に取りつけられた 12 機の CCD カメラ (STC-540LS, 画素数 750000) によって NTSC に変換され、各プロジェクタに入力される。

3.2.2 12面体ディスプレイ用コンピュータ画像生成

この菱形12面体に計算機によるCG映像を投影するために、本ディスプレイの仕様からそれに合わせた映像を作成する。

まず、それぞれのスクリーンに対して正常な画を投影するためには、あらかじめスクリーンの位置や傾き、大きさなどを調べておく必要がある。ある1枚のスクリーンに着目すると、そのスクリーンで投影されるべき画像は、中にいる人があたかも菱形の窓を通して外を見ているような景色であればよいことになる。描画のためには、まず視線の位置、方向を決定しなければならない。そこで便宜的に図3.3のように各スクリーンに対して番号をふり座標系をとると、視点を12面体の中心にもってくるとき、各スクリーンの視点の回転行列は次のようになる。

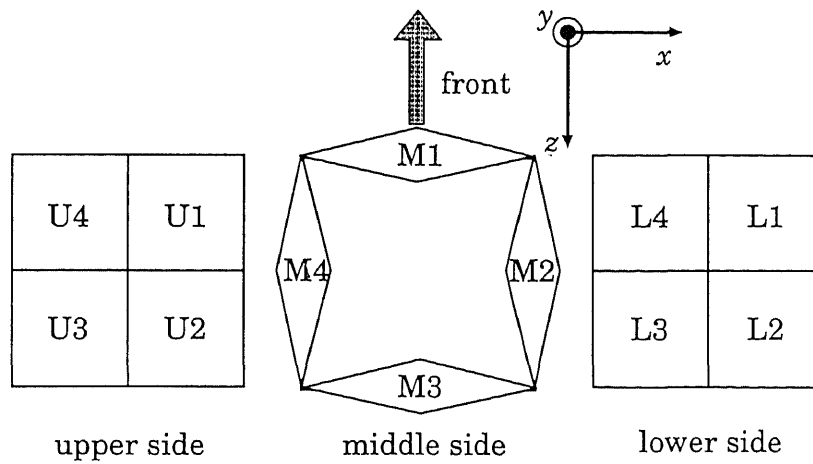


図 3.3: 12面スクリーンの位置

$$\begin{aligned}
R(M1) &= && Rot(z, \alpha) \\
R(M2) &= Rot(y, -90.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(M3) &= Rot(y, -180.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(M4) &= Rot(y, -270.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(U1) &= Rot(y, -45.0) \cdot Rot(x, -45.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(U2) &= Rot(y, -135.0) \cdot Rot(x, -45.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(U3) &= Rot(y, -225.0) \cdot Rot(x, -45.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(U4) &= Rot(y, -315.0) \cdot Rot(x, -45.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(L1) &= Rot(y, -45.0) \cdot Rot(x, 45.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(L2) &= Rot(y, -135.0) \cdot Rot(x, 45.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(L3) &= Rot(y, -225.0) \cdot Rot(x, 45.0) && \cdot Rot(z, \alpha) \\
R(L4) &= Rot(y, -315.0) \cdot Rot(x, 45.0) && \cdot Rot(z, \alpha)
\end{aligned}$$

但し、 $\alpha = \tan^{-1}(\frac{3}{4})$ であり、プロジェクタの光軸まわりの回転を意味する。これらを視点変換に用いることで、各スクリーンへの正しい映像が得ることができる。

次に12枚の画像を同時に生成するため、12個のビューポートをカメラの位置に合わせて設定する。プロジェクタの解像度はおよそ320×240である。またCRTの解像度は一般に1280×1024であることから、4行3列にビューポートを並べればよいことになる。以上のことが決定された後はプログラムへの実装である。プログラムの流れは以下のようなになる。

1. 初期化

内部状態やウィンドウを初期化する。ウィンドウの位置、大きさはあらかじめ微調整して定めておいた値を用いる。

2. 時間の進行

時間の進行にともなって変化する内部状態を更新する。12枚の画像の同期をとるためには、12枚分の時間進行処理を一括しておこなう必要がある。したがって描画を開始する前に仮想世界の時間や状態をここで変更し、12枚の描画が終わるまで内部状態が変更できないようにしておく。

3. ビューポートのセット

12枚のうちの1つのビューポートを準備する。ビューポートの位置はあらかじめ微調整して定めておいた値を用いる。

4. 視点のセット

12面スクリーンのうちの1つの視点変換を前述の $R()$ を利用しておこなう。

5. 描画

内部状態に基づいたシーンを描画する。菱形の外側の投影に不必要な部分をなくすために菱形の窓も同時に描画する。映像における視点変換はここでおこなう。12枚分の描画が終了するまで、3,4,5を繰り返す。全ての描画が終了したら2にもどって繰り返す。

1回の時間の進行につき描画が12回繰り返されるため、描画に時間を要するような複雑なモデルを生成することは難しい。高速化を図るため、3,4及び5の一部の処理はOpenGLのディスプレイリストの機能を用いている。12個のビューポートにそれぞれの絵を描画している様子を図3.4に示す。この表示画像の正面には、4行3列で等間隔に配置したCCDカメラが配置され、12面分の映像を取り込んでいる。

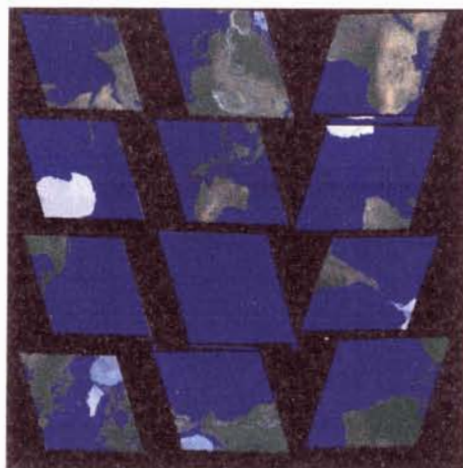


図 3.4: 生成した画像

3.2.3 アナグリフ方式による立体視

立体視の方式で一般に用いられているのは、偏光レンズを用いた偏光方式や液晶シャッターを利用した時分割方式である。偏光方式は立体映画などに広く用いられている手法である。縦偏光と横偏光の画像を同時に映写し、観察者は左右に縦、横偏光レンズの

眼鏡をつけて左右独立の映像を得ることで立体視をおこなうものである。時分割方式は左右の映像を高速に切り替え、観察者の液晶シャッタによって左右の映像を分離するもので、イベント会場でよく見られる方式である。

菱形12面体では映像の投影に液晶プロジェクタを用いているため、立体視をおこなうことを考える場合、立体視の方式の選択の幅が格段に狭くなる。まず、液晶プロジェクタでは液晶の偏向によって光をコントロールしていることから、偏向方式の立体視は不可能となる。また液晶の偏向を切り替わる速度は、時分割表示に耐えるほど高速ではないため、時分割方式を実現するのも困難である。

そこで代替の方式としてアナグリフ方式の実装を試みた。アナグリフ方式は赤青レンズによって左右成分の分離をおこなうもので、児童向け雑誌の付録などによく見られる。これを実装する段階で問題になったのが、赤青映像の分離が可能かどうかである。つまり赤いフィルタを通して見る映像は青い映像しか見えてはならず、青いフィルタからは赤い映像だけを見せなければならない。この問題に対して、プロジェクタ映像に赤青のテストパターンを表示し、前述の条件を満たすように色調整を通して最も見えの良い状態を作り出した。図3.5はその試行によって得られた赤(0.8,0.0,0.0)、青(0.0,0.0,0.16)による両眼映像である。

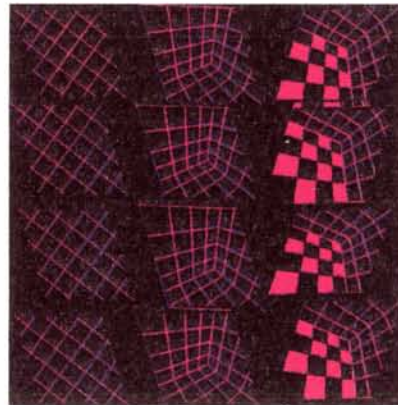


図 3.5: アナグリフ方式による生成画像

実際にアナグリフによる立体視を呈示してみたところ、広い空間等の奥行き感は生成されることがわかった。しかしながら細かいものを呈示した場合、立体に見えるのか見えないのかわからない状態であった。これはプロジェクタの解像度が少ないため、赤青画像がつぶれてしまうことが原因であると考えられる。またスクリーンの継ぎ目

の部分に視差画像が来ると、不整合が生じることもわかった。これはスクリーン中央から各面に臨むとき、視差を左右方向につけているためで、各面に対して各々の視差をつけていることに起因している。したがってこの問題を完全に解消するには、全天周の映像を球などで近似し視差を発生させる必要があるだろう。

3.3 背面投影型球面ディスプレイ

3.3.1 多面体ディスプレイと球面ディスプレイ

前節では多面体を用いた没入型ディスプレイの最も投影効率のよい例として、菱形12面体をもちいた全立体角ディスプレイを紹介した。菱形12面体ディスプレイの最たる特徴はバックヤードが小さいことである。しかし一般に多面体ディスプレイでは継ぎ目の問題は避けられず、特にスクリーンの継ぎ目のなす角は小さいほど視野に不自然さを与える。菱形12面体ディスプレイでは他の立方体型ディスプレイと比較して、スクリーン同士のなす角は120度と大きいものであった。それでも稜線や頂点で映像の不連続性が観察された。

このスクリーンの継ぎ目問題を根本的に解決するためには、スクリーンの形状として必然的に球面が望ましくなる。本章では、球面によるスクリーンを視覚呈示デバイスとして利用するための問題点を列挙し、どのような設計が求められるのかを述べている。

3.3.2 球面ディスプレイの問題点

球面に映像を投影するものとして、最も有名で普及しているものはプラネタリウムであろう。最近ではプラネタリウムのスクリーンに星空を映すだけでなく、CGを投影することもできるものが開発されている。五藤光学のVIRTUALIUM[24]は、スクリーンの付根に配置された6台の投影装置で映像を出力し、広範囲にわたる視野を提供している。一方、映画の分野でも球面スクリーンが登場している。IMAXに用いられているスクリーンは、大きいもので21[m]×15[m]もあり曲率半径が27[m]と観客を囲む形で球面をとっている。こうしたプラネタリウムや映画は多人数で観るという性質上、大きな設置スペースを必要とするため、VRへの応用という点では現実的でなかった。そこに目をつけたのがAlternateRealities社で、彼らはプラネタリウムのシステムをそのまま小型化したものをVisionDomeという製品にして世に送り出している[25]。VisionDomeでは超広角レンズをもちいて、半球状のスクリーン全面に映像を投影しており、傍観者は映像を仰いでみることになる。

球面スクリーンを利用した多くのシステムでは、以上の例からみてもわかるように

前面投射を採用している。しかしながら多面体による没入型ディスプレイでも背面投射を利用しているように、前面投射をVRに利用するためには以下の2点で都合が悪い。第1点はスクリーンと光源との間に人の陰ができてしまうことである。観察者はスクリーンの映像とのインタラクションをおこなうわけだから、人がスクリーンに近づくと陰ができてしまうのは困るわけである。第2点は光源の位置が観察者と同じ側になるため、光源の位置によっては観察者の物理的な位置を拘束するということである。要するに球の凹面に結像させるためには、光源は曲率の中心付近にあるのが望ましく、同時に観察者にとっても曲率の中心が最も見えの良い位置であることを意味している。これらの点から、映像に囲まれた空間でインタラクションを行うためには背面投射が望ましいことになる。

以上のことから球面スクリーンに対して背面投射をおこなえばよいことになるが、そうするとまた別の問題が発生する。第1点は多面体スクリーンでも問題となったバックヤードの問題である。球面が小さければともかく、全天周型を作るとなると莫大な設置コストが予想される。2点目は、前述したようにプロジェクタは平面や凹面に投影することを想定しているため、無条件に凸面に結像させるのは難しい、ということである。プロジェクタの焦点深度によってスクリーンの曲率に制限が生じることになる。3点目は、ある凸面に結像させた映像を凹面から透かして見る場合、映像が対角方向に歪んでしまうことである。

こうした問題に対し、本研究では次のようなアプローチで背面投射球面ディスプレイを試作した。第1点のバックヤードについては、構造上やむを得ないものとして、試作スクリーンを半周以下の大きさとした。第2点の結像の問題についてはプロジェクタの焦点深度から、スクリーンで利用可能な曲率を算出した。第3点の歪みの問題に関しては、映像を作成するソフトウェアによって行うこととした。本節ではこれらを詳しく述べながら、試作した背面投射球面ディスプレイについて紹介する。

3.3.3 球面ディスプレイの設計

(1) プロジェクタの選定

一般にプロジェクタは光源側に近づく方向に湾曲するスクリーンに対する調整機能を持つものは多いが、光源側から遠ざかる方向に湾曲するスクリーンに投影することは

想定されていない。そこで、著者は単眼式のプロジェクタを使って焦点深度の範囲で逆曲率を持つスクリーンに投影することを試みた。単眼式であればスクリーンが曲がっていても色ずれは起きないため調整機能がなくても画が出せるわけである。解像度の低いローコストの液晶プロジェクタは焦点深度が深いのでどんな曲面にも投影できるが、ワークステーションの高解像度の画像を表示できるものは焦点深度が薄いため、曲率があまり大きくできない。

さらに、背面投射球面スクリーンにおいて両眼立体視を行おうとすると、プロジェクタに対する制約は格段に大きくなる。両眼立体視の方式としては、液晶シャッターによる時分割式と偏向レンズを用いるものの2つが一般によく用いられるが、背面投射球面スクリーンでは時分割式しか使用できない。光源から遠ざかるような曲率を付けると周辺部の明るさが不足するため、拡散材を貼ってそれを補わなければならないのであるが、拡散材を用いると偏光が乱れて左右の分離ができなくなってしまう。そのため、このスクリーンで立体視をするためには、液晶シャッターの時分割に耐える高い垂直周波数（CrystalEyes の場合 90[Hz] 以上）を受け付ける単眼プロジェクターでなければならなくなる。液晶シャッター眼鏡でステレオ視ができるプロジェクタは三管式のものばかりであるため、著者はすでに生産中止になった単眼式の高解像度プロジェクター（ELECTROHOME 社の ECP Graphics）をオーバーホールして使っている。

(2) 曲率の決定

プロジェクタを選ぶと、次にそのプロジェクタで焦点が合わせられるスクリーンの曲率の限界を調べなければならない。そのための実験として、プラスチック製の弾性変形するスクリーンを円筒状に湾曲させ、それに ECP Graphics でテストパターンを投影するというを行った。平面の状態から少しずつ曲げていながら周辺部のピントの状態を観察することによって、どこまで湾曲させられるかを見極めるわけである。この実験の結果、曲率 1400[mm] 程度までは曲げられることがわかった。プロジェクタの特性に合わせてディスプレイの形状を決めるというのは本末転倒であるが、仕様外の使い方をしている以上それもやむを得ない。

(3) 画面サイズの決定

曲率を決めると、次に1台のプロジェクタで投影する画面の大きさを決める必要がある。画面の継ぎ目は無い方が望ましいので、1台のプロジェクタでより大きな画面に投

影するのが有利である。ところが、1枚のスクリーンが大きくなると、それを設置する部屋も大きなものが必要になり実用上の問題が生じる。特に本研究の試作システムは著者の実験室（7[m] 四方、天井高 2.7[m]）に設置しなければならないため、自ずと画面サイズには上限が出てくる。また、球面ディスプレイ専用のスペースを確保するだけでなく、実験室の他の作業スペースを確保しなければならない。そのため、プロジェクタの光軸の高さを 1600[mm] とし、その下を他の作業スペースとして使えるように配置を工夫している。このようなことは、ディスプレイのシステム設計には直接関係しないことであるが、実際問題として空間没入型ディスプレイを施工する場合には最も深刻な問題であるといっても過言ではない。

さて、限られたスペースでより高い臨場感を実現しようとする、いきおいスクリーンを観察者の近くに置くことになるが、近すぎると水晶体の焦点調節の問題から遠景の呈示に無理が生じる。呈示画面が眼から 1[m] 以上離れると、調節が無窮遠と同様になることが知られているため、スクリーンから 1[m] の距離に立って見る状況を設定する。この時、十分な没入効果を得るためには人間の視覚の特性を吟味する必要がある。人間の視野角に関しては過去に様々な研究があるが、本研究では畑田らの行った実験データ [26] に基づいて画面サイズを決定した。用いたデータは次のようなものである。まず、臨場感の指標としてよく用いられる視覚誘導性自己運動であるが、ジェットコースター等の動きのある映像を呈示した時に重心移動が起こる呈示視野角が 60 度から 80 度程度で飽和するという結果が得られている。次に、映像とインタラクションを行う時に画面を見回すことが必要になるが、これに対応するものとして眼球と頭部の運動で無理なく見渡せる範囲である安定注視野が計測されており、その値は水平に 80 度、上下に 70 度程度である。これらの知見を基に画面サイズは横 1500[mm]、高さ 1300[mm] とした。1[m] の距離からこのスクリーンを見た時の視野角は水平が 88 度、上下が 75 度である（図 3.6）。

3.3.4 試作球面ディスプレイ

上記の手法に基づいて球面スクリーンの製作を行った。曲率 1400[mm] の透明なプラスチックの殻をまず作り、その裏に拡散材を貼り付けた。前述の横 1500[mm]、高さ 1300[mm] のものを基本ユニットとして、以下に述べる 2 種類のディスプレイを製作

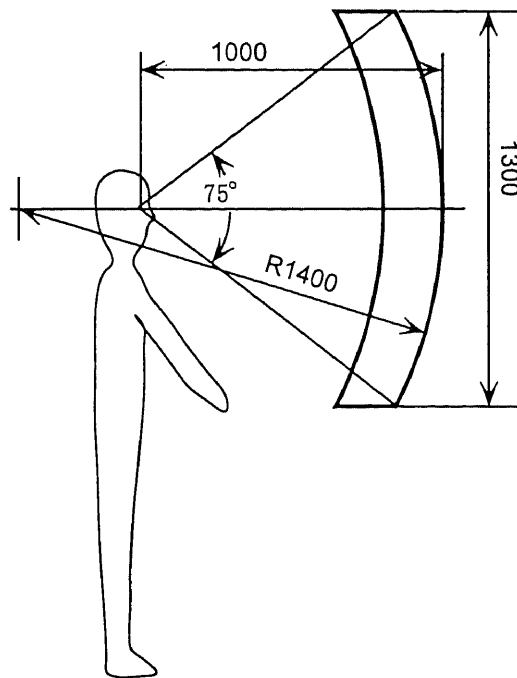
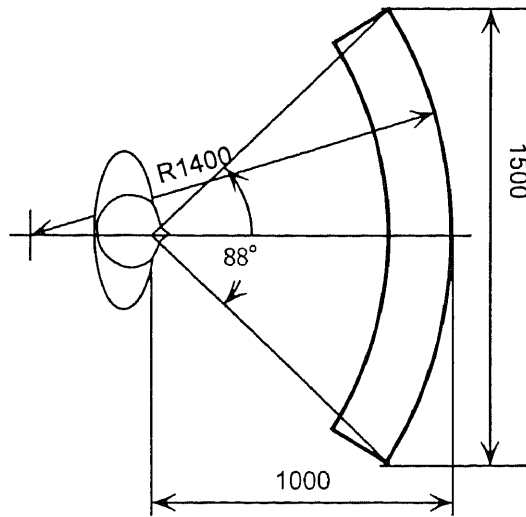


図 3.6: スクリーンの視野角

した。

(1) 壁型

これは、球状の壁で水平の視野を覆うものである。周辺視野までカバーする高い臨場感と複数の観察者に対応する映像空間の実現を目標としており、そのために上記の基本ユニットを2枚つなぎ合わせたもの製作した。実際には基本ユニット2枚分のプラスチックの殻を一体成形し、それに拡散材のフィルムを貼り付けている。このスクリーンに2台のECP Graphicsで背面投射を行っている。スクリーン中央には厚さ3[mm]の仕切板をつけている。中央部に1[m]の距離に立った場合の水平視野角は162度である。図3.7はこのスクリーンの全景である。CrystalEyesのトランスミッターは中央部上下と左右端に合計4つ設置している。画像生成用の計算機にはSGIのi-stationを用いている。i-stationには2チャンネルのビデオ出力があり、640×512の解像度のステレオ映像を2画面表示している。

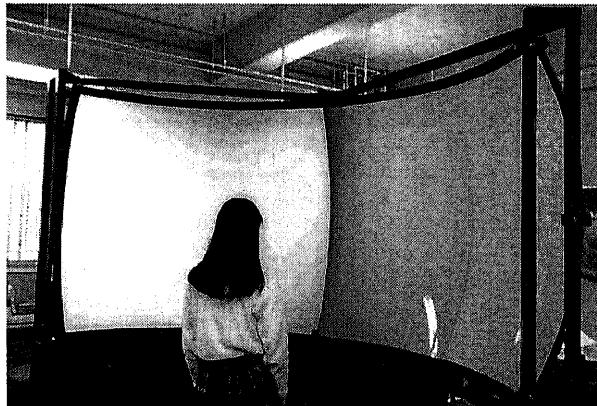


図 3.7: 完成した球面スクリーン(壁型)

(2) デスク型

上記の壁型は広大な仮想空間の景観を呈示するのに向いているのに対して、デスク型は卓上に限定された仮想空間を提供する。このディスプレイは球面スクリーンの基本ユニットをねかせて置いて、プロジェクタの光を床に置いた鏡で反射させて投影するものである。図3.8にそれらの配置を、図3.9にディスプレイ全景を示す。球面スクリーンを用いると非常に大きな仮想の机を呈示することができる。スクリーンが手前に湾曲しているため、遠くの仮想物体が投影されることになる。図3.8に示すように、3[m]

四方程式の仮想の机を見ることが出来る。また、手近な物は回り込み動作を行ってもスクリーン内におさめることができる。図3.9は6自由度力覚フィードバック装置であるHapticMasterを接続した様子を示しているが、このような入力装置を使って広大な机の上の物を自由に操作することができる。机が大きいことは各種の知的作業を行う際にメリットを発揮するはずである。

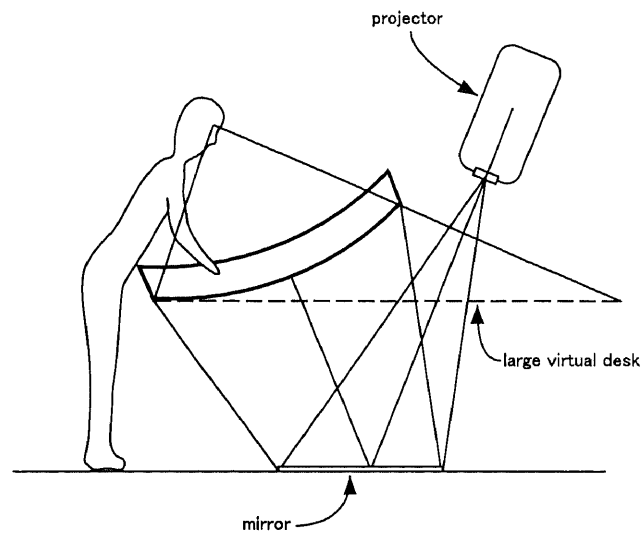


図 3.8: デスク型スクリーンによる配置構成図

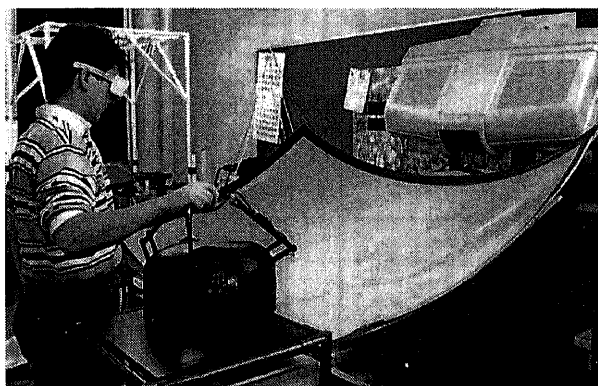


図 3.9: 完成した球面スクリーン (机型)

3.3.5 球面歪みの補正

球の背面から映像を投影し、中心からその映像を観察する場合、投影映像は歪んでしまう。ここでは歪みの発生原理を明らかにし、歪み補正の具体的な手法を述べる。

形状のあるものに光を投影すると、見る位置によって陰ができる。視点が光源に限りなく近づくと、陰はだんだん小さく見える。このことと同様に、プロジェクタなどの映像を形あるものに投影すると、見る位置によって映像に陰ができたり、曲がって見える。また視点が光源に近づくほど元の画像に近い状態になる。背面投射球面ディスプレイでは、プロジェクタの位置と観察者との位置がスクリーンをはさんで向かい合うため、観察者の視点を光源に近づけることは原理的に不可能である。したがって、映像に歪みが生じることは避けられないことになる。

では球面に投影すると、どのような歪みが生じるのだろうか。図 3.10 は、球面ディスプレイの背面からプロジェクタで投影しているときの映像と、観察者から見える映像を俯瞰表現している。黒い丸がプロジェクタの映像、白い丸は観察者が見ることのできる映像を表している。プロジェクタの映像が球面ディスプレイに投影されると、観察者の目には四方に間延びした映像として見えることになる。またこの図は観察者の視点が移動すると、歪みの生じ方が異なってくることを示唆している。

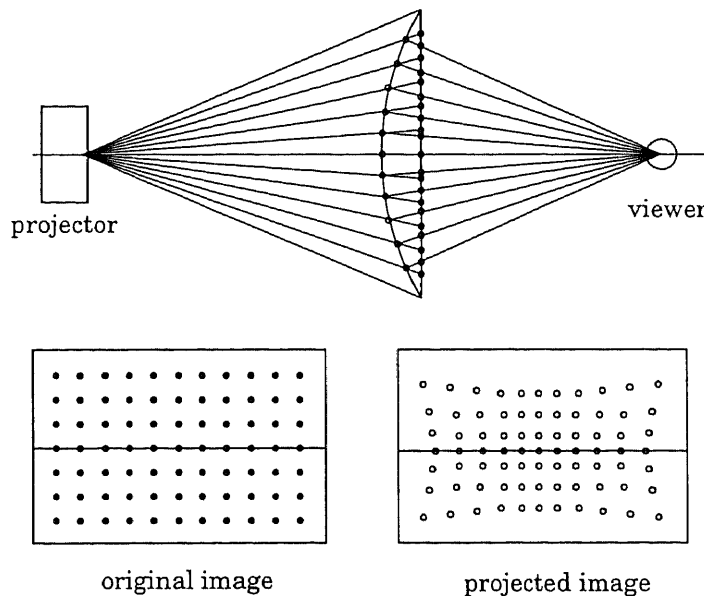


図 3.10: 球面スクリーン投影時の歪み

歪みをなくした映像を観察者に提供するためには、あらかじめ歪んだ映像をプロジェクタから投影すれば良いことになる。歪み補正の機能は市販のプロジェクタにもついているが、本来の使用目的とは異なるため、スクリーンにあった歪みの補正をおこなうことは極めて困難である。さらに観察者が移動するたびに歪みの生じ方が異なってくることを考えると、元の映像を視点の位置に応じてソフトウェア上で歪み補正し、プロジェクタに入力するのが最も現実的かつ有効な方法である。

それではソフトウェアで歪みを補正するために、どのような手法が最も効果的か考えてみよう。図 3.11 は歪み発生の様式図で、プロジェクタは P 、観察者は O で、球面

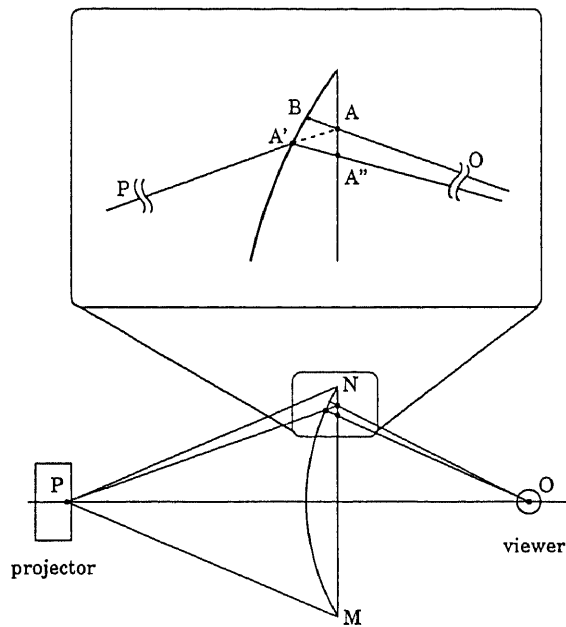


図 3.11: 球面スクリーン投影時の歪み補正

スクリーンは弧 \widehat{NM} 、観察者の視野は線分 NM を表している。 A に向かってプロジェクタが投影するとき、プロジェクタの光束は A' でスクリーンにぶつかり、観察者には A'' に映像があるかのように見える。観察者から見る場合、本来 A に見えなければならないものが A'' にあらわれるわけで、これが歪みの原因となっている。歪みをキャンセルするには、投影の段階ですべての画素について $A \rightarrow B$ への変換をおこなえばよいことになる。 $A \rightarrow B$ の変換が何を意味するのかというと、平面画像 NM を弧 \widehat{NM} に貼付けていくことに等しい。この射影に着目すると、描画におけるテクスチャマッピング

グの技法が最も適していることになる。したがって、 NM 上の平面画像を生成したのちに、 $A \rightarrow B$ に対応する変換にしたがってテクスチャとして弧 \widehat{NM} に貼付けていけばよい。張り子になった球面をプロジェクタ側を視点にしたときの映像が、最終的な投影画像となる。

以上を総じてまとめると、ソフトウェアによる歪み補正の手順は次のようになる。

1. 原画の生成

スクリーンに映したい原画を描画する。

2. テクスチャの取り込み

描画された画像をテクスチャとして取り込む。

3. テクスチャの貼付け

テクスチャを球面に貼付けていく。

4. 描画

テクスチャが貼られた球面の映像をプロジェクタ側を視点に再描画する。

次節でそれぞれの手順について詳しく述べていく。

3.3.6 球面歪み補正の具体的手法

(1) 原画の生成

テクスチャの原画となる画像を生成するために、視点の位置とそれともなう視野の設定をおこなう。視野の設定は一般に視体積という四角錐の形状、大きさを決めることになる。スクリーンの大きさが定まっていれば、視点に応じた視野の大きさは原理的に計算できる。

図 3.12 は観察者の視点がスクリーンの曲率中心にある場合の視野を表している。

スクリーンの大きさが曲率半径 R 、水平視野角 $2\theta_h$ 、垂直視野角が $2\theta_v$ のとき、観察者の視体積は図のようにスクリーンの 4 隅の点となるから、

$$height = 2R \cdot \sin \theta_v$$

$$width = 2R \cdot \cos \theta_v \cdot \cos \theta_h$$

$$near = R \cdot \cos \theta_v \cdot \sin \theta_h$$

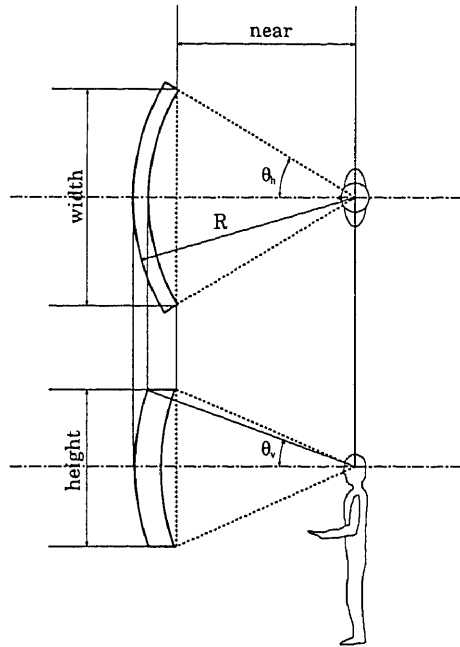


図 3.12: 視点が曲率中心にあるときの視体積

と表すことができる。視野の上部中央はスクリーンより大きめにとることになるが、不要な部分は後述のテクスチャ取り込みによって無視されるため問題とはならない。

図 3.12 の視点を原点として、観察者の視点が (E_x, E_y, E_z) だけ移動すると視体積が図 3.13 のように変形することになる。このときの視体積は、

$$\begin{aligned}
 right &= \frac{width}{2} - E_x \\
 &= R \cdot \cos \theta_v \cdot \cos \theta_h - E_x \\
 left &= \frac{width}{2} + E_x \\
 &= R \cdot \cos \theta_v \cdot \cos \theta_h + E_x \\
 upper &= \frac{height}{2} - E_y \\
 &= R \cdot \sin \theta_v - E_y \\
 lower &= \frac{height}{2} + E_y \\
 &= R \cdot \sin \theta_v + E_y \\
 near' &= near + E_z
 \end{aligned}$$

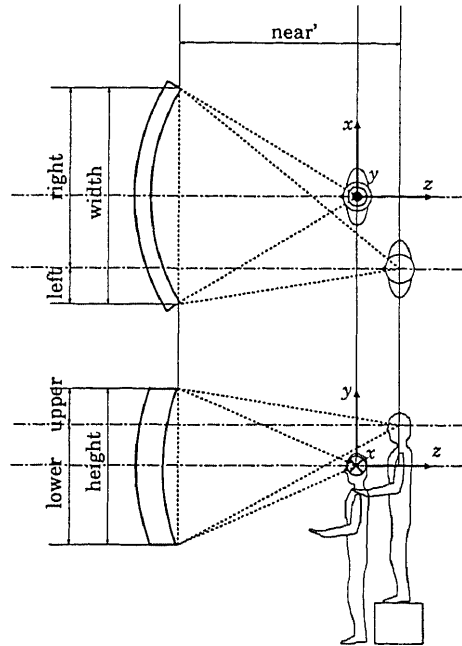


図 3.13: 視点が移動したときの視体積

$$= R \cdot \cos \theta_v \cdot \sin \theta_h + E_z$$

と表される。以上のことから視点の位置と視体積の形状が決定され、原画像を生成することができる。

(2) テクスチャの取り込みと貼付け

テクスチャマッピングの技法では、通常テクスチャバッファに収められた画像の取り込み点と、取り込んだテクスチャを貼付ける点を必要とする。テクスチャの映像は、元々は(1)で定めた視体積における映像であった。また前節の知見より、テクスチャの取り込み点は図 3.11 での点 A に相当し、貼付け点は B に相当することになる。したがって $A \rightarrow B$ への写像は、視体積の底面上の点から球面スクリーン上の点への射影、ということになる。球面スクリーン上に貼付け点を定めておくと、スクリーン上の点と視点の2点を通る直線が決まり、直線と視体積底面との交点がテクスチャの切り出し点として一意に決まる。この射影は幾何学的に定義でき、計算機上で容易に求まる。

まず最初にテクスチャを貼付ける点として、球面スクリーンを縦に m 分割、横に n 分割し、格子状に貼付け点を定める。分割数が多いほど正確にテクスチャが貼られ、歪みの補正が可能となるが、逆に処理速度が遅くなる。この処理速度とテクスチャ分割

数に関するトレードオフについては後述の考察で詳しく取り上げる。原点をスクリーンの曲率中心にとり、座標系を図 3.13 のようにとったとき、貼付け点の水平、垂直画角をそれぞれ θ_{vi}, θ_{hj} (但し i, j は $0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n$ である整数) と表すと、スクリーン上の点 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) は次の式で表される。

$$\begin{aligned}x_{ij} &= R \cdot \sin \theta_{vi} \\y_{ij} &= R \cdot \cos \theta_{vi} \cdot \cos \theta_{hj} \\z_{ij} &= R \cdot \cos \theta_{vi} \cdot \sin \theta_{hj}\end{aligned}$$

視点が (E_x, E_y, E_z) にあるとき、視体積の底面は幾何学的に

$$z = R \cdot \cos \theta_v \cdot \sin \theta_h + E_z$$

で表される。また視点と貼付け点の 2 点を通る直線は

$$\frac{x - E_x}{x_{ij} - E_x} = \frac{y - E_y}{y_{ij} - E_y} = \frac{z - E_z}{z_{ij} - E_z}$$

となる。よって交点 (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) は

$$\begin{aligned}Z_{ij} &= R \cdot \cos \theta_v \cdot \sin \theta_h + E_z \\X_{ij} &= (x_{ij} - E_x) \cdot \frac{Z_{ij} - E_z}{z_{ij} - E_z} + E_x \\Y_{ij} &= (y_{ij} - E_y) \cdot \frac{Z_{ij} - E_z}{z_{ij} - E_z} + E_y\end{aligned}$$

と表すことができる。これがテクスチャの取り込み点である。よって貼付け点 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) に対し、取り込み点 (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) が決まる。

テクスチャ座標系での取り込み点 (Tx_{ij}, Ty_{ij}) は、視体積の底面の大きさが $-\frac{width}{2} \leq x \leq \frac{width}{2}, -\frac{height}{2} \leq y \leq \frac{height}{2}$ であることから、

$$\begin{aligned}Tx_{ij} &= \frac{X_{ij} + \frac{width}{2}}{width} \\Ty_{ij} &= \frac{Y_{ij} + \frac{height}{2}}{height}\end{aligned}$$

となる。

(3) 描画

最終的な描画は、テクスチャマッピングによる張り子の球面をプロジェクタ側から見たときの映像となる。プロジェクタの視体積はスクリーン全体が入る大きさであるから、プロジェクタの投影距離を L とするとき、図 3.14 より

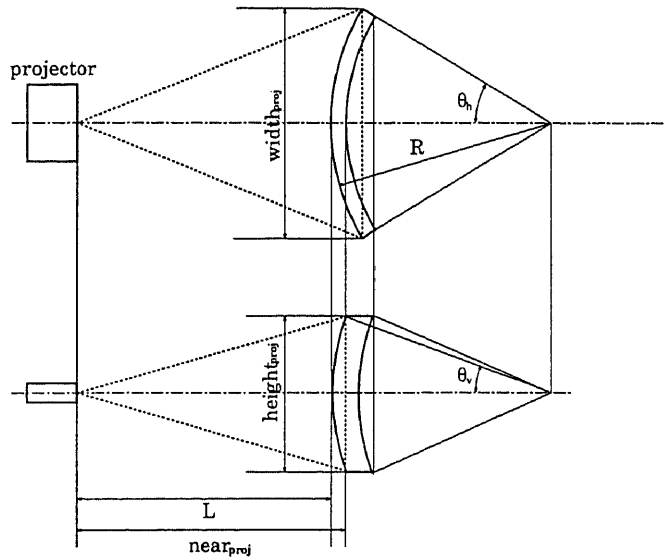


図 3.14: プロジェクタの視体積

$$\begin{aligned}
 height_{proj} &= 2R \cdot \sin \theta_v \\
 near_{proj} &= L + R \cdot (1 - \cos \theta_v) \\
 width_{proj} &= 2R \cdot \sin \theta_h \cdot \frac{near_{proj}}{L + R \cdot (1 - \cos \theta_h)} \\
 &= 2R \cdot \sin \theta_h \cdot \frac{L + R \cdot (1 - \cos \theta_v)}{L + R \cdot (1 - \cos \theta_h)}
 \end{aligned}$$

となる。この視体積を用いて (2) のテクスチャによる張り子を描画する。図 3.15 は原画像で歪み補正のない状態の画像である。スクリーンを縦 40 分割、横 30 分割して、テクスチャマッピングによって球面歪みを施したものが図 3.16 となる。

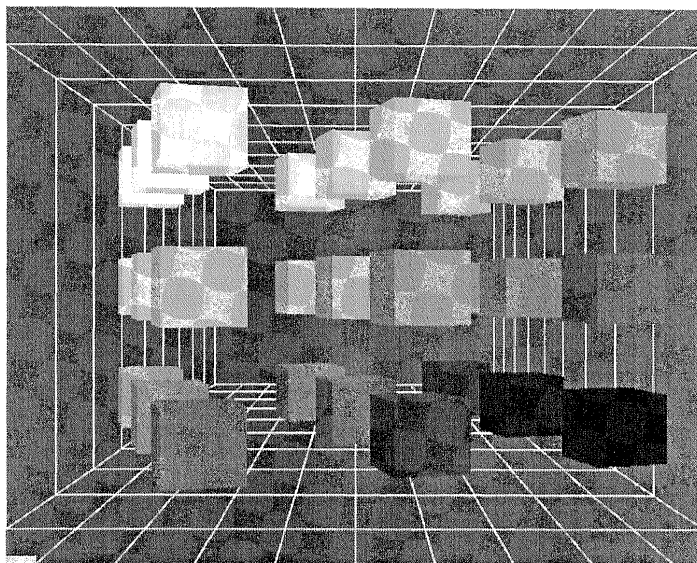


図 3.15: 補正前の原画像

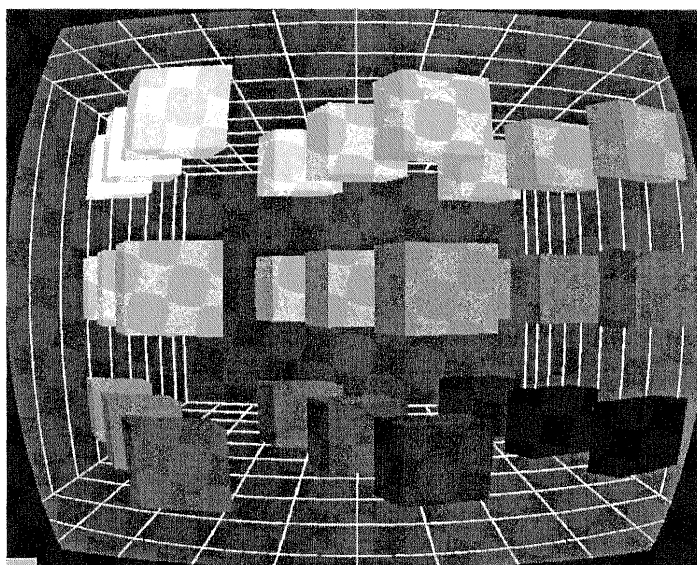


図 3.16: 歪み補正を施した画像

3.3.7 複数画面での球面歪み補正

画面数を拡張する場合、2台以上のプロジェクタで球面スクリーンに投影し、前節と同じ手順で歪み補正をおこなえばよい。ただし、歪み補正で必要となった視体積や視点の位置は、スクリーンに対して相対的なものであったため、そっくりそのまま利用できるわけにはいかない。各々のスクリーンに応じて異なったパラメータによる歪み補正が必要となってくる。例えば、図 3.17 は 2 画面のスクリーンに臨んだ場合の視点の移動を表している。視点が移動すると、各々のスクリーンについて視体積の形状が異なってくるのが明らかである。

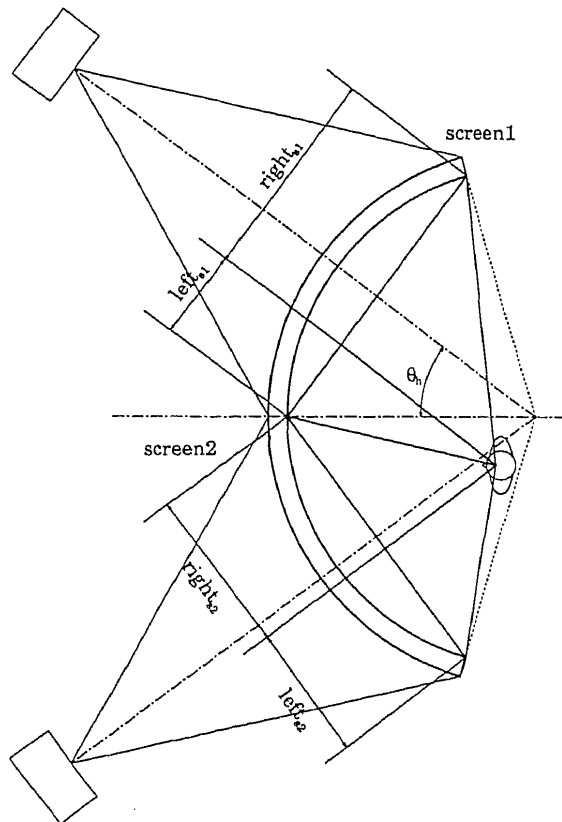


図 3.17: 2画面のスクリーンに拡張した場合の視点の移動と視体積

前節での補正を利用するには、各々のスクリーンに対して座標系の変換をおこなう。すなわち、絶対座標系の原点をスクリーンの曲率中心にとるとき、スクリーン座標系も前節と同様曲率中心に来るが、 y 軸負方向に $\pm\theta_h$ だけ回転させたものとなる。よって

視点の位置が絶対座標系で (E_x, E_y, E_z) にあるとすると、それぞれのスクリーン座標系での視点の位置は、 $Rot(y, \pm\theta_h) \cdot (E_x, E_y, E_z)$ と変換される。変換されたスクリーン座標系での視点の位置によって、前節(1)と同様に視体積を決定することができる。テクスチャの取り込み、貼付けもすべてスクリーン座標系でおこなうことになる。

なお、両眼立体視をする場合もこれと全く同じ要領で実現できる。

3.3.8 球面歪み補正に関する問題点

歪み補正をおこなう上でまず問題となるのは、補正処理をするために莫大な描画能力を必要とすることである。テクスチャマッピングの技法は非常に強力な補正をおこなうことができる反面、計算機に膨大な描画処理能力を要求する。また強力な描画能力を持つ環境においても、テクスチャの取り込み点、貼付け点が増加するにしたがって描画処理が滞ってしまう。理想的には描画した原画像に対して、全画素の歪み補正をおこなえればよいのだが、処理能力上の問題から、取り付け点や貼付け点を適当な数で離散化しなければならない。例えば今回用いたハードウェアにおけるテクスチャ数と処理速度の関係を調べると、表 3.18 のようになる。これは 100 秒間に何フレーム表示できるかを各分割数に対して計測し、単位時間あたりの処理能力を算出している。通常、人間が映像を動画として認識するために必要なフレーム数は、10[frames/s] といわれているので、このハードウェアでの最適な分割数はおおよそ 100×75 以下となる。

分割数	テクスチャ数	[frames/s]
補正なし	0	44.06
40×30	1200	12.08
60×45	2700	12.08
80×60	4800	12.07
100×75	7500	10.84
200×150	30000	9.05
400×300	120000	4.50
800×600	480000	1.50

図 3.18: SGI Onyx(InfiniteReality) における補正処理能力。

一方、原画像を生成してテクスチャバッファに収めるときに留意しなければならない

いのが、テクスチャバッファにサイズの制限があるということである。テクスチャバッファのサイズは $2^m \times 2^n$ (m, n : 自然数) でなければならないため、原画像はそのサイズに収まるように描画しなければならない。したがってテクスチャバッファを最も有効に利用するために、画面の大きさ (1280 × 1024) に対し、1024 × 1024 の大きさとなってしまう。この問題によってテクスチャバッファに収まる画像は、縦に間延びしたものとなる。原画像は再び4:3の映像に貼付けられるため、横方向の見かけの解像度が若干減ることになる。実際にスクリーンに呈示してみた場合、解像度の減少による不自然さはほとんど見られなかった。しかし横長のスクリーンに投影するときなどは注意が必要である。

3.3.9 背面投射球面ディスプレイの問題点

本節では背面投射による球面ディスプレイシステムを構築するための実現方法について述べてきた。球面ディスプレイの大きな特徴は、継ぎ目がないことである。映像がシームレスに呈示されると見回す動作をする場合に限らず、没入感のある映像が呈示できる。また背面投射であるから、スクリーンの近くで知的作業をすることも可能である。これが背面投射の利点であるが、裏を返せば投影容積が非常に大きくなることでもある。本研究で用いたスクリーン、プロジェクタを設置するためには、約6[m]四方の空間を必要とするため、空間を有効利用しているとは言えない。例えば、本システムを全立体角に拡張すると約15[m]立方の空間を必要とすることになり、これほどの大きな空間を確保するのは現実的ではないだろう。

また投影時に発生する歪みをテクスチャマッピングの技法で実現した。最近では実写映像をテクスチャマッピングする機能を持ったハードウェアが登場してきているので、実写を利用することも考えられる。しかしながら、テクスチャマッピングは計算機に負荷を強いるため、現在のところは描画能力の高い特殊なハードウェアに頼らざるを得ない。

3.4 全方向球面ディスプレイ

3.4.1 球面ディスプレイの拡張

球面ディスプレイを全天周型に拡張する場合、最もシンプルな方法は、拡張する立体角に応じてプロジェクタとスクリーンを用意することになる。しかし全天周に背面投射をすると、バックヤードの問題から莫大な空間的コストを必要とすることは明らかで、運用の面で現実的でない。球面ディスプレイにおける背面投射と前面投射の問題については、3.3.2で議論済であるが。ここではもう一度前面投射による投影方法を振り返って、これを改善する形で設計していくことにする。

前面投射における球面ディスプレイの問題点は、投射光が観察者によって遮られること、それから光源と観察者の理想的な位置が曲率の中央付近にあり、観察者の物理的な位置を拘束することである。プラネタリウムなどのドーム型スクリーンに対して映像を投影する場合は、光源をドームの中心に配置し、観察者はドームの床面から映像を仰ぐ形になる。あるいはVIRTUARIUMのように複数光源を用意する場合は、ドームの下辺から中心に向かって投影し、対角線上に結像した映像を中心から仰いで見ることになる。これらは半球に投影することを目的としているが、これを半球以上に拡張すると、先述の問題が再び浮上してくる。すなわち、中心付近に超広角レンズや複数台の投影装置を設置し周囲に投影すると、観察位置を確保できず、配置の問題が生じるわけである。

では中心付近に投影装置を配置せず、投影光線の損失を最も少なくできる配置はどのようなものか考えてみると、おおむね図3.19のようになるだろう。観察者上方の領域は、光源がスクリーンを遮る部分、あるいは光を通すための穴を意味し、観察者下方の領域は観察者自身による影を意味している。観察者の直上と真下を除く全ての領域を完全に覆うことが可能となる。

この理想的な配置に基づいてプロジェクタ等の光源を配置すると、図3.20のようになるだろう。この図から見ても明らかなように、球面に結像させるためには大きな焦点深度を持ち、短い焦点距離、広い画角を持つ光源が必要となってくる。プロジェクタは本来の目的から平面に結像する構造になっているため、球面の内側全てに結像するほど焦点深度を持っていない。結果として、球面ディスプレイの広範囲に前面投射する

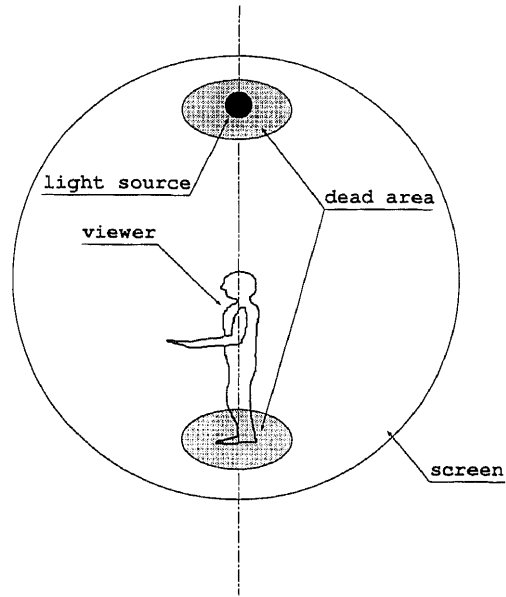


図 3.19: 光源と観察者の理想的な配置

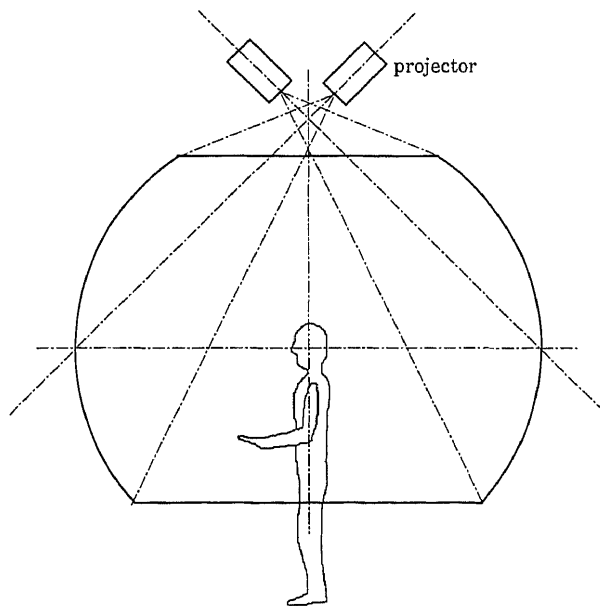


図 3.20: プロジェクタの配置

場合、求められる光源は以下の条件を満たすことが必要となる。

- 球面に映像をいきわたらせるような広い投影画角を持つこと
- 球面全体に結像できうる大きな焦点深度を持つこと

この条件を満たすためには、投影専用の超広角レンズを設計することになる。レンズ系設計には莫大なコストや時間を要し、しかも汎用性を損なうため、本研究では別の手段を模索し凸面鏡の性質に着目している。プロジェクタ等の光束を凸面鏡に反射させると光束が拡がり、同時に凸面の曲率と配置を適切にとると、光束の焦点深度が非常に大きくなる性質である。

凸面鏡を図3.19における光源付近、すなわち球の上部に持ってくると、映像が周囲に広がりつつ焦点深度の大きい映像が得られるため、前記の条件において好都合となる。実際にプロジェクタは下方から映像を投影することになるが、観察位置とプロジェクタが干渉する恐れがある。そこで図3.21のようにプロジェクタ映像を平面鏡で反射させると、プロジェクタの位置を気にせずに理想的な観察位置を確保することができる。

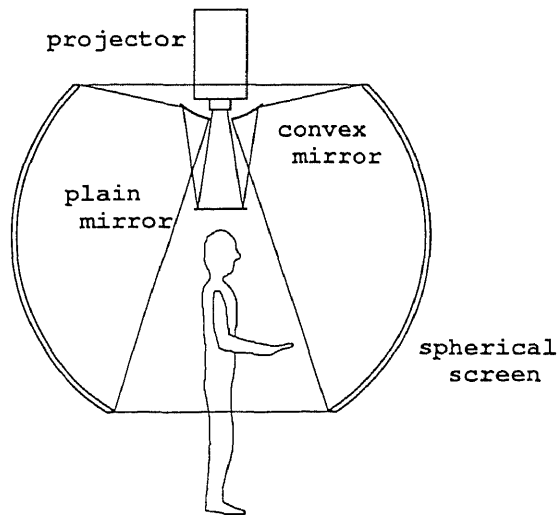


図 3.21: 全方向球面ディスプレイ

3.4.2 全方向球面ディスプレイの設計手法

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

(1) プロジェクタの結像

プロジェクタが放つ光の挙動を厳密に調べるには、プロジェクタの光源からプロジェクタのレンズ群による光の挙動を追跡し、光束の出力状態を導くことになる。射出レンズからの光束はレンズ設計者の意図した位置、つまり平面に結像し、その収差も実用上問題のない小さなものであると考えられる。そこで、プロジェクタから投影される映像は理想的な結像をしていると仮定すると、射出レンズから出る光束の挙動は図 3.22 のようなモデルで表わすことができる。

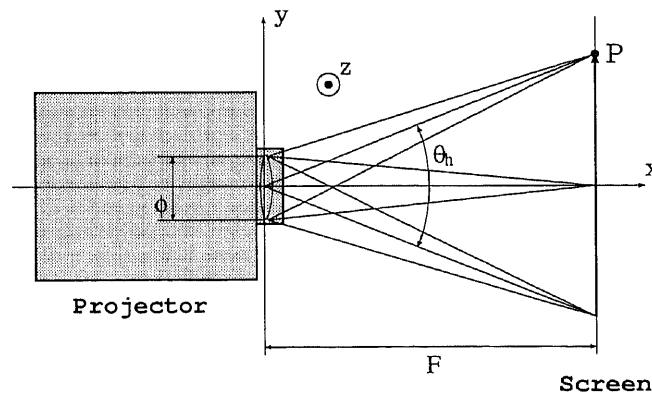


図 3.22: プロジェクタの結像

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

(2) 凸面鏡の反射による結像と収差

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

置くと、図 3.23 のようになる。

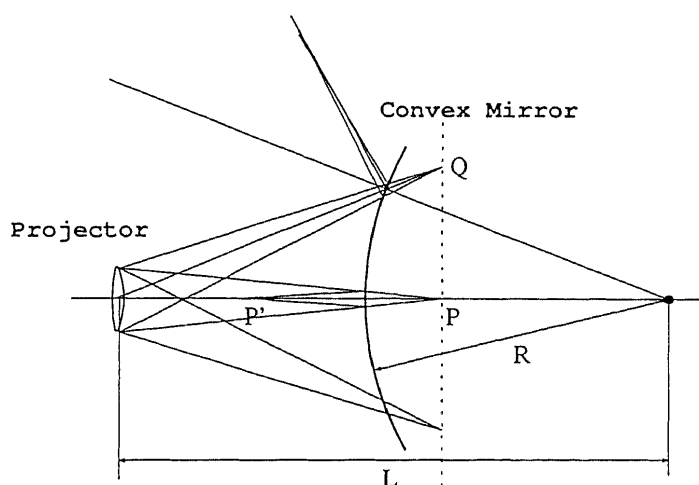


図 3.23: 凸面鏡による反射

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

(3) 結像評価

収差や結像を評価するには、プロジェクタの結像面上の各点に対して、レンズ面から出力される全光束について、レンズ面からスクリーンまでの光線追跡をしなければならない。図 3.24 はある結像点に向かってレンズ面から出る光束の挙動について示している。光束がスクリーンにぶつかる時 1 点で結ぶのが望ましいが、前節で述べたように凸面鏡から反射すると収差が発生する。これを観察するには、レンズ面から出る光束群を光線追跡し、最終的にスクリーンに投影された錯乱円の状態を調べればよい。レンズ面全てについて調べることは膨大な計算量につながるため、レンズの特徴点を利用することになる。実際の光学計算における像評価では、レンズの F ナンバーや実際に何本かの光線を追跡して定めた特徴点を用いている。しかしプロジェクタ内部の光学系が不明瞭なことから、ここでは射出瞳が最も大きく見積られた場合、すな

わちレンズの径の大きさを利用する。レンズの中心 M を通る主光線と、レンズ端 (A, B 及び C, D) を光束の特徴点として用いると、光線追跡の結果としてスクリーンに十字 ($A'-B', C'-D'$) 及び M' が出来ることになり、この位置と大きさが結像の状態を示す目安となる。この十字が小さく、 M' の同心円上にあるほど理想の結像状態に近いことになる。

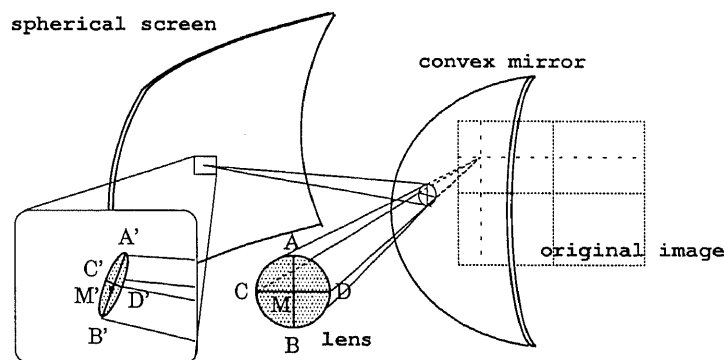


図 3.24: 光線追跡

3.4.3 実際の設計計算

これまで述べてきた光学系の知見に基づいて、実測値による光線追跡シミュレーションをおこない、実機的设计を図った。プロジェクタの光学的な仕様、鏡やスクリーンの配置関係や曲率がわかると、光線追跡が可能となり結像位置や状態を決めることができる。しかし、結像位置などから鏡の配置や曲率などを逆計算することは極めて難しい。また曲率や鏡の大きさなどの物理的制約や、光路上の障害物による干渉などの要因から、数式による算出はさらに見通しの悪いものとなる。そこで、物理的制約などによる境界条件を設定し、未知数である鏡の配置や曲率を仮定しながら、もっとも結像状態のよい場合を評価して決めていくことにしている。

(1) プロジェクタ光束モデルの設定

本研究で使用したプロジェクタは DLA-G10(Victor) で、プロジェクタからの光束の挙動を調べるため、実機より測定したものをを用いた(表 3.1)。このプロジェクタには鉛直方向にあおり角があり、台形歪みの補正機能が備わっていないため、上下方向の対

焦点距離 F	1850~[mm]
垂直画角 θ_v	0.0~0.264[rad]
水平画角 θ_h	-0.173~0.173[rad]
レンズ径 ϕ	72[mm]

表 3.1: DLA-G10 の光学仕様 (実測値)

称性が損なわれてしまう。そこで見かけ上のあおりをなくすために、 프로젝タをピッチ回転下向きに 0.132[rad] 回転して画角の中心に新たな光軸を設定している。

(2) 配置関係と境界条件

次に光線追跡で必要となる鏡やスクリーンの配置について幾何的に定める。各パラメータを図 3.25 のようにとると、5つのパラメータで平面、球面を2次関数などによって表現することができ、光線の挙動を定めることができる。なお、観察者の視点はスクリーンの中心にあるものとし、原点を射出レンズの中心、光軸を x 軸、 프로젝タのあおり方向を y 軸、紙面手前方向を z 軸とする。

これらの未知数は、物理的な配置条件や加工上の制約などによって拘束を受けることになる。主な境界条件は、1. 프로젝タと凸面鏡が干渉しないために $L_c < R_c$ 、2. 平面鏡と観察者の干渉しないために $L_m \leq L_s$ 、3. 焦点深度を大きくするために $F < 2L_m + L_c$ 、4. スクリーン加工上の制約より $R_s = 1050[mm]$ である。この境界条件の下で未知数 L_m, L_c, R_c, L_s の4つを設定すると、光線追跡の準備が整うことになる。

(3) 光線追跡

光線の追跡にはスネルの法則 [27] に基づいておこない、平面鏡の反射、凸面鏡の反射を経てスクリーンへの結像までを幾何学的に算出する。 프로젝タの光束モデルと境界条件下の未知パラメータを利用すると、結像の状態が定まる。x-y 平面で対称となるので、光線追跡すべき結像点は半分になる。しかし結像点に対し5つのレンズ特徴点に関する光線追跡をおこなわなければならない、設定すべき未知パラメータは4つあるので、未知パラメータを境界条件だけで拘束しながら計算しても膨大な時間を必要とすることになる。

そこで未知パラメータの大まかな推測と光線追跡の結果表示を目的として、光線追跡のシミュレーションプログラム (図 3.26: Virtual Projector) を作成した。図は完成形 (表 3.2) による光線追跡の結果を表示している様子である。結像状態を表す十字が球上

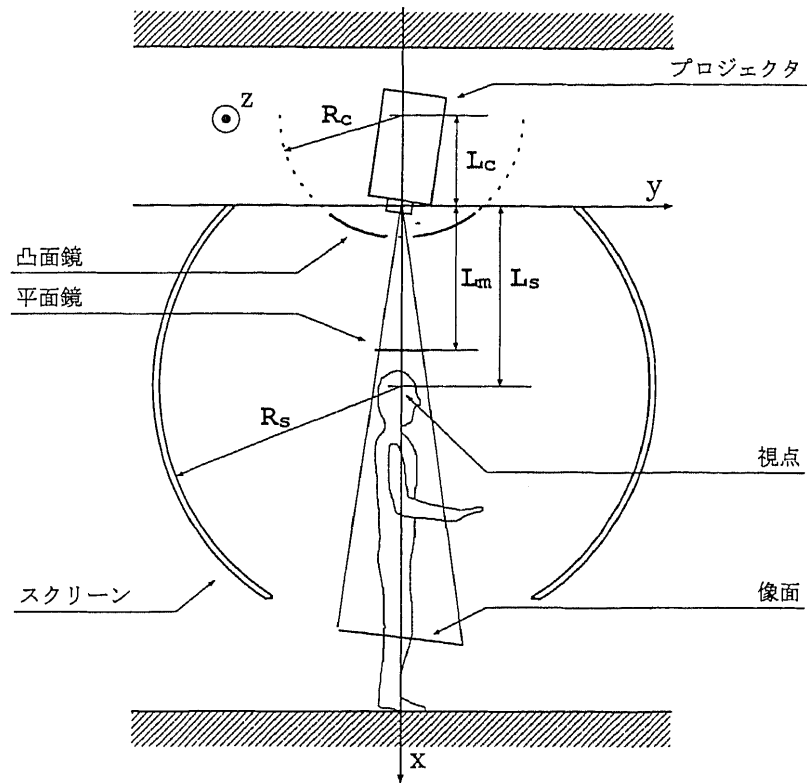


図 3.25: 光学設計のためのパラメータ

に表示されることになるが、この図では最も結像状態のよい解を表示しているため十字が点となって表示されている。各パラメータを変更しながら結像状態や表示位置などを目視で確認することができるので、未知パラメータの大きな組み合わせ範囲を探ることができる。

(4) 結像の評価

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

結像状態を示す十字はレンズ特徴点による光線追跡の結果から得られる。このとき、主光線の結像位置が十字の内部にあることを確認しておく。レンズ有効径を大きく見積もっているため、実際より大きめに算出される。計算の結果、最も小さくなったのは1点あたりの十字の辺の長さが平均で5.38[mm]であった。

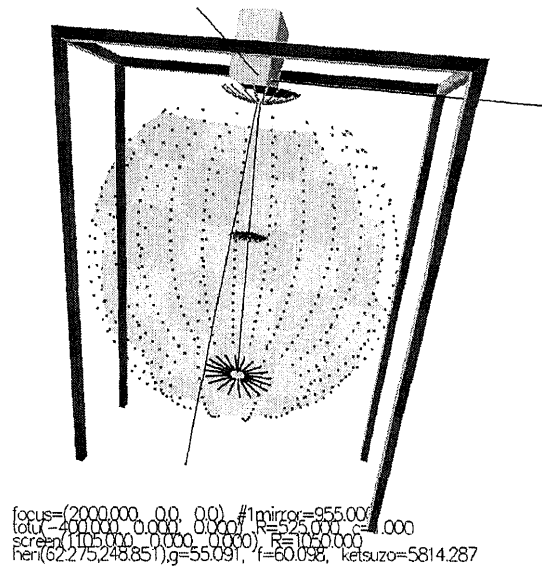


図 3.26: バーチャルプロジェクタ

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

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

これらの結果はすべて同時に満たされるわけではないので、このより評価基準を緩くしながら画素数を優先して選定した。この時の評価と選定されたパラメータは表3.2のようである。

(5) 照度分布シミュレーション

これらのパラメータによって、球面スクリーンが製作されることになるが、こうした映像を拡散投影する場合、映像の明るさが深刻な問題となる。そこで、バーチャルプロジェクタによって球面スクリーン上で画像を結像させた場合の照度分布シミュレー

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

表 3.2: 選定されたパラメータ

ションをおこなっている。

シミュレーションの方法は次の通りである。プロジェクタの光量を平面上で格子に分割し、その単位格子あたりの光束量を求める。その単位格子が平面鏡、凸面鏡を経てスクリーンに結像するときの面積を算出する。単位格子は4点で定まるので、4点の結像位置を求め、その4点が構成する2つの3角形面積の和を計算することになる。単位格子の結像面積が求めれば、単位面積あたりに照射される光束量、すなわち照度が算出される。

このような手順で算出された照度分布は、図 3.27 のようである。なお、プロジェクタの全光束量は 1000[lm] であり、この図の格子の分割数は緯線方向に 50 分割、経線方向に 100 分割である。紙面向かって右方向がプロジェクタのあおり方向 (上方向) で、紙面鉛直方向に対して対称な分布となる。スクリーンの上方に比べ、下方では明るさが約半分程度になっている。なお本シミュレーションでは、鏡の反射による減衰や、プロジェクタの投影光量の不均一性については考慮に入れていない。

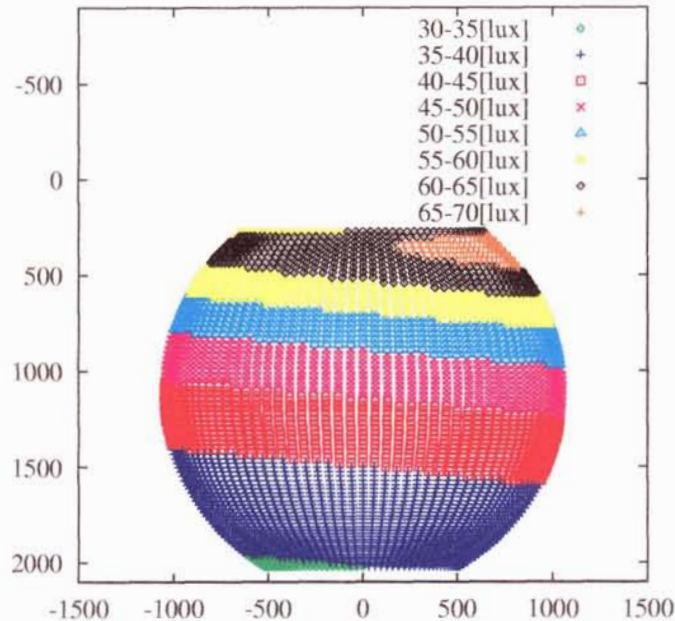


図 3.27: シミュレーションによる照度分布

3.4.4 試作機の性能

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

球面スクリーンの直径は2.1[m]で、垂直角は仰角、俯角あわせて125度と大きめにつくってある。材質は発泡スチロールの削り出しによるもので、メンテナンス性を高めるために全体を8分割することができる。図3.28は8つのうちの1ユニットをはずして、内部が見える状態にしたものである。投影面側は、投影光線の反射を押さえるため発泡剤0.1%を塗布しており、スクリーンゲインは0.47である。架台を含めた占有容積は2.4(W)[m]×2.4(D)[m]×3.3(H)[m]で、天井がやや高め部屋に設置することができる。プロジェクタは前出のDLA-G10で、全周に拡散呈示するためにSXGAやHi-Vision表示に対応したものを採用している。凸面鏡はアルミ合金を削り出しの後メッキ加工したもので、架台に固定されている。また平面鏡は通常のガラス鏡で、光線を遮らないようにテグスで吊り下げられている。

本ディスプレイが映像を照射した場合の結像状態について調べた。結像の位置については、表3.2の仰角や俯角を得られることがわかった。結像の状態を定量的に示すこ

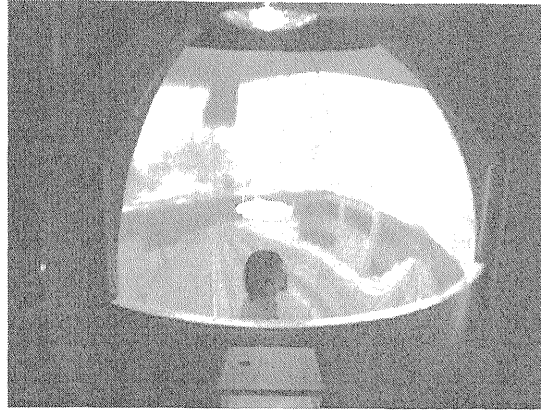


図 3.28: 試作した全方向球面没入型ディスプレイ

とは困難であるため、1画素の大きさを測定し本来表示される画素の大きさと比較することになっている。測定箇所はあおり角の影響を平均的に受ける部分で、図3.25におけるx-y平面上のスクリーン上の点である。測定値と設計された理論上の画素の大きさを表3に示す。ここでの測定値とは、1画素がスクリーン上に表示された時の大きさである。範囲で記入されているのは、原形をとどめている画素の大きさと周囲に広がった光の大きさを意味している。また理論値とは画素の分布(図3.31)から算出したものである。理論値から測定値を引いたものが、結像の誤差や凸面鏡の拡散などの要因によって発生したものとなる。表3.3の十字の長さ、つまり結像の誤差と比較すると、設計値より小さいことがわかる。これはレンズの有効径を大きめに見積もっているために生じているものである。結像の状態を評価して得られた設計値はおおむね妥当であると考えられる。

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

表 3.3: 全方向球面ディスプレイの表示画素の大きさ

なお、主観的に映像を観察した場合スクリーンの最下点付近では画素の輪郭まで弁別される。水平付近においても画素の周囲へ拡散する光量が少ないため、画素の判別

ができる程度である。仰角 40 度付近から経線方向への拡散が顕著になり、場所によっては画素の原型をとどめないところもでてくる。したがって、本ディスプレイでは画面上方に文字などの表示要素の小さな情報を出力することは難しい。

次に本ディスプレイが映像を照射した場合の照度分布は、図 3.29 である。この測定では、スクリーン上に 10[cm] 角の白い正方形をプロジェクタで照射していき、そこに光電池式照度計 (SANWA LX-3131) のセンサをスクリーン面法線方向に置いて計測している。左右対称となる半球分について経線、緯線を 10 度おきにとり、その位置に 10[cm] 角の白い正方形をプロジェクタで投影していく。その位置に光電池式照度計 (SANWA LX-3131) のセンサをスクリーン面法線方向に向けることで、照度を測定している。図の右方向が画面の上方向 (あおり方向) に相当し、照度は 20~35[lx] の範囲に分布していることがわかった。照度のばらつきに関しては、スクリーンに均一な映像を投影しても、明るさのムラは感じられない程度である。また明るさについては、球面ディスプレイの設置環境を暗くすることでコントラストを確保し、実用上問題なく呈示をおこなうことができる。なお、理論値による照度分布 (図 3.27) と比較すると、約半分の光量が失われていることになる。これは反射鏡表面における減衰が大きいためと考えられる。また、シミュレーションでは照度が上下で 2 倍程度ばらついていたが、実測ではほとんど観察されなかった。プロジェクタは、一般に映像の周辺になるほど光量が減るといった投影性能を持っていることに起因しているものと思われる。

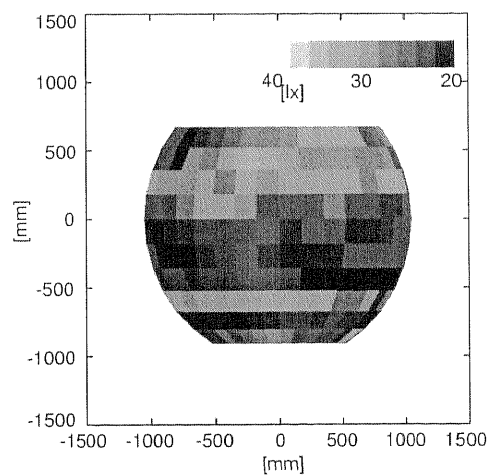


図 3.29: スクリーン上の照度分布

3.4.5 ソフトウェアによる歪み映像生成

この球面ディスプレイに映像を投影するには、あらかじめドーナツ状に歪ませた映像をプロジェクタに入力しなければならない。ここではテクスチャマッピングの技法を応用し、所定の位置の画像を貼付けることによって補正をおこなっている。水平角 θ の映像を補正する場合の様子を図3.30に示す。補正処理は以下のような手順でおこなわれる。

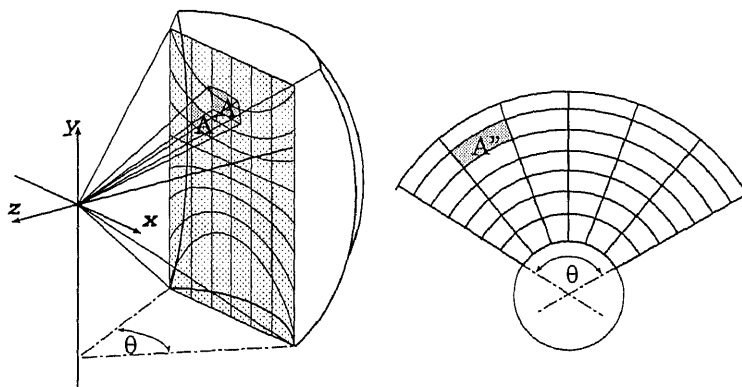


図 3.30: 視野角 θ の映像の球面歪み補正

(1) 映像を全天周分フレームバッファに格納する

まず最初に、図3.30の球殻部分の映像を全天周分描画する。全方向を分割するとき、スクリーンの半径や仰角、俯角がきまると、視野の大きさは幾何学的に算出でき、図の網目部分のところに映像を射影された画像を生成することができる。

(2) テクスチャの切り出し

次に描画された映像から、所定の位置で切り出すための準備をおこなう。球面上の領域 A に対応する画像上の A' の部分を算出することに相当する。扇上の各領域 A'' に対する A の位置関係はスクリーンの光学設計時に算出されており、図3.31のようになる。ここでの θ_1 はプロジェクタの主光線(中心軸)に対する画角(扇形の放射方向に相当)で、 θ_2 はスクリーンの緯度を表している。スクリーンの緯度と水平角がわかると A の位置が定まり、その座標を画像上に射影することによって A' の空間座標が求まるというわけである。なお、網目の部分はテクスチャとして扱われるため、(1)の視野の大きさからテクスチャ座標を算出する必要がある。

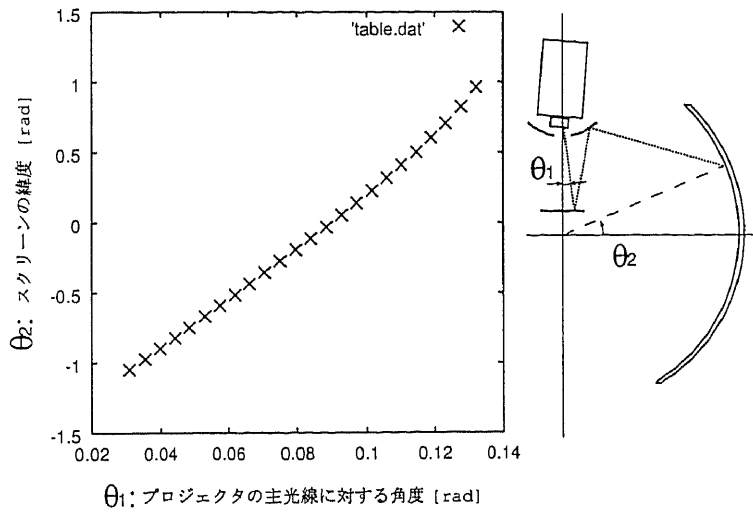


図 3.31: 角度の対応テーブル

(3) テクスチャを所定の位置にはりつけていく

最後の段階で、切り出されたテクスチャを扇形の所定の位置に貼付けていく。中心角は(2)で用いた水平角に対応し、母線の長さは(2)で参照した図3.31のとおり θ_1 から算出できる。テクスチャの切り出し点と貼付け点が定まると、テクスチャマッピングを実行することができる。この作業を複数方向の映像に対して同様におこなうと、継ぎ目のない全周分の映像が完成する。なお、プロジェクタのあおり角による台形ひずみをキャンセルするには、プロジェクタのあおりがある状態で視野を定義する必要がある。

実際にプロジェクタから投影される映像は、図3.32左側の視野映像に対して右のようになる。これは観察者が格子模様の立方体の中にいる時の映像で、全周を4分割したときの視野がA~Dに対応している。なお、描画にOnyx(i-station,IP25)を利用した場合の描画速度は、この図のような映像の場合で15[Hz]、純粋に補正に要する時間は約50[ms]である。

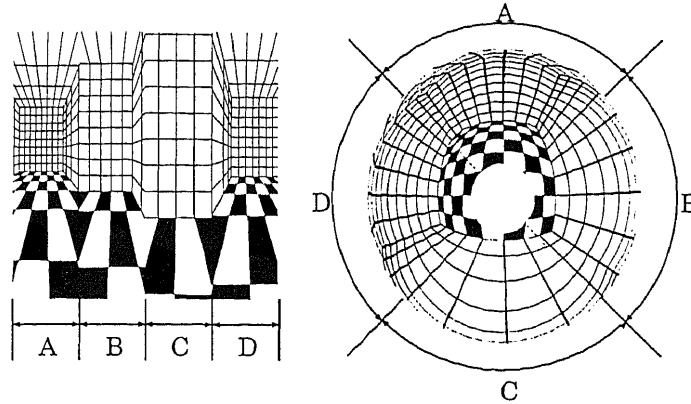


図 3.32: テクスチャの原画と最終出力画像

3.4.6 楕円鏡による歪み映像生成

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

一般に2次曲面を用いた撮像系は、口径の大きな反射式の望遠鏡などで用いられており、光線を多く集める目的で用いられている。VRに積極的に利用している例としては、回転双曲面ミラーをカメラの鉛直上に配置し、結果として全方位の映像を取得することができるHyperOmniVision[28]がある。双曲面鏡は焦点に向かってくる光束を別の焦点に結ぶという、撮像に理想的な性質をもっている。この性質を利用して、本球面スクリーンの光学系に適合するような回転双曲面の算出を試みた。プロジェクタ画角とスクリーン画角の対応関係(図3.31)を用いて光線追跡計算をおこなったところ、双曲面鏡ではスクリーンの垂直視野角をカバーすることができないことがわかった。

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

算出の方法は、x-y平面上での反射点を2点与え、その2点の位置と傾きを境界条件とし、残りの点によって誤差修正をしながら近似曲面を導出するものである。最初に与える2点はカメラの画角、焦点距離、焦点深度を満たしておく必要がある。図3.33は、x-y平面上のy正方向におけるスクリーン上下端を境界条件として近似曲面を導出した結果である。この回転楕円体は短軸長134[mm]、長軸長192[mm]である楕円を長軸まわりに回転した立体で、さらに図におけるz軸に1.78度傾けたものである。

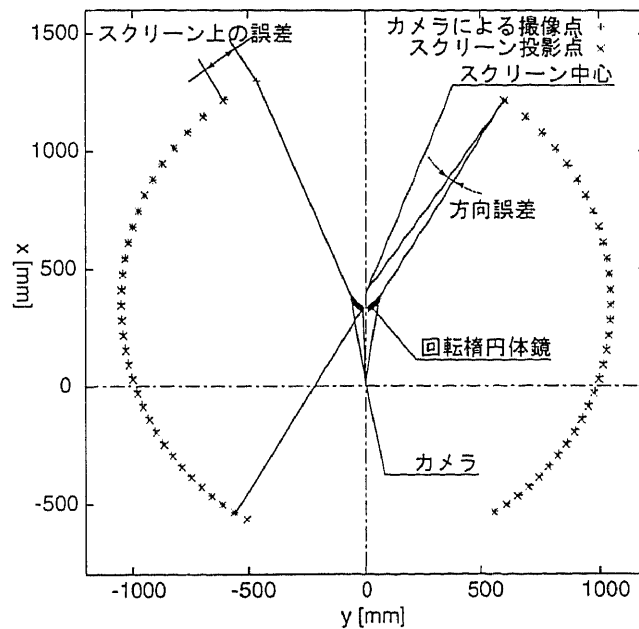


図 3.33: 近似曲面とそれによる誤差

この回転楕円体を用いるとき、撮影時と投影時との誤差が大きくなる場所は、境界条件から離れたところに位置するスクリーン上部の縁の部分で、スクリーン上での誤差が180[mm]、方向に関する誤差が16度であった。この結果に基づいて回転楕円体鏡を作成し、ハイビジョンカメラと組み合わせた撮像系を図3.34に示す。この装置によって撮像した映像(図3.35)を球面ディスプレイに投影したところ、スクリーン上縁の映像に関しては歪みが大きいですが、それ以外の部分では不自然さは感じられず、呈示上大きな影響を与えないことがわかった。しかし非常に広範囲の映像を反射するため、撮影範囲に極端に明るい物体があると周囲が露光不足のため暗くなったり、ハレーションをおこすといった問題が生じた。

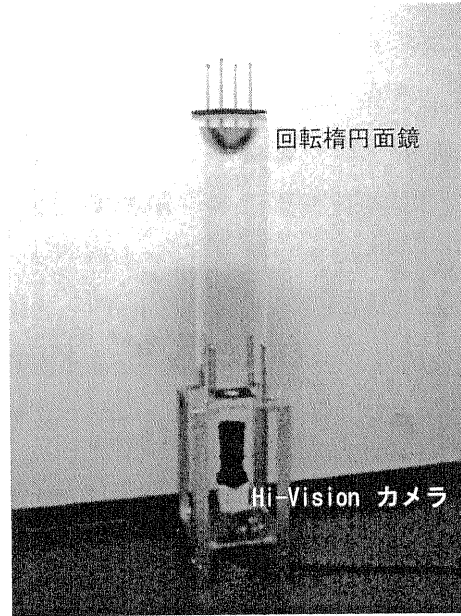


図 3.34: 実写映像の撮像系

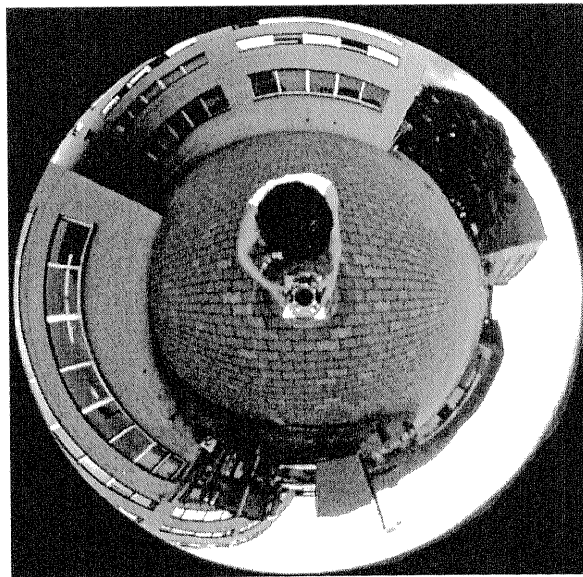


図 3.35: 撮影された実画像

3.4.7 Virtual Projector を用いた他の構成例

本論文で述べてきた、凸面鏡を用いた球面没入ディスプレイの設計手法は、図 3.21 で示される構成以外にも適用できるような一般性がある。例えば、3.4.3 で設計した試作機では 1 系統の映像を全方向に呈示しているため、解像度の点で必然的に問題が生じてくる。現行のプロジェクタを活用して、視野の前方に画素を集める方法も有効であるという考えから、ドーム型没入ディスプレイの設計もおこなっている。本装置の設計方法は 3.4.3 と同様であり、作成された配置関係は図 3.36 で、そのときの仕様は表 3.4 となっている。この構成において映像を表示するためには、必然的に補正映像が必要となってくる。3.4.5, 3.4.6 章で述べた方法を利用して、補正テーブル及び撮像系も同時に作成している。

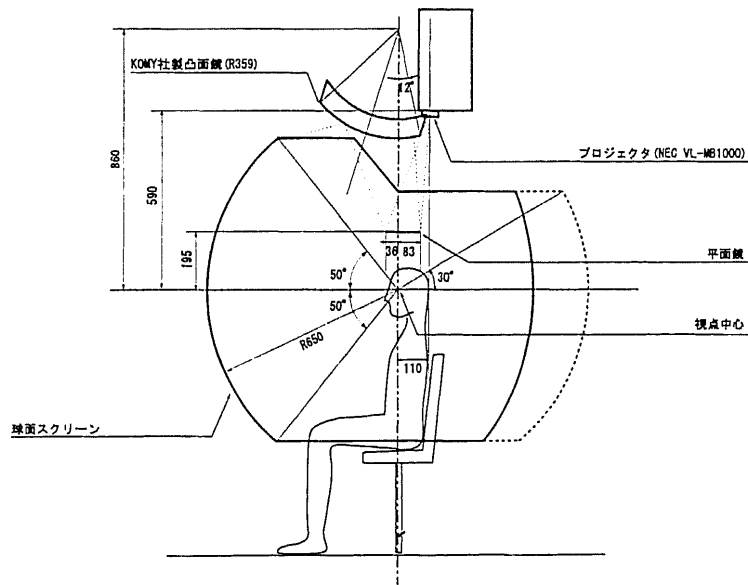


図 3.36: ドーム型スクリーンの側面図

なお、図 3.36 は半球型であるが、平面鏡の角度を変更してプロジェクタを頭上前方に配置すると、前後の対称性を確保することができる。3.36 の構成を 2 セット合体することによって全方向型に拡張することも可能となる (図 3.37)。

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

表 3.4: ドーム型スクリーンの仕様

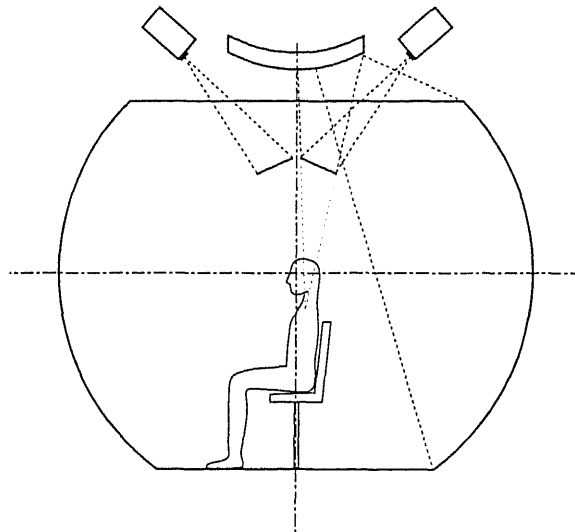


図 3.37: 拡張されたドーム型スクリーンの側面図

3.5 まとめ

本章では視覚呈示装置として、没入型ディスプレイに関する要素技術について述べてきた。菱形12面体ディスプレイ、背面投射球面ディスプレイと改良を重ね、最終的に凸面鏡の反射を用いた球面没入型ディスプレイを製作設計した。そこでは実際に光線追跡シミュレーションによって得た結果より試作機を作成し、さらに本ディスプレイに映像を投影するためのインフラを構築した。

このディスプレイの特徴は、凸面鏡を用いて映像を省スペースながら広い範囲に結ばせていることである。単純な機器構成にもかかわらず、全方向の映像を呈示することが可能になる。しかし、映像を拡散させると継ぎ目の問題がなくなる反面、解像度

の上で問題が生じてくる。また映像を出力するためには、計算機による歪み補正や楕円鏡を用いて特別に生成しなければならない。こうした点は、従来の補正がいない没入型ディスプレイと比較すると短所となり得ることを念頭におくべきである。

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

なお、こうした没入型ディスプレイで両眼立体視を実現することは、距離感の生成という点で重要な意味を持つ。本研究では、全方向球面ディスプレイにおける両眼立体視の実現には至らなかった。本投影方式で立体視をおこなうためには、1. 時分割に絶え得るプロジェクタを利用する、2. 液晶プロジェクタを2台利用して左右の映像を分離する、といった方法が考えられる。左右の映像分離に際しては、映像が全方向へ拡散するという性質上、2A. 円偏光を利用する、2B. プロジェクタのレンズ面と眼前に高速で同期反転するシャッタを置く、などの工夫が必要となる。なお実写映像の立体視化は、撮像装置の構造上2台のカメラによるキャプチャは原理的に不可能である。レンジファインダなどで映像の距離情報を抽出し、人工的に両眼視差を発生する仕組みが必要となる。

第4章 力覚と視覚による統合呈示環境

見えるものに対して触れてみたいという願望は、誰しもが思うことであろう。現在の電子メディアは視聴覚が先行しており、いわばショーケースの中に物があって手で触れないような状態にある。こうした触れるといった願望を満たすために、力覚関係の研究者は視覚系と融合させる研究をおこなってきた。本章は力覚と視覚を同時に呈示できる環境として、問題点を整理し、その実現方法について述べるものである。

4.1 力覚と視覚による情報呈示の問題点

計算機が人間に情報を訴えるためには、人間の感覚量を呈示できるなんらかの装置が必要とされる。視覚に対してはCRTなどのディスプレイ装置、力覚に対してはフォースディスプレイやテクスチャディスプレイなどである。本論文ではこの情報呈示装置として、2章でフォースディスプレイについて、3章では没入型ディスプレイについて述べてきたとおりである。

視覚における、現在で考えられうる最も情報密度の高い伝達方式は、おそらく動画映像であろう。一般に映像と呼ばれているものは、人間の残効、すなわち残像特性を利用しており、走査線を画面の上から下まで高速に並べることによって1枚の静止画像を生成している。さらに静止画像を秒間10フレーム以上切り替えることによって、動画として認識されるといわれている。

一方、人間の深部感覚にも残像特性のような性質が存在する。触・圧・振動や温・冷に対して、はじめの感覚強度が大きいほど、残存感覚時間が長くなることが知られている。しかし、長時間の持続的刺激によって感覚が消失する順応という性質もあり、視覚のようにこの特性を利用することは難しい。それに加えて、深部感覚では人間の能動的な動作を伴う、という点で本質的に視覚と異なる。これは、人間の動作入力に対

して直ちにその結果を出力に反映させなければならないことを意味する。物に触れようとする場合、10分の1秒でもそこに物がない、つまり触刺激が発生するのが遅れると、不自然に感じるわけである。深部感覚呈示における計算機側の更新速度は、高速であればあるほどよい、ということになる。

力覚と視覚によって同時に情報呈示をおこなう場合、2つの感覚特性に応じて呈示環境を鑑みる必要が出てくる。視覚呈示ではフレームレートで10[Hz]以上、力覚呈示は可能な限り速いことが望ましい。特にフォースディスプレイではリンク機構の制御をしている以上、安定した呈示を得るために50[Hz]以上のサーボレートが必要であることが経験則よりわかっている。つまり力覚呈示では、視覚と比べて時間的な分解能が高く、より多くの情報量を必要とすることを意味する(図4.1)。こうしたことから、安定した呈示を得るために、更新速度を互いに独立にする、すなわち、感覚の種別において処理を分割するのが望ましい。

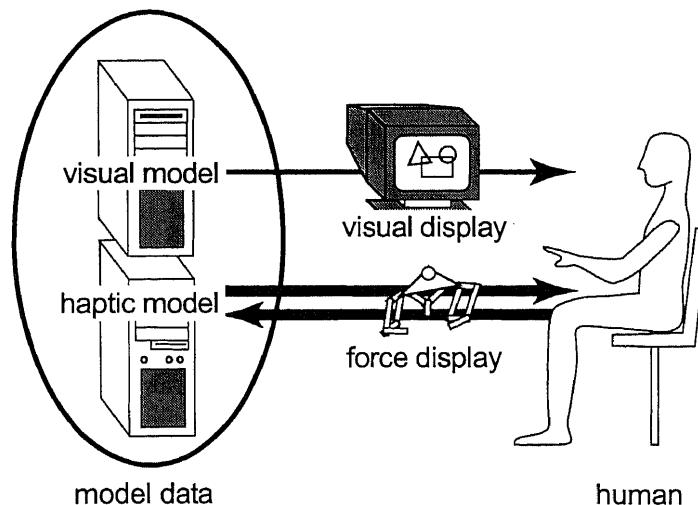


図 4.1: 力覚と視覚の情報入出力

視覚と力覚の分割処理によって、安定した呈示を得ることができるが、逆に弊害も発生する。例えば、呈示されているモデルデータに対して何らかの作用が発生した場合、その作用は視覚、力覚に反映されなければならない。モデルデータを共有し、互いに連携をとりながら、整合性を保ちつづけるといった仕組みが必要となってくる。こうした仕組みを実現するに際し、技術的には問題がない。しかし、この仕組みは複雑

を極めるため、呈示内容に特化した汎用性の低いプログラムとなってしまふ。これは、アプリケーションソフトを開発、構築していく上で、大きな弊害となる。

このような弊害に対して、開発上、汎用性のある部分は再利用して、生産性を高める工夫が必要となってくる。従来より仮想環境の構築に関する研究が活発におこなわれてきたが、上記のような弊害を意識して取り組んでいるものも数多い。視覚と力覚を導入している環境について典型的な例を省みると、SensAble Technologies社のGHOST[32]、ノースカロライナ大のArmlib[33]、東京大学のVis-Age[34]、筑波大のVECS[35]などが報告されている。最近では触覚専用の構築ソフトウェアすら存在している[36]。これらの環境では力覚の導入を主眼にしているため、力覚呈示装置に関するフレキシビリティが高く、視覚と力覚の統合について様々な工夫が見られる。

GHOSTでは、ポリゴンや3次元プリミティブの位置や形状、また硬さや重さ、摩擦などの力覚パラメータをC++のクラスを用いて定義している。開発者はオブジェクトの定義をおこない、GHOSTライブラリをリンクすることで視覚系と力覚系のアプリケーションを構築することができる。一方Armlibは、力覚系の制御と視覚呈示の処理を分割している。力覚帰還ライブラリが力覚系と視覚系に用意され、力覚系がサーバ、視覚系がクライアントとなっている。複数台の力覚呈示装置をサポートしており、クライアントは各サーバへモデル情報や力覚情報を送信する。サーバは受信した情報を解釈し、装置のデバイスドライバを介して制御をおこなう。VisAgeとVECSでは、ツリー構造によって仮想空間および各オブジェクトを管理している。視覚系と力覚系の処理はこのツリー構造を参照をおこなうことで実現している。またHIPは触覚専用のライブラリで、構造の異なる各種の力覚呈示装置に対して極めて柔軟に対応できるソフトウェア環境である。視覚呈示には別途、専用のプロセスを作成することになる。

本研究室ではVECSを踏襲した統合環境として、LHX(Library of Haptics)[37]を開発してきた。LHXでは通信マネージャや共有メモリマネージャなど、計算機に依存する部分、デバイスマネージャなど力覚呈示装置に依存する部分など、各機能ごとに分割管理している。これによって、視覚と力覚の統合に関する問題のほか、計算機による依存性や装置による依存性を排除している。

本研究では、3章で開発した多種の視覚呈示装置を対応させるため、LHXを基に改良を重ねた。本章では視覚と力覚を統合する環境として、現在のLHXについて紹介す

るものである。

4.2 統合環境の構築方針

視覚と力覚を統合する環境を改良、構築するにあたって、本研究では次のような問題点に着目し、構築方針としている。

1. 各感覚に対する更新速度

このようなシステムの必要十分条件は、各種の感覚特性に応じた呈示を行なえることである。前節で述べてきた通り、視覚に対する情報の更新速度が10[Hz]以上、力覚に対する更新速度は可能な限り高速であることが望ましい。なお力覚呈示において、50[Hz]以上あれば安定した呈示ができることが経験的にわかっている。

2. 視覚呈示装置に対する柔軟性

種々の視覚呈示装置に対して適応性を高めるために、呈示装置専用のドライバを作成しておく。力覚呈示装置に対しても同様である。これはアプリケーションプログラムの作成過程において、生産性を高めるのに有効である。また、視覚呈示装置の仕様に変更がある場合、過去に作成した応用プログラム全てに修正を加える必要がなくなる。

3. 計算機の機種非依存性

機種依存性の高い部分は交換可能な状態にしておく。最近の動向として、とくにパーソナルコンピュータの性能向上が著しい。従来までは特殊な描画専用の計算機が用いられていた部分を、パーソナルコンピュータで代用できるようになってきており、機種間での移植を円滑におこなうためである。

4. 再利用性

基盤となるドライバ等は、他の研究や実験など多様な目的で再利用されることを想定し、機能ごとに分割しておく。

4.3 統合環境の全体概要

本研究で構築した統合環境では、その機能によって大きく4つに分類される。新規にソフトウェアを構築する場合は、視覚、力覚の核となる部分を作成し、各機能に付随したモジュールを適宜、利用する形となっている。図4.2にその基本構造を示す。

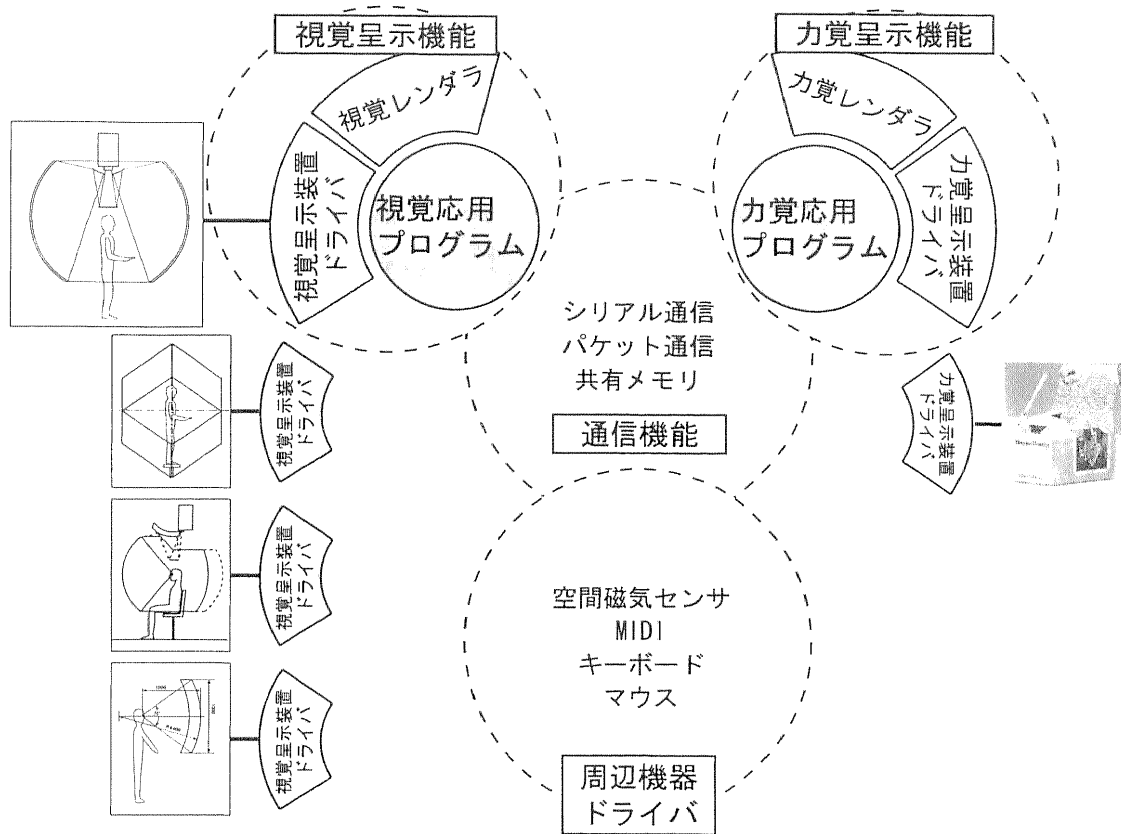


図 4.2: 力覚と視覚の統合呈示システム

1. 視覚呈示機能

視覚呈示機能は、視覚呈示装置に映像を出力するためのものである。本機能は中心となる視覚応用プログラム、サブプログラムである視覚呈示装置ドライバ、および視覚レンダラから構成されている。

視覚応用プログラムでは、呈示する内容についての記述をおこなう。アプリケーションの制作者が視覚に関するプログラムを記述するのはこの部分だけである。したがっ

て、この内容はアプリケーションごとに異なる。ここからサブプログラムを呼び出したり、他の機能を利用することが可能である。

視覚呈示装置ドライバは、種々の視覚呈示装置に関するサブプログラム群である。CRT ディスプレイを除く視覚呈示装置ではそれぞれの映像の出力方法が異なるため、核装置に対応するドライバを提供するものである。本ドライバでサポートする装置は、CRT ディスプレイ、背面投射球面ディスプレイ、没入型球面ディスプレイ、頭部搭載型ディスプレイ、及び菱形12面体ディスプレイである。異なる視覚呈示装置を利用する場合、各々のデバイスドライバに差し換えるだけで実装することができる。

視覚レンダラでは、再利用性の高い幾何的物体の表示について定義するサブプログラムである。例えば手やボタン、バネなどのアイコン表示や、ポリゴンモデルの読み込み、表示に関する記述がされている。

2. 力覚呈示機能

力覚呈示機能は、力覚呈示装置のセンサ入力、モータ出力を司るものである。本機能は中心となる力覚応用プログラム、サブプログラムである力覚呈示装置ドライバ、および力覚レンダラから構成されている。

力覚応用プログラムでは、視覚と同様に呈示する内容についての記述をおこなう。力覚呈示装置ドライバから受け取った位置情報をもとに、発生させるべき力覚刺激量を算出し、ドライバに反力情報を与えることになる。ソフトの制作者が力覚に関するプログラムを記述するのはこの部分だけとなる。ここからサブプログラムを呼び出したり、他の機能を利用することが可能である。

力覚レンダラでは、2章で述べてきた力覚マッピングを実装しており、空間データと位置情報から力覚マッピングによる刺激量に変換される。また、空間データの読み込みや加工をおこなうほか、空間データを回転移動させた場合の座標系変換に関する処理を実行できる。

力覚呈示装置ドライバでは、力覚呈示装置に関する特有の入出力を扱うものである。異なる力覚呈示装置を利用する場合、基本的に各々のデバイスドライバに差し換えるだけで実装できる。

3. 通信機能

視覚呈示機能と力覚呈示機能の間で、モデルなどの整合性をとるために必要な機能

である。また、周辺機器と接続する場合にも用いられる。本機能でサポートするのは、TCP/IP、RS232C 及び共有メモリである。共有メモリは同一計算機上で通信をおこなう場合のみに用いられる。

なお本機能は、複数のフォースディスプレイが接続することを前提にしたネットワークインタフェースでもある。したがって複数ユーザが同時に仮想環境を利用することができる。この機能によってグループウェア環境を容易に構築することが可能となる。

4. 周辺機器ドライバ機能

この機能は、視覚、力覚呈示以外に関する周辺機器を管理する機能である。本機能でサポートする周辺機器は次のとおりである。

- キーボード
主にキーボードから各プログラムに対して指示を入力するときに用いる。
- マウス
主に視覚呈示における視点、仮想物体の回転移動を入力するときに用いる。
- Midi
Midi 楽器を接続することによって、音声を出力するためのドライバである。このドライバを利用するには RS232C による通信機能が必要である。
- 空間位置センサ
空間磁気センサ (polhemus) を接続するためのドライバである。主に頭部のトラッキングなどに用いられる。このドライバを利用するには RS232C による通信機能が必要である。

4.4 統合環境の実装

本章で述べてきた統合環境は、現在 SiliconGraphics 社の IRIX 6.x と WindowsNT のワークステーションで実装可能である。SiliconGraphics 社の計算機は描画処理に優れており、WindowNT の動作する計算機は演算に関してコストパフォーマンスが高い。これらの計算機環境は、画像生成と力覚呈示の点から適している。本統合環境では、構

築目標として機種依存性を排除しているため、いずれかの計算機環境においても、両機種が混在する場合でも動作することを保証している。視覚呈示においては、グラフィックスライブラリ OpenGL を用いており、両機種間でソースレベルの互換性が保証されている。表 4.1 は本環境に実装されているモジュールとその機能、機種依存性を表している。各機能を構成するモジュールは、それぞれ C 言語で記述されており、関数の形で供給されている。

モジュール名	モジュール機能	計算機機種
pose	HapticMaster の位置計算ドライバ	汎用
power	HapticMaster のトルク計算ドライバ	汎用
polhemus	シリアル通信による polhemus ドライバ	汎用
midi	シリアル通信による midi ドライバ	汎用
connect	SGI 上で RS232C によるシリアル通信をおこなうドライバ	SGI 専用
connect-6.2	SGI 上で RS232C によるシリアル通信をおこなうドライバ (IRIX 6.2 以前)	SGI 専用
cons	SGI 上で kbhit() と同様のコンソール入力を行なうためのドライバ	SGI 専用
socket	SGI 上で Ethernet による通信をおこなうドライバ	SGI 専用
process	SGI 上でプロセスを起動するドライバ	SGI 専用
dist-bar	SGI 上で全方向球面ディスプレイに映像を表示するための補正ドライバ	SGI 専用
dist-ens	SGI 上で EnspheredVision に映像を表示するための補正ドライバ	SGI 専用
share	SGI 上で共有メモリを利用するドライバ	SGI 専用
predist	SGI 上で背面投射球面ディスプレイ (2 画面) に映像表示するためのドライバ	SGI 専用
garnet	菱形 12 面体ディスプレイに映像表示するためのドライバ	汎用
connect	NT 上で RS232C によるシリアル通信をおこなうドライバ	NT 専用
socket	NT 上で Ethernet による通信をおこなうドライバ	NT 専用
share	NT 上で共有メモリを利用するドライバ	NT 専用
process	NT 上でプロセスを起動するドライバ	NT 専用
adpio	NT 上で ad ボード (PCI9112) を駆動するためのドライバ	NT 専用
adread/ barrel/ dome/	HapticMaster キャリブレーション init.def を設定するプログラム Barrel スクリーン用参照テーブル table.dat を設定するプログラム Dome 背面投射球面ディスプレイ用参照テーブル domewin.cfg を設定するプログラム	SGI 専用 SGI 専用 SGI 専用
adread/	HapticMaster キャリブレーション init.def を設定するプログラム	NT 専用
cg_mouse	画面上の映像の視点をマウスで移動 (WorldToolKit[38] に準ず) するライブラリ	汎用
cg_track	画面上の映像をマウスで回転する外部ライブラリ	汎用
f_track	画面上の映像をフォースディスプレイで回転する外部ライブラリ	汎用
fontout	ラスターフォント描画外部ライブラリ	汎用
matrix	行列計算 (double) 外部ライブラリ	汎用
matrix_f	行列計算 (float) 外部ライブラリ	汎用
shapes	描画プリミティブ外部ライブラリ	汎用
primitiv	力覚プリミティブ外部ライブラリ	汎用
iso-surface	ポリウムデータから等値面ポリゴンデータを抽出するプログラム	汎用
isoview	等値面ポリゴンデータを表示するプログラム	汎用
makegrad	ポリウムデータから勾配データを抽出するプログラム	汎用
reconst	ポリウムデータの一部を切り出すプログラム	汎用
resample	ポリウムデータを線形補完によって格子数の変換をするプログラム	汎用
volview	ポリウムデータを表示するプログラム	汎用

表 4.1: 統合環境を構成するモジュール

4.5 統合環境の性能評価

4.2で述べた通り、本統合環境の構築目標は各感覚に対する更新速度の点、異なる視覚呈示装置への透過性、異なる計算機への透過性、および本環境の再利用性であった。ここではモデルとなるアプリケーションを本統合環境に構築して、更新速度の面について検討し、透過性を実装によって示す。

性能評価に用いたアプリケーションは、図4.3のようなものである。視覚的に表示されるのは、力覚呈示装置の把持部の空間位置を示すカーソルと呈示対象となる立方体で、力覚的に呈示されるのは、立方体の各面の法線方向に対する抗力である。視覚、力覚の呈示に関して最も基本的であり、本統合環境の性能を調べるには十分な構造のものである。

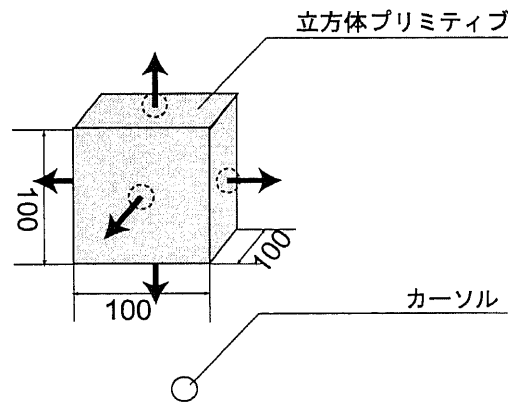


図 4.3: 性能評価用アプリケーション

ここで測定の対象となるのは、各感覚に対する更新速度であるが、視覚呈示装置に対して透過性が高いことを示すために、各呈示装置についてのドライバを差し換えた場合のものを作成し、評価の対象としている。同様に、機種依存性を示すため力覚処理と視覚処理が同一計算機 (SGI Onyx i-station, PC/AT) にあるもの、および分散される (Onyx + PC) ものについて作成している。なお PC による歪み補正は、計算機がサポートしていないため測定不可能である。

表 4.2 はそれぞれの環境における視覚、力覚更新速度の実測値である。テクスチャマッピングによる歪み補正をおこなうと視覚更新速度が遅くなるのは3章で述べてきた通りだが、本モデルより複雑なものを呈示するためには、10[Hz] という制約からお

よそ 40[msec] で描画を完了しなければならない計算となる。当然のことながら、視覚処理と力覚処理を同一の CPU で実行すると、お互いに負荷が加わるためにパフォーマンスが悪くなる。逆に、処理が別 CPU に分散された場合には力覚処理が非常に高速になる。この場合は、むしろ視覚処理が遅くなるほど視覚処理によるフェッチが少なくなり、力覚更新が速くなっていくものである。したがって、視覚的力覚的に複雑なモデルを呈示するときには、更新速度の面からお互いに分散処理するのが望ましいといえる。

視覚更新速度 [Hz]			
視覚呈示装置	実装形態		
	単独 (SGI)	分散 (SGI+PC)	単独 (PC)
CRT	78.8	72.6	68.3
菱形 12 面体ディスプレイ	72.2	71.7	20.7
背面投射球面ディスプレイ	17.8	17.9	—
全方向球面ディスプレイ	17.9	18.0	—
Ensphered Vision	18.0	18.2	—

力覚更新速度 [Hz]			
視覚呈示装置	実装形態		
	単独 (SGI)	分散 (SGI+PC)	単独 (PC)
CRT	1178.5	3620.1	2219.5
菱形 12 面体ディスプレイ	1153.7	3620.9	2819.4
背面投射球面ディスプレイ	1145.3	3638.8	—
全方向球面ディスプレイ	1161.2	3638.7	—
Ensphered Vision	1164.3	3637.6	—

表 4.2: 本環境における視覚、力覚更新速度

第5章 医療データを用いた統合呈示環境の評価

本章では、医療データの可視化、可触化に焦点をあて、本研究における統合呈示環境の実例としている。CTやMRIなどで得られた医療データは、それ本来の画像データには医科学的になんら意味を持たない。人間が把握可能な感覚量と、理解可能な意味が伴うことによってはじめて有益な情報となる。ここでは本統合環境で医療データを可視化、可触化する方法について記している。また、その方法に基づいた呈示に関する客観評価をモデル実験を通しておこなっている。

5.1 医療データ呈示の目的

医療分野における大きな課題として、医療費の低減と低侵襲化、それに健康維持を目標とした予防医学への取り組みが挙げられる。現在、これらの発展を側面から支えている技術として、コンピュータの利用は不可欠なものとなってきた。とくに最近では、患部への低侵襲化をすすめるべく、従来の切開術から内視鏡的手術に部分的に移行してきている。しかしこのことは、より精密な手術前の診断を医師に要求するばかりでなく、手術時における術技も高度化し、医師に負担をかけることを意味している。従来のようなX線CTやMRI断層撮像などの検査自体の精度を上げるだけにとどまらず、医師が理解しやすく適切な判断につながるような、より密度の高い呈示や診断支援が求められる。

このような目的に対して、人工現実感の技術を導入することはきわめて自然である。対象となるデータの状態や構造を把握させるために、人間の複数の感覚に呈示したり、対象との相互作用的な操作ができるからである。したがって、人工現実感の分野において医療情報の呈示に関する研究も盛んにおこなわれている。例えば [39] は、患者の

MRA 画像情報より脳内の血管を抽出し、仮想内視鏡の視点から表示して、実際の手術経路を策定するものである。また、直腸の CT データを表示し仮想の潜水艇によってナビゲーションをおこなうことで低侵襲手術を目指すもの [40]、力覚を導入した例としては、患者の頭部医用画像から神経や頭蓋骨などの組織を呈示し、手術の経路計画をたてるもの [41] もある。

本研究では、これらの情報呈示において力覚を導入し、さらに没入型視覚ディスプレイを呈示に導入することについて述べてきた。没入型ディスプレイを利用すると、視野を変更するために視線を変えることもなく、周囲の状態を俯瞰することができる。例えば、「ミクロの決死圏」のような仮想の潜水艇や仮想内視鏡における周辺データの全方向表示は、医療情報を呈示するという上で意味のあるものだと考えられる。この章では以上のような医療情報の呈示方法について述べる。また、この全方向呈示と力覚を導入することが有意であるかについて、モデルデータを通して評価検討するものである。

5.2 空間データ呈示方法論

情報呈示という観点からすると、一般論としては視覚は広い範囲から情報を受動的に inputs し、全体の様子を把握するのが得意である。それに対し力覚は人体や装置が届く範囲で局所的な情報を能動的に得るのに適している。空間データの呈示ということ考えた場合、視覚としては広がりをもった映像、つまり全方向にデータを表示するような呈示方法が威力を発揮すると予想される。また、力覚としては詳細部を丹念に調べるもの、すなわちある特定の領域のデータを呈示するような呈示が適切であろう。この2つの呈示方法を同時に両立させるために、本研究では呈示のモードを2つ用意している。この呈示モードは視覚に重心をおいたナビゲーションモードと力覚を重視する触診モードである (図 5.1)。

ナビゲーションモードは、空間データが全方向に表示され、力覚呈示装置によってデータ内の視点を制御するものである。空間データの全方向表示によって、観察者が次にどちらに進めばよいか、内部の構造はどのようになっているか、などの情報を得ることができる。また力覚呈示装置によって、侵入してはならない領域や、進路方向を力覚表現することで、経路のナビゲーションの役割を果たすことも可能である。観

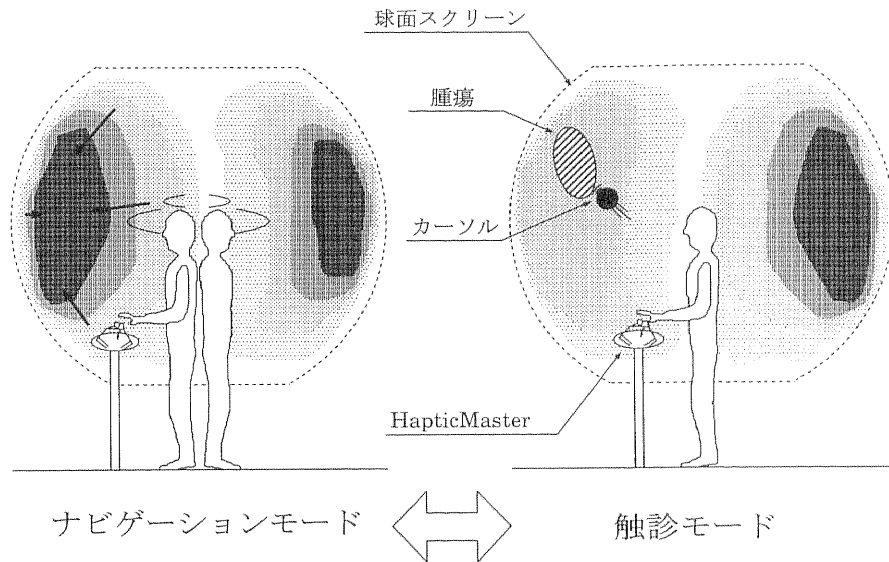


図 5.1: ナビゲーションモードと触診モード

観察者は力覚によってガイドを受ける操縦桿によって、安全な経路で周囲データを確認できることになる。

触診モードは、空間データが全方向に表示されるが視点の位置は変わらない。かわりに力覚呈示装置によって操作できるカーソルが表示され、このカーソルを介してデータへのインタラクションをおこなうものである。空間データの詳細部分は視覚的に半透明表示され、力覚的にはトルクや粘性などのマッピング呈示される。観察者は局所的なデータを視覚、力覚によって把握できることになる。

5.3 空間データの実装

5.3.1 視覚表現

没入型ディスプレイの周囲全体に、空間データをボクセル (volume cell) 表現することはあまり向かない。ボクセルとは立方的な画素を意味するが、データの内部に視点があると立方体の画素の大きさや間隔が強調されてしまうからである。さらに都合のわるいことに、ボクセルは通常では半透明で、その透過度がデータの高低を決定づけるものであり、周囲全体に半透明の画素を表示すると透過度だけが周囲の判断の材料

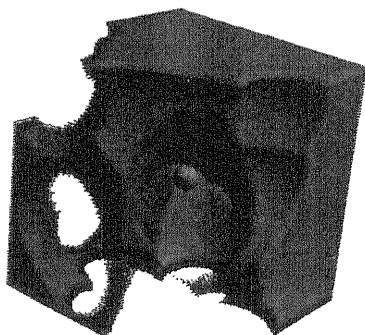


図 5.2: ボリュームによる視覚表現

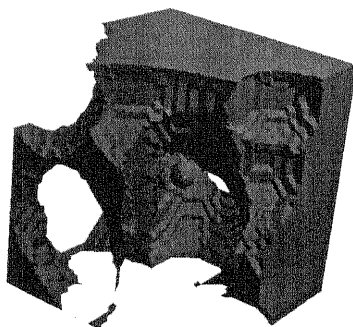


図 5.3: 等値面による視覚表現

となる。その結果、奥行き情報が完全に欠落してしまうのである。実際に呈示を試みたが、これは雲の中から雲の状態を把握しようとするのに似ている。

こうした理由より、空間データを周囲全体に表示するのは、データより抽出 (iso-surface) された等値面をもちいることにしている。空間データから等値面を抽出するためには、MarchingCube 法 [9] を用いてあらかじめサーフェスデータを生成している。本統合環境において MarchingCube 法による等値面抽出の処理系を実装し、任意の空間データや閾値に対して等値面を作成、表示できるようにしている。例えば図 5.2 は立方体ボリュームデータを任意に削り出して作成したもので、このデータより等値面処理されたものが図 5.3 である。一方、触診モードでは空間データの詳細部分に対して作用するものであり、局所データを俯瞰することができるため、その局所部分に対してのみボクセル表示をおこなう。局所部分はナビゲーションモードにおける前進方向

に作成され、等値面の表裏に関係なく重畳表示される。データ値の高いところには青、低いところには赤というように色情報によってマッピングしている。ボクセル表示は全て半透明とし、等値面の向こう側に隠れているデータも観察できるようになっている。

5.3.2 力覚表現

ナビゲーションモードにおける力覚の役割は、侵入してはならない領域の表現である。ここでは2章で述べてきた近接覚による呈示をおこなっている。近接覚の対象となるデータは、視覚において等値面処理をしたときの閾値としている。こうすることによって、視覚で表現される等値面の向こう側に侵入することはできなくなる。もし等値面の奥に進みたい場合は、あらためて等値面の閾値を定め直せばよい。

触診モードでは、2章の力覚マッピングによる呈示をおこなう。局所的なデータとカーソルが表示されるので、空間データにおけるカーソル位置を算出する。その位置よりデータ値が参照されるので、その高低に応じて、トルクや粘性、勾配などの刺激強度をマッピングしている。触診モードの視覚表示は半透明なボクセル表現であるが、力覚マッピングをおこなうことによって、奥行き方向のオクルージョンを解消することができる。

5.3.3 医療データの統合呈示

実際に医療データを呈示している様子を写真によって説明する。

図5.4は、本呈示環境の全景である。内部の状態がわかるように、没入型ディスプレイの4分の1を取り外しているが、実際は全方向に映像が呈示される。呈示されているデータは幼児の頭部CT画像で、皮膚以下の組織を等値面抽出して全方向に表示している。観察者の右手には力覚呈示装置があり、これを操作してデータとのインタラクションをおこなう。

図5.5は頭部CT画像を俯瞰している状態の表示である。以下の図では便宜的に歪み補正前の映像を示している。ナビゲーションモードではこの映像を全周で見ながら移動することができる。また、近接覚呈示によって皮膚の向こう側へ侵入することはできなくなっている。データ上に放射状に表示されている線は、データの方角を示すため

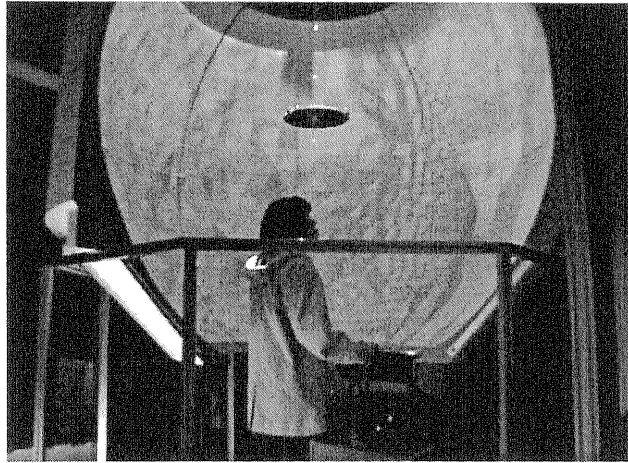


図 5.4: 統合環境による医療データ呈示の様子

の指標である。全方向にデータが表示されると自分の現在方向や位置を喪失する、という理由で描画している。中央に見える黒い立方体の枠は、触診モードにおける作用可能な領域である。触診モードに遷移すると、この領域内に半透明ボクセルが表示される。

図 5.6 はナビゲーションモードで口腔部に近づいたときの映像である。触診モードにおける作用可能な領域が等値面データにめり込んでいる。

図 5.7 は図 5.6 の状態から触診モードに遷移した場合の映像である。半透明のボクセルが皮膚以下の内部構造を示している。赤いボクセルほどデータ値が高く、骨などの組織が表現される。観察者が白いカーソルを操作すると、カーソルの位置のデータより力覚マッピングされた刺激をうける。データ値が高いところほど、トルクや粘性などの刺激値が強い。



図 5.5: 本環境による医療データの呈示例 (1)



図 5.6: 本環境による医療データの呈示例 (2)

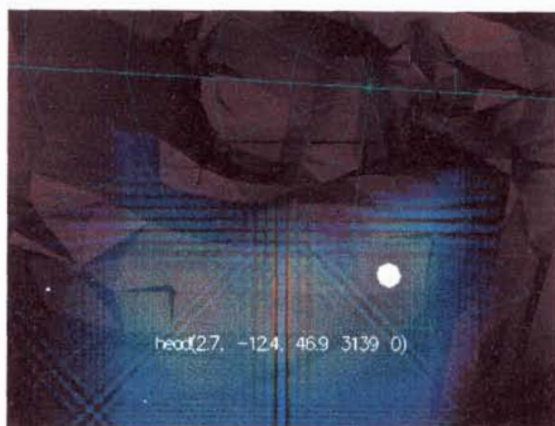


図 5.7: 本環境による医療データの呈示例 (3)

5.4 評価実験

5.4.1 実験条件

本論文では、情報呈示環境に対して力覚を導入すること、没入型ディスプレイをもちいて全方向に情報を呈示することを提案してきた。この導入による効果を、従来の典型的なVRの呈示環境と本呈示環境を比較することで評価している。本研究の提案する呈示環境を図示すると図5.8となる。また従来の呈示環境は図5.9である。

従来の典型的なVR環境とは、人間の頭部運動をセンシングして、頭部搭載型ディスプレイ(HMD)によって全周映像を呈示するものである。頭部運動の計測には磁気センサ(Polhemus)を用いており、6自由度の位置姿勢が計測される。計測結果に基づいて映像を生成し、その映像はHMDによって視覚呈示される。HMDはSony製のGlasstron(PLM-50:水平画角40.2度,垂直30.1度)で、NTSC入力が可能である。また操作入力装置としてジョイスティックが備え付けられている。ジョイスティックは、HapticMasterの位置姿勢入力機能だけを用いる。すなわちモータにトルクが全く出力されない状態で用い、これを3次元位置入力装置として利用する。

なお実験の計算機環境は、映像の生成にはSiliconGraphics社のOnyx(Infinite Reality,196MHz,IRIX6.5)、力覚の生成にはPC/AT互換機(Pentium450MHz,WindowsNT)を用い、両者は10BaseTによるTCP/IPによって接続されている。映像の更新速度は、没入型ディスプレイ環境の場合およそ10[Hz]、HMD環境の場合は磁気センサの更新速度と同じで約50[Hz]である。また、力覚の更新速度はいずれの環境においても3000[Hz]程度である。

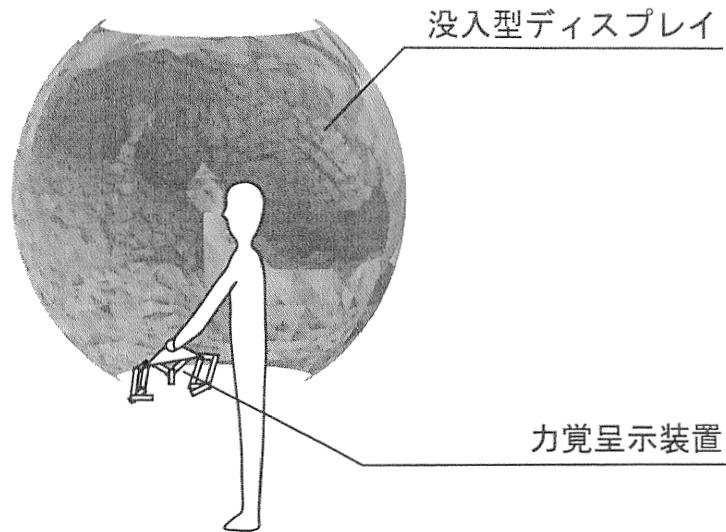


図 5.8: 本研究で提案する呈示環境

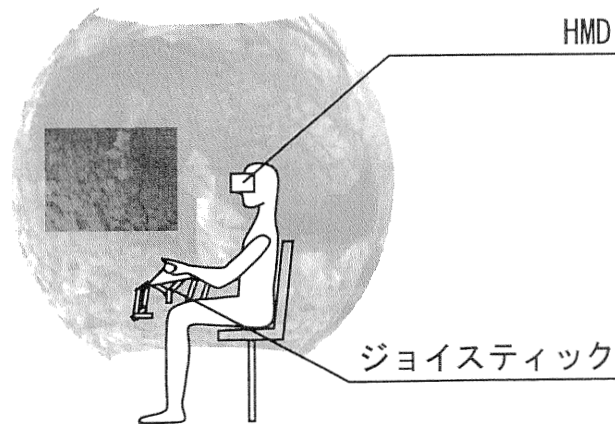


図 5.9: 従来の典型的な VR 呈示環境

5.4.2 ナビゲーションモードにおける操作性評価

ナビゲーションモードでは、周囲の情報を観察しながら目標となる位置に移動することを目的としている。実験の方法は、モデルデータの中に目標となる指標を表示しておき、その目標への到達性を空間的、時間的に測定するものである。モデルデータは、人間の食道などを模擬した洞窟モデル、骨格などを模擬したモデルを用意し、ランダムに指標を配置している。図5.10は洞窟モデルによる平面的な模式図を示している。スタート地点から移動を開始し、ゴール地点を探しながら力覚呈示装置、ジョイスティックを操作する。データはボリュームデータで構成されており、近接覚呈示に用いられる。また視覚表示の際にはボリュームデータから等値面を抽出する。なお評価に際しては、モデルデータ5種類(洞窟2, 骨格3)に対して被験者(学生6名)がそれぞれの環境で試行し、移動時の軌跡とタスクに要した時間を測定している。

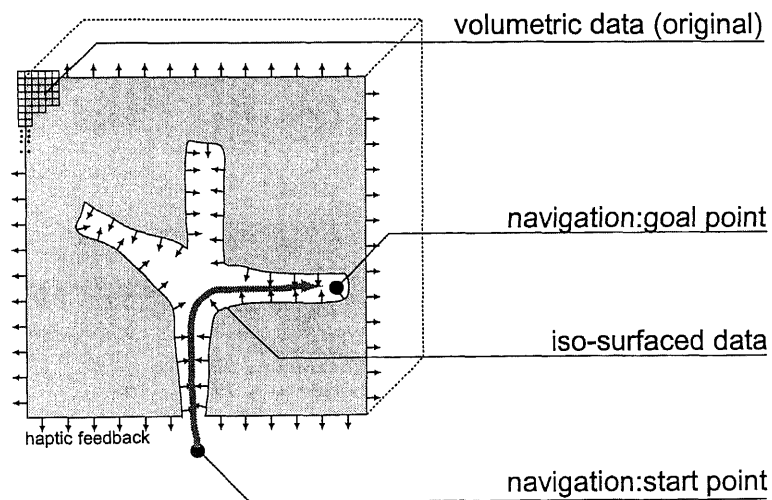


図 5.10: ナビゲーションにおけるタスク

図5.11は、ナビゲーションによる到達時間の全平均と標準偏差を示している。2つの呈示環境の間で平均の差の検定(t検定)をおこなったところ、有意性が確認された($p=1.7 \times 10^{-4}$)。また図5.12は、ナビゲーション時において等値面に侵入を許した時間的な割合を全試行で平均したものと標準偏差である。軌跡データから解析したもので、試行時間における侵入時間の割合のことを意味しており、大きいほど侵入を許していることになる。検定の結果、有意性が確認された($p=9.8 \times 10^{-11}$)。

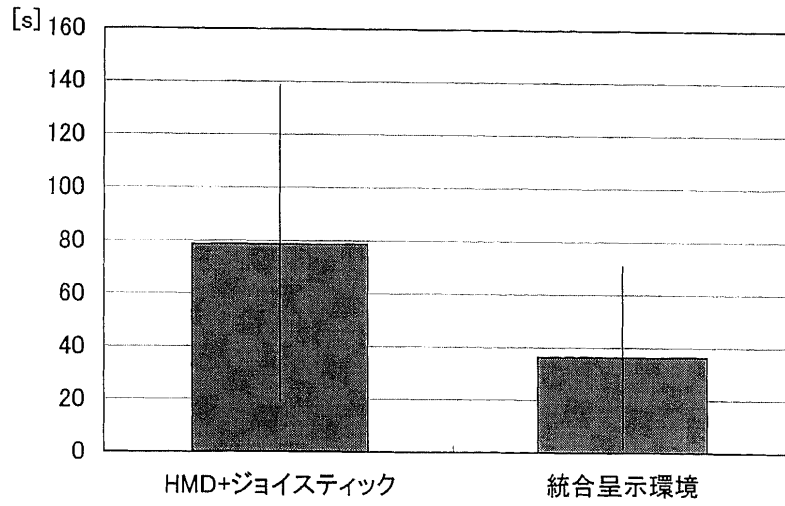


図 5.11: ナビゲーションに要した時間

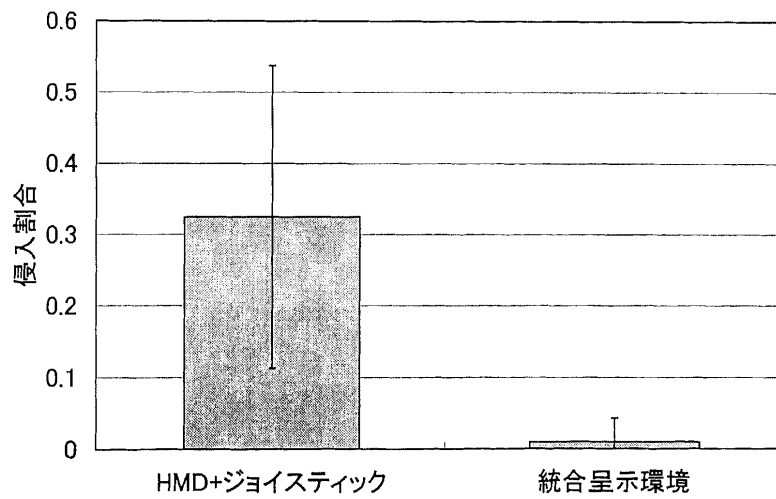


図 5.12: ナビゲーション時に侵入を許さない領域を侵した時間割合

5.4.3 触診モードにおける操作性評価

触診モードでは、対象データに対してインタラクションを行なうことを目的としている。実験の方法は、モデルデータの中に特異点となるデータを呈示しておき、その特異点への時間的な到達性、空間的な到達性を測定するものである。これはデータ中に腫瘍など、周囲と性質の異なる点を探すといったことを想定したものである。

図 5.13 のように、実験 5.4.2 のゴール地点に視点が固定され、目の前に局所的なボリュームデータが表示される。このときの視覚情報は図 5.7 のようになる。力覚呈示装置、ジョイスティックを操作してカーソルを動かし、局所的なボリュームデータの中にある特異点を探索する。力覚呈示では、粘性によって力覚マッピングしており、周囲のデータと特異点とは明らかに弁別できる刺激強度を用いている(特異点 $3.1[\text{kg}\cdot\text{s}]$, 等値面上 $1.5[\text{kg}\cdot\text{s}]$)。なお評価に際しては、モデルデータ 6 種類に対して被験者(学生 5 名)がそれぞれの環境で試行し、特異点を指示するまでの時間と空間位置を測定する。

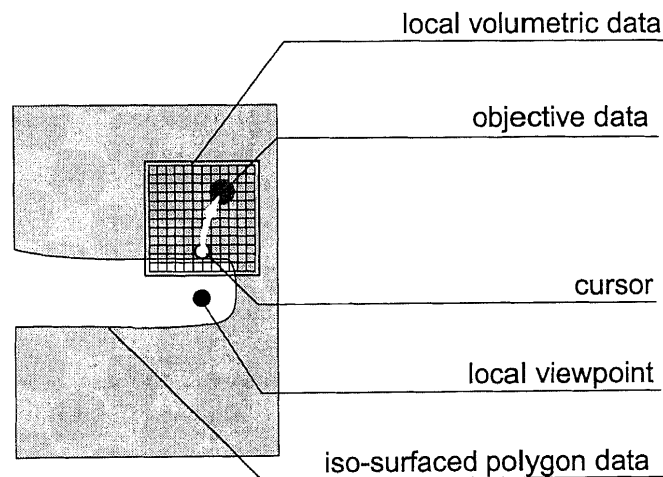


図 5.13: 触診モードにおけるタスク

図 5.15 は、触診による指示時間の平均と標準偏差を示している。2つの呈示環境の間で平均の差の検定をおこなったところ、有意性が確認された ($p=0.018$)。また図 5.12 は、触診による特異点の指示精度の全平均と標準偏差を表している。検定の結果、有意性が確認された ($p=9.6 \times 10^{-6}$)。

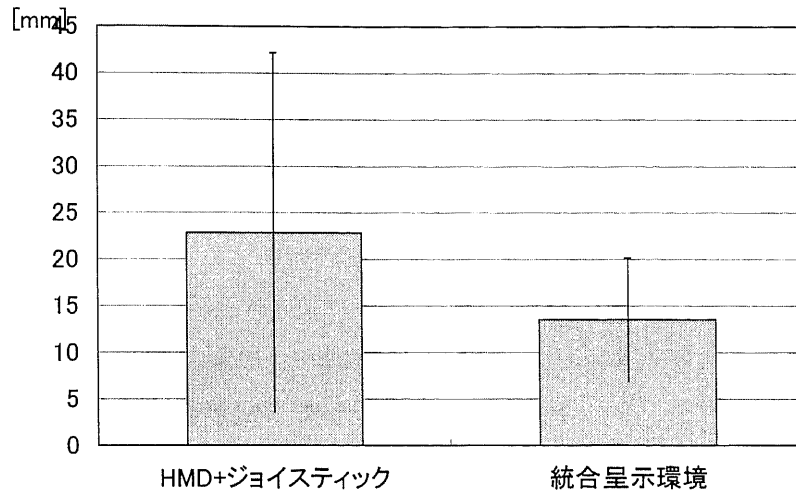


図 5.14: 触診モードにおける目標指示の精度

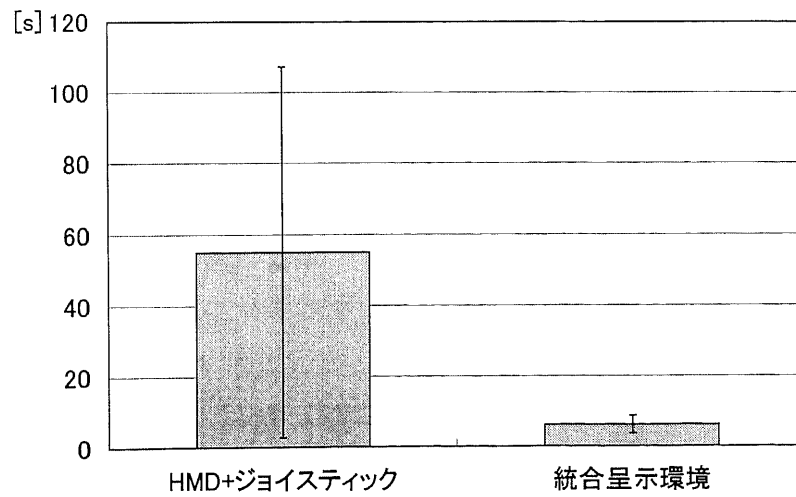


図 5.15: 触診モードにおける目標指示に要した時間

5.4.4 考察

被験者の感想として、手元の操作空間が非常に小さいのに対し映像空間が周囲全体であるため、操作に慣れるまで大変である、といった操作性の問題が指摘された。移動モードでは空間データに対する近接感覚呈示のため、手元のモデルデータの大きさは10[cm]四方の大きさであった。一方、視覚表示においても10[cm]四方のモデルを呈示しているが、全方向に表示しているため、相対的に自分が小さく周囲が大きく見えることになる。被験者によってデータ空間の見えの大きさをたずねたところ、およそ3~5[m]であった。こうした視覚と力覚における空間的な相違、つまり見えと操作空間のレジストレーション問題が操作性の弊害となっていると考えられる。したがって操作性を改善するためには、全方向に表示される映像に対して、力覚呈示装置の操作空間の狭さを感じさせないメタファの導入が求められる。たとえば力覚呈示装置によって内視鏡を操作するメタファ(内視鏡の操作は先端部分の向きを手元のワイヤー引っ張り量でコントロールする)や、乗り物の操縦桿などのメタファなどが考えられるだろう。近接感覚の呈示は直接的に利用できないが、データに近接するとワイヤーや操縦桿から反力を発生させることに応用することは可能である。

一方、データ空間の見えの大きさに関しては、距離感の喪失に帰着する。観察者を中心に相似的に拡大したモデルを球面ディスプレイに呈示しても、表示される映像は変化しない。線の太さや面の明るさで遠近感を表現することも可能であるが、本質的な問題の解決とはならないだろう。こうした距離感を没入型ディスプレイにて表現するには、両眼視差による立体視が必要であると考えられる。

また、没入型ディスプレイによる実験中に心理的な疲労を訴える被験者もいた。本実験では従来環境と本研究の提案する環境で、試行時間や空間的な精度についての評価をおこなっており、試行時間に着目すると従来のVR環境のほうが長い。にもかかわらず、没入型ディスプレイにおける実験で、被験者1名が実験中に疲労を訴え、実験途中で休憩をとった。こうした心理的、生理的疲労の要因は現時点で明らかとなっていないが、操作性の問題のほか、フォースディスプレイの発生するノイズ音がスクリーン内で反響する、周囲を暗くするため周辺に浮かぶ画面がちらつく、画面の更新速度が遅くフリッカーとなる、などが原因として考えられる。なお被験者によっては、HMDを被ったほうが疲れたという感想もあり、心理的生理的な影響に関して一概に比

較することは難しい。

第6章 展望

本研究は力覚に関する要素、視覚に関する要素が統合された一つのシステムである。それぞれの要素技術は独立した分野で、本章では展望としてシステムの各要素ごとに述べている。また、各要素がVRのシステムとしてどのような役割を果たし、将来的可能性について記述している。

6.1 力覚呈示に関する技術的問題と展望

触覚メディアが視覚や聴覚に大きく立ち遅れているのは、その呈示装置に関する開発や研究が大きく出遅れたことに一因がある。しかし、昨今では呈示装置の環境が整いつつあり、研究の関心もそのハードウェアからソフトウェアに移行してきた。

触覚メディアにおける呈示装置は、ある意味で聴覚メディアにおける楽器に似ている。楽器はある種の音色を奏でることができるが、あらゆる音を発生させることはできない。調律された楽器を楽譜にしたがって演奏することによって、初めて音色を音楽に変換することができるのである。これと同様に多種の力覚呈示装置も、ある特別な触覚を生成することができるが、あらゆる触覚を生成できるわけではない。オーケストラのように装置を組み合わせることによって重く、熱く、またざらざらする感覚を表現できることを意味する。

ここで重要となるのは、楽譜の存在である。楽譜についての詳しい歴史は定かではないが、9世紀ごろに賛美歌を記号化したものが残っているとされている。現在となっては、Cの音が周波数340Hzの正弦波という物理量で一意に定義できるが、楽譜のできた当時は物理量とは無関係であることはほぼ間違いない。音階のある種の法則を見出し、楽器が発生する音を記号化していたことになる。さらに楽譜の役割は、発音記号の羅列を人間にとって意味のある音楽として構成することにもある。

これを触覚にも使えないだろうか。現在の触覚ディスプレイは、いわば楽器の創成期に相当するだろう。触覚ディスプレイを昔の楽器に見たてて「触譜」を作れはしないだろうか。現状で触覚情報を表現するには、重さ何グラムとか何度の熱さという物理量でしか記述できない。本論文でも便宜上、感覚刺激量としてそのような表現を用いてきた。この表現方法は物理量に基づいており、機械的な再現性も高い反面、人間に直感的にわかりにくくなる。触覚のあらわす意味も伝わりにくい。触覚において楽譜の役割を果たすもの、触覚を記号化し人間にとってわかりやすく意味をなすものの存在は、今後触覚が多方面で利用される上で不可欠なものだと考えられる。

6.2 没入型ディスプレイに関する展望

没入型ディスプレイは人間の周辺視野を含めた映像を呈示できる、極めて臨場感の高いシステムである。しかしながら装置の規模や設置コストは莫大なもので、こうした理由から現状では研究用途やイベントなどでしか見かけることはない。将来的に一般に普及するには、取り組むべき課題として設置容積、プロジェクタの価格、解像度の問題があげられるだろう。

例えば設置容積については、本論文でとりあげた凸面鏡による拡散を利用した投影方式も有効な手段の一つであろう。映像を周囲に配するために凸面鏡を利用すると、解像度や補正処理の面で新たに問題が発生することが本研究の知見より明らかとなっている。プロジェクタの解像度、低価格化については、おそらく時間が解決するものだろう。また映像の歪み補正に関して、本研究では計算機によるもの、凸面鏡による撮像の2種類を試みた。計算機によるものは補正処理に要する時間が大きく、鏡による補正ではハレーションを起こすといった問題が生じたが、両者を組み合わせることで実時間による実写映像の補正処理も可能になるだろう。

一方、没入型ディスプレイ自身の技術的な問題とは別に、ディスプレイとその呈示内容による、心理的、生理的影響についての問題にも取り組まなければならない。没入型ディスプレイはそれ自体が臨場感の高いシステムであるため、人によっては気分が悪くなるといった、生理的疾患を及ぼす恐れがある。例えば、1997年末の人気アニメによるてんかん騒動では、テレビという歴史的に成熟したメディアであったにもかかわらず、その放映内容によっててんかん症状を引き起こしたものであった。没入型

ディスプレイの開発は端緒についたばかりであり、こうした装置による負の影響について、慎重に調査、研究をしなければならない。また、この問題は没入型ディスプレイだけに限らず、まだ成長期にある VR システム全般について言えることでもある。

6.3 力覚と視覚の統合システムに関する展望

力覚と視覚の統合における問題点は、視覚と力覚の呈示方法が本質的に異なることに起因しており、視覚系と力覚系の分散処理、つまり二重処理が開発上の弊害となることであった。現状では視覚と触覚の異なる2種間での接続であるが、将来的にはネットワーク越しの装置間での通信や、処理時間が異なる多数の装置の接続なども考えられる。そこで通信状況が悪化した場合や、装置の追加によるシステム全体のスループットの低下などに対し、いかに破綻を少なくするかが今後の技術課題となってくる。

一般に制御に関するサーボレートが一定以下になると、発振や暴走する恐れがある。このことより、人命にかかわるシステムの場合、例えば遠隔手術シミュレータなどを利用している場合、深刻な問題となるだろう。このような問題に対し、通信インフラの整備は当然求められるが、統合システムにおいて柔軟に対応できる仕組みも考えられる。力覚呈示装置の安全性に関する重要度が高く、通信状況によって安全性を確保できない場合、視覚などの優先順位の低い情報に対し制限を加えるといった具合である。人命にかかわらずとも、莫大なデータをあつかう場合、その状況によって柔軟に力覚と視覚の振り分けることは重要になってくると思われる。

6.4 VR 技術の応用に関する展望

本研究の応用例として、医療データを全周に可視化、可触化し、いわば映画「ミクロの決死圏」のような環境を構築した。人間がマイクロ化して人体に侵入する、といったことはSFの夢物語としてしか存在しなかった。しかし、実際に侵入するのではなく、あたかも入っているかのような感覚をあたえることができるという可能性を示した。現状のシステムでは解像度の面などで問題が残っているが、プロジェクタの解像度やリアルティエンジンが改良されれば、より本物に近い映像が表示できるだろう。また、開発の進んでいるナノマシンなどを組み合わせることによって、実際に治療や施術が可

能になるかもしれない。

しかしながら、VRシステムの利点ばかりに注目することはできない。先に触れたように、電子メディアにおける負の影響、心理・生理的影響について、いまだに十分検討しなければならない部分が残っている。発展途上期にあるVRのシステムにおいて、こうした検討はなおさら必要であろう。通産省では1995年度より、「バーチャルリアリティシステム等における生理的・心理的影響に関する調査」をおこなっており[43]、現状のシステムにおける影響とその診断手法、システムの設計・使用にあたってのガイドラインなどを策定しつつある。こうした姿勢は、健全なVRシステムを構築するための指針となるにとどまらず、VRが社会的に広く普及する上で重要な役割を果たすものとする。

第7章 結論

本研究では、無機的な空間データを人間に伝達するための方法として、力感覚による呈示、没入ディスプレイによる呈示の導入を提案した。これを実現するために、力覚呈示、視覚呈示の各要素技術を統合し、1つのシステムとして機能する環境を構築した。また応用例として、ミクロの視点から人体データを探索操作できるいわば人体ナビゲータのような操作環境を、実医療データを元に構成した。この操作環境を通して、力感覚の導入、没入ディスプレイの導入の有効性を確認した。

以下に各章で得られた知見と結論をまとめる。

第2章

空間データを力覚に変換する方法について論じた。データを感覚情報に変換する力覚マッピングでは、トルク、粘性、勾配による刺激を利用して、人間がどの程度刺激を受容するか、その刺激から空間情報を得られるかをモデル実験を通して確認した。また別のアプローチとして、データに対する近接感覚を力覚表現し、それをデータ内のナビゲーションに積極的に利用する方法も提案した。また、実医療データにおいてナビゲーションが可能であることを確認した。

第3章

人間の周囲に映像を呈示するための方法について論じた。没入型ディスプレイの問題点を改良を重ねながら明らかにし、最終的には凸面鏡を用いて球面に拡散させる投影方式に至った。この方式を実現するために、設計時における光学計算と投影映像の歪み補正の方法について述べ、試作機を作製して構築例とした。本投影方式の利点は、従来の没入型ディスプレイと比較して投影容積、画像の継ぎ目などの問題が改善されることである。その反面、解像度の低下や歪み映像の生成処理は、高度な視覚呈示をおこなう上で不利に働くとはいわざるを得ない。

第4章

力覚と視覚という性質の異なる感覚を人間に呈示するための環境について論じた。この統合環境に求められる課題とは、各感覚に対する更新速度、装置に対する柔軟性、計算機環境の非依存性、ソフトウェア資産の再利用性であった。これら諸条件を満たすためのシステム概要を示し、実装した。

第5章

実データを呈示する場合の方法論について論じた。本呈示環境に空間情報を呈示するため、観察者がデータ空間に埋没するようなメタファを導入した。このメタファにおいて、没入型ディスプレイによる周辺視情報、力覚による情報を呈示するため、データ空間をナビゲーションするモード、局所的なデータを触診するモードの2つのモードに分けた。人間の頭部CTデータとモデルデータを通して、従来の典型的なVR環境、すなわちHMDとジョイスティックを用いた環境と操作性の比較対照実験をおこない、本研究で提案する呈示方法の有効性を確認した。

謝辞

本論文は著者が1998年4月より2000年3月にわたり、筑波大学大学院工学研究科博士課程在学中におこなった研究成果をまとめたものである。この期間中多くの方々から賜わったご指導、ご協力、ご支援に対し、心から感謝の意を表したい。

中でも、筑波大学 岩田洋夫助教授および矢野博明講師には著者の大学院生活を通じて格別のご指導と様々な興味深い研究課題を賜わり、衷心より深く感謝する次第である。研究のまとめに際し、筑波大学 星野力教授、太田道男教授、鬼沢武久教授、中村裕一助教授には貴重なご教示、ご助言を賜わり、深く感謝する。また、試作ディスプレイを製作するにあたってご協力いただいた機能工学系の技官の方々に感謝したいと思う。

また、研究室内外の生活を共にし、広く実験にご協力いただいた筑波大学機能工学系岩田研究室の先輩、同輩、後輩諸氏に感謝する。

最後に研究生生活を支えてくれた家族に感謝する。

2000年3月

橋本 渉

参考文献

- [1] 田村 博 編: ヒューマンインタフェース, オーム社, 1998
- [2] 廣瀬通孝: バーチャル・リアリティって何だろう, ダイヤモンド社, 1997
- [3] 畑田豊彦: 空間視知覚での心理物理学, 仮想現実学への序曲, 共立出版, pp.65-77, 1996
- [4] 佐藤誠, 他: 触覚のリアリティ, 仮想現実学への序曲, 共立出版, pp.110-116, 1996
- [5] Merrian-Webster, Inc.: <http://www.m-w.com/>
- [6] Iwata, H. et al.: Interaction with Autonomous Free-form Surface, Proceedings of ICAT'94, pp.27-32, 1994
- [7] 広田光一, 他: 仮想物体の弾性モデルに関する検討, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, Vol.11, pp.521-526, 1995
- [8] Kaufman, A.: Volume Visualization: Principles and Advances, COURSE NOTES 31/32. Siggraph97, 1997
- [9] Lorensen, W. et al.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp.163-169, 1987
- [10] 藤代一成, 他: ボクセル指向3次元データ表現とその表示技術, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.3, 1993
- [11] Galyean, T. et al.: Sculpting: An Interactive Volumetric Modeling Technique, Computer Graphics, Vol.25, No.4, pp.267-274, 1991
- [12] Iwata, H. et al.: Volume Haptization, Proc. of IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality, 1993

- [13] 野間春生, 他: フォースディスプレイを用いた高次元ボリュームデータの力覚表現, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.121-128, 1993
- [14] Avila,R. et.al: A Haptic Interaction Method for Volume Visualization, Visualization '96 Proceedings, pp.197-204, 1996
- [15] Mor,A. et.al: Interacting with 3-Dimensional Medical Data Haptic Feedback for Surgical Simulation, Proc. The First PHANToM User's Group Workshop, 1996
- [16] Gibson,S. et.al: Simulating Arthroscopic Knee Surgery using Volumetric Object Representations, RealTime Volume Rendering and Haptic Feedback, The joint Conference on Computer Vision and Virtual Reality in Medicine and Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 1996
- [17] 田中良久: 心理学的測定法, 東京大学出版会, 1977
- [18] 伊関洋, 他: 3次元画像術中ナビゲーションシステム, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 Vol.1, pp.107-108, 1996
- [19] Cruz-Neira,C. et.al.: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality, Proc. of SIGGRAPH'93, pp.135-142, 1993
- [20] 廣瀬通孝, 他: はいれるテレビの開発と評価, ヒューマンインタフェース部会, Vol.10, No.2, pp.263-270, 1995
- [21] 廣瀬通孝, 他: 没入型多面ディスプレイ (CABIN) の開発, 日本バーチャルリアリティ学会 Vol.2, pp.137-140, 1997
- [22] 岩田洋夫: 菱形 12 面体を用いた全立体角ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会 Vol.1, pp.91-94, 1996
- [23] 岩田洋夫: シームレス全周球面ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会 Vol.3, pp.155-158, 1998
- [24] (株) 五藤光学: <http://www.goto.co.jp/product/virtualium-j.html>
- [25] Alternate Realities Corporation: <http://www.virtual-reality.com/products.html>
- [26] 畑田豊彦: 視覚効果による人工現実感, 精密工学会誌, Vol.57, No.8, 1991
- [27] 応用物理学会光学懇話会 編: 幾何光学, 森北出版, 1975

- [28] 尾上良雄, 他: 全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス, 信学技法, PRMU97-20, 1997
- [29] 三宅和夫: 幾何光学, 共立出版, 1979
- [30] 中山治平: レンズ設計工学, 東海大学出版会, 1986
- [31] 和田陽平, 他 編: 感覚+知覚 心理学ハンドブック, 誠信書房, 1969
- [32] GHOST General Haptics Open Software Toolkit, Brochure of SensAble Technologies Inc., 1996
- [33] Mark, W. et.al.: UNC-CH Force-Feedback Library Revision C.2, 1996
- [34] 木島竜吾, 他: 人工現実感の研究-仮想空間エディタ Vis-Edit の開発, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.187-190, 1991
- [35] 矢野博明, 他: 力覚帰還型仮想環境構築ソフトウェア, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.2, No.1, pp.1-9, 1997
- [36] 廣瀬通孝, 他: 触覚用共通ソフトウェア (HIP) の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.3, No.3, pp.111-119, 1998
- [37] Iwata, H. et.al.: LHX: An Integrated Software Tool for Haptic Interface, Computer & Graphics, Vol.21, No.4, pp.413-420, 1997
- [38] WorldToolKit windows user's guide, SENSE8 Corporation, 1994
- [39] 深作和明, 他: 仮想血管内視鏡による脳血管内手術に対する画像支援, 日本バーチャルリアリティ学会, Vol.3, pp.229-232, 1998
- [40] Hong, L et.al.: Virtual Voyage: Interactive Navigation in the Human Colon, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp.27-34, 1997
- [41] Guan, C et.al.: Volume-based Tumor Neurosurgery Planning in the Virtual Workbench, IEEE Computer Society, pp.167-173, 1998
- [42] 岩田洋夫: バーチャルリアリティにおける生理・心理面から見た生体への影響, Proceedings of The 6th IVR seminar, pp.154-161, 1998
- [43] 平成 10 年度情報化推進基盤整備に関する調査研究報告書, 1999

著者文献

- 原著論文

1. 力覚を用いた多次元空間ブラウザ
橋本渉 (筑波大学工学研究科), 岩田洋夫 (筑波大学機能工学系)
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 1997年9月, Vol.2, No.3, pp.9-16
2. LHX: An Integrated Software Tool for Haptic Interface
Hiroo IWATA, Hiroaki YANO, Wataru HASHIMOTO
PERGAMON, Computer & Graphics, 1997, Vol.21, No.4, pp.413-420
3. ボリュームデータに基づく術中危険領域の力覚表現
橋本渉 (筑波大学工学研究科), 岩田洋夫 (筑波大学機能工学系)
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 1998年12月, Vol.3, No.4, pp.197-202
4. 凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ: Ensphered Vision
橋本渉 (筑波大学工学研究科), 岩田洋夫 (筑波大学機能工学系)
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 1999年9月, Vol.4, No.3, pp.479-486

- 査読付き会議論文

- (1) Garnet Vision
Hiroo IWATA, Wataru HASHIMOTO, Atsuro ICHIGAYA, Yoshinori ASADA
ACM SIGGRAPH'97, Visual Proceedings, pp.83, 1997
- (2) A Versatile Software Platform for Visual/Haptic Environment
Wataru HASHIMOTO, Hiroo IWATA
Proceedings of ICAT97, pp.106-114, 1997
- (3) Haptic Screen
Hiroo IWATA, Hironori NAKAGAWA,
Wataru HASHIMOTO, Fumitaka NAKAIZUMI
ACM SIGGRAPH'98, Visual Proceedings, pp.117, 1998

● その他の公表論文

- (1) 視覚と力覚を用いた5次元空間のナビゲーション
岩田洋夫 (筑波大学機能工学系), 橋本渉 (筑波大学工学研究科)
計測自動制御学会 ヒューマンインタフェース研究会, 東京大学山上会館,
Human Interface N&R, 1996年5月, Vol.11, No.2, pp.307-312
- (2) 視覚と力覚を用いた5次元ビューワの開発
橋本渉 (筑波大学工学研究科), 岩田洋夫 (筑波大学機能工学系)
可視化情報シンポジウム, 国立教育会館,
可視化情報, 1996年7月, Vol.16, No.1, pp.91-94
- (3) 背面投射球面ディスプレイ
岩田洋夫 (筑波大学機能工学系), 橋本渉 (筑波大学工学研究科)
計測自動制御学会 ヒューマンインタフェース研究会, 東京大学山上会館,
Human Interface N&R, 1997年5月, Vol.12, No.2, pp.119-124
- (4) 危険領域の力覚表現による手術支援環境
橋本渉 (筑波大学工学研究科), 岩田洋夫 (筑波大学機能工学系)
日本バーチャルリアリティ学会大会, 名古屋大学 豊田講堂シンポジオン,
日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1997年9月, pp.39-42
- (5) 凸面鏡を用いた全方向球面ディスプレイの光学設計
橋本渉 (筑波大学工学研究科); 岩田洋夫 (筑波大学機能工学系)
日本バーチャルリアリティ学会大会, 北海道大学 学術交流会館,
日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1998年8月, pp.159-162
- (6) 空間データの力覚マッピングに関する研究
橋本渉 (筑波大学工学研究科), 岩田洋夫 (筑波大学機能工学系)
日本バーチャルリアリティ学会大会, 奈良県新公会堂,
日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1999年9月, pp.191-194
- (7) 球面ディスプレイの製作法に関する研究
野沢浩明 (筑波大学理工学研究科), 橋本渉 (筑波大学工学研究科), 岩田洋夫 (筑波大学機能工学系)
日本バーチャルリアリティ学会大会, 奈良県新公会堂,
日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1999年9月, pp.157-160

付録 A HapticMasterの機構的入出力特性

A.1 可動領域

HapticMaster 把持部の可動範囲は、半径約 20[cm] の半球内になる。この数値は実機による測定に基づくものであるが、ここでは実際に制御で用いる計算ルーチンを用い、計算機によるシミュレーションをおこなう。

図 A.1 は把持部の可動範囲を示している。単位は [cm] で、原点は装置の中心部で各リンクの第一関節軸の高さに相当する。これは姿勢を全く変更しない場合の可動範囲である。このとき、左右-21~23[cm]、前後-23~22[cm]、上下 10~30[cm] の範囲をとる、半径約 22[cm] のドーム形となる。

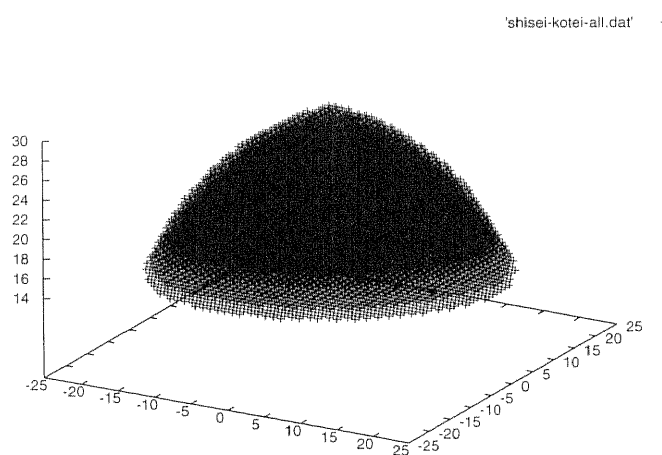


図 A.1: HapticMaster の可動範囲 俯瞰図

把持部の姿勢に関する可動範囲は、把持部の空間的位置に大きく依存することにな

る。姿勢のみを変更する場合、最大で $-90 < pitch < 90$ 、 $-90 < roll < 90$ 、 $-150 < yaw < 140[deg]$ 程度である。また、姿勢が変化すると可動範囲は縮小される。例えば、通常の並進動作で誤差として変更されうる姿勢を 10 度程度とすると、この時の可動範囲は、左右-19~22[cm]、前後-21~20[cm]、上下 15~29[cm] の範囲をとる、半径 20[cm] のドーム形となる。

A.2 計測誤差

本装置における計測誤差の要因が最も明白であるのは、各リンク角度を計測するポテンシオメータの量子化誤差である。ここではリンクの角度の丸め誤差が、把持部の空間的な位置、姿勢にどの程度影響を及ぼしているかを調べている。

全可動範囲における把持部の位置計測誤差は表 A.1 のようになる。なお、これらは姿勢を固定 ($yaw, pitch, roll=0.0$) した状態で、最悪のケースを想定した誤差である。

Δx 左右	Δy 前後	Δz 上下
0.0570 [cm]	0.0625 [cm]	0.0436 [cm]
$\Delta pitch$	$\Delta roll$	Δyaw
0.5151 [deg]	0.5560 [deg]	0.8562 [deg]

表 A.1: HapticMaster の把持部における誤差

A.3 最大出力

前述の可動範囲内での最大出力を算出する。ここでいう最大出力とは、9つのモータのうち1つでも飽和状態に入る直前の場合のことを意味している。各モータの最大トルクは定格で0.365[kgcm]、ギヤ比が1:10である。しかし、装置を用いて実際のジョイントトルクを測定してみると、定格をオーバーした約6.3~6.4[kgcm]程度出力していることがわかった。

以下はモータの最大出力を実測値である635[gcm]として、把持部に発生する呈示力を算出している。但し、最大出力は計測値に基づいており、計測誤差、モータの個体差によるばらつきなどは含まれていない。

A.3.1 最大呈示並進力

姿勢を固定した場合、最大並進力は位置によって変化するが、上下方向に650.0~3750.0[g]、左右方向に700.0~2000.0[g]、前後方向に600.0~1900.0[g]である。なお、実際の分布状態は図A.2となる。これは手前方向の最大並進力[g]の分布で、原点から天方向10cmの平面を図示している。この図では、1150~1900[g]の範囲に分布している。天方向20[cm]の値は950[g]程度、天方向30[cm]の値は全て640[g]である。

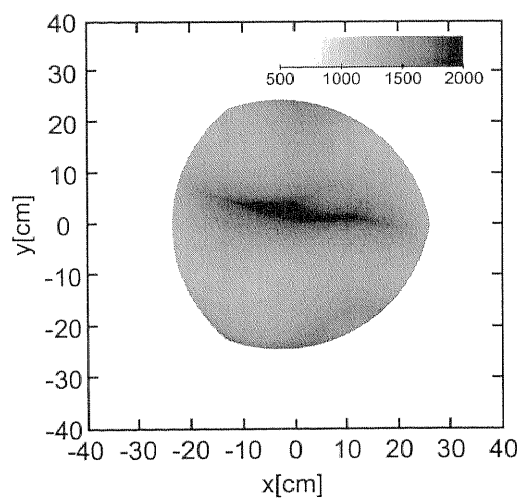


図 A.2: 最大呈示並進力の分布上面図 平面 $z=10$ (左右 x -前後 y)

以上より、姿勢を変更しないときに全可動範囲で保証される呈示並進力は約 600[g] となる。

A.3.2 最大呈示モーメント

姿勢を固定した場合、最大モーメントも位置によって変化するが、x 軸まわりでは 1500.0~12500.0[gcm]、y 軸まわりでは 2000.0~12500.0[gcm]、z 軸まわりでは 4000.0~12000.0[gcm] となる。なお、実際の分布状態は図 A.3 となる。これは手前方向の最大モーメント [gcm] の分布で、原点から天方向 10cm の平面を図示している。この図では、6500~12500[gcm] の範囲に分布している。天方向 20[cm] の値は全て 6350[gcm]、天方向 30[cm] の値は全て 4250[gcm] である。

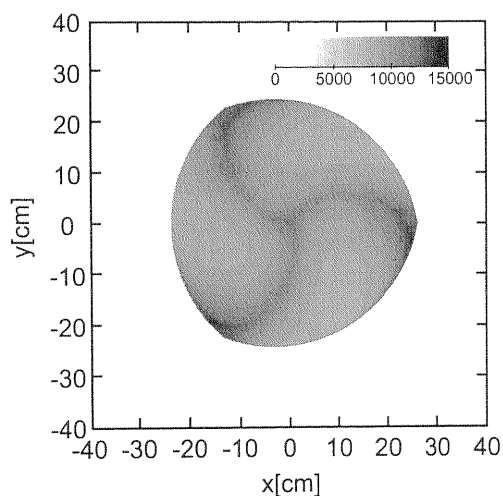


図 A.3: 最大呈示トルクの分布俯瞰図 $z=10$ (左右 x-前後 y)

以上を総合すると、姿勢を変更しないときに全可動範囲で保証される呈示モーメントは約 1500[gcm] となる。

付録B 力覚マッピングの作用点拡張

2章で述べてきた力覚のマッピングは、データに対して点によって作用するものであった。3次元データにおける空間的な位置を力覚呈示装置で指し示し、その位置における反力を算出するもので、いわばデータに対するピンポイント的な作用をおこなってきた。これは本研究で利用してきた力覚呈示装置が、1点を把持するという特性によるものである。点作用は、データの細部構造を知る上で有効な手段であるが、実際の世界では0次元の接触ではなく、線作用、面作用や3次元的に作用することが多い。ここでは、点把持型の力覚呈示装置において、図B.1のような仮想の工具(以下、作用具)を持つ場合、これまでの単一作用点を拡張して、複数点における作用について述べるものである。これは点把持型力覚呈示装置だけでなく、面呈示型の力覚呈示装置にも応用が可能である。

B.1 力覚マッピングの整理

前節まで述べてきたマッピングを拡張するため、本節で整理しておく。 $V(l, m, n)$ を格子数が $l \times m \times n$ である3次元空間配列データとし、各配列には画素値が格納されているとする。格子は $X_{min} \leq x \leq X_{max}$, $Y_{min} \leq y \leq Y_{max}$, $Z_{min} \leq z \leq Z_{max}$ で示される3次元空間に6面体格子構造として張られているものとし、格子間隔 X_{diff} , Y_{diff} , Z_{diff} は

$$\begin{aligned} X_{diff} &= (X_{max} - X_{min}) / (l - 1) \\ Y_{diff} &= (Y_{max} - Y_{min}) / (m - 1) \\ Z_{diff} &= (Z_{max} - Z_{min}) / (n - 1) \end{aligned}$$

となる。格子間隔が力覚呈示装置の精度と比較して大きい場合、3重線形補完などでデータを内挿することになる。力覚の作用点が3次元空間上で (x_f, y_f, z_f) とするとき、

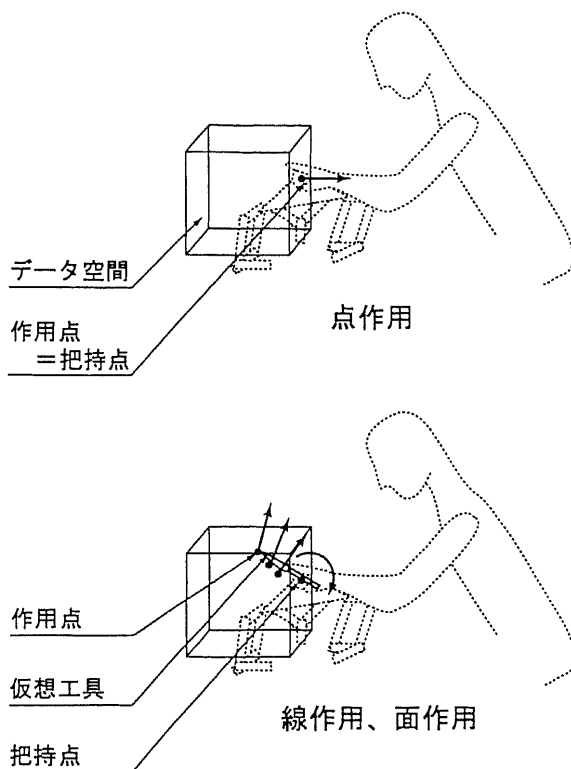


図 B.1: 作用点の拡張による仮想の工具

その作用点は格子空間 (i, j, k) では、

$$i = (x_f - X_{min}) / X_{diff}$$

$$j = (y_f - Y_{min}) / Y_{diff}$$

$$k = (z_f - Z_{min}) / Z_{diff}$$

となる。ただし i, j, k は整数である。このとき力覚マッピングは、

$$\text{トルクマッピング} \quad M = k_{torq} \cdot V(i, j, k)$$

$$\text{勾配マッピング} \quad \vec{F}_{grad} = -k_{grad} \cdot \text{grad}V(i, j, k)$$

$$\text{粘性マッピング} \quad \vec{F}_{visc} = -k_{visc} \cdot V(i, j, k) \cdot \frac{\delta}{\delta t}(x_f, y_f, z_f)$$

$$(k_{torq}, k_{grad}, k_{visc} : \text{ゲイン定数})$$

とあらわすことができる。トルクマッピングの算出結果はスカラーとなるため、ある回転軸でのトルク量となる。

一方、近接感覚マッピングは作用点を中心に監視領域を用意する。力覚の生成手法は2.7.2で述べたとおりであるので、簡単に整理する。監視領域の重み付けデータを D とする。 D は作用点の中心から距離 R_{in} に監視を及ぼす領域であり、距離によって減衰するガウス分布である。力覚の作用点が3次元空間上で (x_f, y_f, z_f) とするとき、その作用点は格子空間 (i, j, k) にあり、そこで生じる力覚 $F_{dang}^{\vec{}}$ は、

$$F_{dang}^{\vec{}} = -k_{dang} \cdot \sum_{(u,v,w) \in R_{in}} D(u, v, w) \cdot V'(i+u, j+v, k+w) \cdot \frac{(u \cdot X_{diff}^{\vec{}}, v \cdot Y_{diff}^{\vec{}}, w \cdot Z_{diff}^{\vec{}})}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}$$

k_{dang} はゲイン定数であり、 V' はある閾値 v_{thre} で V を2値化したもので、

$$V'(u, v, w) = \begin{cases} 0, & \text{for } V(u, v, w) < v_{thre} \\ 1, & \text{for } V(u, v, w) \geq v_{thre} \end{cases}$$

である。

B.2 作用点の拡張

力覚マッピングでは単一作用点にて算出した力覚を出力した。作用点を拡張して複数にする場合、各作用点について発生する力覚を合成し、その合力を力覚呈示装置の把持点に呈示することになる。力覚マッピングをおこなうには、前節で述べてきたとおり空間データに対する作用点の位置を算出しなければならない。しかしながら、各作用点の位置は空間データの位置姿勢に依存し、さらには把持部の位置や回転運動にも依存することになる。これは力覚マッピング処理を煩雑するばかりでなく、作用具の形状を変えるとといった作用点の変更に対して弊害となる。

本研究では、こうした処理の煩雑さと作用点の変更に対する柔軟性に着目し、空間データ座標系、作用点座標系を概念を導入し、座標系の変換によって力覚の算出処理をおこなっている。図 B.2 は作用点の拡張にもなって導入された座標系の概念図である。ワールド座標系 O は力覚呈示装置における操作空間の座標系を意味している。空間データ座標系 S は空間データが配置されている位置姿勢をあらわす座標系であり、 $V(x, y, z)$ はその座標系における空間データを示している。また、作用具座標系 T は把持部の位置姿勢をあらわすもので、 $W(x, y, z)$ は作用具の形状をあらわす空間配列データを示している。このような座標系を導入し、適切に座標変換を施すことによって、力

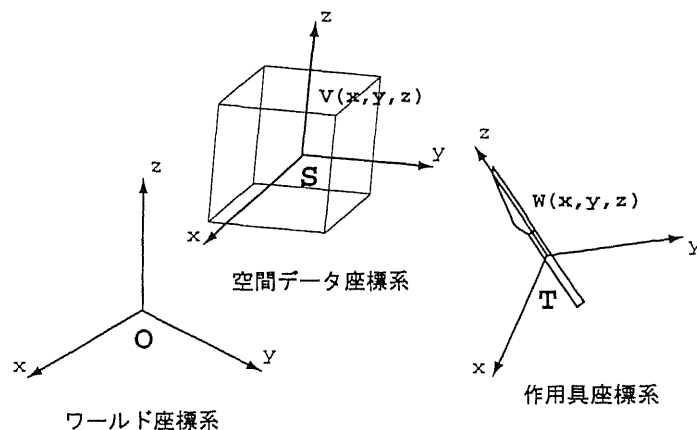


図 B.2: 座標系の概念図

覚マッピング処理を簡略化し、 W を変更するだけで作用具を任意の形状にすることができる。

具体的な処理手順は次の通りである。

(1) 空間データ座標系 S を算出する

通常、空間データはワールド座標系に対して位置姿勢を保っている。その位置姿勢をあらわす同次座標行列 T_S 、およびその逆行列 T_S^{-1} を算出する。時系列的に位置姿勢が変化の場合は逐次 T_S と T_S^{-1} を更新する。

(2) 作用具座標系 T を算出する

作用具座標系は、ワールド座標系に対する作用具の位置姿勢、すなわち力覚呈示装置の把持部の位置姿勢を意味している。これより、把持部の同次座標行列 T_T を算出する。

(3) 作用点が空間データ座標系上のどの位置に相当するか算出する

作用具座標系における作用点の位置は $W(x, y, z)$ で定義されている。したがって、空間データ座標系上における作用点の位置 $W_S(x, y, z)$ は同次座標変換によって

$$W_T(x, y, z) = T_S^{-1} \cdot T_T \cdot W(x, y, z)$$

と算出される。

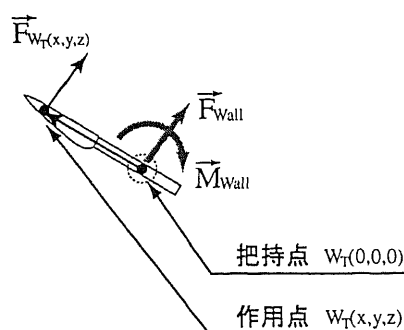


図 B.3: 作用具の並進力、モーメント

(4) 各作用点に対し、力覚マッピングをおこなう

空間データ座標系上における各作用点の位置より、力覚マッピングを適用する。各作用点 $W_S(x, y, z)$ において、前節の力覚マッピングより力覚ベクトルを算出し、 $\vec{F}_{W_S(x,y,z)}$ とする。この算出結果は空間座標系上における力覚ベクトルの集合である。ただしトルクマッピングの結果はスカラー量ではないため、ここで適用することはできない。

(5) 力覚マッピングの合力を算出する

作用点を受ける力覚ベクトル $\vec{F}_{W_T(x,y,z)}$ に対し、合力を計算する。把持部が受ける並進力は、作用点を受ける力覚ベクトルの総和である。すなわち、

$$\vec{F}_{W_T(all)} = k_f \cdot \sum \vec{F}_{W_T(x,y,z)}$$

である。 k_f は定数である。作用点の個数が増えると力覚がそれに応じて大きくなるため、通常この定数は作用点の個数の逆数がかかっている。

把持部が受けるモーメントを計算するには、把持部から作用点を示す方向ベクトルと、作用点を受けるベクトルの外積を算出する。空間データ座標系上における把持部の位置は、作用具座標系の原点 $W(0, 0, 0)$ に対し、(3) と同じ操作を施して $W_S(0, 0, 0)$ と算出される。したがって、把持部におけるモーメントは、

$$\vec{M}_{W_T(all)} = k_m \cdot \sum (W_T(x, y, z) - W_T(0, 0, 0)) \cdot \vec{F}_{W_T(x,y,z)}$$

と算出される (図 B.3)。 k_f は定数であり、上記と同じ理由で作用点の個数の逆数がかかっている。

(6) 合力をワールド座標系に変換する

上記で計算された把持部に及ぼす合力は空間データ座標系におけるベクトルである。したがって、力覚呈示装置に出力するためにはワールド座標系に変換しなければならない。この操作は同次座標変換であらわすと、

$$\begin{aligned}\vec{F}_{W(all)} &= T_S \cdot \vec{F}_{W_T(all)} \\ \vec{M}_{W(all)} &= T_S \cdot \vec{M}_{W_T(all)}\end{aligned}$$

となる。

以上のような行列演算によって、複数の作用点を持つ作用具を表現することが可能である。