

低コスト普及型を指向した
医療画像システムの研究

2013年7月

千葉大学大学院工学研究科

人工システム科学専攻 電気・電子系コース

宮 兆喆

(千葉大学学位申請論文)

低コスト普及型を指向した 医療画像システムの研究

2013年7月

千葉大学大学院工学研究科

人工システム科学専攻 電気・電子系コース

宮 兆喆

概要

高所恐怖症を克服するための支援ツールとして簡易型バーチャルリアリティ (VR) エクスポージャーシステムを開発した。システムは、1 台のパソコンと 1 台のプロジェクタ、及び半球ドームスクリーンから構成されている。ドームスクリーンには直径 1 m の乳白色プラスチック製の半球を用い、プロジェクタからの映像を背面投影した。

特定の恐怖症の治療には、不適応な恐怖反応を惹起させている恐怖の対象物や恐怖状況といった恐怖刺激に、恐怖反応が低減するまでクライアントを暴露するエクスポージャー療法がある。近年では、コンピュータ及び映像機器の発展から、バーチャルリアリティを利用したエクスポージャーシステムが注目されている。

映像素材としては、市販のビデオカメラで撮影したものを使えるようにし、映像の歪み補正ソフトウェアも自作した。安価ではあるが、評価結果は没入感が得られることを示した。操作も容易であり、普及型の臨床ツールとして活用される可能性を示した。

一方で医療画像診断で臓器等の輪郭抽出に使われる代表的な手法の一つであるスネーク法を、代表的なマルチコアプロセッサの一つである Cell Broadband Engine (Cell) を用いて高並列処理するシステムを構築した。スネーク法による輪郭抽出ではパラメータ設定の自動化が難しく、パラメータを調整しながら繰り返し計算を行って所望の画像を得ることが多い。

本研究では、PS3 による安価な並列計算システムを構築し、パラメータに強く依存するスネーク法に対する有効性を検証する。医療画像診断で用いられるスネーク法は、閉じた領域を安定して抽出でき、対象形状の特徴をエネルギー関数として処理に埋め込むことができるという優れた特長を持つ。

これを高並列化された計算システムの各プロセッサに異なったパラメータを持たせて同時に計算させ、所望の画像を得られるようにする。本システムでは Cell を搭載したソニー製家庭用ゲーム機プレイステーション 3 (PS3) を用いた。PS3 に搭載されている Cell では、チップ内部の 6 個の計算ユニットを並列動作させることが可能である。16 台の PS3 をクラスタ化し、パラメータの異なる 96 の輪郭抽出計算を同時に行うことに成功した。

Abstract: We developed a prototype of simple virtual reality (VR) system as a support tool to overcome fear of heights.

The system consists of one personal computer, one projector and a hemisphere dome screen with the diameter of 1 m. It is a dome-screen type VR system because it makes little burden both to a medical doctor (or a counselor) and to a client. The dome screen is a low-cost type made milky-white plastic. We adopted rear projection using only one projector and could get an image with an effective field of vision. We can use a picture or a movie took from a personal-type digital camera. As for the correction of image distortion, we made the software tool originally. Therefore, the running cost is also low and the operation is easy. As the result of evaluation experiment, we confirmed that the system made a feeling of devotion with little sense of incongruity. It seems to show the possibility that the simple VR system can be utilized as a medical service tool of the spread type.

On the anther hand we developed the system to accelerate the snake algorithm by Cell Broadband Engine (Cell). The snake method is the representative technique used for the outline extraction such as organs by medical imaging diagnosis. In the snake method, however, it is difficult to set the parameters automatically. We often repeat the parameter setting to get a desired image. In our parallel computing system by Cell processors, therefore, we give each processor a different parameter and calculate it at the same time on the outline extraction by the snake method. We get a desired image in many simulations. Cell is one of the representative multi-core processors. In our system, we used 16 machines of PlayStation3 made by Sony as home-use game console. PlayStation3 has a Cell processor. One of PlayStation3 allows us to operate six calculation units in a Cell processor. Using 16 machines of PlayStation3, we succeeded in performing 96 different outline extraction calculations of parameter at a time.

Key words : Virtual reality, Dome screen, Rear Projection, Exposure therapy, Fear of heights, Cell BE, Multi-core processor, Parallel computation, Outline extraction, Snake method.

目次

第一部 高所恐怖症克服支援を目的とする簡易な 背面投影ドームスクリーン VR システムの試作.....	1
第 1 章 はじめに	1
1.1 緒言	1
1.2 本論文の構成	4
参考文献	5
第 2 章 恐怖症.....	7
2.1 恐怖症	7
2.1.1 特定恐怖	7
2.1.2 高所恐怖	7
2.1.3 社会恐怖	8
2.1.4 広場恐怖	8
2.2 暴露療法.....	9
2.2.1 認知行動療法.....	9
2.2.2 暴露療法.....	11
参考文献	12
第 3 章 VR システム	16
3.1 VR を用いた暴露療法.....	16
3.2 VR における視覚効果の有効範囲.....	18
3.3 従来のシステム.....	20
3.3.1 ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた VR システム	20
3.3.2 没入型多面ディスプレイを用いた VR システム	21
参考文献	23
第 4 章 提案システム	26

4.1 曲面形状没入ディスプレイ.....	26
4.2 自作半球ドーム型スクリーン.....	27
4.2.1 半球ドーム型スクリーンの設計.....	27
4.2.2 半球ドーム型スクリーンの製作.....	30
4.2.3 自作半球ドーム型スクリーンの評価.....	33
4.2.4 乳白色のドーム型スクリーン.....	34
参考文献.....	41

第5章 歪み補正 42

5.1 球面への映像の投影の問題点.....	42
5.1.1 カメラの歪み補正.....	42
5.1.2 カメラキャリブレーション.....	43
5.1.3 カメラパラメータの導出手順.....	44
5.2 OpenCV.....	47
5.3 スクリーンの形状による幾何歪み.....	50
5.3.1 幾何歪みの原理.....	51
5.3.2 幾何歪みの補正手法.....	52
5.4 歪み補正の結果と考察.....	53
参考文献.....	65

第6章 VRシステムの評価 67

第7章 おわりに 71

7.1 結言.....	71
7.2 今後の展望.....	71

第二部 Cell プロセッサを用いた並列処理によるスネーク法 72

第1章 はじめに 72

1.1 緒言.....	72
-------------	----

1.2 本部分論文の構成	74
参考文献	75

第 2 章 Snake 法輪郭抽出処理 76

2.1 Snake の原理	76
2.2.1 Snake 法	76
2.2.2 内部エネルギー	77
2.2.3 外部エネルギー	78
2.2.4 画像エネルギー	79
2.3 Snake 関数	80
2.3.1 線形補間演算	83
2.3.2 画像エネルギー	84
2.3.3 ヤコビ法演算	84
参考文献	86

第 3 章 Cell への実装 88

3.1 Cell Broadband Engine (Cell)	90
3.1.1 構成	90
3.1.2 Cell の特徴	95
3.2 PLAYSTATION3 (PS3)	96
3.2.1 メモリ	96
3.2.2 ネットワーク	96
3.2.3 GPU	96
3.3 実装方法	98
3.4 PS3 クラスタシステム	99
3.4.1 MPI (Message Passing Interface)	99
3.4.2 OpenMP	100
3.5 Cell についての Snake 法の実装	102
3.5.1 開発環境	102
3.5.2 PC 上での Snake 法のプログラミング	102
3.5.3 PS3 への実装	102
3.5.4 SPE を用いた演算	103

3.6 SIMD 演算を用いた高速化.....	106
3.6.1 SMID 演算	106
3.6.2 ヤコビ法 SIMD 演算.....	106
3.6.3 線形補間 SIMD 演算.....	107
3.7 SPE の並列化	108
3.8 PS3 クラスタを用いた並列処理.....	109
参考文献	111
第 4 章 性能評価	117
4.1 SIMD 演算	118
4.2 SPE の並列化	119
4.3 PS3 クラスタ	121
4.4 PS3 と PC の比較	121
第 5 章 おわりに	123
5.1 結言	123
5.2 今後の展望.....	123
全体のまとめ.....	124
謝辞 125	
付録 126	
Cell(PS3)開発環境の構築.....	127
HDD の初期化	127
ブートローダのインストール	127
Fedora のインストール	127
テキストモードログインへの変更.....	128
Cell SDK のインストール	128
spu_timing のインストール	129
MPI(Message Passing Interface)の環境構築	131
MPICH2 のインストール.....	131

環境設定.....	131
ssh パスワードなしでのログイン	132
業績リスト	133
国際会議.....	134
口頭発表.....	134
受賞	134

図目次

第一部

図 2-1 : 認知行動療法の種類	9
図 2-2 : 認知行動療法の考え方	10
図 3-1 : VR 技術のコンセプト	16
図 3-2 : 情報受容特性の分布 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24 -No.4, P 194-200)	18
図 3-3 : HMD を用いた VR システム図	21
図 3-4 : CAVE システム図	22
図 4-1 : 半球の分割図 1	27
図 4-2 : 半球の分割図 2	28
図 4-3 : 半球ドーム型スクリーン製作図	30
図 4-4 : 半球ドーム型スクリーン完成図 (内側)	31
図 4-5 : 半球ドーム型スクリーン完成図 (外側)	31
図 4-6 : 半球ドーム型スクリーンの全完成図	32
図 4-7 : 半球ドーム型スクリーンへの映像の投影試験	33
図 4-8 : 本 VR システム概略図 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)	34
図 4-9 : 乳白色のドーム型スクリーン	35
図 4-10 : CAD を用いた設計 (前面)	36
図 4-11 : CAD を用いた設計 (横)	37
図 4-12 : 半球ドーム型スクリーン完成図 (前面)	38
図 4-13 : 半球ドーム型スクリーン完成図 (横)	39
図 4-14 : 実際に体験している様子 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)	40
図 5-1 : 半径方向歪み	42
図 5-2 : 円周方向歪み	43
図 5-3 : 3次元空間の2次元平面への投影	45
図 5-4 : 歪みを考えた場合の画像平面への投影	46
図 5-5 : チェスボード	47

図 5-6: 補正前の撮影 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24 —No.4, P 194-200)	48
図 5-7: 補正後の撮影したチェスボード (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24—No.4, P 194-200)	48
図 5-8: 球面へ投影したときの幾何学歪み	50
図 5-9: 歪みを補正して投影したときの例	50
図 5-10: 幾何歪み補正前 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24—No.4, P 194-200)	51
図 5-11: 幾何歪み補正後 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24—No.4, P 194-200)	52
図 5-12: 検証用画像 (碁盤)	53
図 5-13: 補正をかけた画像	54
図 5-14: 補正前の正方格子 (全体像)	55
図 5-15: 補正後の正方格子 (全体像)	56
図 5-16: 理想視点から撮影 (補正前) (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24—No.4, P 194-200)	57
図 5-17: 理想視点から撮影 (補正後) (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24—No.4, P 194-200)	58
図 5-18: ドーム右端の画像 (補正前)	59
図 5-19: ドーム右端の画像 (補正後)	60
図 5-20: ドーム下の画像 (補正前)	61
図 5-21: ドーム下の画像 (補正後)	62
図 5-22: 10 階建てのビルの屋上から地上を見下ろした映像のスナップショット (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24—No.4, P 194-200)	64
図 2-1: Snake 曲線略図	76
図 2-2: 内部エネルギー	77
図 3-1: Cell プロセッサの構成図	88
図 3-2: PS3 を用いたクラスタシステム	88
図 3-3: Cell の構成図	90
図 3-4: SPE 詳細図	91
図 3-5: Cell のデータバス構造	94

図 3-6: Cell のシステム構成例	95
図 3-7 : Snake パラメータの違いによる正抽出 (宮, 他, Medical Imaging Technology, Vol.31, No.1, pp.72-74)	109
図 4-1: ファントム	117

表目次

第一部

表 6-1:没入感(宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)	68
表 6-2 : 理想視点評価 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)	69
表 6-3 : 自由視点評価 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)	69
表 3-1 : MPI の関数	100
表 3-2 : PC と PS3 の比較.....	102
表 3-3 : SIMD 演算関数	106
表 3-4 : Cell プロセッサの開発環境 (宮, 他, Medical Imaging Technology, 109	
表 4-1 : SIMD 演算結果	118
表 4-2 : SPE 並列化演算時間	119
表 4-3 : SPE コンテキスト作成時間.....	119
表 4-4 : スレッド作成時間.....	119
表 4-5 : PS3 クラスタ演算時間	121
表 4-6 : Cell プロセッサの計算並列高速化比 (宮, 他, Medical Imaging ...	122

第一部

高所恐怖症克服支援を目的とする簡

易な背面投影ドームスクリーン VR システムの試作

第1章 はじめに

1.1 緒言

高所恐怖症の有病率は、1996年に発表された Fredrikson らの調査によれば、男性では 6.3%、女性では 8.6%であり、広く認められる障害であることがわかる。認知行動療法、クライアント中心療法、精神分析、家族療法など、様々な心理療法があり、エクスポージャー療法は行動療法、認知行動療法に含まれる治療技法の一つである。高所恐怖症を含む特定の恐怖症の治療には、エクスポージャー療法、特に、実際の恐怖場面に恐怖反応が低減するまで患者を暴露する *in vivo* エクスポージャーが有効であることが知られている。

近年は VR を利用した VR エクスポージャーの治療報告が多くあり、高所恐怖症の治療においては、コンピュータグラフィックスで吊り橋やガラス張りのエレベーターなどの高所状況を再現する VR エクスポージャーは、従来の *in vivo* エクスポージャーと同様に効果があることが多くの研究で示されている。Emmelkamp らは、VR エクスポージャーと *in vivo* エクスポージャーの効果を比較する研究を行った。高所恐怖を訴える 33 名の参加者が VR 条件群 (n=17) と *in vivo* 条件群 (n=16) にランダムに配置され、VR エクスポージャーでは、*in vivo* エクスポージャーが実施された非常階段や屋上庭園などの高所の状況をコンピュータグラフィックスで正確に再現し、同様の手続きでエクスポージャーを実施した。その結果、高所恐怖症の程度を測定する質問紙や実際に階段を上って地面を見下ろすという行動テストにおいて、両条件で改善が認められ、また治療条件間に有意差が認められず、この改善は 6 か月後のフォローアップ期にも維持されていた。このことから、高所恐怖症の治療において、VR エクスポージャーは *in vivo* エクスポージャーと同等の効果があることが示された。

このように、高所恐怖の治療の手段として VR エクスポージャーは有効であり、これまでもいくつかのシステムが構築されている。代表的な研究例として、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた VR エクスポージャーシステムがある。この

システムでは、クライアントが HMD を装着し、コンピュータ上の映像データを HMD に出力することで、クライアントに仮想空間を提示する。HMD の動きはセンサで検出され、映像データは装着者の頭の向きに連動して描画される仕組みになっており、クライアントは高い臨場感を体感できる。一方で、HMD の重量や頭の締め付けなどの不快な装着感があって仮想空間に集中できないこと、見回すことは可能だが視野角が狭いこと、モーションシックネスと呼ばれる車に酔った気分になるなどの難点も明らかになった。

HMD を使わない VR システムとしては、CAVE がある。クライアントを取り囲む空間に映像を表示するため、HMD のような不快な装着感がなくて仮想空間に集中しやすいが、大がかりである。

さらに、VR エクスポージャーがあまり普及しない本質が、純粋な技術レベルの問題というよりも、カウンセラーにとっての負荷が大きいという報告がある。金銭的な負担と装置を取り扱う際の困難さである。この問題はハードウェアだけでなく、ソフトウェアについても同様である。

コンピューターグラフィックス (CG) を利用した従来の VR システムは、ハードウェア面では十分に成熟してきているが、ソフトウェア面、特にコンテンツの提示に関する負荷が大きい。カウンセラーが自分でコンテンツを作るのは困難であるので、一般的には外注することになるが、数十秒の映像でも数百万円程度の費用が生じる。そのため、各クライアントに応じた必要数のコンテンツを用意することは困難である。さらに、高機能化した VR システムを運用するためには、専門の知識を習得する必要がある。NeuroVR システムというフリーで利用できる CG コンテンツを提供するプロジェクトもあるが、既存のコンテンツが少ないため、患者に必要な物がない可能性も高く、また、CG 提示に関する専門知識が必要なことは解決しない。

そこで本研究では、安価で取り扱いの容易なシステムの構築を試みた。VR をエクスポージャーに適用する際、複数人間が同時に映像を見る必要はないことと、必要以上に高精細な画質が要求されることがないことを考慮すると、ハードウェアを大幅に簡素化できる。さらには、映像も CG ではなく、普通のビデオカメラで撮影したものを利用できるようにする。このことにより、金銭的な負荷が大きく減少し、取り扱いやすさが大幅に向上する。

この方針に沿って、ハードウェアに関しては、ドームスクリーンを利用した。観察者の負荷が少ない半開放的な VR システムとして、都市開発分野 (Cyber Dome) や天文分野 (4D2U プロジェクト) で応用されている。クライアントの負担が少ない

ということに加え、カウンセラーにとっては、コンテンツ撮影が市販のビデオカメラだけで可能であり、提示が容易であること、HMD などのようなトラッキングセンサーなど必要としないこと、撮影から提示までソフトウェアもハードウェアも安価であることなどの利点がある。VR に関しての特別な知識のないカウンセラーでも運用しやすく、この技術は VR エクスポージャーとしても有効であると考えられる。

ただし、一般に市販されているドームスクリーン VR システムは、プロジェクタを複数台使用し、映像表現を追求しているため、数百万円～数千万円と高価であり、取り扱いも専門知識が必要である。

本研究では、個人用のエクスポージャー専用システムとして、プロジェクタを 1 つだけ使用したドームスクリーン VR エクスポージャーシステムの開発を試みた。開発費は 20 万円程度であり、取り扱いも容易にすることに成功した。

近年、医療における画像処理の重要性が増している。ただし、画像診断を行う上で基礎となる輪郭抽出処理は、計算におけるパラメータ設定の自動化が難しく、未だに改善の余地がある。

1.2 本論文の構成

第一部分の論文は全7章から構成される。本章では、研究背景、目的、論文の構成について、第2章では恐怖症について、第3章ではVRにおける視覚効果の有効範囲について述べる。第4章ではVRにおける提案システムである。第1章ではいろいろな歪み補正の方法を示す。第6章ではVRシステムの評価である。第7章では研究の総括と今後への課題を考察する。

参考文献

- [1] Y. Choy, A. J. Fyer and J. D. Lipsitz, Treatment of specific phobia in adults. *Clinical psychology review*, 2007; 27: 266-286.
- [2] D. F. Grös and M. M. Antony, The assessment and treatment of specific phobias: a review. *Current psychiatry reports*, 2006; 8: 298-303.
- [3] R. T. LeBeau, et al.,—Specific phobia: a review of DSM-IV specific phobia and preliminary recommendations for DSM-V. *Depression and Anxiety*, 2010; 27: 148-167.
- [4] M. Krijin, P. M. G. Emmelkamp, R. P. Olafsson and R. Biemond, Virtual reality exposure therapy of anxiety disorders: a review. *Clinical psychology review*, 2004;—24: 259-281.
- [5] J. Bush, Viability of virtual reality exposure therapy as a treatment alternative. *Computers in Human Behavior*, 2008; 24: 1032-1040.
- [6] M. Fredrikson, P. Annas, H. Fischer and G. Wik, Gender and age differences in the prevalence of specific fears and phobias. *Behaviour Research and Therapy*, 1996; 34: 33–39.
- [7] I. M. Marks, *Fears, phobias and rituals: Panic, anxiety and their disorders*. Oxford University Press (New York), 1987.
- [8] C. M. Coelho, A. M. Waters, T. J. Hine and G. Wallis,—The use of virtual reality in acrophobia research and treatment. *Journal of Anxiety Disorders*, 2009; 23(5):—563-574.
- [9] L. F. Hodges, et al., Virtual environments for treating the fear of heights. *Computer*, 1995; 28(7): 27-34.
- [10] P. M. Emmelkamp, M. Krijin, A. M. Hulsbosch, S. de Vries, M. J. Schuemie and C. A. van der Mast, Virtual reality treatment versus exposure in vivo: a comparative evaluation in acrophobia. *Behaviour Research and Therapy*, 2002; 40(5): 509-516.
- [11] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin and T. A. DeFanti, Surround-Screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. *Computer Graphics. Proc. SIGGRAPH '93*, 1995:—135-142.
- [12] R. Segal, M. Bhatia and M. Drapeau, Therapist's Perception of Benefits

- and Costs of Using Virtual Reality Treatments. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 2011; 14: 29-34.
- [13] G. Riva, et al., NeuroVR 2-A Free Virtual Reality Platform for the Assessment and Treatment in Behavioral Health Care. *Medicine Meets Virtual Reality*, 2011; 18: 493-495.
- [14] 柴野伸之, 澤田一哉, 竹村治男, マルチプロジェクトを用いたスケーラブル大型ドームディスプレイ CyberDome の開発. *日本バーチャルリアリティ学会誌*, 2004; 9(3): 327-336.
- [15] 小久保英一郎, 他, 国立天文台 4 次元デジタル宇宙プロジェクト. *日本バーチャルリアリティ学会誌*, 2003; 8(4): 59-60.
- [16] 林宏雄, 斎藤光男, 増渕美生 : Cell Broadband Engine の設計思想. *東芝レビュー* **61**: 2-8, 2006
- [17] Barker K J, Davis K, Hoisie A et al: Entering the petaflop era: the architecture and performance of Roadrunner. *SC '08 Proc. ACM/IEEE conference on Supercomputing: Article No.1*, 2008
- [18] 岩井啓助, 菊池義浩, 河原邦彦 : 高画質な 3D 表示を実現した CELL レグザ 55X2. *東芝レビュー* **66**: 41-44, 2011
- [19] Luttmann E, Ensign D L, Vaidyanathan V et al: Accelerating Molecular Dynamic Simulation on the Cell Processor and PlayStation 3. *J Comput Chem* 30: 268–274, 2009
- [20] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D: Snakes: Active Contour Models. *Int J Comput Vision*, 321-331, 1988
- [21] 柴藤稔 : 動的輪郭モデル Snakes の概観. *Med Imag Tech* 12: 9-15, 1994
- [22] http://www.fuanclinic.com/pdplaza/contents_9/24.html
- [23] <http://e-words.jp/w/VR.html>

第2章 恐怖症

2.1 恐怖症

恐怖症とは特定のある一つのものに対して、他人には不可解な理由から、心理学的、および生理学的に異常な反応を起こす症状で、精神疾患の一種である。

恐怖症は以下の三種類に分けられ、

1. 特定恐怖
2. 社会恐怖
3. 広場恐怖

となっている。

2.1.1 特定恐怖

特定恐怖とは、ある特定の物や状況を意味もなく恐れ、それらに出会うことを避けることである。恐怖の対象になるものは、ヘビやクモなど嫌いな動物や恐ろしいと感じた場所、あるいはとがった刃物や血など実に様々である。特定恐怖は何かの時に、これらの1つで激しい恐怖を体験し、それをきっかけに始まる。

- 例) 1. 閉所恐怖
2. 高所恐怖
 3. 先端恐怖
 4. クモ恐怖
 5. 血液恐怖

2.1.2 高所恐怖

本研究でターゲットとした高所恐怖について述べる。ただ単に高いところが苦手だから高所恐怖症だと言っている人が中にはいるが、これは実は正確に言えば、高所恐怖症ではなくて、高所恐怖癖という状態で、単に苦手程度で収まっている。本当の高所恐怖症であるとそれだけでは収まらず、実際に高い場所に行くと危険を感じたり異常な行動に出たり倒れたり動けなくなるほどひどいものなどもある。

高所恐怖の場合には高所へ行くということを避ける。精神状態も安定せずに平気でいられないことが多いので、怖いと感じていても、それがまだ冷静さを保っている分には高所恐怖癖に入る。高所恐怖症の人なら冷静さを保つことができなくなり、パニックを起こしたり倒れたり危険を感じすぎて思わぬ行動に出たりする可能性がある。

2.1.3 社会恐怖

社会恐怖とは、人前で恥をかいたり、きまりが悪い思いをすることをひどく恐れ、人が集まる場所にいることに強い不安を覚え、そういった場面を避けることである。集まりに出かけても人前で顔が赤くなる、自分の意見をうまく話せない。それを周りの人は注目して笑っているのではないかといった不安から、しばしば何も出来なくなってしまうことである。

- 例) 1. 対人恐怖
2. 赤面恐怖
3. 視線恐怖

2.1.4 広場恐怖

広場恐怖とは、強い不安からパニック発作が起きる。パニック発作の反復とともに、クライアントは発作が起きた場合にその場から逃れられないと妄想するようになる。さらに不安が強まると、患者は家にこもりがちになったり、一人で外出できなくなることもある。広場恐怖の進展とともに、患者の生活の障害は強まり、社会的役割を果たせなくなっていく。

2.2 暴露療法

2.2.1 認知行動療法

人間に不適切な状態を維持・悪化させてしまうシステムができた理由は不適切な学習（または未学習）であるとし、それらを改善するために別の内容を学習しようとすることを学習理論という。その学習理論に基づいて行動を変化させていく方法を行動療法、一方、認知や感情に焦点を当てる心理療法を認知療法と呼ぶ。現在、この両者は不可分に結びついており、「認知行動療法」と呼ばれるようになった。

エラー! 参照元が見つかりません。に認知行動療法の種類を示す。認知行動療法は、上の四角が行動療法で、下の四角が認知療法とそれに似た種類の治療法である。

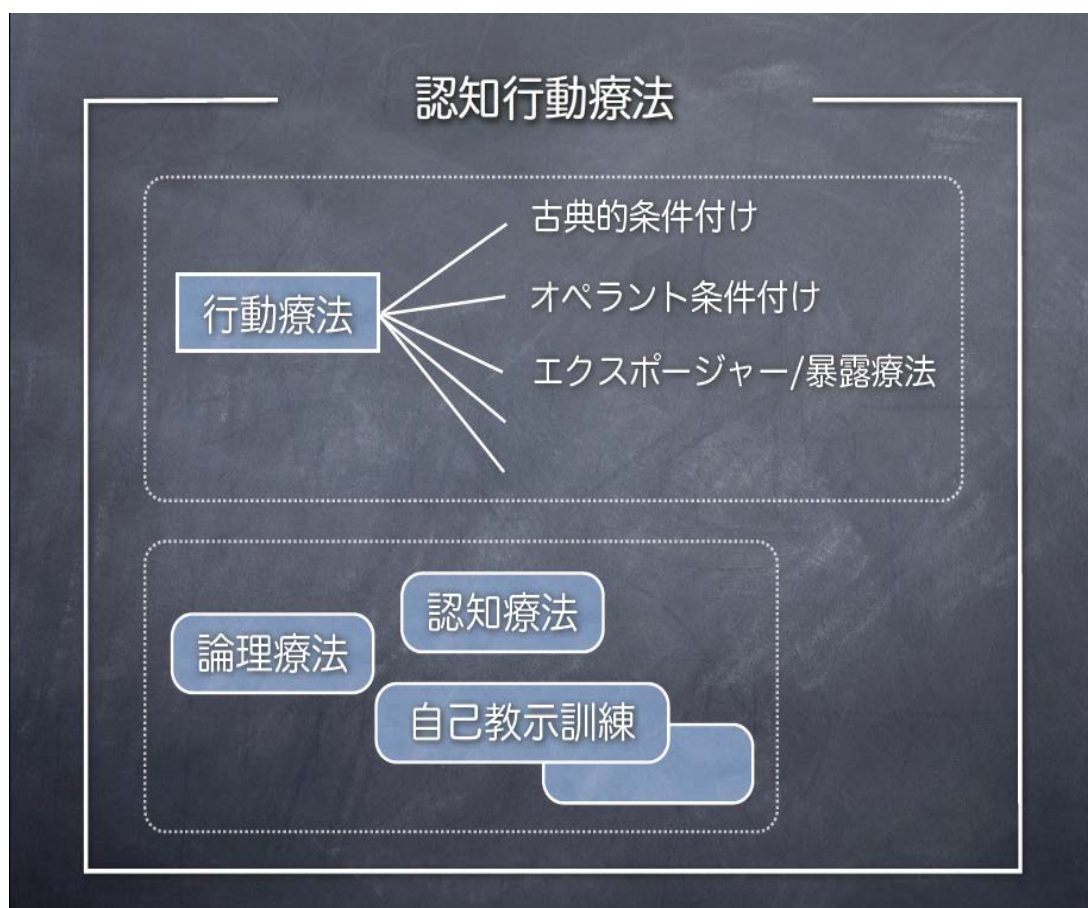


図 2-1 : 認知行動療法の種類

認知行動療法を述べる上で、認知と行動の結びつきについて

図 2-2 で示す。

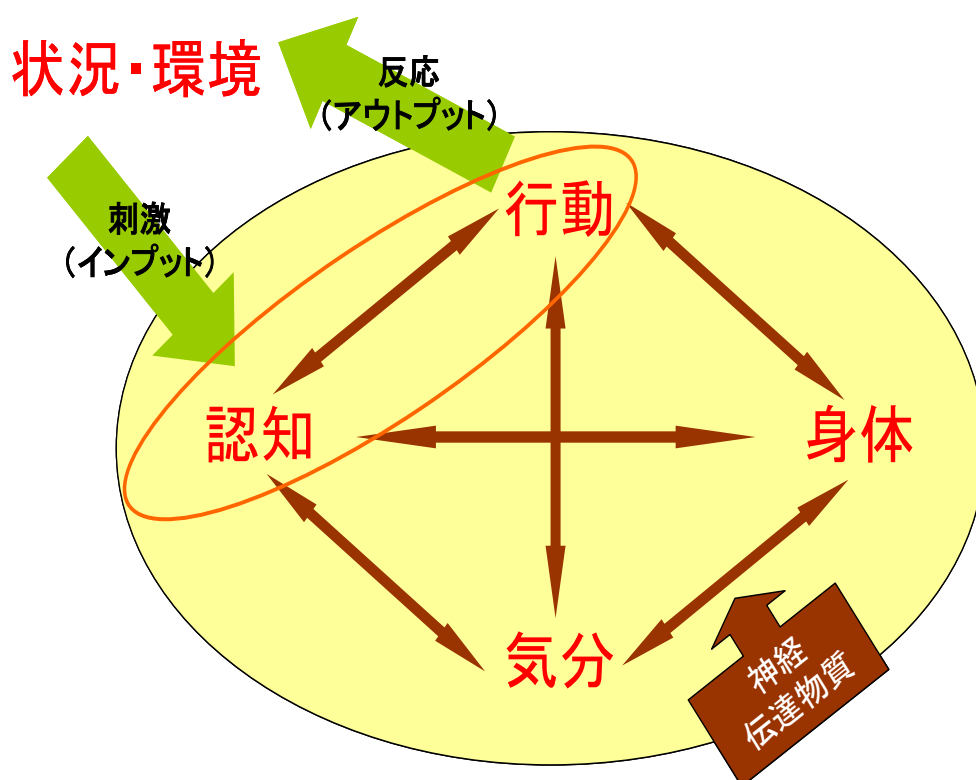


図 2-2 : 認知行動療法の考え方

図 2-2 で示したように、認知は外界の環境からのインプットを司ることが多い。つまり、「何が起こった」とか、「あれは嫌な事だ」とか、自分の外側で起こっている出来事を読み取る入口からすでに困り事が起こっている事がある。

そのような時に、起こった出来事と自分の考えはくっついてしまい、事実と考えの区別がなかなかつかなくなるような事もある。さらに、起こった出来事のうち「嫌な出来事」を選んで抽出する様になってしまう。

例えば、今までの人生で良い事も悪い事もあるが、「思いだせる限りすべて悪い事ばかりだった」となっている時、それはネガティブな記憶ばかりを選んで思い出すような考えの癖がついてしまう。

また、行動は外界へのアウトプットを司ることが多い。誰かとコミュニケーションを持つ時、得策ではない発言や行動によってさらに相手からの返事が違ってきて、ますます混乱する事になる。

自分の考え方（認知）を変える事で、自分の行動が変化する事が解っている（認知

療法)。また、行動が変わる事で考え方（認知）も変化する事も解っている（行動療法）。認知行動療法とは変えやすい方から、どちらでも変えていく治療法である。

近年、不安や恐怖が中心となっている症状、たとえば社会不安障害、強迫性障害、パニック障害、心的外傷後ストレス障害(PTSD)、恐怖症などに対する心理療法では、認知行動療法が有効であるという報告が数多くみられる。

2.2.2 暴露療法

本研究では、行動療法の1つである暴露療法を用いて恐怖症克服の支援を行いたい。暴露療法とは、あえて恐怖や不安の原因になる刺激や状況に段階的にさらすことで人間の持つ本来の力（自然治癒力）を発揮させることにより不安反応を消していく方法である。

クライアントの不適切な反応の原因となっている刺激や状態に、クライアントは段階的に直面していく。直面する方法は、イメージを用いて行うものと、現実場面を用いて行うものがある。治療効果はイメージを用いるより現実場面に直面するほうが高いといわれている。

暴露療法を行うと、まず初めに、恐怖関連刺激にさらされることで、意識的にも生理的にも恐怖反応が喚起される。恐怖関連刺激に繰り返しさらされることで生理的な慣れが生じ、落ち着いた気分になったり、緊張しなくなったりする。「慣れる」ということは記憶の作用である。暴露療法は安全な環境の中で行っているため、「危険から守られた中で恐怖や不安を感じることができる」という体験を脳が受け取る。また、それと同時に恐怖関連刺激にさらされているので脳はストレスホルモンを分泌する。ストレスホルモンには記憶の固定化を促進する作用がある。これらのことは、「恐怖や不安に対処することができる」という体験が脳に深く記憶される。それゆえ、恐怖を喚起していた刺激や状況にさらされたとしても、不適切な反応が生じなくなるのである。

参考文献

- [1] 日本バーチャルリアリティ学会 VR 心理学研究委員会, “だまされる脳ーバーチャルリアリティと知覚心理学入門”, 講談社ブルーバックス (2006)
- [2] L. F. Hodges, B. O. Rothbaum, R. Kooper, D. Opdyke, T. C. Meyer, J. J. deGraaff, J. S. Williford and M. M. North, “Virtual environments for treating the fear of heights”, *Computer*, Vol.28, No.7, pp.27-34 (1995)
- [3] M. Krijin, P. M. G. Emmelkamp, R. P. Olafsson and R. Biemond, “Virtual reality exposure therapy of anxiety disorders: a review”, *Clinical psychology review*, Vol.24, pp.259-281 (2004)
- [4] http://ja.wikipedia.org/wiki/In_vivo
- [5] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%8D%E7%9F%A5%E8%A1%8C%E5%8B%95%E7%99%82%E6%B3%95>
- [6] Abramson, L. Y., Seligman, M. E. P., & Teasdale, J. D. Learned helplessness in humans : Critique and reformulation. *Journal of Abnormal Psychology*, 87, 49-74, 1978
- [7] Bandura, A. *Social learning theory*. New York : General Learning Press, 1971 (原野広太郎・福島脩美 訳 1974 人間行動の形成と自己制御 金子書房) .
- [8] Bandura, A. Self-efficacy : Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, 84, 191-215, 1977
- [9] Beck, A. T. Thinking and depression : I.Idiosyncratic content and cognitive distortions. *Archives of General Psychiatry*, 9, 324-333, 1963
- [10] Beck, A. T. Thinking and depression: II.Theory and therapy. — *Archives of General Psychiatry*, 10, 561-571, 1964
- [11] Beck, A. T. Cognitive therapy: Nature and relation to behavior therapy. *Behavior Therapy*, 1, 184-200, 1970
- [12] Beck, A. T. *Cognitive therapy and emotional disorders*. New York : International University Press, 1976 (ベック, A, T. 大野 裕 (訳) 1990 認知療法 岩崎学術出版社) .
- [13] Beck, A. T., Rush, A. J., Shaw, B. F., & Emery, G. *Cognitive Therapy of Depression*. New York : Guilford Press, 1979 (ベック, A. T. ・ラッシュ, G.,

- A, J.・ショウ, B. F.・エメリィ, G. 坂野雄二 (監訳) 1992 うつ病の認知療法 岩崎学術出版) .
- [14] Beck, A. T., Weissman, A., Lester, D., & Trexler, L. The measurement of pessimism : The Hopelessness Scale. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 42, 861-865, 1974
- [15] Chambless, D. L., Caputo, G. C., Bright, P., & Gallagher, R. Assessment of fear in agoraphobics : The body sensations questionnaire and the agoraphobic cognition questionnaire. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 52, 1090-1097, 1984
- [16] Ellis, A. Reason and emotion in psychotherapy. New York : Stuart, 1962
- [17] Fennell, M. J. V., & Campbell, E. A. The Cognitions Questionnaire : Specific thinking errors in depression. *British Journal of Clinical Psychology*, 23, 81-92, 1984
- [18] Fielder, R., & Beach, L. R. On the decision to be assertive. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 46, 537-546, 1978
- [19] Glass, C. R., Merluzzi, T. V., Biever, J. L., & Larsen, K. H. Cognitive assessment of social anxiety : Development and validation of a self-statement questionnaire. *Cognitive Therapy and Research*, 6, 37-55, 1982
- [20] Guidano, V. F., & Liotti, G. Cognitive assessment and emotional disorders : A structural approach to psychotherapy. New York : Guilford Press, 1983—
- [21] Hollon, S. D., & Kendall, P. C. Cognitive self-statement in depression : Development of an Automatic Thoughts Questionnaire. *Cognitive Therapy and Research*, 4, 383-395, 1980
- [22] 神村栄一 認知行動療法の適応と限界 : 期待される効果が得られないとき *心身医療*, 9, 1217-1221, 1997
- [23] Kendoll, P. C., & Hollon, S. D. Cognitive-behavioral interventions: Theory, Research, and Procedure, New York, Academic Press, 1979
- [24] 児玉昌久・片柳弘二・嶋田洋徳・坂野雄二 大学生におけるストレスコーピングと自動思考, 状態不安, および抑うつ症状との関連, *ヒューマンサイエンスリサーチ*, 7, 14-26, 1994

- [25] Krantz, S., & Hamman, C. L. Assessment of cognitive bias in depression. *Journal of Abnormal Psychology*, 88, 611-619, 1979
- [26] Lazarus, R. S., & Folkman, S. *Stress, appraisal, and Coping*. New York : Springer, 1984
- [27] 松村千賀子 日本版 Irrational Belief Test (J I B T) 開発に関する研究 心理学研究, 62, 106-113, 1991
- [28] Maultsby, M. C. *Rational behavior therapy*. New Jersey : Prentice-Hall, 1984
- [29] Meichenbaum, D. H. *Cognitive behavior modification : An integrative approach*. New York : Plenum, 1977 (マイケンバウム, D. H. 根建金男 (監訳) 1992 認知行動療法 同朋舎) .
- [30] 森 治子・長谷川浩一・石隈利紀・嶋田洋徳・坂野雄二 不合理な信念測定尺度 (J I B T-20) の開発の試み ヒューマンサイエンスリサーチ, 3, 43-58, 1994
- [31] Peterson, C., von Baeyer, C., Abramson, L. Y., Matalsky, G. I., & Seligman, M. E. P. The Attributional Questionnaire. *Cognitive Therapy and Research*, 6, 287-300, 1982
- [32] Raimy, V. A self-control model of depression. *Behavior Therapy*, 8, 787-804, 1975
- [33] Rotter, B. Generalized expectancies for internal vs. external control of reinforcement. *Psychological Monographs*, 80, 1-28, 1966
- [34] 坂野雄二 認知行動療法の発展と今後の課題 ヒューマンサイエンスリサーチ, 1, 87-107, 1992
- [35] 坂野雄二 認知行動療法 日本評論社, 1995
- [36] 坂野雄二 さまざまな認知行動療法 岩本隆茂・大野裕・坂野雄二 (編) 認知行動療法の理論と実際 培風館 Pp.57-71, 1998
- [37] 坂野雄二・東條光彦 一般性セルフ・エフィカシー尺度作成の試み 行動療法研究, 12, 73-82, 1986
- [38] Scheier, M. F., & Carver, C. S. Optimism, coping, and health : Assessment and implications of generalized outcome expectancies. *Health Psychology*, 4, 219-247, 1985

- [39] Schwartz, R.M., & Gottman, J. Toward a task analysis of assertive behavior.
Journal of Consulting and Clinical Psychology, 44, 910-920, 1976
- [40] Seligman, M. E. P. Helplessness : On depression, development and death.
San Francisco : Freeman, 1975
- [41] Watson, D., & Friend, R. Measurement of social-evaluative anxiety.
Journal of Consulting and Clinical Psychology, 33, 448-459, 1969
- [42] <http://yaburenai.com/chiryohou/koudou.html>

第3章 VR システム

3.1 VR を用いた暴露療法

前述の通り，暴露療法では，イメージを用いるより，実際の刺激にさらす方が治療効果が高いといわれているので，VR システムを用いる場合は，単なる映像提示ではなく人間の感覚系に作用するような提示を実現することによって，まるでその空間に自らが存在するかのような没入感や臨場感を伴う空間体験を実現する事が重要である。

人の感覚の中で，視覚によって得られる情報が最も多く，感覚系の 80~90% を占めると言われている。従って VR における視覚提示は，バーチャル空間への没入感を体験者に提示することが求められる。

VR 技術のコンセプトを示す。

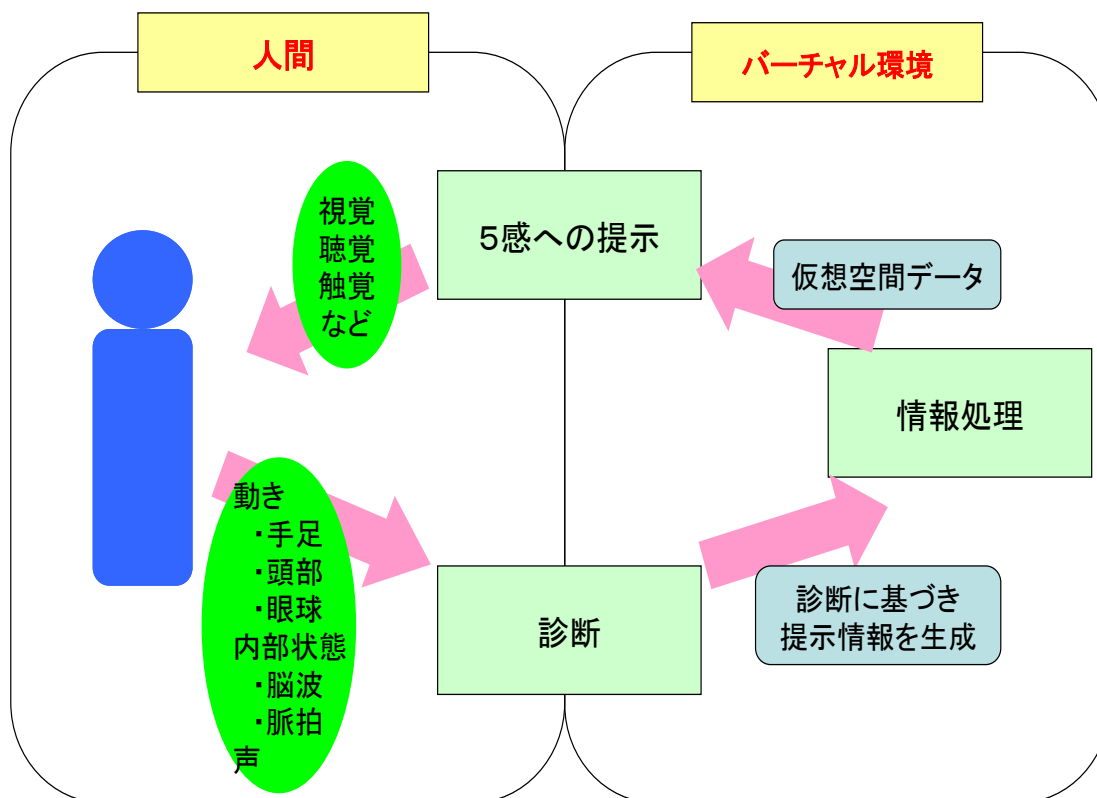


図 3-1 : VR 技術のコンセプト

は，コンピュータで作るバーチャル環境が，視覚をはじめ聴覚・触覚・力感覚・移

動感覚など感覚系の特徴に適合した提示を体験者に行うと、体験者の生理的な反応として、手足や頭部・眼球などが無意識に動く、あるいは脳波や脈拍・筋電や心電などに影響が表れることを示す。この自律神経系応答の変化を計測、臨床医の診断によつて的確な情報処理に基づいた提示を続けて行くと、クライアントはバーチャル環境で高い没入感覚を得ることを示す。

3.2 VRにおける視覚効果の有効範囲

VR システムを用いる場合、映像そのものの高画質化よりも、没入感及び臨場感が治療効果に大きく関わる要素になると考えられる。そこで、VR の視覚提示は、単に映像を提示するだけではなく、バーチャル空間への没入感を体験者に与えることが必要になってくる。

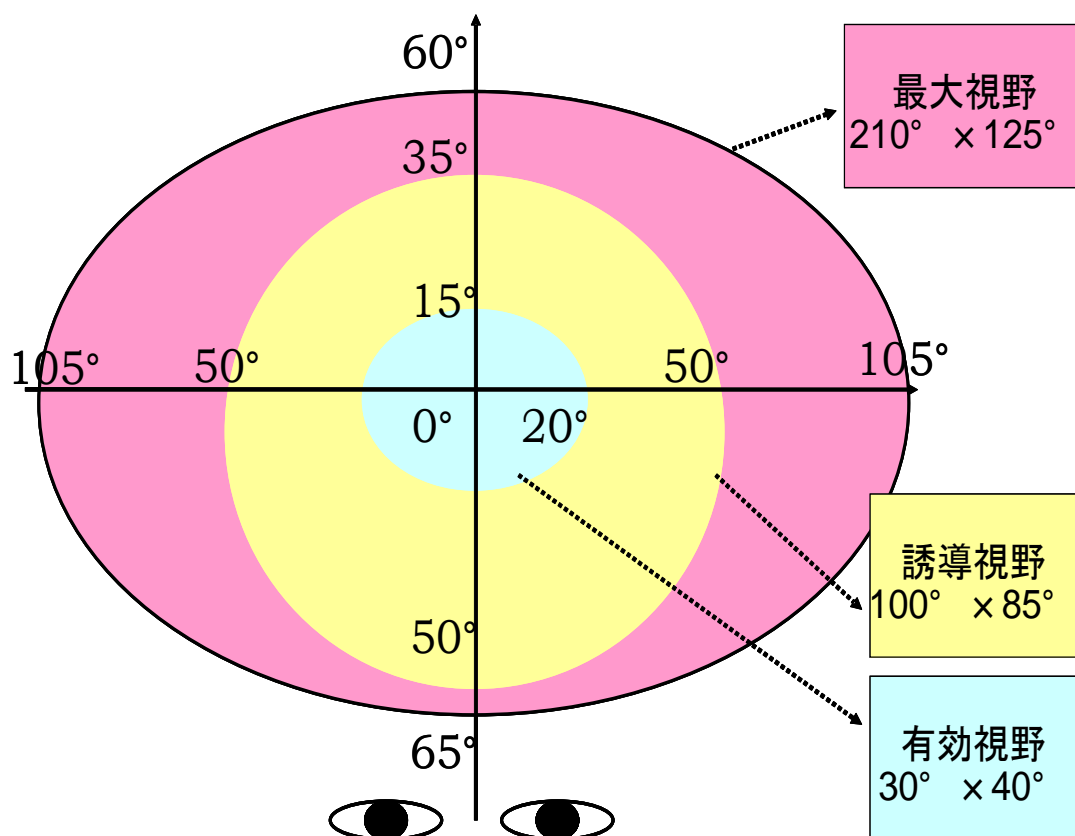


図 3-2：情報受容特性の分布（宮，他，The Society of Life Support Engineering, Vol.24
—No.4, P 194-200)

図 3-2 はそれぞれの視野の関係である。これらを考慮して、本研究では、水平視野 100° 以上、垂直視野 85°以上の視覚提示を行うことにした。

5感の中でも、特に、人の視野を覆うような映像提示を行うと、映像との相対的な位置関係が平衡感覚や運動感覚に大きな影響を及ぼし、その映像に没入した感覚を得られる。眼球構造に基づいた平均的な人間の両眼による視野範囲を、エラー! 参照元が見つかりません。に情報受容体特性の分布として水平方向及び垂直方向の角度として表す。最大視野範囲はおよそ水平方向に 210 度、垂直方向に 125 度程度と言われている。人間が視覚より文字や色などの詳細な情報を得ることができる範囲は有効視

野と位置付けられ、およそ水平方向に 30 度、垂直方向に 20 度と言われている。視野における映像の占有する範囲が拡大するにつれて、映像が視覚に大きな影響を与える大画面効果は増加するが、ある範囲を超えるとその効果が飽和し、それ以上映像範囲を拡大しても、大画面効果がさほど増えないとされ、この大画面効果が飽和する範囲を誘導視野と定義されている。誘導視野は、水平方向 100 度、垂直方向 85 度程度と報告されている。誘導視野範囲から最大視野範囲までは補助視野とも言われ、赤い点滅など強力な刺激の存在に気づく程度の周辺的な範囲とされている。

しかしながら、近年の研究では周辺視野は平衡感覚や運動感覚に大きな影響を及ぼすとの報告もある。渦巻きなどの回旋運動の映像を広視野に表示することで、身体動揺の誘起を確認した実験事例がある。本研究では周辺視野の影響を人間の視覚特性に適合するために、誘導視野を超える広い視野範囲に映像提示可能なディスプレイの構築が必須であると考えられる。

3.3 従来のシステム

3.3.1 ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた VR システム

VR システムの原型を最初に開発したのはアイバン・サザランドでヘッド・マウンテッド・ディスプレイ (HMD : Head Mounted Display) という。左右の目に別々の小型ディスプレイをあて、視差を利用した立体映像を投影し、三次元情報入力装置を用いて人工的な仮想三次元空間をクライアントの周囲に出現させるシステムを 1968 年に開発している。

HMD を用いた VR システムでは、

図 3-3, エラー! 参照元が見つかりません。のように、クライアントが HMD を装着して暴露療法を行う。コンピュータ上の映像データを HMD に出力することで、クライアントに仮想空間を提示する。HMD の動きはセンサーで検出され、映像データは装着者の頭の向きに連動して描画される仕組みになっている。

しかし、欠点として HMD の重量や頭の締め付けなどの不快な装着感があって仮想空間に集中できないこと、見回すことは可能だが視野角が狭いこと、モーションシクネスと呼ばれる車に酔った気分になるなどが指摘されている。

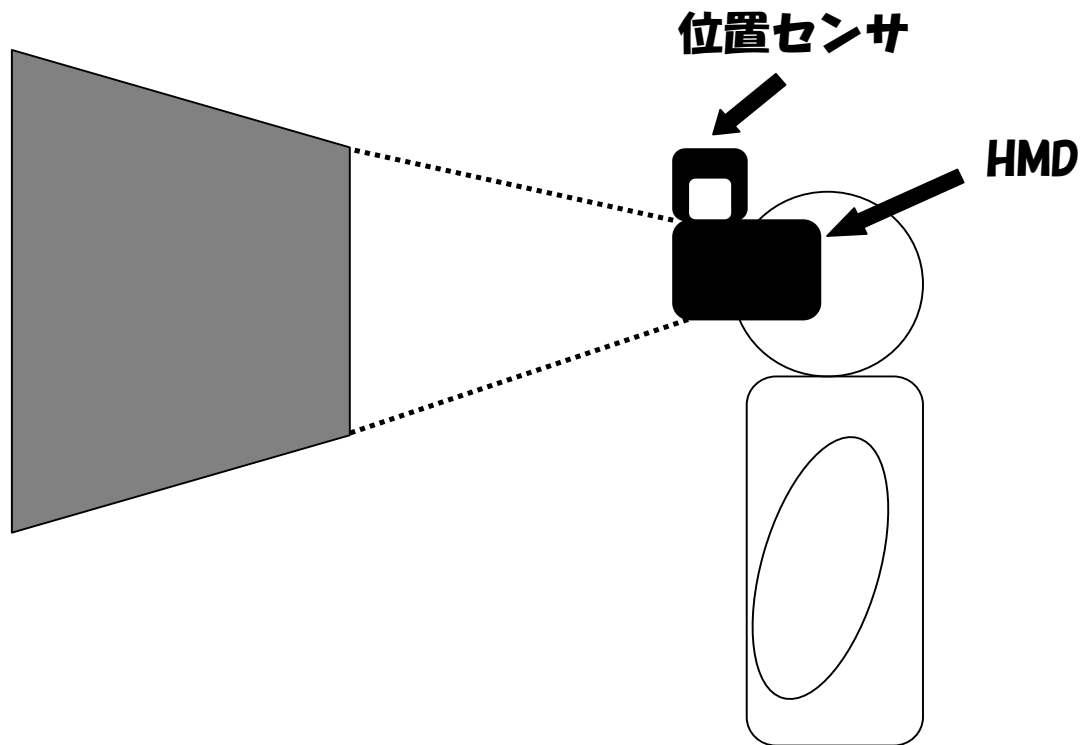


図 3-3 : HMD を用いた VR システム図

3.3.2 没入型多面ディスプレイを用いた VR システム

没入型多面ディスプレイを用いた VR システムとして CAVE がある。CAVE はイリノイ大学シカゴ校で開発された。1 辺 10 フィートの立方体状の空間の正面，側面，床面がそれぞれ立体視映像のスクリーンで構成されている。クライアントは液晶シャッターメガネを用いて各面に投影された立体視映像を見ることで，全体として一つの没入型バーチャル空間を体験することができる。CAVE の技術は各地で研究が進められ 3 面構成，5 面構成，6 面構成等の種々のスクリーン構成のシステムや，立体視に偏光方式を用いるシステム等も開発されている。これらの没入型多面ディスプレイを総称し CAVE 型ディスプレイと呼ぶ。

，エラー! 参照元が見つかりません。，エラー! 参照元が見つかりません。で示す通り，没入型多面ディスプレイは，基本的に各スクリーン面に対応した各プロジェクタによって映像投影するため，個々のスクリーンとプロジェクタの関係は，単純な平面スクリーン投影と等価であり，構築が比較的容易である。HMD のような不快な装着感がなくて仮想空間に集中しやすい。しかし，スクリーンのつなぎ目を通る直線は，

スクリーンのつなぎ目を頂点とする 2 本の折れ曲がった線分として知覚されてしま
う . かつ , 大 掛 かり で 高 価 で ある .

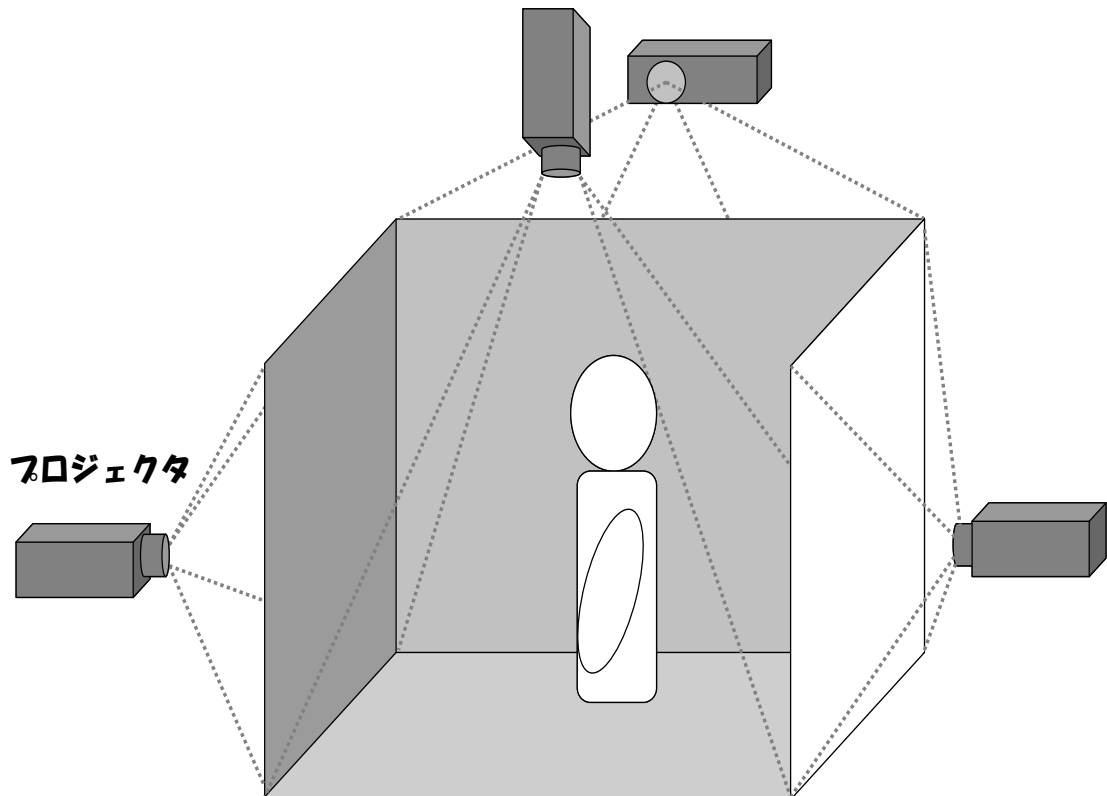


図 3-4 : CAVE システム図

両者に共通している特徴は、立体視が容易に実現して、深い没入感が得られること
である。HMD では左右の目に視差を持たせた映像を入力することで、ステレオ立体
視を実現する。一方、CAVE は、最近盛んに市販されるようになってきている 3D テ
レビの基本となっている技術であり、専用のメガネをかけることでステレオ立体視を
実現する。どちらも身体のすぐ近くから遠方までを知覚させることが可能である。

ただし、ステレオ立体視は、文字通りの 3 次元情報を提示しているわけではなく、
基本的には 2 枚の平面から立体感を演出する技術である。したがって、目はスクリー
ンの位置に焦点が合っていて、脳は別の位置に立体を知覚するという矛盾が生じてい
る。そのため、3D 酔いと呼ばれる症状を起こすことがあり、健康被害も懸念されて
いる。

参考文献

- [1] M. Krijin, P. M. G. Emmelkamp, R. P. Olafsson and R. Biemond, “Virtual reality exposure therapy of anxiety disorders: a review”, *Clinical psychology review*, Vol.24, pp.259-281 (2004)
- [2] *Head Mounted Displays: Designing for the user*; Melzer and Moffitt; McGraw Hill, 1997.
- [3] Zhengyou Zhang, “ A Flexible New Technique for Camera Calibration” ,Microsoft Research,(1998)(last updated 2008)
- [4] ROGER Y.TSAI, “ A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses” ,*IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No.4, pp.323-344 (1987)
- [5] 澤田一哉, スケーラブル半球ドーム型立体映像提示システム. システム/制御/情報, 2005; 49(9): 369-373
- [6] 澤田一哉, “スケーラブル半球ドーム型立体映像提示システム”, システム/制御/情報, Vol.49, No.9, pp.369-373 (2005)
- [7] 宮野秀市, “バーチャルリアリティを利用した心理的療法—VR エクスポージャーによる恐怖症の治療—”, 日本音響学会聴覚研究会, Vol.36, No.9, pp.785-787 (2006)
- [8] 日本バーチャルリアリティ学会 VR 心理学研究委員会, “だまされる脳—バーチャルリアリティと知覚心理学入門”, 講談社ブルーバックス (2006)
- [9] L. F. Hodges, B. O. Rothbaum, R. Kooper, D. Opdyke, T. C. Meyer, J. J. deGraaff, J. S. Williford and M. M. North, “Virtual environments for treating the fear of heights”, *Computer*, Vol.28, No.7, pp.27-34 (1995)
- [10] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%83%88>
- [11] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%BB%E8%A7%92>
- [12] Baird, J. C. (1970). *Psychophysical analysis of visual space*. Oxford, London: Pergamon Press.

- [13] Joynson, R. B. (1949). The problem of size and distance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1, 119-135.
- [14] McCready, D. (1965). Size-distance perception and accommodation-convergence micropsia: A critique. *Vision Research*. 5, 189-206.
- [15] McCready, D. (1985). On size, distance and visual angle perception. *Perception & Psychophysics*, 37, 323-334.
- [16] O'Shea, R. P. (1991). Thumb's rule tested: Visual angle of thumb's width is about 2 deg. *Perception*, 20, 415 - 418
- [17] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A6%96%E8%A7%92>
- [18] Sutherland, I.E.. “The Ultimate Display” . Proc. IFIP **65** (2).
- [19] Cruz-Neira, C.; Sandin, D.J., and DeFanti, T.A. (August 1993). [“Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE”](#). [Proceedings of SIGGRAPH '93 Computer Graphics Conference](#). SIGGRAPH '93 Computer Graphics Conference. ACM SIGGRAPH. pp. pp. 135-142
- [20] 舘 暲 (12 2005). [“第 10 回を記念する新字 \(ばーちやる\) の提案”](#). *日本バーチャルリアリティ学会誌* 10 (4): pp. 18-19
- [21] 『バーチャルリアリティ——理論・実践・展望』 サンドラ・K・ヘルセル、ジュディス・P・ロス＝編／広瀬通孝＝監訳／海文堂出版／1992 年 6 月 (『Virtual reality:theory,practice,and promise』の邦訳)
- [22] 『人工現実感生成技術とその応用』 岩田洋夫＝編著／サイエンス社／1992 年 12 月
- [23] 『聖なるヴァーチャル・リアリティ——情報システム社会論』 西垣通＝著／岩波書店／1995 年 12 月
- [24] 『ヴァーチャルという思想——力と惑わし』 フィリップ・ケオー＝著／嶋崎正樹＝訳／西垣通＝監修／NTT 出版／1997 年 9 月 (『Le virtuel』の邦訳)

- [25] 『だまされる脳——バーチャルリアリティと知覚心理学入門』 日本バーチャルリアリティ学会 VR 心理学研究委員会＝編／講談社(ブルーバックス)／2006年9月
- [26] http://www.sgi.co.jp/company_info/press_releases/archives/20121212.html
- [27] <http://www.cybernet.co.jp/avs/example/interview/011.html>
- [28] <http://www.interaction-ipsj.org/archives/paper2011/interactive/0213/4DEX-5.pdf>
- [29] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%83%E3%83%89%E3%83%9E%E3%82%A6%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%87%E3%82%A3%E3%82%B9%E3%83%97%E3%83%AC%E3%82%A4>
- [30] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0>

第4章 提案システム

4.1 曲面形状没入ディスプレイ

そこで本システムでは、曲面形状没入ディスプレイを用いることとした。曲面形状没入ディスプレイに単眼映像を投射する場合、クライアントは両眼視差や運動視差（頭部移動）による奥行き知覚ができないため、映像の奥行き感は非常に曖昧なものになる。曲面形状没入ディスプレイの特性である、フレームレス、広視野、スクリーン形状が3次元形状であることから、クライアントはスクリーンの存在をほとんど知覚できず、平面スクリーンよりも没入感が高いことが分かっている。

人間の視野が楕円形状であることから、映像周辺部分が曲線である方が違和感が少なく、視野の中に折れ曲がりが生じない楕円形状もしくは球面形状のスクリーンで視野を覆う方が望ましいと考えられる。水平方向 180° 垂直方向 180° の視覚提示が可能な半球型のドーム型スクリーンとプロジェクタを用いたVRシステムの試作を行う。

4.2 自作半球ドーム型スクリーン

本研究では，VR システムを利用した暴露療法を利用しやすいものにするため，安価に行うこともねらいの一つである．そのため，プロジェクタのみを購入し，半球ドーム型スクリーンは安価な材料で自作することにした．

4.2.1 半球ドーム型スクリーンの設計

自作する半球ドーム型スクリーンは，半径 (r) 50cm とした．

以下にその設計を示す．

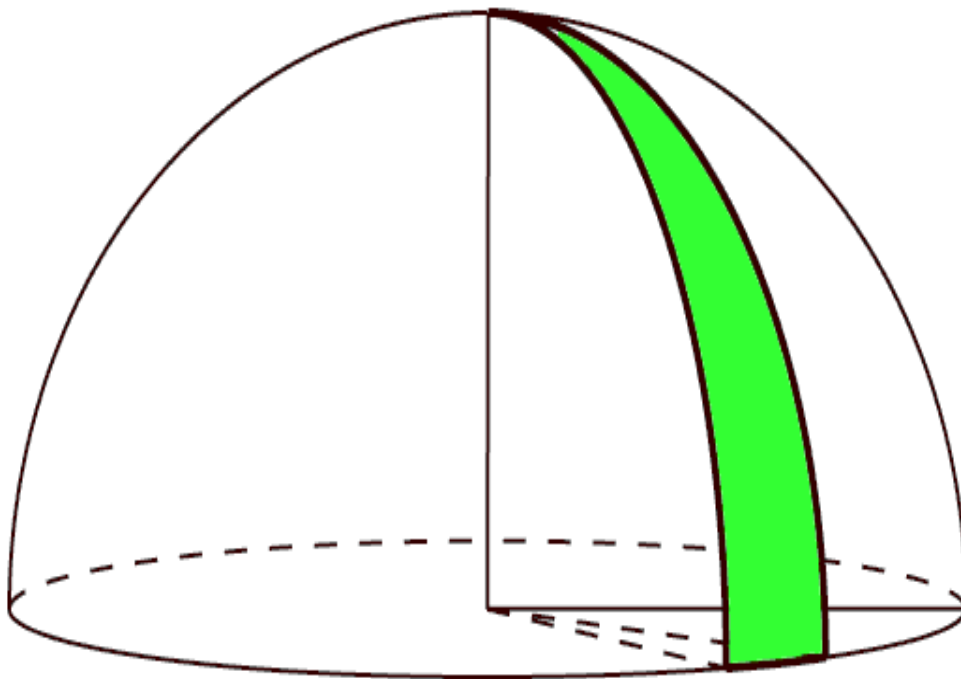


図 4-1: 半球の分割図 1

まず，

図 4-1 のように，半球をその円周に沿って分割する．分割数 (n) は多いほど形状が半球に近くなる．本研究では分割数 (n) を 24 とした．

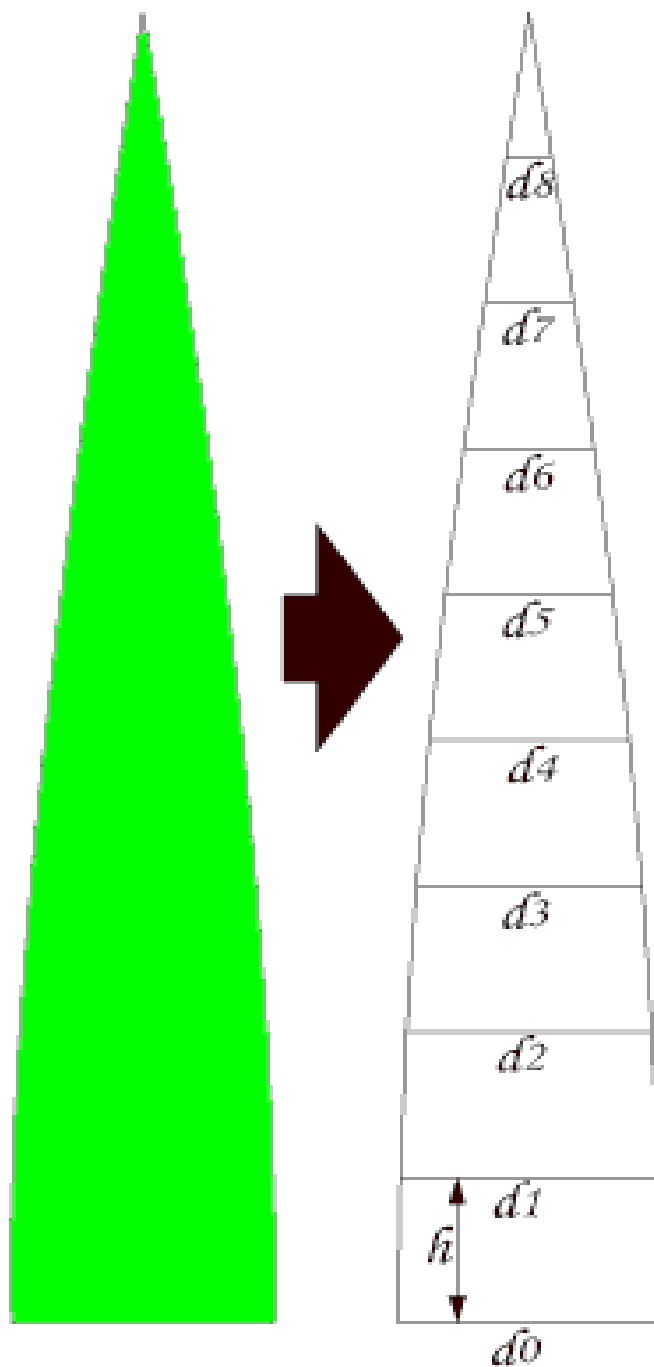


図 4-2: 半球の分割図 2

図 4-2 のように、半球を 24 分割したものを、高さの同じ 1 個の三角形と 8 個の台形の組み合わせで近似する。この高さを h 、各台形の底辺の長さを大きいほうから順に $d_0, d_1, d_2, \dots, d_7$ 。三角形の底辺の長さを d_8 と置く。各パラメータは半径 r 、分割数 n を用いて以下の式で表される。

$$h = 2\pi r / 36$$

$$d_0 = 2\pi r / n$$

$$d_1 = d_0 \cdot \cos 10^\circ$$

$$d_2 = d_0 \cdot \cos 20^\circ$$

これより求まる各パラメータをエラー! 参照元が見つかりません。に示す.

図 4-2 の各パラメータ

	長さ(mm)
h	87.3
d0	130.9
d1	128.9
d2	123
d3	113.4
d4	100.3
d5	84.1
d6	65.4
d7	44.8
d8	22.7

4.2.2 半球ドーム型スクリーンの製作

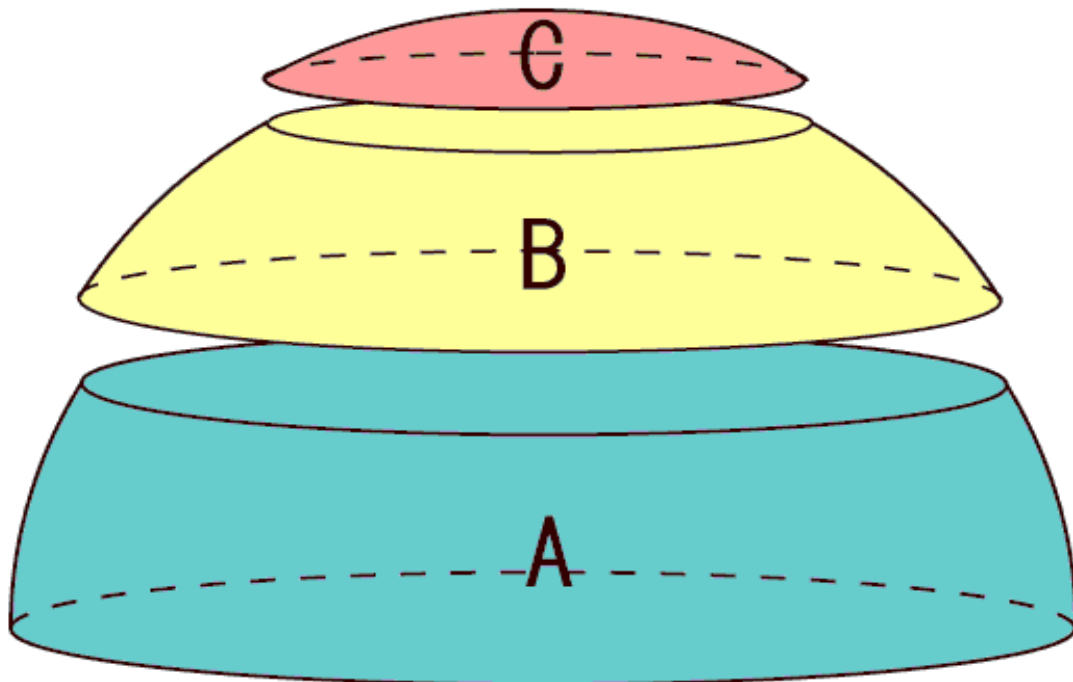


図 4-3: 半球ドーム型スクリーン製作図

前項でパラメータを設定した各パーツを

図 4-3 のように三段に分けて張り合わせて、最後に重ね合わせた。



図 4-4: 半球ドーム型スクリーン完成図 (内側)

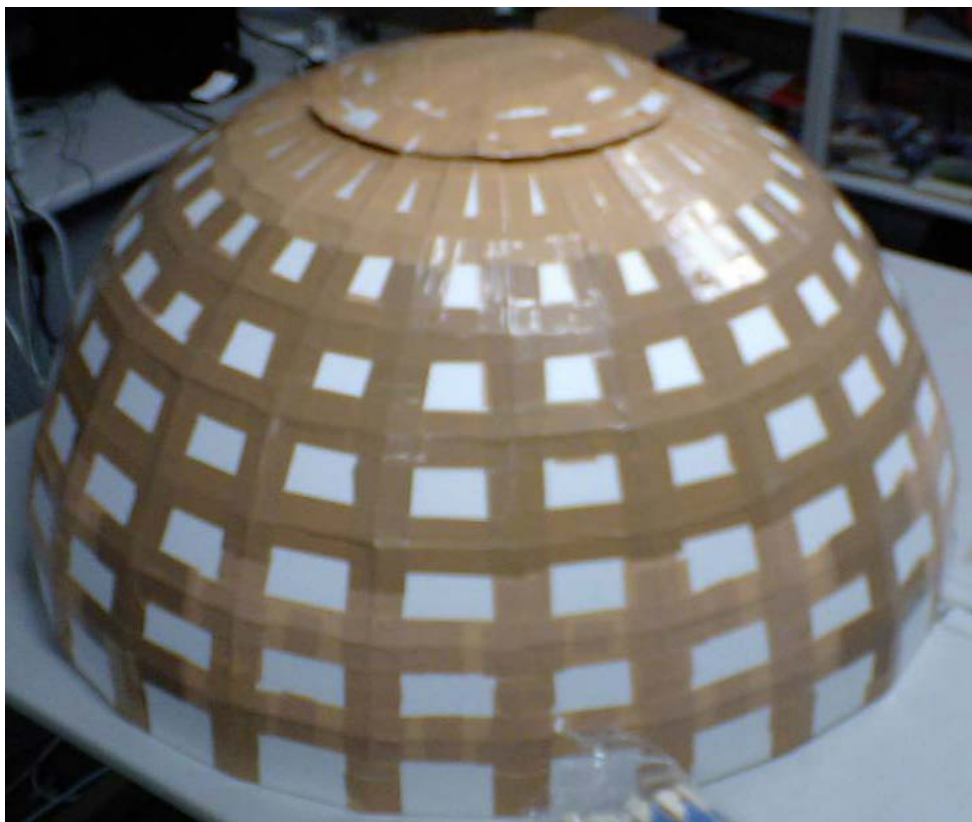


図 4-5: 半球ドーム型スクリーン完成図 (外側)

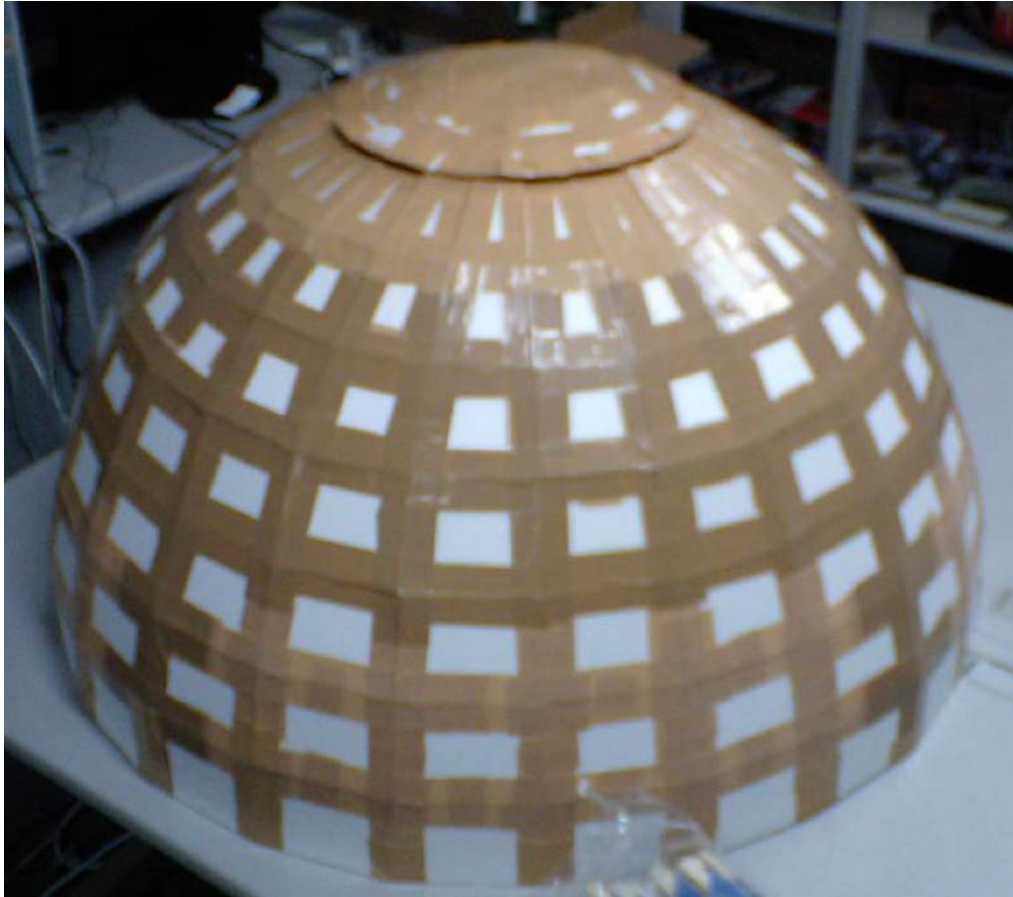


図 4-6: 半球ドーム型スクリーンの全完成図

内部は表面を全てガムテープで目張りしたあと、シリコンスプレーを用いてガムテープの切れ目の線を見えづらくして下地を作った後に白のつや消しカラースプレーを用いて塗装を行った。

4.2.3 自作半球ドーム型スクリーンの評価

図4-7は、実際に完成した半球ドーム型スクリーンにプロジェクタを用いて画像をフロント投影してみた写真である。

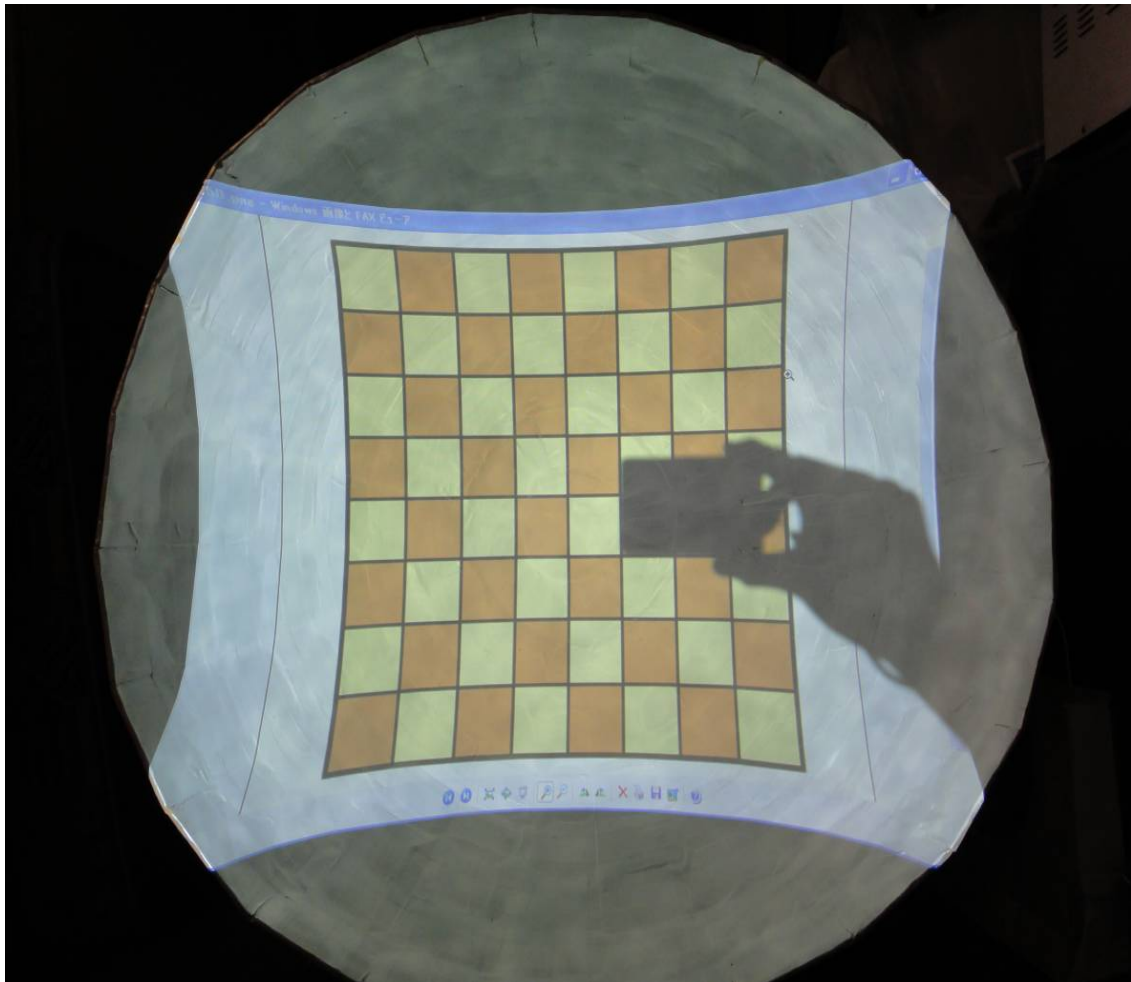


図 4-7： 半球ドーム型スクリーンへの映像の投影試験

平面スクリーンに比べて、臨場感が高く、吸い込まれるような感覚を得ることができた。

塗装に関しては、投影する画像が白いとスクリーンの色に同化してしまい他の色に比べて薄く見えてしまうが、画像を認識するには問題のない程度であった。ガムテープの線や材質も実際に映像を投影してみると目立たなくなった。しかし、クライエントの影がスクリーンに映らないような位置に置くと、スクリーンから大きく外れてしまい歪みが無視できる範囲ではなくなってしまい、覗き込むような姿勢で映像を提示するのは難しい。

4.2.4 乳白色のドーム型スクリーン

この問題を解決するために、図 4-8 に示すように、もっとも簡単で有効な方法として、ドーム型スクリーンを乳白色にして背面から投影するリアプロジェクション形式にした。

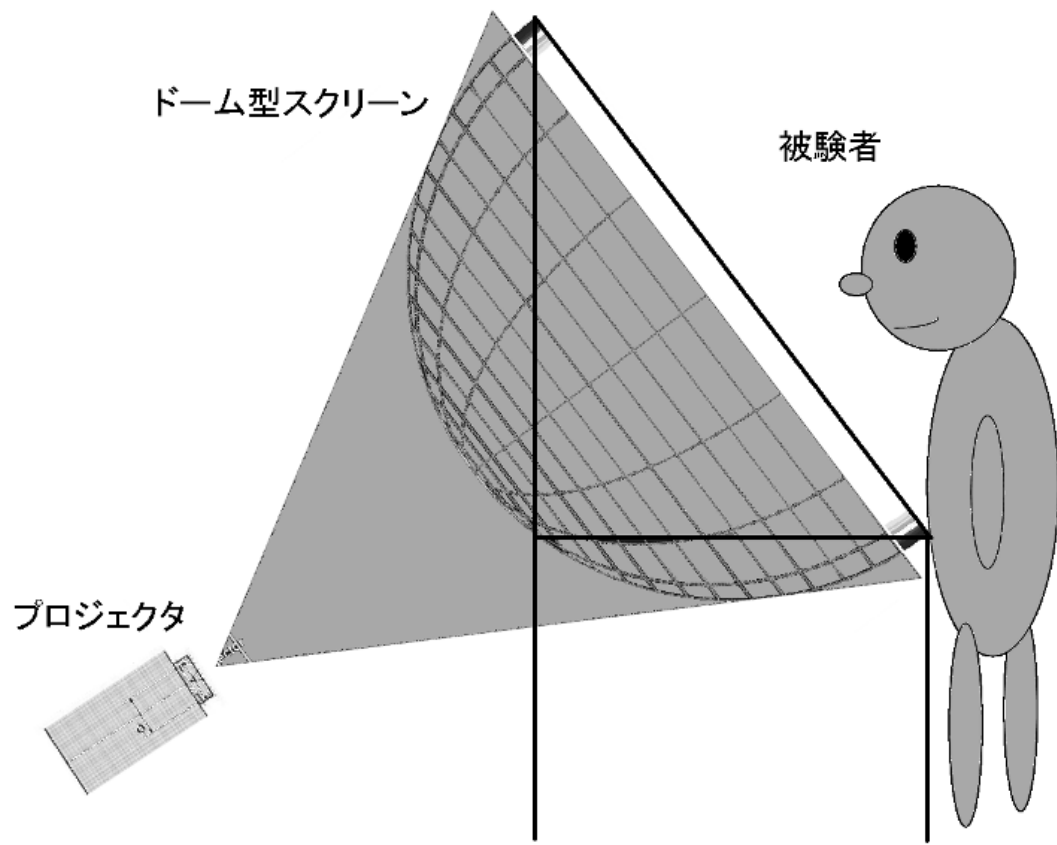


図 4-9: 本 VR システム概略図(宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)

図 4-10 は外径 1000mm の乳白色のドーム型スクリーンである。



図 4-11: 乳白色のドーム型スクリーン

高所恐怖症克服の目的に合わせて、スクリーンを傾け、覗きこむ形にした。このときの理想視点は、フレームの長さを変えることで任意に設定することが可能である。その設計図を、図 4-10, 図 4-11 に示す。

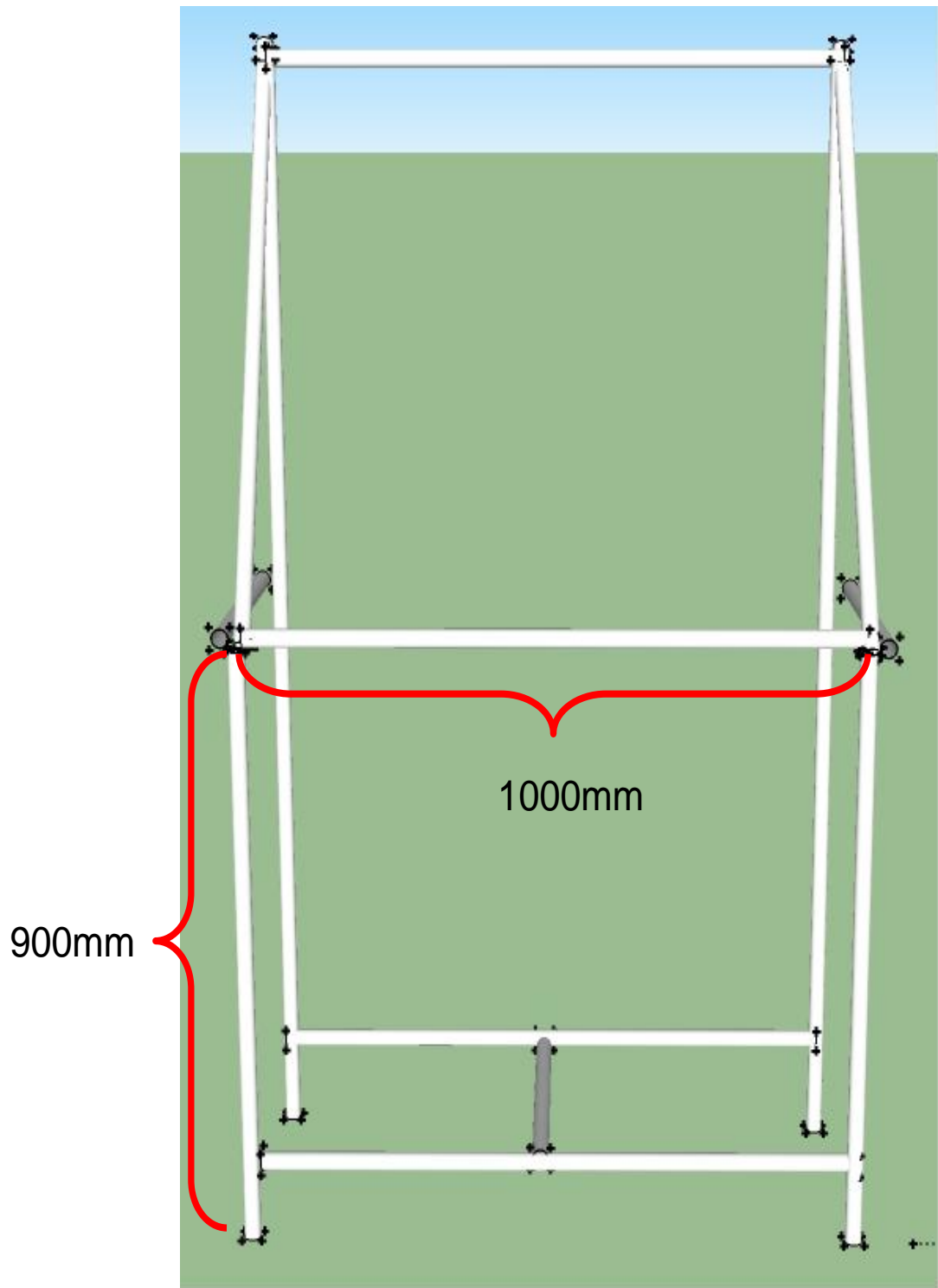


図 4-12 : CAD を用いた設計 (前面)

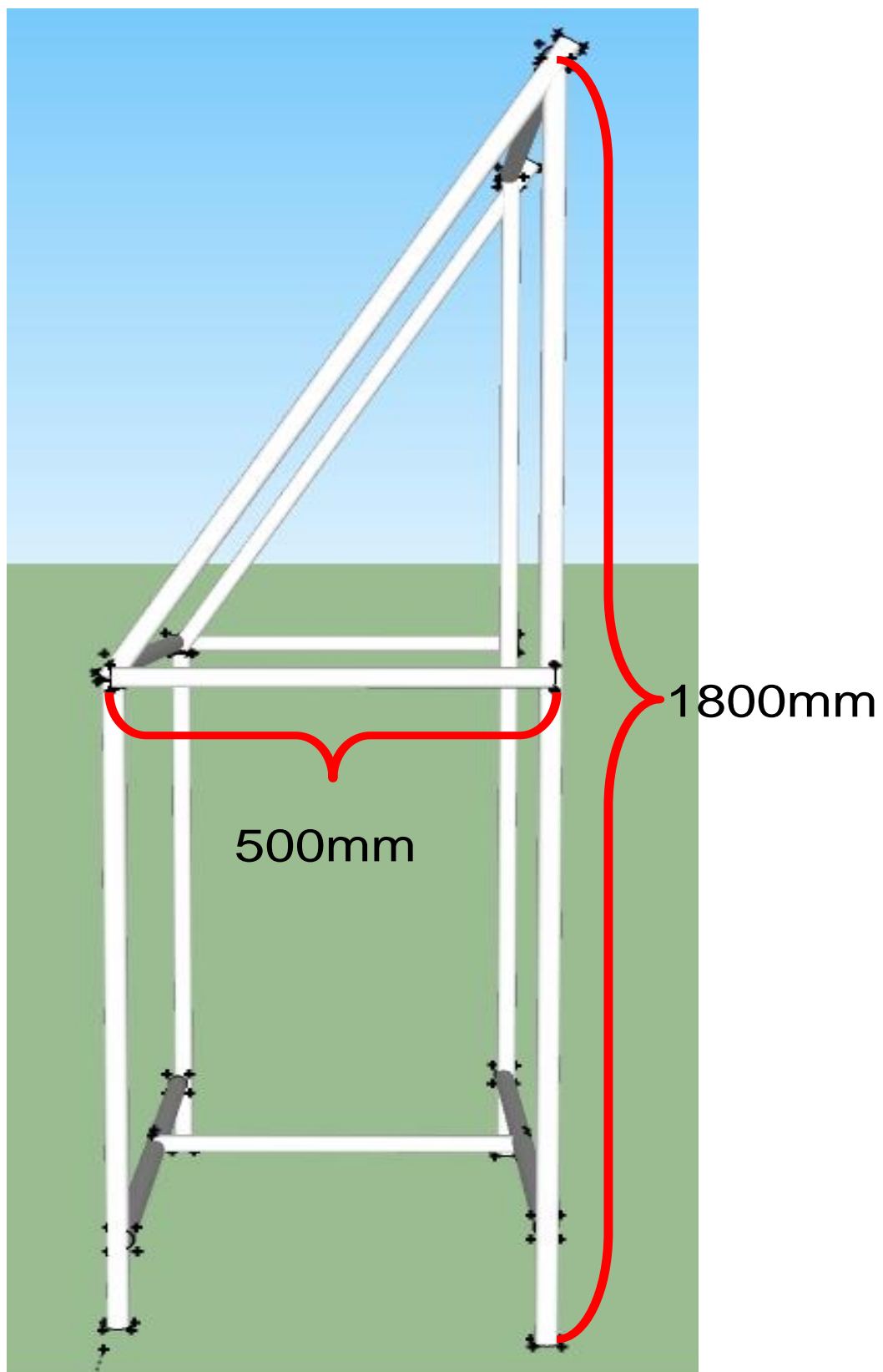


図 4-13 : CAD を用いた設計 (横)

実際に出来上がったシステムを図 4-12, 図 4-13 に示す.



図 4-14 : 半球ドーム型スクリーン完成図 (前面)



図 4-15 : 半球ドーム型スクリーン完成図 (横)

図 4-16 に実際に体験している様子を示す.

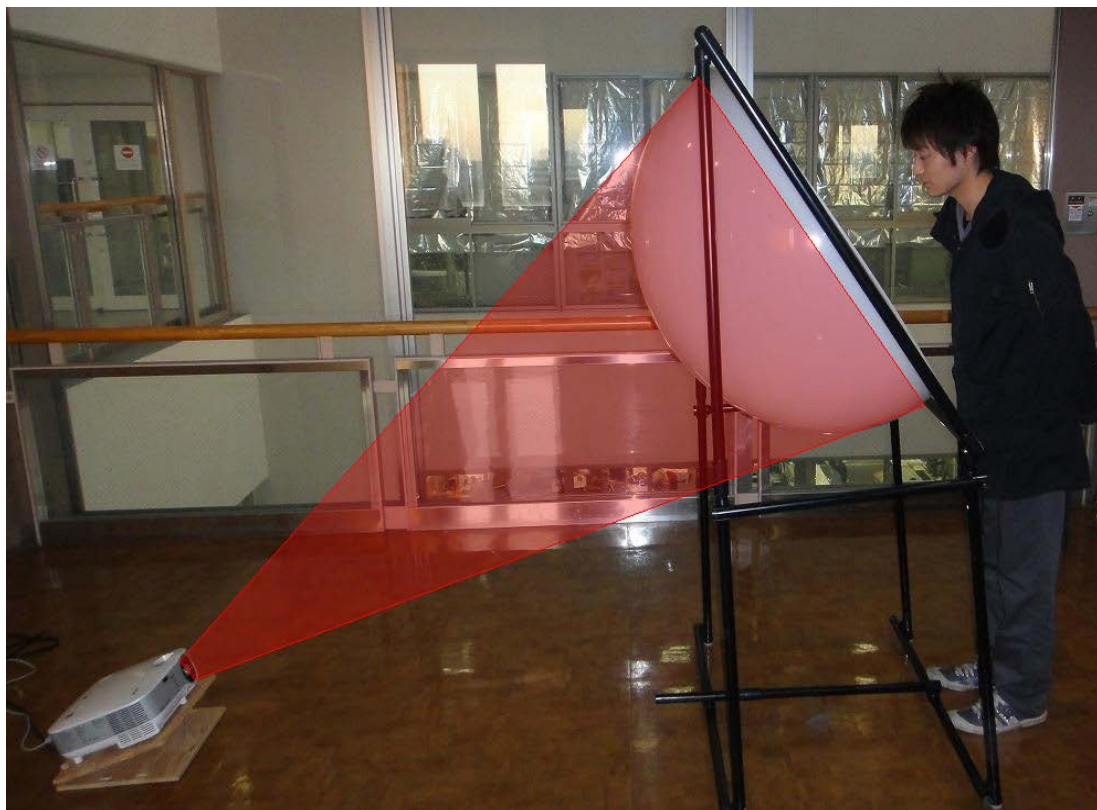


図 4-17 : 実際に体験している様子 (宮, 他, The Society of Life Support
Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)

参考文献

- [1] 宮野秀市, “バーチャルリアリティを利用した心理的療法－VR エクスポージャーによる恐怖症の治療－”, 日本音響学会聴覚研究会, Vol.36, No.9, pp.785-787 (2006)
- [2] 日本バーチャルリアリティ学会 VR 心理学研究委員会, “だまされる脳－バーチャルリアリティと知覚心理学入門”, 講談社ブルーバックス (2006)
- [3] L. F. Hodges, B. O. Rothbaum, R. Kooper, D. Opdyke, T. C. Meyer, J. J. deGraaff, J. S. Williford and M. M. North, “Virtual environments for treating the fear of heights”, Computer, Vol.28, No.7, pp.27-34 (1995)
- [4] 澤田一哉, スケーラブル半球ドーム型立体映像提示システム. システム/制御/情報, 2005; 49(9): 369-373
- [5] Gray Bradski・Adrian Kaebler 著: “詳細 OpenCV コンピュータビジョンライブラリを使った画像認識・処理”, オライリー・ジャパン(2010)
- [6] 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム 著: “OpenCV プログラミングブック”, 毎日コミュニケーションズ(2007)
- [7] OpenCV (Open Source Computer Vision):
- [8] <http://patent.astamuse.com/ja/published/JP/No/2011529233>
- [9] <http://www.nihonbinary.co.jp/Products/VR/DisplaySystem/ImmersiveDisplay/immersivedome%20catalog.pdf>
- [10] <http://www2.panasonic.biz/es/catalog/lighting/products/nsl/pdf/ZFCT1A217-952.pdf>
- [11] <http://dome-theater.com/archives/theaters/theater01>
- [12] <http://dome-theater.com/archives/theater-types/others>
- [13] <http://patent.astamuse.com/ja/published/JP/No/2010128480>

第5章 歪み補正

5.1 球面への映像の投影の問題点

曲面形状スクリーンへの映像提示には、その形状に応じた何らかの映像歪み補正機能を必要とする。投射系に適合したレンズ系を撮像時に使用して映像を作成するものや、特殊レンズを用いた光学系で歪み補正を行うものがある。光学系を用いる場合、スクリーンの大きさや曲率などを変更すると、新たな光学系を設計しなければ対応できないという短所があり、コスト面からも特殊レンズは高価になる。

アミューズメント施設などで見受けられる曲面形状スクリーンを用いたシステムの多くは、その曲率が小さいため、歪み補正を行わず、映像の歪みを考慮したものとはなっていないため、より高い没入感を必要とする場合には適さない。

本研究では、臨床医にとっても利用しやすいように専門的な光学系やコンピュータ技術を必要としないで、撮影した映像、画像を簡単に投影できるシステムを開発する。

5.1.1 カメラの歪み補正

本研究の目的にあるように、市販のカメラを用いた場合、図 5-1 のようなレンズの中心から離れた場所を通過する光はレンズの近くを通過する光よりも大きく曲げられることから生じる歪み（半径方向歪み）と

図 5-2 のようなレンズと撮像素子の位置を合わせるときに生じる歪み（円周方向歪み）が発生していることがある。

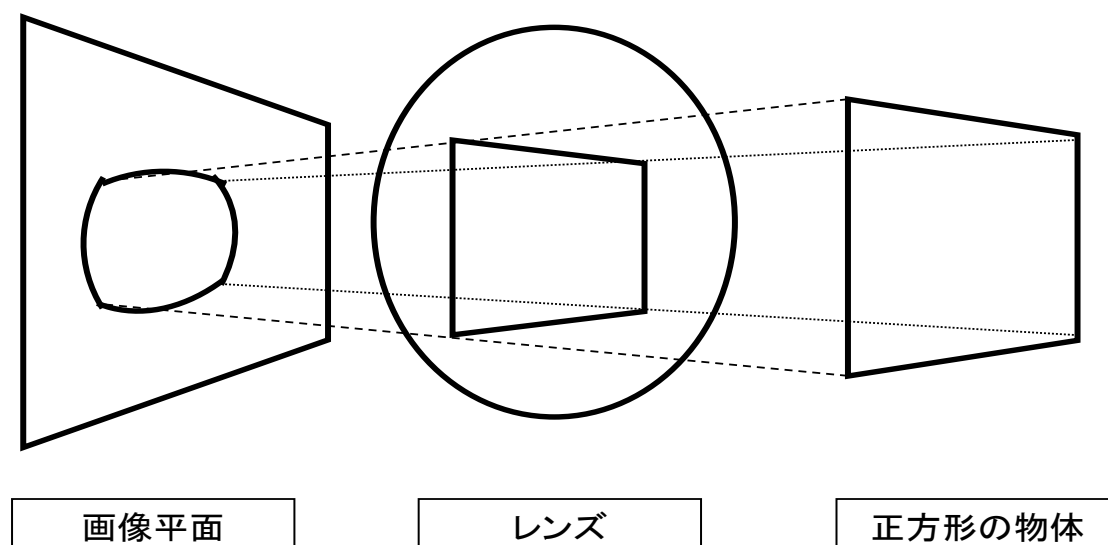


図 5-1 : 半径方向歪み

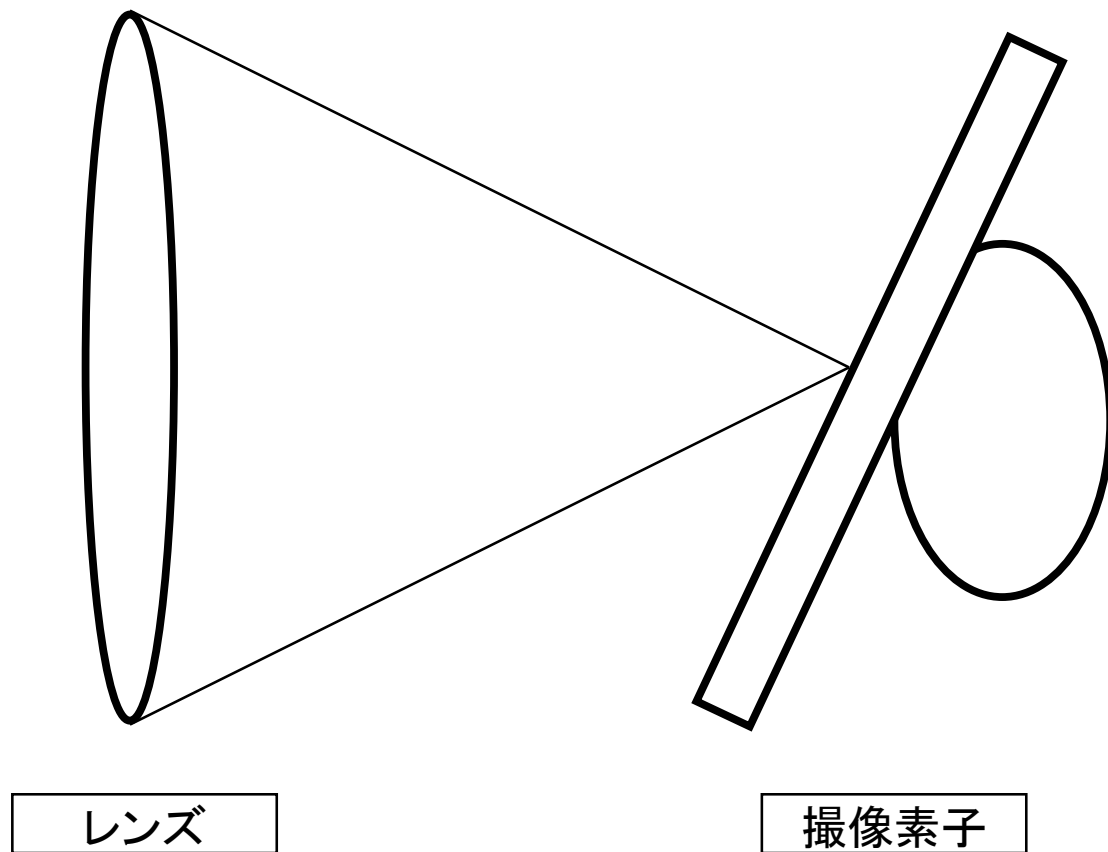


図 5-2 : 円周方向歪み

5.1.2 カメラキャリブレーション

カメラで写真を撮影する時、位置が異なっていたり、カメラの位置が同じでも、カメラやレンズが異なれば、得られる画像も違う。逆に言えば、得られた画像からそのカメラの位置姿勢や特性を表すパラメータが分かる。このように撮影画像からカメラの位置姿勢や特性を推定することをカメラキャリブレーションという。ピンホールカメラに基づくカメラキャリブレーションにおいて、カメラの位置姿勢や特性を表すパラメータは外部パラメータと内部パラメータに分類できる。外部パラメータはカメラの3次元空間における位置姿勢を表す。内部パラメータは3次元空間を2次元画像平面へ投影するためのパラメータであり、レンズやカメラそのものの特性を表す。以下に本研究で用いたパラメータを示す。

- ・ 外部パラメータ
 - 回転 (3次元空間におけるレンズの光軸方向)
 - 平行移動 (3次元空間におけるレンズの中心座標)

- ・ 内部パラメータ
 - 焦点距離（レンズ中心から投影画像平面までの距離）
 - レンズ歪み係数（レンズによる光の歪みを表すパラメータ）
 - 画像主点位置（レンズ中心を通り，投影画像平面に垂直に交わる光線と投影画像との交点）
 - 画素サイズ（縦および横方向の画素の大きさ）

5.1.3 カメラパラメータの導出手順

世界座標系における点 $P(x_w, y_w, z_w)$ と，画像座標系における点 P の投影点 $p(x_d, y_d)$ との幾何学的対応関係を考える．

まず，点 P の 3 次元座標の同次座標表現 $P = [X \ Y \ Z \ 1]^T$ と点 p の 2 次元座標の同次座標表現 $p = [u \ v \ 1]^T$ を用いて， P と p の関係は，

$$sp = \mathbf{A}[\mathbf{R} | \mathbf{T}]P \quad (5.1)$$

ここで， s は画像のスケール係数， $[\mathbf{R} | \mathbf{T}]$ はカメラモデルの外部パラメータ行列， \mathbf{A} はカメラモデルの内部パラメータ行列を表す．

カメラの位置姿勢は， X ， Y ， Z 軸まわりの回転行列 \mathbf{R} と平行移動行列 \mathbf{T} で記述できる．

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

一方，内部パラメータ行列 \mathbf{A} は

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_u & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fs_u & fk_s & u_0 \\ 0 & fs_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

のように， α_u ， α_v ， u_0 ， v_0 および γ の 5 つの変数を持つ行列として表現できる．そして，式 (5.4) に示すように，これらの変数は焦点距離 f ， u 方向および v 方向の画素サイズ (s_u, s_v) ，画像平面とカメラ光軸の交点である主点座標 (u_0, v_0) ，画像平面上の u 軸と v 軸の傾きを表すせん断係数 k_s によって求められる．また，スケール係数と

呼ばれるパラメータ α_u および α_v は、焦点距離と画素サイズの積である。

以上のカメラパラメータによって、世界座標系の点を、画像平面に投影する。そのために、

図 5-3 のように、世界座標の Z_w をカメラ光軸と一致するように、世界座標を $[R | T]$ を用いて回転、平行移動させる。そうすることで、世界座標とカメラ座標を同じ座標として考えることができるので、世界座標系における点 $P(x_w, y_w, z_w)$ を、カメラ座標系における点 $P_c(x_c, y_c, z_c)$ に変換できる。また、 O_c はピンホールカメラにおけるピンホールを表している。 $U-V$ の 2 次元平面で表される画像平面は $X_c - Y_c$ 平面に平行であり、画像の中心は $Z_c = f$ になる位置におかれている。

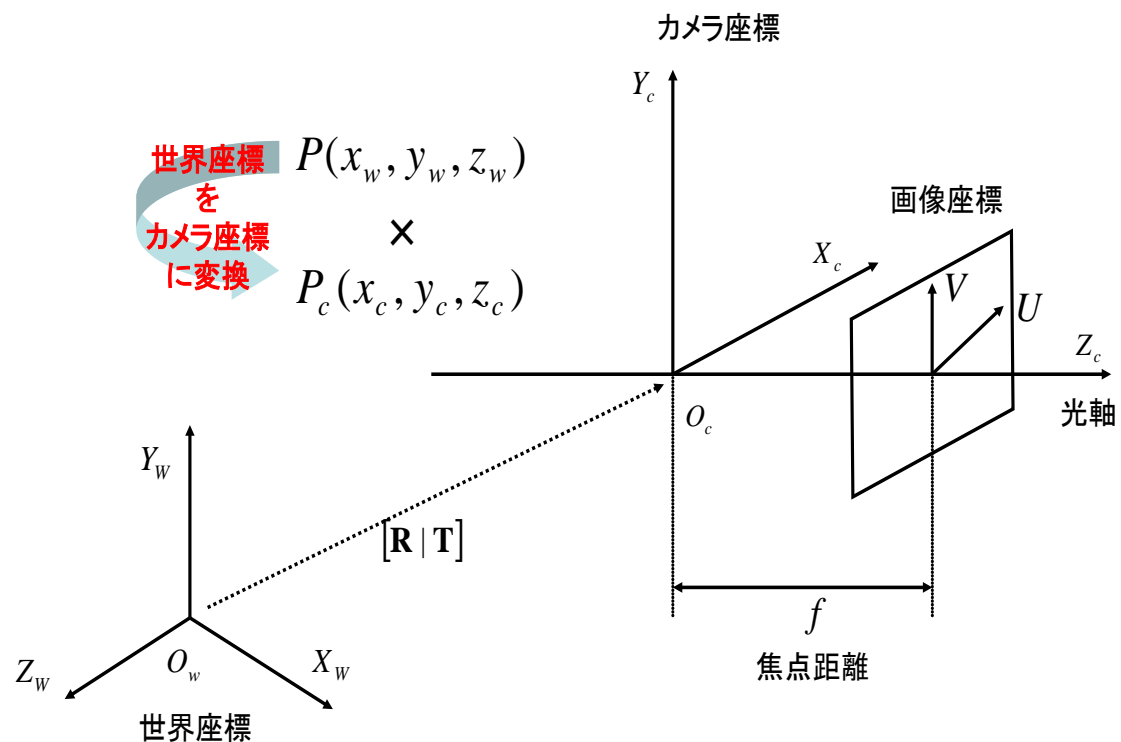


図 5-3 : 3次元空間の2次元平面への投影

図 5-4 のように、理想的なピンホールカメラでは点 P は (U_u, V_u) に透視投影される。投影点は点 $P_c(x_c, y_c, z_c)$ とレンズ中心 (ピンホール) を結ぶ直線と、投影した画像平面の交点にあたり、

$$U_u = f_x \frac{x_c}{z_c} \quad (5.5)$$

$$V_u = f_y \frac{y_c}{z_c} \quad (5.6)$$

のように表される. f_x , f_y はそれぞれ, $f_x = fs_u$, $f_y = fs_v$ である.

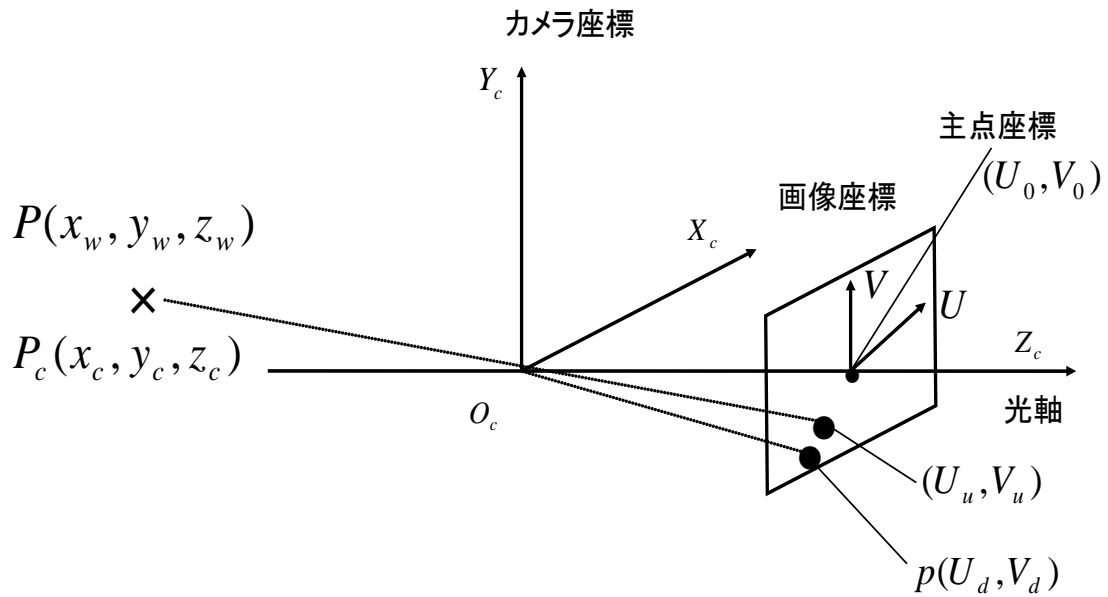


図 5-4: 歪みを考えた場合の画像平面への投影

しかしながら, 前章でも述べたとおり, 歪みが生じるので, 実際には点 P は $p(U_d, V_d)$ に投影される. 歪みは, 以下の式のように表される.

$$U_u = f_x \frac{x_c}{z_c} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 \frac{x_c}{z_c} \frac{y_c}{z_c} + p_2 \left\{ r^2 + 2 \left(\frac{x_c}{z_c} \right) \right\} \quad (5.7)$$

$$V_u = f_y \frac{y_c}{z_c} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1 \left\{ r^2 + 2 \left(\frac{y_c}{z_c} \right) \right\} + 2p_2 \frac{x_c}{z_c} \frac{y_c}{z_c} \quad (5.8)$$

k_1 , k_2 は半径方向の歪み係数, p_1 , p_2 は円周方向の歪み係数である.

5.2 OpenCV

上記, k_1 , k_2 , p_1 , p_2 を推定するために OpenCV でカメラキャリブレーション関数として実装されている Zhang のアルゴリズムを用いる. デジタル画像処理において, カメラキャリブレーションは,

1. 幾何特性が既知の物体を撮影する.
2. 撮影画像から, 世界座標系と画像座標系の対応関係を何点か求める.
3. 得られた対応関係から, カメラモデルの内部及び外部パラメータを推定する.

といった手順で行われる.

幾何特性が既知の物体として, 図 5-5 のようなチェスボードを用いる.

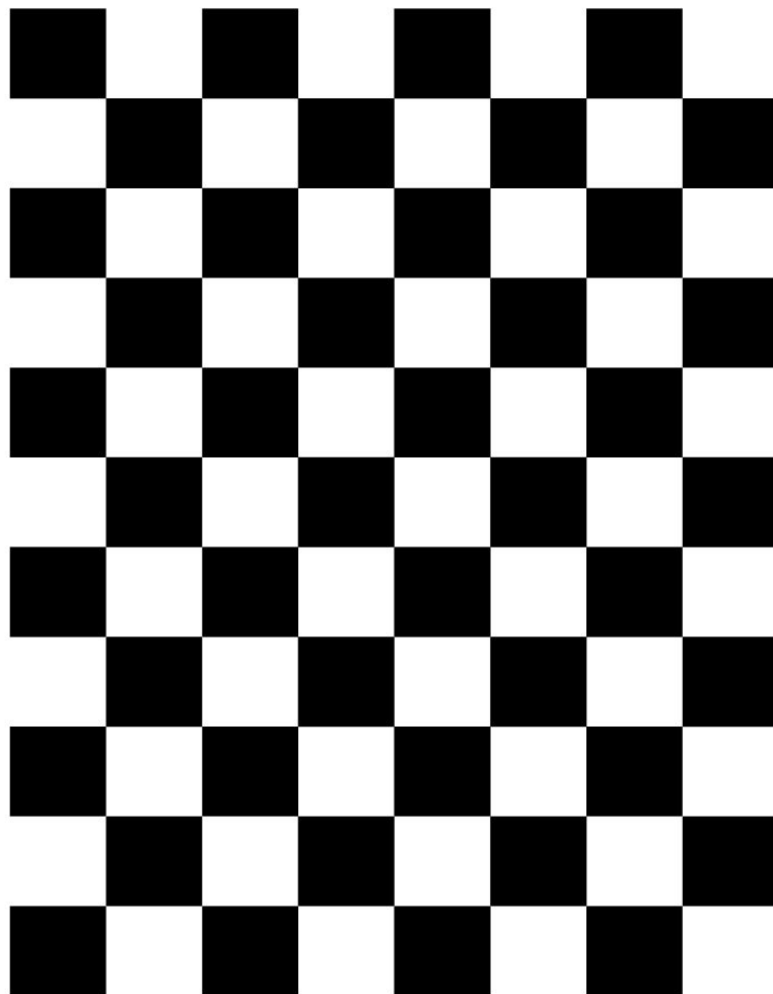


図 5-5 : チェスボード

図 5-6, 図 5-7 に, 実際に撮影したチェスボードと, 補正をかけたチェスボードを

示す.

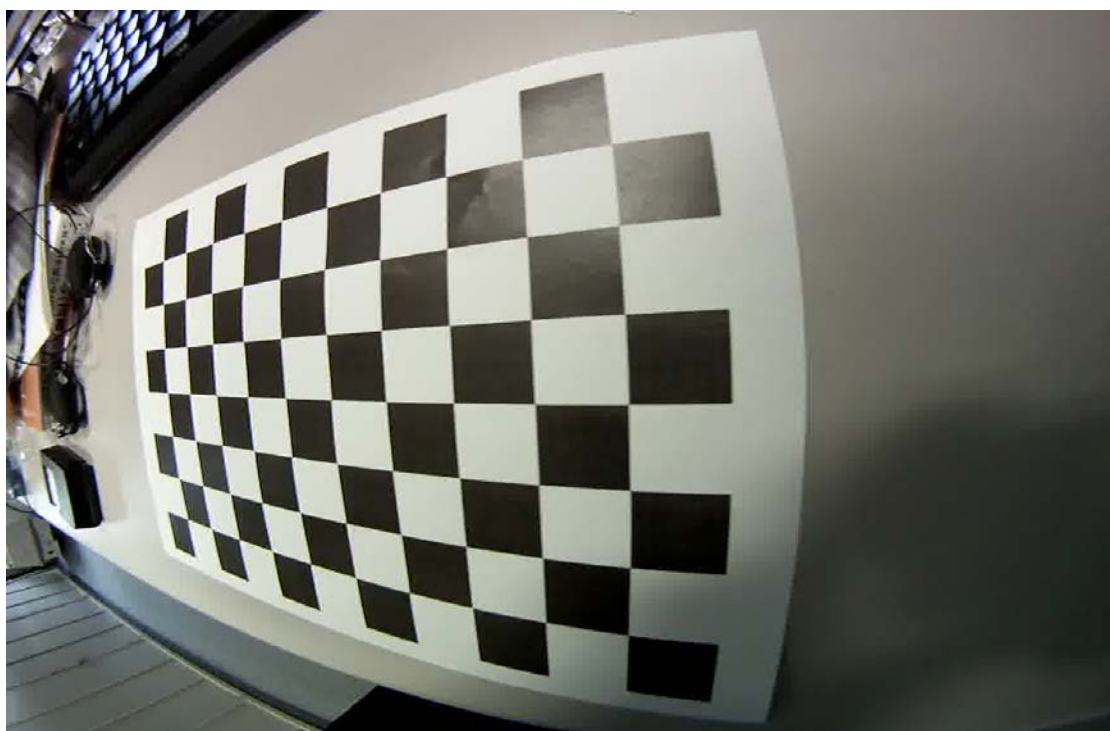


図 5-6: 補正前の撮影 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24
-No.4, P 194-200)

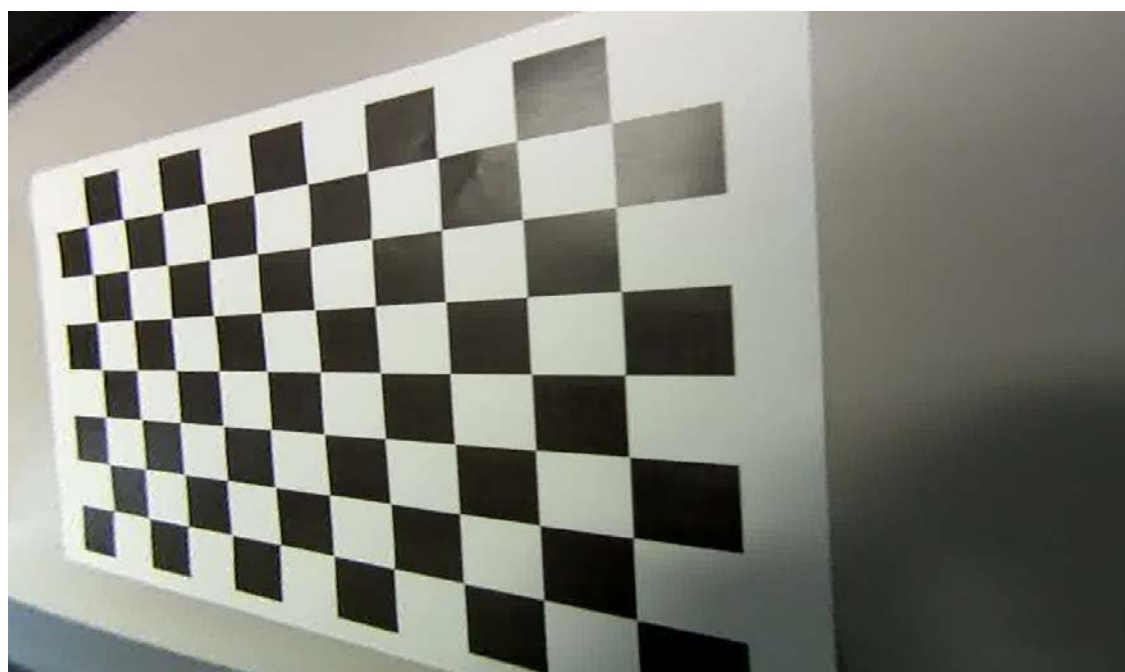


図 5-7: 補正後の撮影したチェスボード (宮, 他, The Society of Life Support
Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)

本研究で使用したカメラは、より大きな視野を得るために魚眼レンズを用いた。そのため、

図 5-6 は魚眼レンズ特有の歪みを持っているが、

図 5-7 を見ると補正されている事が分かる。

5.3 スクリーンの形状による幾何歪み

プロジェクタは、平面スクリーンに向かって映像を投影するので、スクリーンの形状が平面ではない場合、その形状に応じた幾何学歪みが発生する。

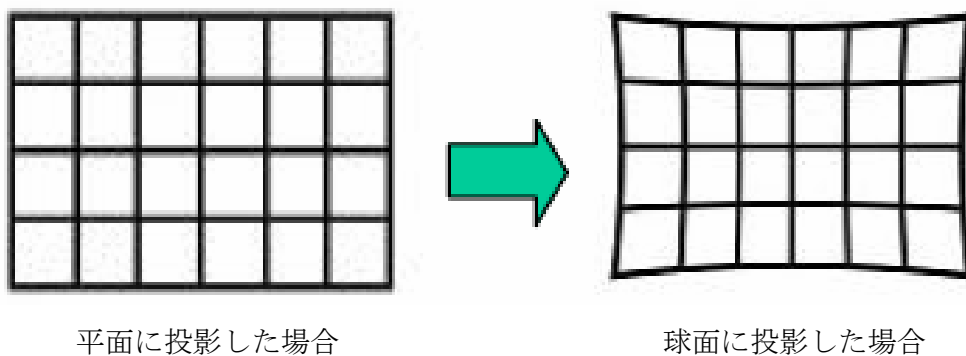


図 5-8：球面へ投影したときの幾何学歪み

図 5-8 は球面スクリーンへ映像を投影した場合の映像の歪みの例である。左のような映像を直接球面スクリーンへ投影すると、右のような歪んだ像がスクリーンには映し出される。

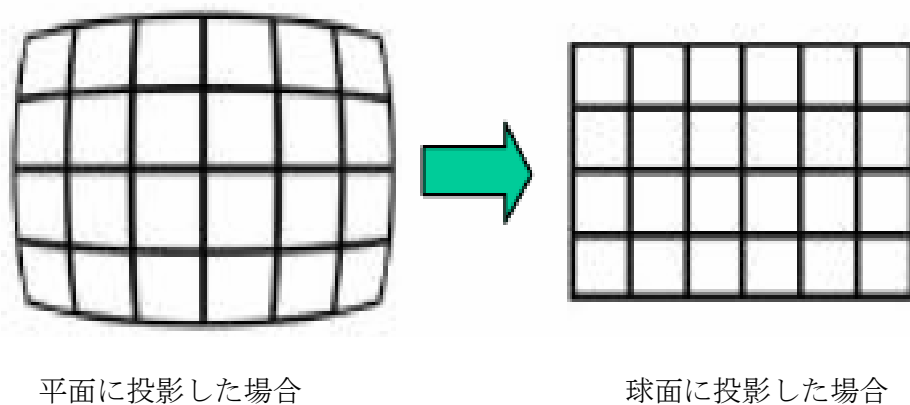


図 5-9：歪みを補正して投影したときの例

そこで、投影したい画像を図 5-9 の左のように補正をかけて球面スクリーンに投影すると本来映したかった像が映し出される。

5.3.1 幾何歪みの原理

歪みの有り無しにかかわらず、プロジェクタが投影する映像が視点からどのように見えるかどうかは、視点の位置やプロジェクタの位置、投影面の形状に影響される。本研究では図 5-10 のように、プロジェクタをドーム型スクリーンの中央から 180cm の位置に置き、視点をドームの外径の中心においた。この視点を理想視点とする。青丸がプロジェクタ位置、赤丸が視点位置である。青色、赤色の 3 角形は、それぞれ、プロジェクタ投影領域、視野領域になっている。彎曲した灰色の円弧は半球ドーム型スクリーンである。

まず、プロジェクタからそのまま映像を投影した場合を考える。プロジェクタは前述の通り平面スクリーンに投影するように設計されているので、仮想平面スクリーン上に等間隔で投影点 P を結ぶ。プロジェクタとこの投影点 P の延長上にドーム型スクリーンの投影点 D が結ばれる。そして、投影点 D と視点位置を結ぶことで、視点から見た投影点 V がわかる。結果として、プロジェクタで等間隔に投影した投影点は、視点からは、外側に歪んだ点として見える。

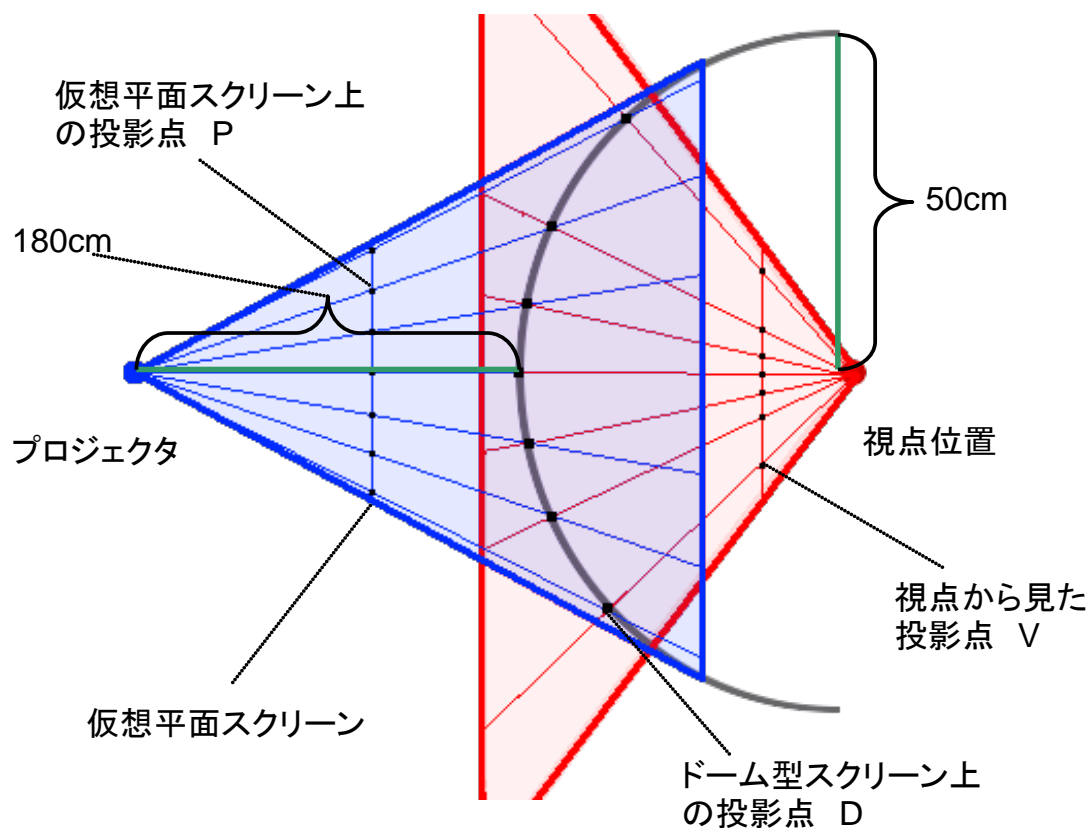


図 5-10 : 幾何歪み補正前 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24
-No.4, P 194-200)

5.3.2 幾何歪みの補正手法

幾何歪みを補正するということは、視点から見た投影点を、歪み無く等間隔に並ばせるということである。つまり、視点位置から見た投影点が等間隔に並んだ点を追跡し、それに合わせてプロジェクタで投影する映像に補正をかければよい。

図 5-11 のように、視点から見た投影点を等間隔に並らばせ、視点から見た投影点 V' と定義する。この点と視点位置とを結ぶ直線が、投影面と交わる点を、ドーム型スクリーン上の投影点 D' とする。更に、この投影点 D' とプロジェクタ位置とを結ぶ直線が、仮想平面スクリーンと交わる点を仮想平面スクリーン上の投影点 P' とする。

この様に、視点から追跡して位置を決めた投影点をプロジェクタから投影すれば、結果として、視点から見た投影点は歪みのない等間隔に並んだ点として見えることになる。

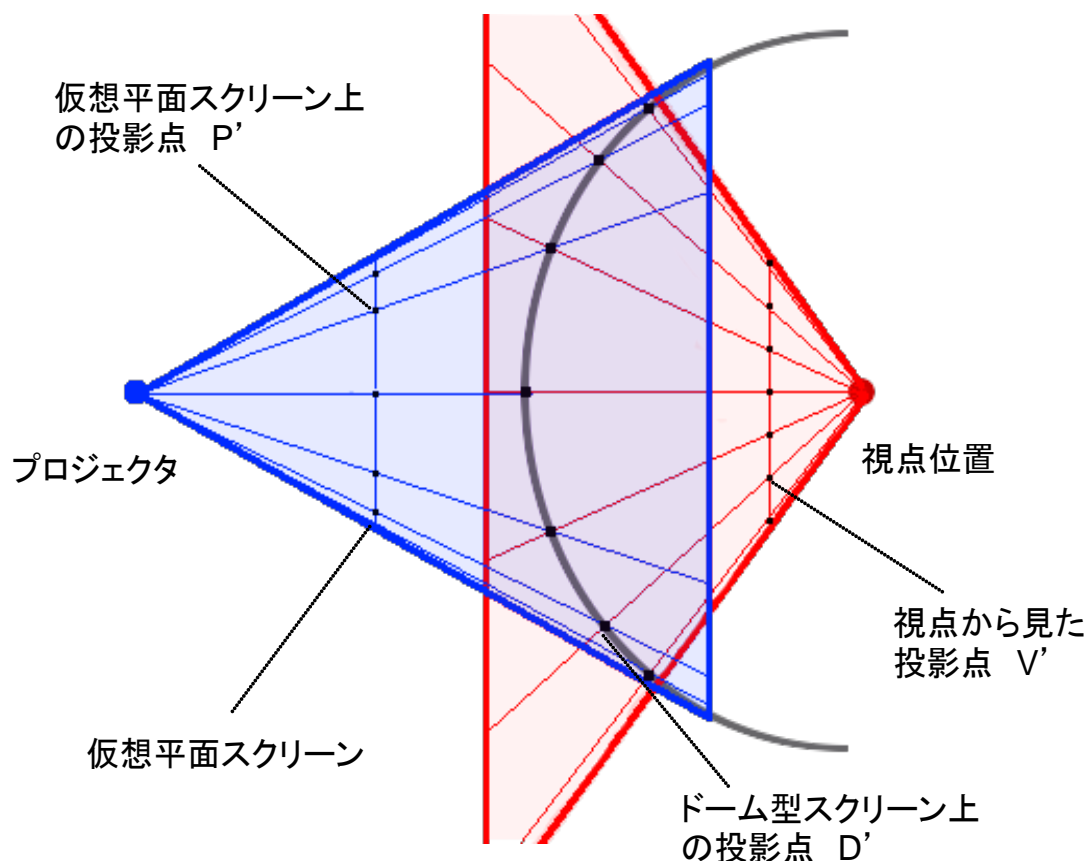


図 5-11: 幾何歪み補正後 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24
-No.4, P 194-200)

5.4 歪み補正の結果と考察

本研究での歪み補正の検証に、

図 5-12 を用いた。

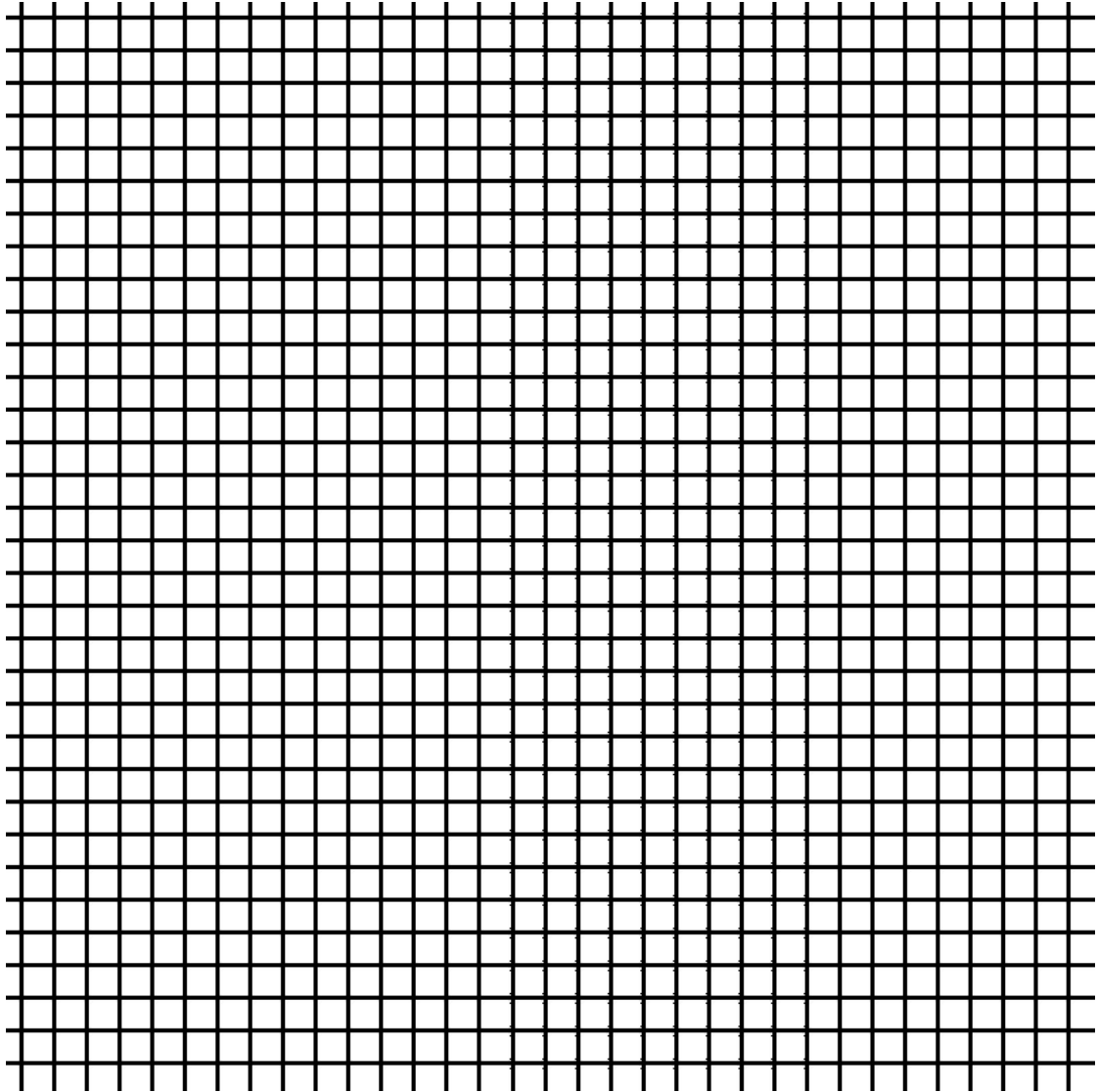


図 5-12 : 検証用画像 (基盤)

歪み補正をかけた画像を図 5-13 に示す。

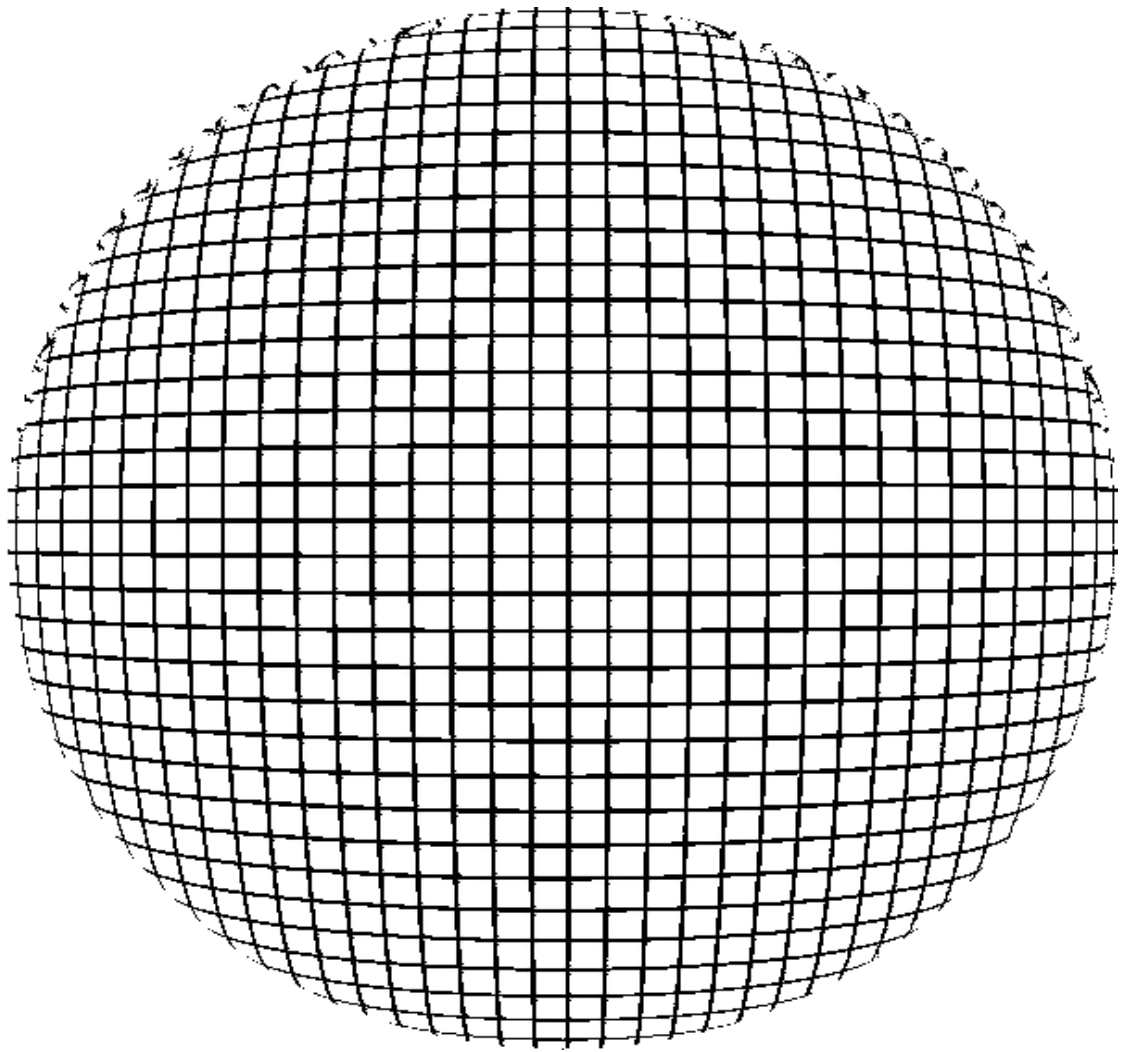


図 5-13 : 補正をかけた画像

図 5-14, 図 5-15 に, 実際に投影した様子を示す.

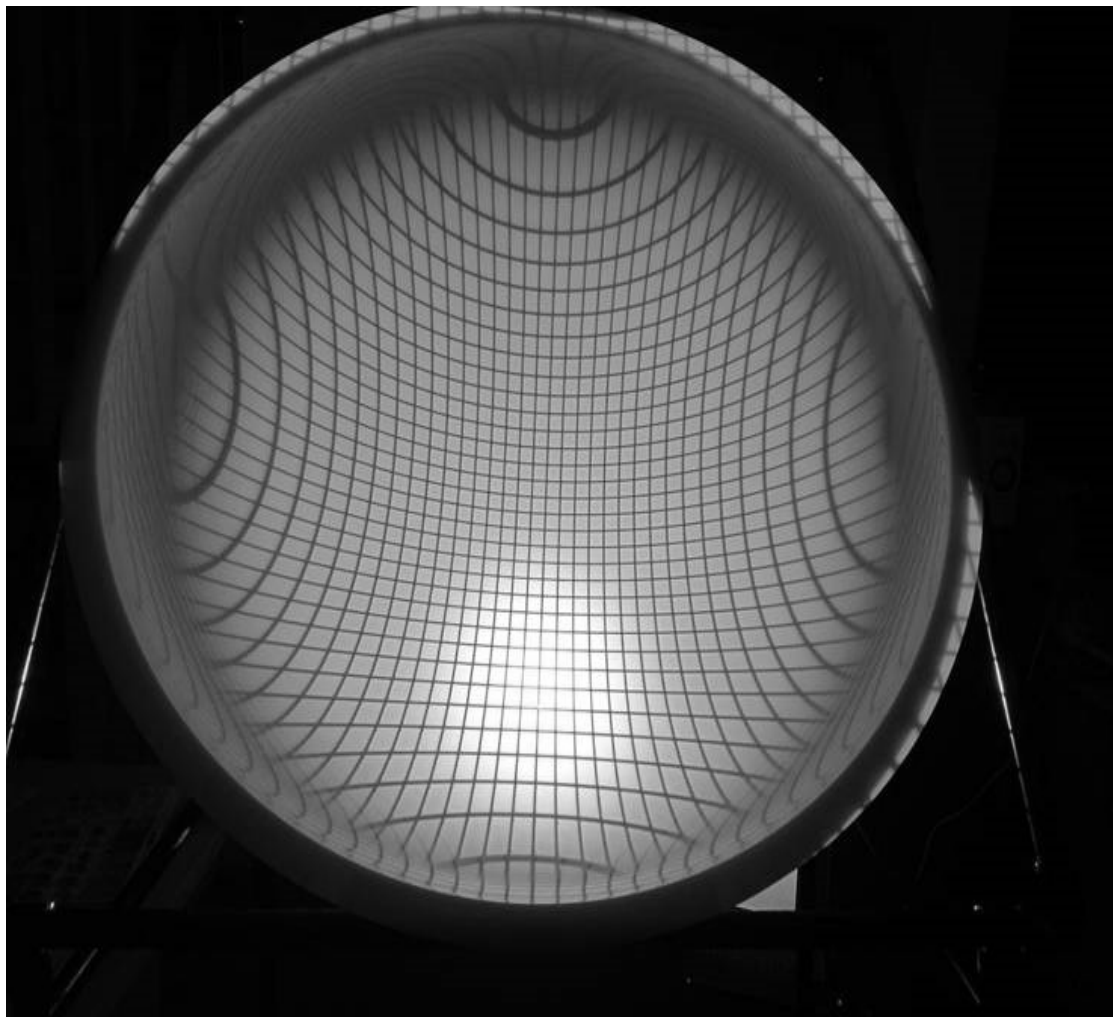


図 5-14 : 補正前の正方格子 (全体像)



図 5-15 : 補正後の正方格子 (全体像)

図 5-14 と図 5-15 を比べると，補正する前の写真ではドーム型スクリーンの周辺に向かうほど歪んでいたのが補正をかけることにより，歪みが軽減された．理想視点から見ると，実際に必要な誘導視差 ($100^{\circ} \times 85^{\circ}$) の範囲では十分な程度の補正になっている．

理想視点から撮影した写真を，図 5-16，図 5-17 に示す．

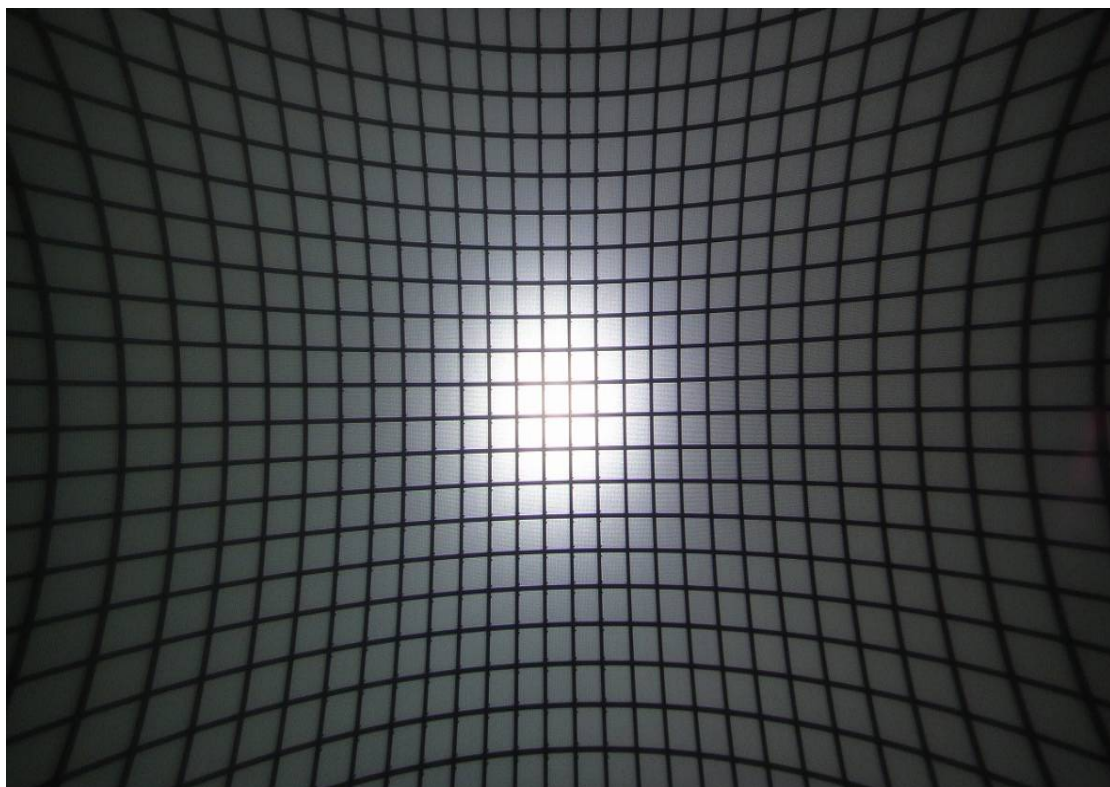
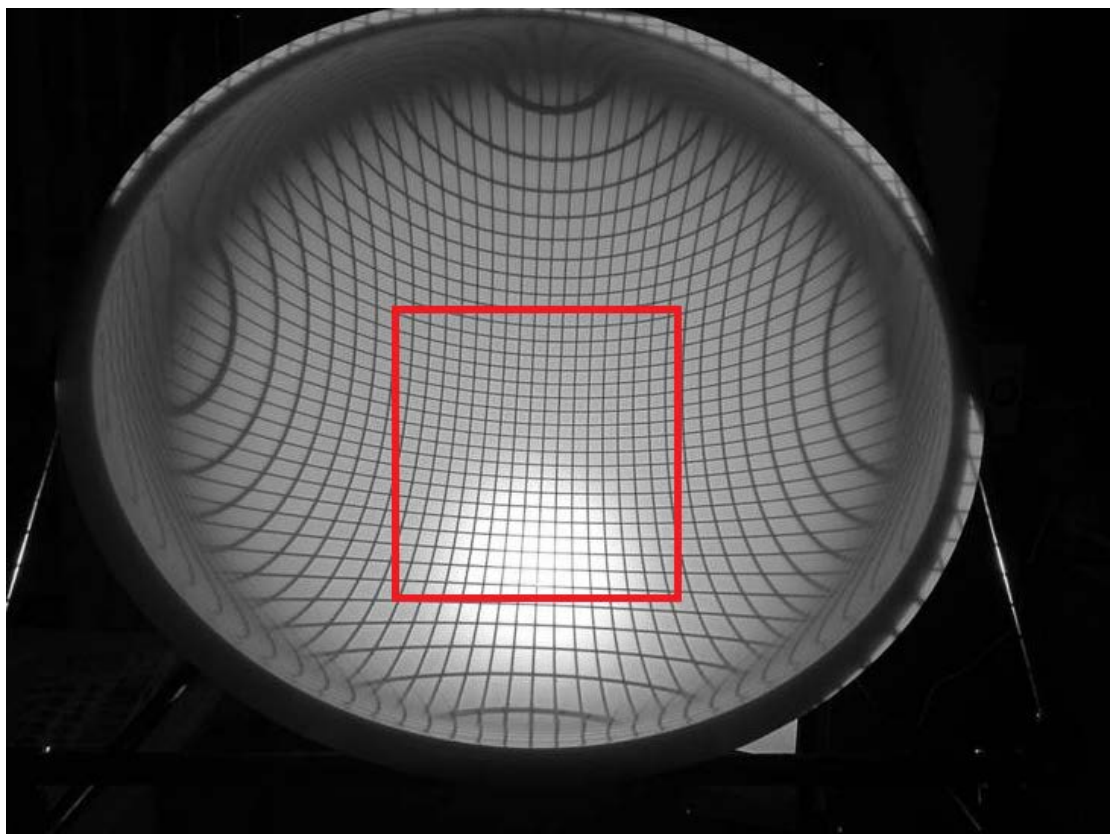


図 5-16 : 理想視点から撮影 (補正前) (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)

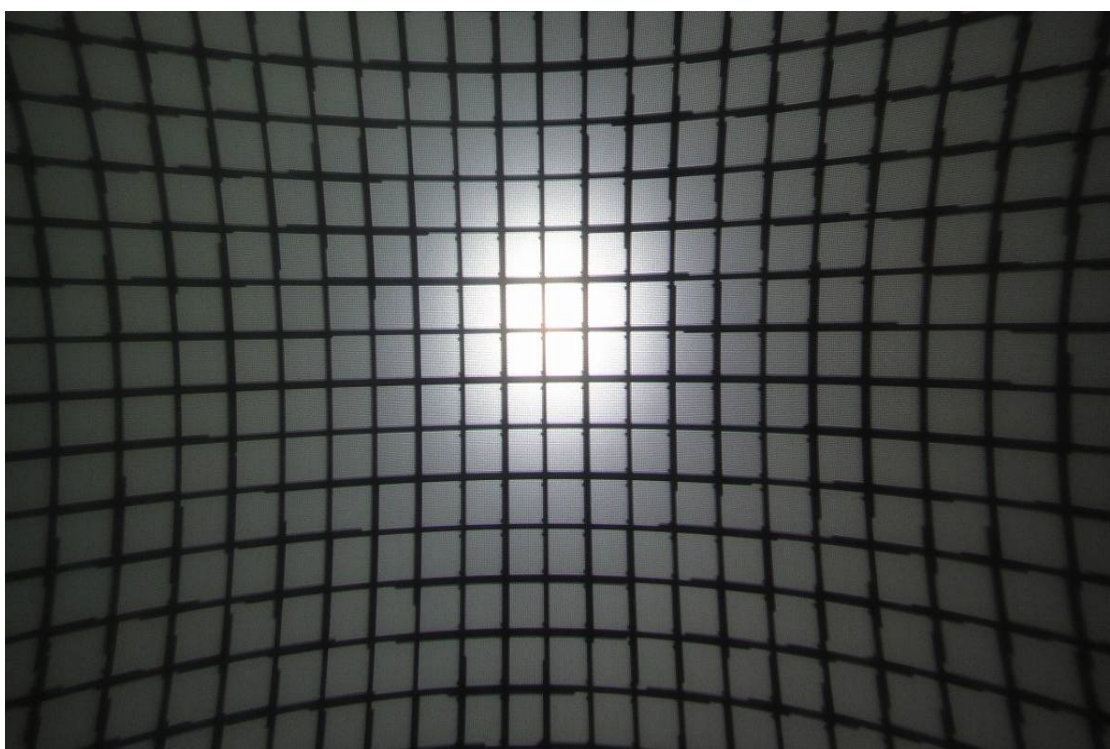
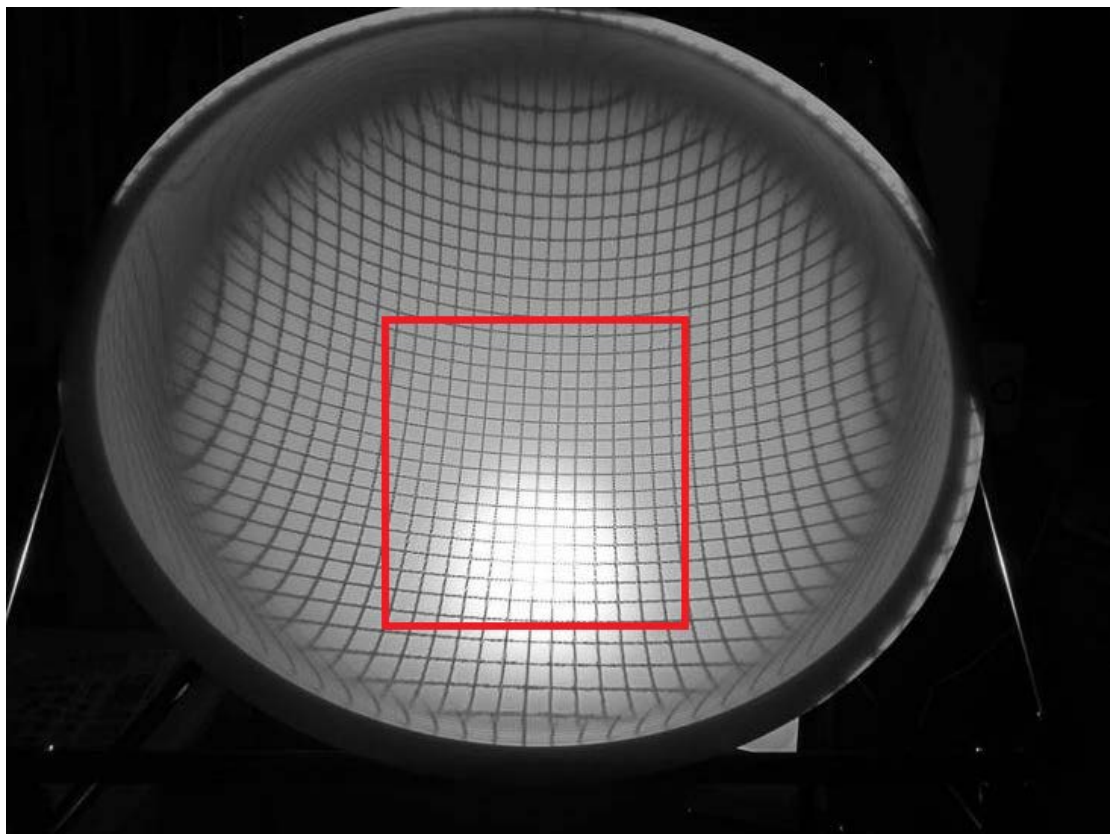


図 5-17:理想視点から撮影(補正後)(宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)

理想視点から右に平行移動した画像を，図 5-18，図 5-19 に示す．

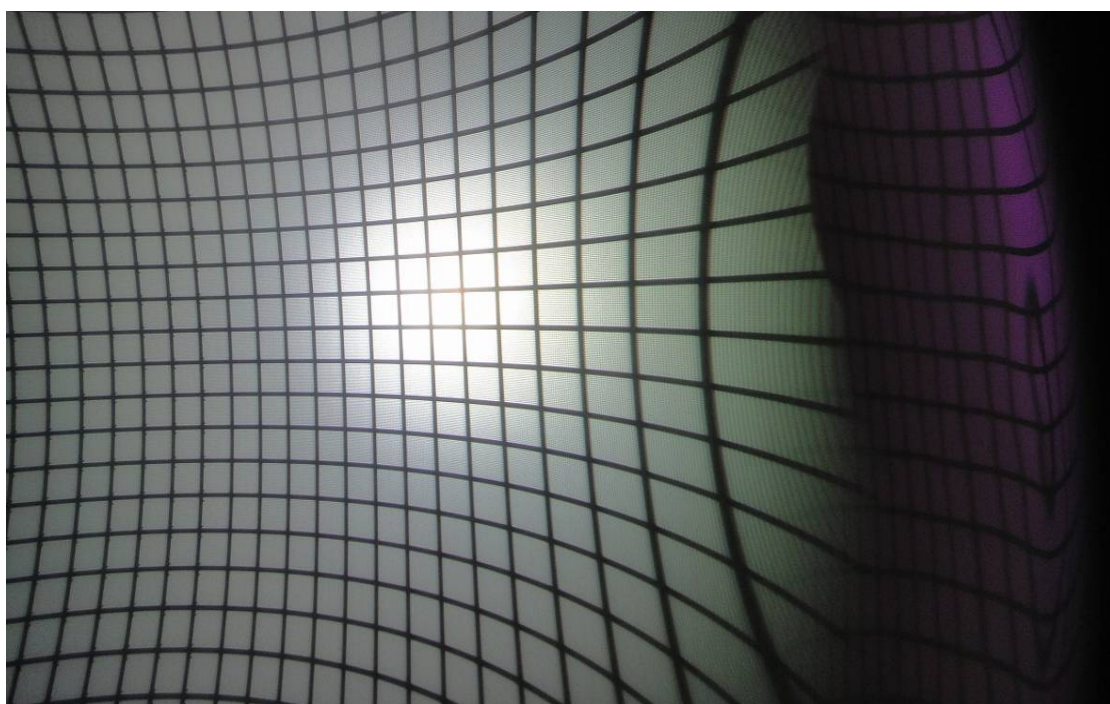
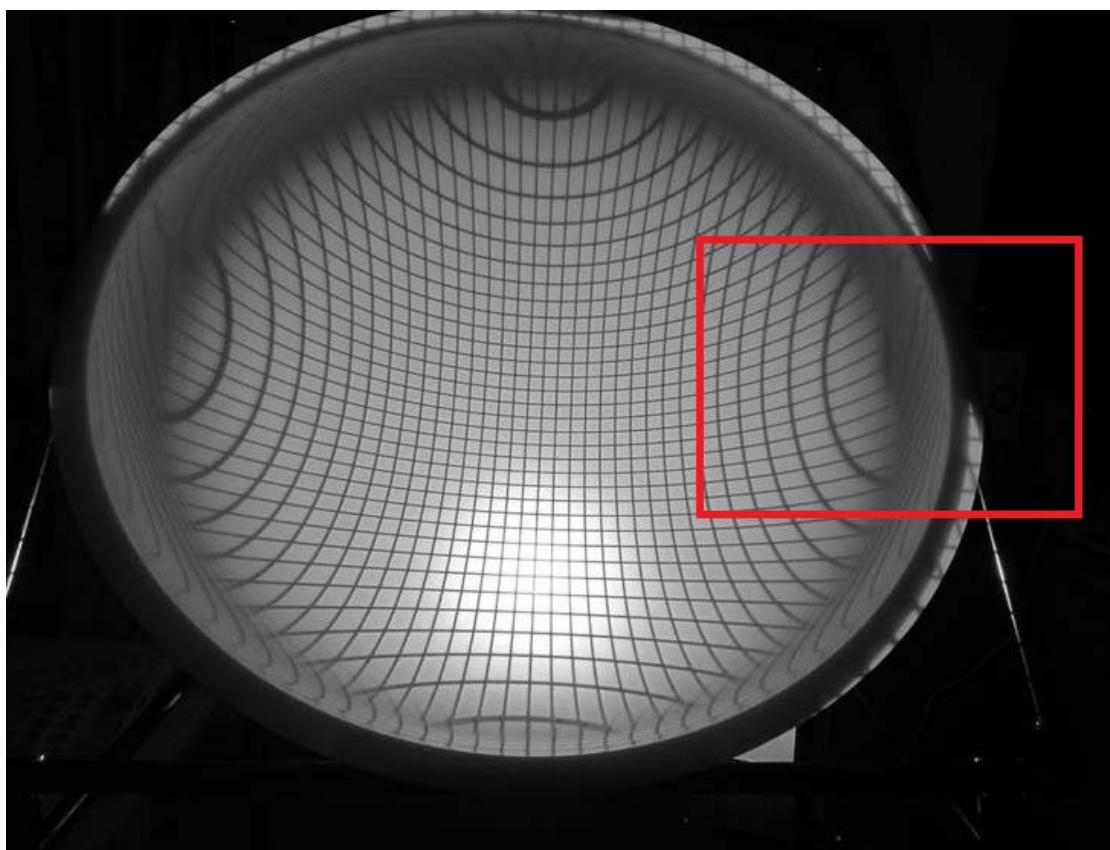


図 5-18：ドーム右端の画像（補正前）

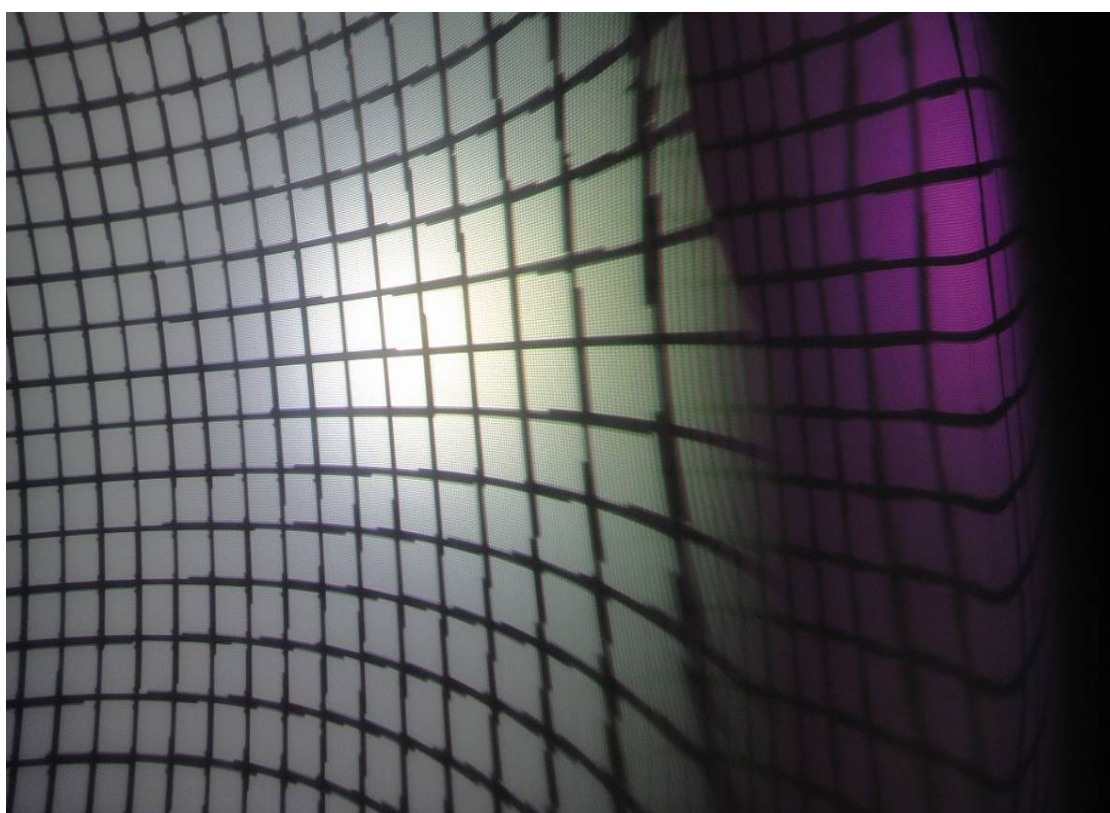
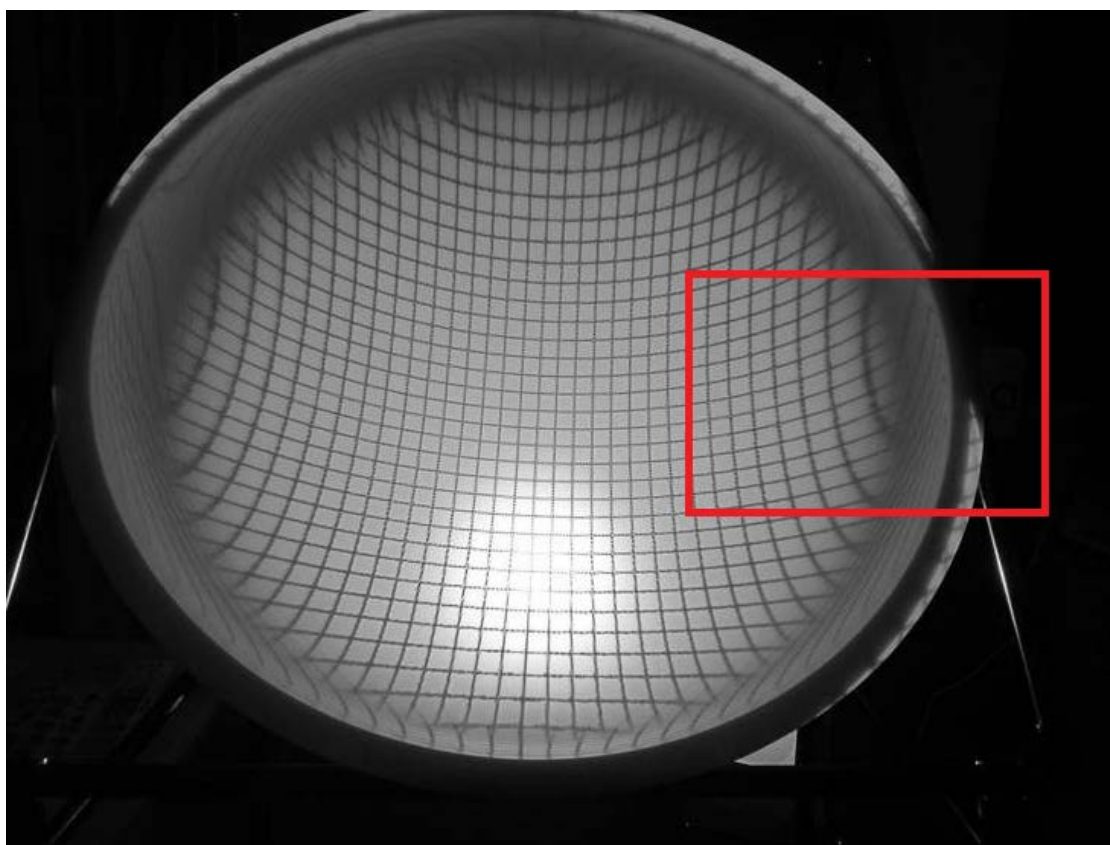


図 5-19 : ドーム右端の画像 (補正後)

理想視点から下に平行移動した画像を，図 5-20，図 5-21 に示す．

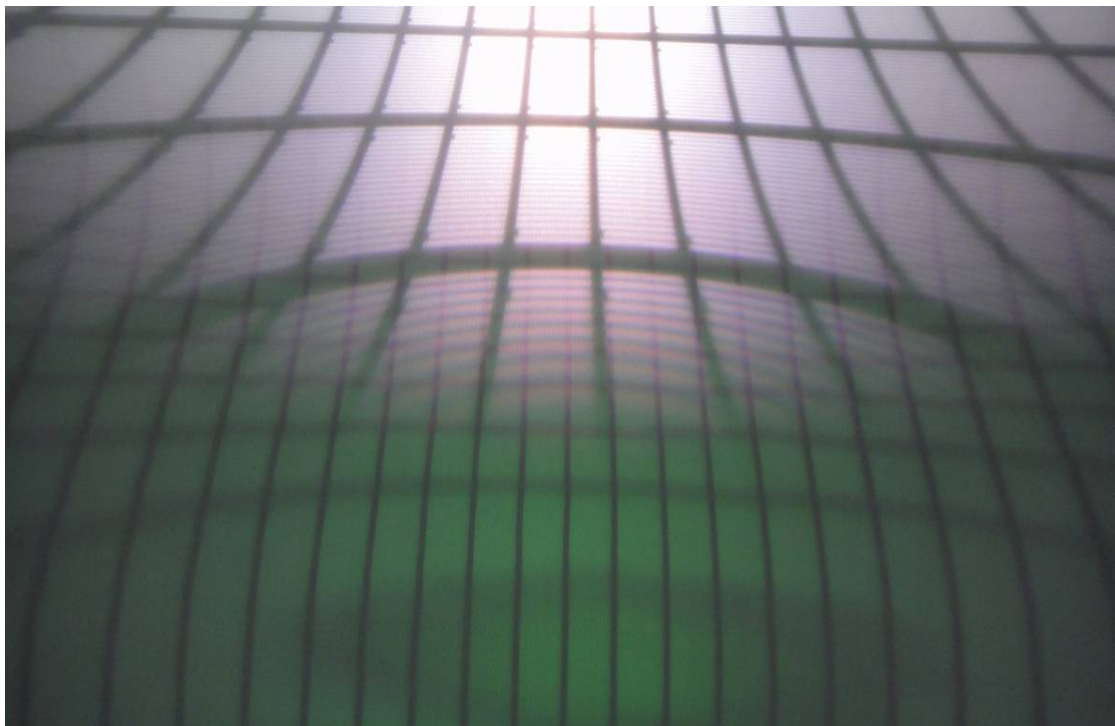
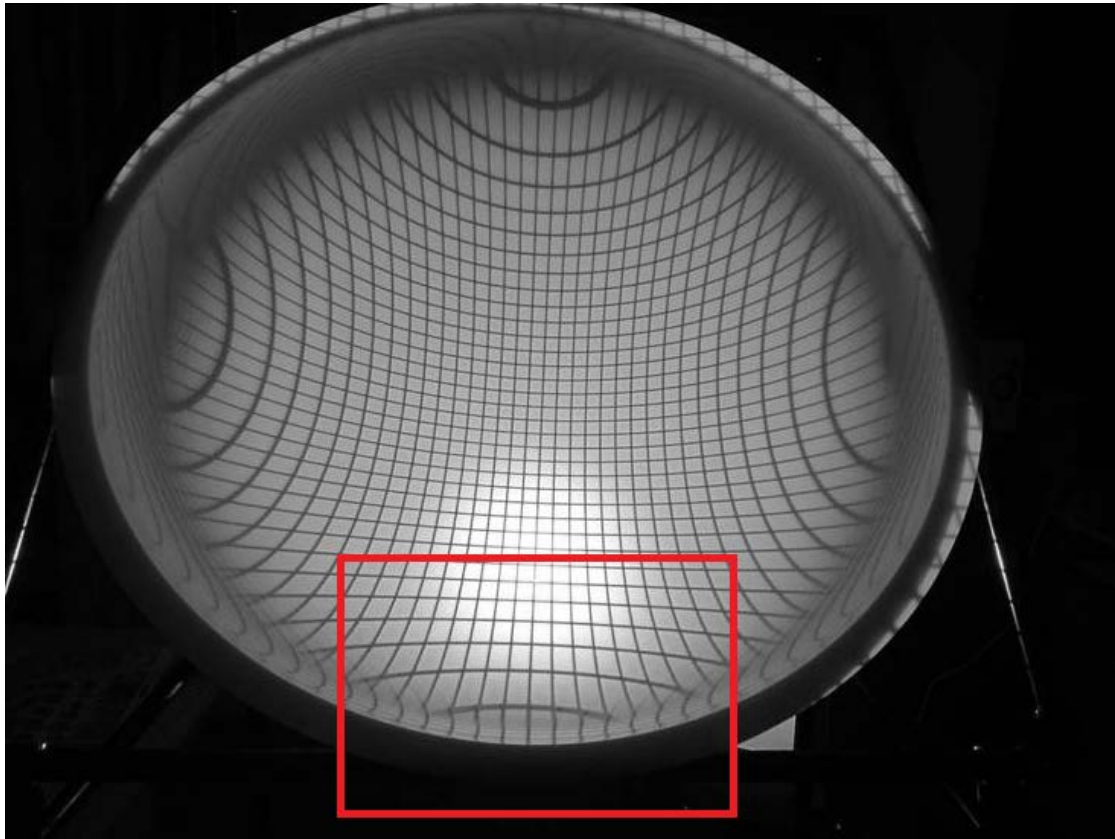


図 5-20 : ドーム下の画像 (補正前)

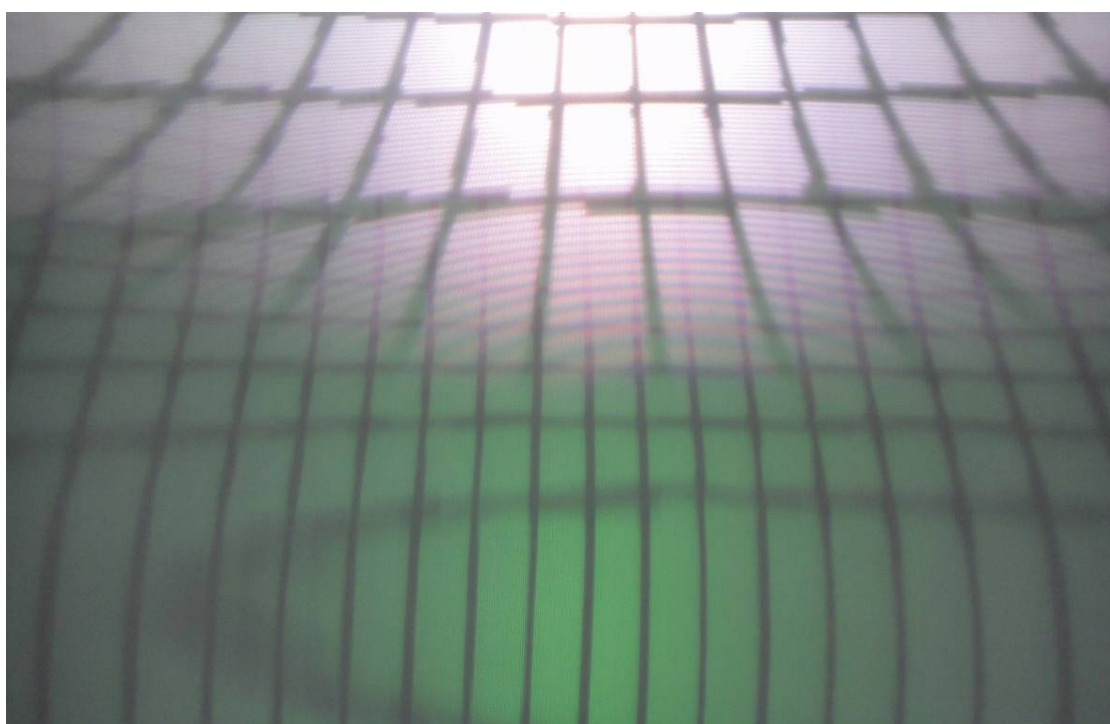
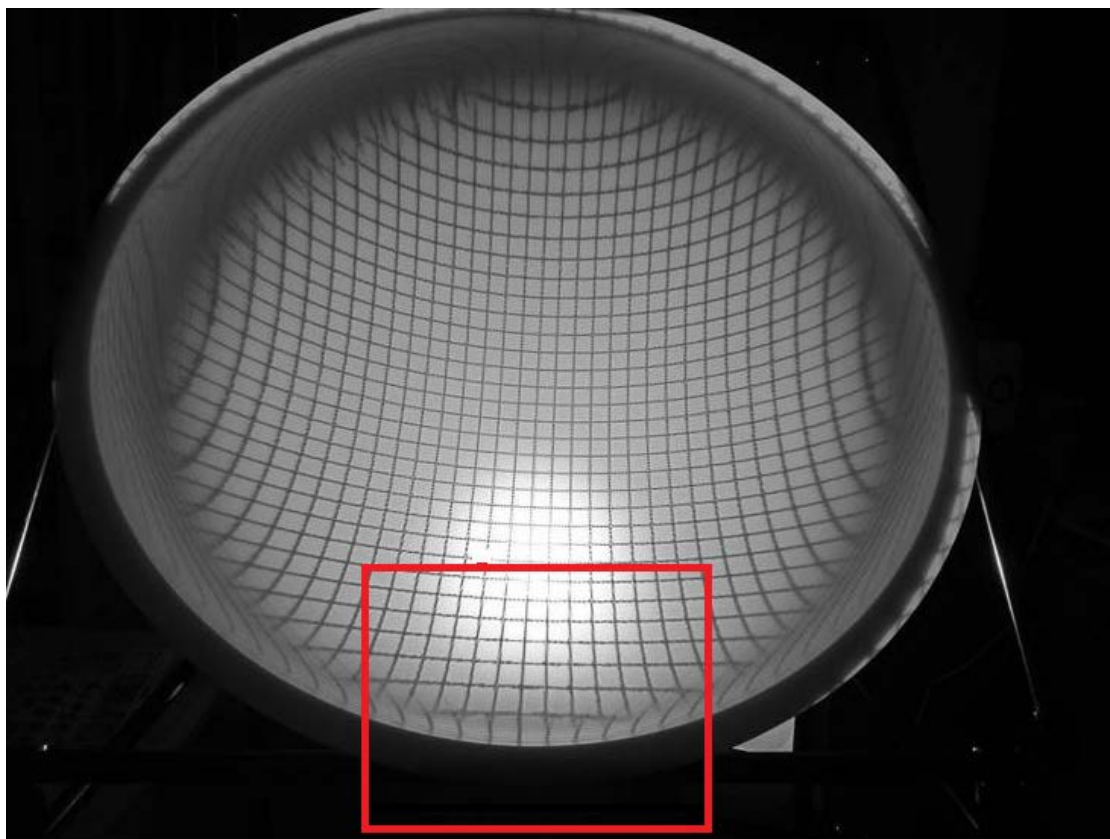


図 5-21 : ドーム下の画像 (補正後)

理想視点からでは歪みの激しいようにみえたドームの端でも, 平行移動して観測す

ると補正されていることがわかる。実際のクライアントで暴露療法を実施するときは、頭部や視点の動きが激しい。理想視点から外れることが予想されるが、接合部分や折れ曲がりがないドームの形状は、表示面の曲率が一定もしくは連続的な変化となるため、直線は連続な曲線として知覚され、ある程度直線が曲線に歪んだとしても、クライアントはそれを直線として知覚する。ある程度の移動を許す投影方法から暴露療法に適していると考えられる。

図 5-17, 図 5-19, 図 5-21 など、補正後の線を見ると、線の太さが一定でない。これは、幾何歪みを補正した際にできてしまう空白のピクセルを埋める処理をしているためこのようなガタガタの線になっている。基盤のような周波数成分の高い画像では、元画像とのずれが目立つが、実際の暴露療法で用いられるような高所の画像では目立たない結果となっている。

実際の映像例を 5-22 に示す。10 階建てのビルの屋上から地上を撮影した画像を補正処理して映写したものである。このような動画映像は、臨場感や没入感も大きく、高所恐怖症の VR 暴露療法としても有効であると期待される。



図 5-22: 10階建てのビルの屋上から地上を見下ろした映像のスナップショット(宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)

参考文献

- [1] Y. Choy, A. J. Fyer and J. D. Lipsitz, Treatment of specific phobia in adults. *Clinical psychology review*, 2007; 27: 266-286.
- [2] D. F. Grös and M. M. Antony, The assessment and treatment of specific phobias: a review. *Current psychiatry reports*, 2006; 8: 298-303.
- [3] R. T. LeBeau, et al., Specific phobia: a review of DSM-IV specific phobia and preliminary recommendations for DSM-V. *Depression and Anxiety*, 2010; 27: 148-167.
- [4] OpenCV (Open Source Computer Vision).
- [5] <http://opencv.jp/opencv/document/>
- [6] Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration. Microsoft Research, 1998 (last updated 2008).
- [7] http://opencv.jp/sample/camera_calibration.html
- [8] L. F. Hodges, B. O. Rothbaum, R. Kooper, D. Opdyke, T. C. Meyer, J. J. deGraaff, J. S. Williford and M. M. North, “Virtual environments for treating the fear of heights”, *Computer*, Vol.28, No.7, pp.27-34 (1995)
- [9] M. Krijin, P. M. G. Emmelkamp, R. P. Olafsson and R. Biemond, “Virtual reality exposure therapy of anxiety disorders: a review”, *Clinical psychology review*, Vol.24, pp.259-281 (2004)
- [10] Zhengyou Zhang, “ A Flexible New Technique for Camera Calibration” ,Microsoft Research,(1998)(last updated 2008)
- [11] ROGER Y.TSAI, “ A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses” ,*IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No.4, pp.323-344 (1987)
- [12] <http://www.hitachi-jten.co.jp/products/fisheye/index.html>
- [13] <http://www.wakayama-u.ac.jp/~wuhy/CV09.pdf>
- [14] <http://chihara.naist.jp/opencv/?%A5%EC%A5%F3%A5%BA%CF%C4%A4%D F%CA%E4%C0%B5>
- [15] http://ja.wikipedia.org/wiki/OpenCV#cite_ref-IPSJv51i4p382_1-2

- [16] 橋本直「特集 拡張現実感 (AR) 基礎 3: 開発用ツール」、『情報処理』第 51 巻第 4 号、情報処理学会、2010 年 4 月、382 ページ。
- [17] <http://www.kkaneko.com/rinkou/opencv/opencvintro.html>
- [18] http://translate.google.co.jp/translate?hl=ja&langpair=en%7Cja&u=http://docs.opencv.org/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html
- [19] <http://translate.google.co.jp/translate?hl=ja&langpair=en%7Cja&u=http://blog.martinperis.com/2011/01/opencv-stereo-camera-calibration.html>
- [20] <http://kyoko.lab.tkikuchi.net/edu/image/8>

第6章 VR システムの評価

本システムを図 4-8 に示す。安価で取り扱いを容易にするために、プロジェクタを 1 台とした。単純に1台のプロジェクタで正面からスクリーンに投影すると、観察者が影になってしまう。これを回避するもっともシンプルな手法として、スクリーンの背面から映写するリアプロジェクション方式を用いた。ただし、リアプロジェクション用のドームスクリーンは容易に入手できるものではなかったため、乳白色で直径 1m の安価なプラスチック素材の半球を利用した。このシステムでも十分に映写が可能である。プロジェクタは、10 万円以下の普及機であった NEC 製 ViewLight NP901WJ を用いた。解像度 1,280×800、明るさ 2000 lm である。画角は、手動ズーム(1~1.2 倍)によって、21.5°~25.9°で調整可能になっている。本実験では、25°になる条件で使用した。

以上にもとづき、システム全体は、パソコン 1 台、プロジェクタ 1 台、及びドームスクリーンで構成し、高所恐怖症克服の目的に合わせて、覗きこむ形にした。

外観を図 4-14 に示す。ドームスクリーンを支える土台も安価で軽量のパイプを組み合わせて作製した。各パイプの長さは手動のネジで固定するようしており、高さや傾きを容易に変更できる。プロジェクタの台も 2 枚の板を組み合わせた簡易なもので、ネジで傾きを調整用できるようにした。

リアプロジェクションの場合、プロジェクタの光源方向にあたる場所が明るくなる。そのため、ドームに映る明るい光源を指標にすることで、専門知識や特別なツールを必要とすることなく、容易に光軸をセッティングすることができる。また、ドームが球状であるため、被験者の視線方向の中心を明るい光源像に合わせれば、視野マップがドーム中心からずれるだけで、プロジェクタからの映像を中心にとらえることができる。つまりは、逆の言い方をすれば、プロジェクタとドームスクリーンの位置を厳密に合わせる必要はないということでもある。被験者の視線方向とプロジェクタの光軸が直線上にあれば、ドームが球形のことより、歪み補正がそのまま適用できる。

後述する評価実験の結果では、被験者の視点が光軸を外れた場合でも実用上は支障のないことが示唆されており、補正に関しては、十分であると考えられ、採用した。

本システムの評価として、没入感のアンケートを行った。映像として、モノレールの車窓から見た動画を用いた。22 名の健常な男子大学生(平均年齢 23±2 歳)に参加してもらって回答を得た。

環境は、日中の明るい室内であった。例えば、暗室で行うことで効果が高まる可能性があるが、今回はシステムの評価ということで、環境的な要因を考慮しないように

一般的な状況を条件とした。

理想視点位置に固定して見た場合（理想視点）と、自由に視点位置を変えながら見た場合（自由視点）の2パターンでアンケートをとった。

表 6-1：没入感（宮，他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24-No.4, P 194-200)

視点位置	Yes	No
理想	100%	0%
自由	100%	0%

まずは、理想視点と自由視点の場合それぞれでの没入感を調べた。測定方法は、次の二つから一つを選択してもらう2件法を用いた。

「没入感を感じた」(Yes)

「没入感を感じない」(No)

表 6-1 がその結果であり、本システムから没入感の得られることが確認された。

次に、観察領域の違いによる没入感と違和感についての評価を行った。被験者は、理想視点位置に固定の場合でも、自由に視点位置を変える場合でも、どちらにおいても、見る場所は正面に限らず、被験者の自由意志とした。その上で、誘導視野における感じ方と、半球ドーム全体を見回したときの感じ方の差異を評価した。これは、本システムが誘導視野の映像を重視して試作されており、その評価である。

評価方法は、三つから一つを選択してもらう3件法を用いた。それぞれの選択肢は以下の通りである。

【没入感 (Immersive reality)】

「誘導視野領域に限定して観察する方がより強く感じた」(Inductive field)

「自由にドーム全体を観察する方がより強く感じた」

(All of dome)

「両者に特に差は感じなかった」

(No difference)

【違和感 (Feeling of strangeness)】

「誘導視野領域に限定して観察する方がより強く感じた」

(Inductive field)

「自由にドーム全体を観察する方がより強く感じた」

(All of dome)

「特に違和感は感じなかった」

(No strangeness)

表 6-2 : 理想視点評価 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24—
No.4, P 194-200)

Immersive reality	Inductive field	All of dome	No difference
	27%	55%	18%
Feeling of strangeness	Inductive field	All of dome	No strangeness
	14%	32%	54%

表 6-3 : 自由視点評価 (宮, 他, The Society of Life Support Engineering, Vol.24—
No.4, P 194-200)

Immersive reality	Inductive field	All of dome	No difference
	14%	77%	9%
Feeling of strangeness	Inductive field	All of dome	No strangeness
	18%	45%	37%

表 6-2 及び 6-3 の結果から、見る領域を誘導視野領域に限定するよりも半球ドーム全域に広げた方が、より没入感が増すことがわかった。ただし、違和感も増している。これは、へりを観察した場合はスクリーンを意識させてしまうためであると考えられる。

理想視点と自由視点の結果を比較する。没入感については、理想視点のときは「誘導視野」と「半球ドーム全域」で 2 倍の差が出ているが、自由視点においては、その差がさらに大きく、ほぼ 8 割が「半球ドーム全域」のときの方が没入感が大きいと回答している。このことから、自由にドーム全域を観察できるときに、もっとも大きな没入感が得られることをが示唆される。また、違和感については、理想視点においては半数以上が違和感はない（特に感じない）と回答している。自由視点では、やや低く、半数を下回る結果となった。

これらの結果から、本システムは、頭の位置を理想視点において、そこからドーム全域を自由に見るような使い方が、もっとも有効であり、本システムが有効に機能する可能性が示唆された。

本研究は、千葉大学倫理委員会の承認を得た後、参加者から書面にて同意を得て実施した。

第7章 おわりに

7.1 結言

高所恐怖症の克服を支援する目的で、安価なドームスクリーン型 VR エクスポージャーシステムの試作を行った。誘導視野である水平方向 100°以上、垂直方向 85°以上の視覚提示を行うことに成功し、ドームの形状による視野を覆う効果で、没入感が強くなることがわかった。

7.2 今後の展望

今後は、平面映像との定量的な比較や、先行研究となっている HMD システムと本システムの効果を比較していくなど、さらに評価を進める予定である。コストとともに、扱いやすさも重要である。臨床において、両者に同様な効果があると検証されれば、安価で手軽な普及型の VR エクスポージャーシステムとなり、当該分野の発展に貢献できるものと期待される。臨床医や臨床心理士と積極的に議論を重ねながら、本研究課題を発展させていきたいと考えている。

また、本研究を足がかりとして、応用研究も進めていきたいと考えている。本システムの特徴は、映像の精細さを求めることをやめて、安価で取り扱いを容易にしたことである。現在の映像機器は、技術の進歩とともに高精細化が急速に進んでいる。ただし、人間の目にはオーバースペックな場合も多々見受けられ、それほど精細さは必要ないけれども、ポータブルで安価な映像情報機器が大量に必要な場合もある。例えば、自動車運転のシミュレーションシステムがある。近年、高齢者の自動車事故が増加しており、70歳以上での免許更新では高齢者講習が義務付けられている。本システムを応用して、ポータブルな運転シミュレーションシステムの開発を行うなどの貢献ができればと、検討を始めている。

第二部 Cell プロセッサを用いた並列処理に

よるスネーク法

第1章 はじめに

1.1 緒言

近年、CT (Computed Tomography) や MRI (Magnetic Resonance Image) など医療診断装置の発達により、医療における画像処理の重要性が増している。ただし、画像診断を行う上で基礎となる輪郭抽出処理は、計算におけるパラメータ設定の自動化が難しく、未だに改善の余地がある。

一方で、最近では内部に複数の計算ユニットを持ったマルチコアプロセッサが発展し、科学計算にも使用され、成果が報告されている。

そこで本部分研究では、マルチコアプロセッサを利用した安価な並列計算システムを構築して、パラメータに強く依存する問題に対応するシステムを構築し、有効性を示した。本研究は、パラメータ依存の問題がアルゴリズム的には解決できなくても、ハードウェア・リソースを有効利用する方法で実用化に寄与できることを提示する。

本部分研究で用いたマルチコアプロセッサは Cell Broadband Engine (以降:Cell チップ) である。具体的には Cell チップを搭載しているプレイステーション 3 (PS3) を 16 台用いた。PS3 では Cell チップ内の計算ユニット Synergistic Processor Element (SPE) を 6 個並列動作させることが可能であるため、16 台のクラスタでは 96 個のパラメータについて同時に計算することができる。

代表的なマルチコアプロセッサとしては、グラフィックスプロセッサ GPU (Graphics Processing Unit) の進展が著しい。ただし、GPU は単純なプロセッサを多数搭載しているという構造から、計算アルゴリズムをパイプライン化 (並列化) しやすい処理には有効であるが、同じアルゴリズムを多数同時に計算する並列化には適していない。同じアルゴリズムを多数同時に行うという観点からいえば、パソコン (PC) を複数台用いた PC クラスタに向いているが、価格性能費やシステムサイズにおいて、PS3 クラスタの方が有利である。

内部に複数の計算ユニットを持つマルチコアプロセッサが発展している。その先駆

けとなったのが Cell (Cell Broadband Engine) である。IBM, 東芝, ソニーコンピュータエンターテインメントによって開発され, 2006 年末, ソニー製家庭用ゲーム機プレイステーション 3 (PS3) に搭載された。その後, IBM は, Cell の拡張倍精度演算を強化した PowerX Cell 8i プロセッサを 12,960 個搭載したスーパーコンピュータ Roadrunner を開発し, 2008~2009 年のスパコンランキング 1 位を達成, 2010 年には東芝が Cell を搭載した家庭用テレビ CELL レグザをリリースした。Cell を搭載した PS3 は演算能力が高く, しかも安価であるため, 科学技術計算においても成果を上げている。

具体的には, 異なったパラメータ設定を行った計算を 96 並列で同時に解を求める。結果の中には正解と不正解が混合するが, 正解は同様の形をとり, 不正解はばらばらの形になるため, 正解が複数枚得られれば, 正解画像を認識できる。パラメータ依存の問題がアルゴリズム的には解決できなくても, 計算資源を有効利用することで実用化に寄与できる可能性を示す。PS3 の利点はコストパフォーマンスの高さである。16 台をクラスタ化しても 50 万円程度で, 収納サイズもデスクサイドに置ける程度に小さい。結果は, 同時期にリリースされた PC (Intel Pentium4 プロセッサ) と比較して 65 倍以上の演算速度を記録した。

1.2 本部分論文の構成

第二部分の論文，全 5 章から構成される．本章では，研究背景，目的，論文の構成について，第 2 章ではスネーク法による輪郭抽出を示す，第 3 章では Cell への実装について述べる，第 4 章ではシステムの性能評価について，第 5 章では研究の総括と今後への課題を考察する．

参考文献

- [1] Y. Shiraki, et al., “Simplified electroholographic color reconstruction system using graphics processing unit and liquid crystal display projector”, *Opt. Express*, Vol.17, pp.16038–16045 (2009)
- [2] 中山弘敬, *et al.*, “Cell プロセッサによる計算機合成ホログラムの高速化”, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J91-D, pp.2035-2036 (2008)
- [3] N. Tanabe, *et al.*, “Speed-up of hologram generation using ClearSpeed Accelerator board”, *Computer Physics Communications*, Vol.180, pp.1870-1873 (2009)
- [4] M. Kass, A. Witin and D. Terzoulos, “Snake: Active Contour Models”, *Int. J. Computer Vision*, pp.321–331 (1988)
- [5] MPICH2 インストール・設定 :
[HU<http://ameblo.jp/hamubane/entry-10165568292.html>](http://ameblo.jp/hamubane/entry-10165568292.html)
- [6] フィックスターズ PLAYSTATION3: [HU<http://www.fixstars.com/U>](http://www.fixstars.com/U)

第2章 Snake 法輪郭抽出処理

2.1 Snake の原理

2.2.1 Snake 法

代表的な輪郭抽出法の一つである動的輪郭モデル (Active Contour Model: ACM, Snakes) は, 閉じた領域を安定して抽出でき, 対象の形状等の特徴をエネルギー関数として処理に埋め込むことができるという優れた特長をもつ.

しかし, Snakes を用いた従来手法による輪郭抽出法の多くは, 一般的に, 初期輪郭を対象物体の輪郭線の近傍に配置して, そこからの収束を図っているため, 画像毎に利用者が初期輪郭を配置していく必要がある. その手順は次のようなものである.

- ・ 初期値として閉曲線 (Snake 曲線) を与える.
- ・ 輪郭線は画素値の勾配が大きいという特徴を用いて, Snake 曲線の形状や重心間の距離といった評価関数と, 画素値の勾配 (画像エネルギー) が釣り合うようにそれぞれパラメータを掛け, 足し合わせる.
- ・ この評価関数 (Snake 関数) が最小値となる Snake 曲線の位置, 形状を求めることによって, 輪郭抽出を行う.

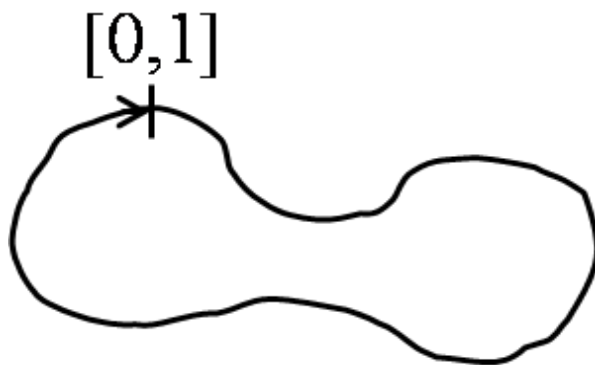


図 2-1 : Snake 曲線略図

図 2-1 のように Snake 曲線が $u(s) = (x(s), y(s)) \quad s \in [0, 1]$ であった場合, $x(s), y(s)$ はある点 s の各 x 座標, y 座標である.

2.2.2 内部エネルギー

内部エネルギーは 2 点間の距離評価関数と直線性評価関数の 2 つの関数に重みとし

て $\frac{\alpha}{2}, \frac{\beta}{2}$ を掛け、足しあわせいたものを用いた((7.1)).

$$E_{\text{inter}}(s) = \frac{\alpha}{2} \left| \frac{du(s)}{ds} \right|^2 + \frac{\beta}{2} \left| \frac{d^2u(s)}{ds^2} \right|^2 = \frac{\alpha}{2} |u_s(s)|^2 + \frac{\beta}{2} |u_{ss}(s)|^2 \quad (2.1)$$

ここで $u_s(s)$, $u_{ss}(s)$ はそれぞれ 1 階微分と 2 階微分である.

- 2 点間距離評価関数 ((2.1) 式第 1 項)

Snake 曲線上のある点 s について, Snake 曲線上での隣の点と差分であり, ある点 s とその隣の点との 2 点間の距離を評価した関数である (図 2-2 左).

- 直線性評価関数((2.1)式第 2 項)

Snake 曲線上での隣の点との位置の差分を二乗したものであり, ある点 s とその 2 点の 3 点が直線上からどの程度ずれているかを評価した関数である (図 2-2 右).

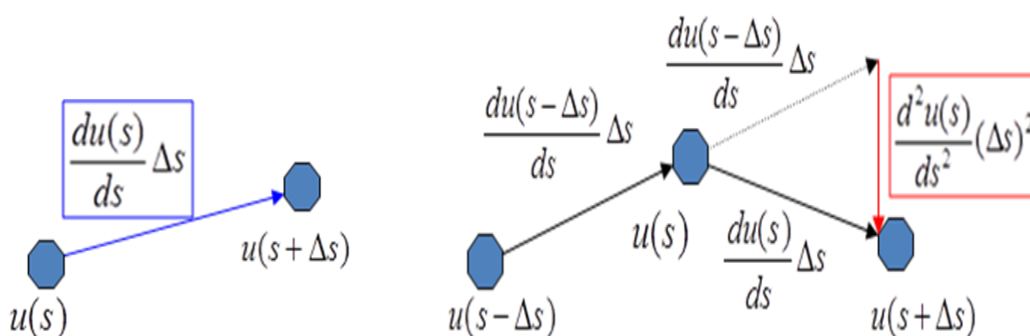


図 2-2 : 内部エネルギー

2.2.3 外部エネルギー

今回外部エネルギーは対象物の凹部も抽出できるように Snake 曲線の重心と Snake 曲線上のある点 s との距離に重みとして $\frac{\eta}{2}$ 掛けたものを用いた ((2.2)式).

$$E_{\text{exter}}(s) = \frac{\eta}{2} |u(s) - u_{c.m.}| \quad (2.2)$$

ここで $u_{c.m.}$ は Snake 曲線の重心である.

外部エネルギーの評価のイメージを図 2-3 になる.

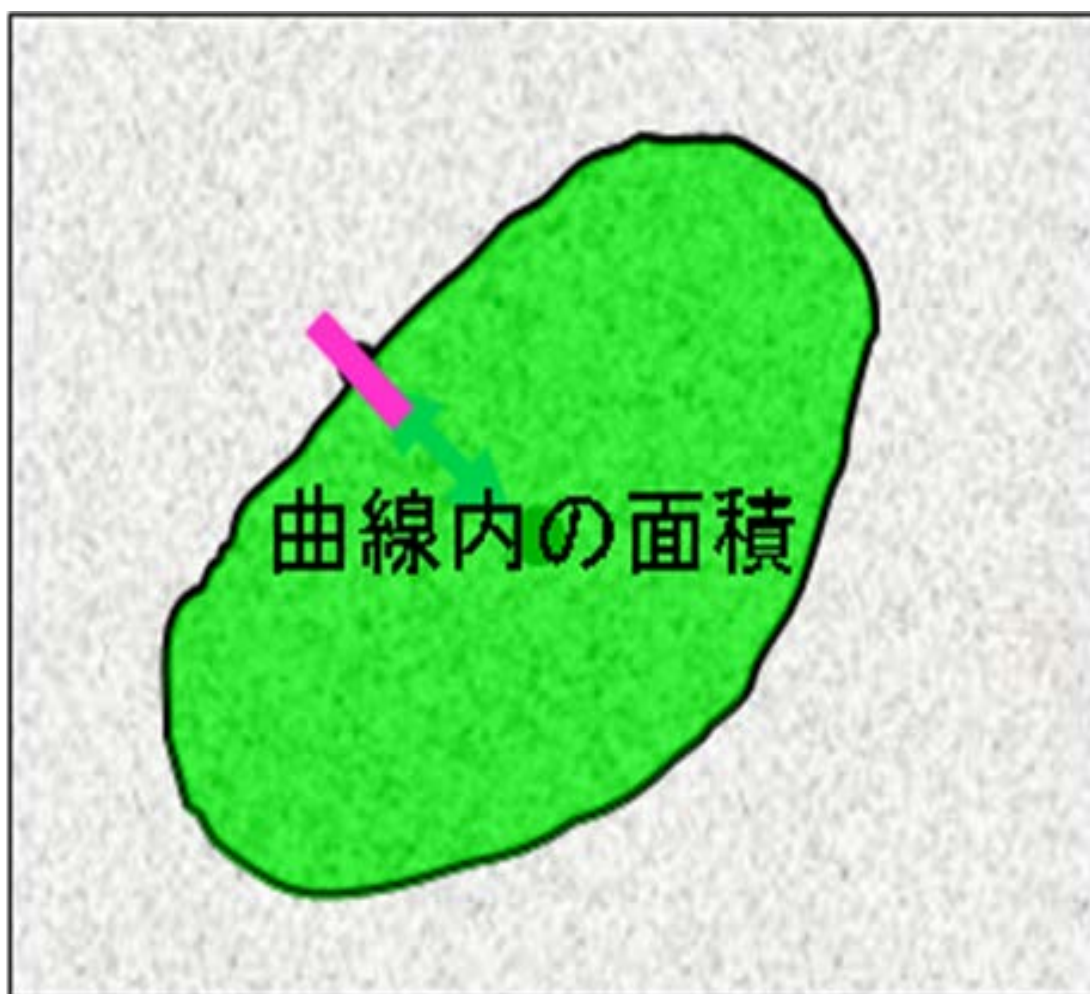


図 2-3 : 外部エネルギー評価

2.2.4 画像エネルギー

今回画像エネルギーは注目点から x, y 方向にそれぞれ 1 画素ずつずれた点との画素の差を用いた(図 2-3).

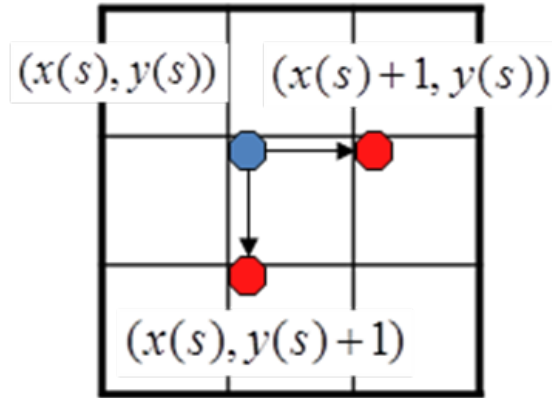


図 2-4: 画像エネルギー

式は

$$E_{image}(s) = -\omega \left| \nabla I(u(s)) \right|^2 \quad (2.3)$$

$$\nabla I(u(s)) = \left(\frac{\partial I(u(s))}{\partial x}, \frac{\partial I(u(s))}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

になる. 画像エネルギーも同様に重みとして $-\omega$ をかけた値になる.

2.3 Snake 関数

Snake 関数はそれぞれ, Snake 曲線の形状を評価する関数 (内部エネルギー) と重心間との距離を評価する関数 (外部エネルギー), 画像エネルギーの 3 つからなる ((2.5)式).

$$E_{total}(u(s)) = E_{inter}(u(s)) + E_{exter}(u(s)) + E_{imag}(u(s)) \quad (2.5)$$

(2.5)式を $s \equiv [0,1]$ の範囲で積分することによって, (2.6)式が求まる.

$$E_{total} = \int_0^1 ds E_{total}(u(s)) \quad (2.6)$$

E_{total} が極小値になる点を求めればよいため,

$$\frac{\delta E_{total}}{\delta u(s)} = \int_0^1 ds \frac{\delta E_{total}(u(s))}{\delta u(s)} = 0 \quad (2.7)$$

となる.

(2.7)式に, (2.5)式を代入すると,

$$\frac{\delta E_{total}}{\delta u(s)} = \int ds \frac{\delta E_{inter}(u(s))}{\delta u(s)} + \int ds \frac{\delta E_{exter}(u(s))}{\delta u(s)} + \int ds \frac{\delta E_{imag}(u(s))}{\delta u(s)} = 0 \quad (2.8)$$

となる.

(2.7)式に(2.1)式, (2.2)式, (2.3)式を代入して, 整理すると,

$$-\alpha \frac{d^2 u(s)}{ds^2} + \beta \frac{d^4 u(s)}{ds^4} + \eta(u(s) - u_{c.m.}) - \omega \nabla |\nabla I(u(s))|^2 = 0 \quad (2.9)$$

となる.

$u(s) = (x(s), y(s))$ を代入し, 画像エネルギー $\omega |\nabla I(u(s))|$ を右辺に移項すると,

$$-\alpha \frac{d^2 x(s)}{ds^2} + \beta \frac{d^4 x(s)}{ds^4} + \eta(x(s) - x_{c.m.}) = \omega F_x(u(s)) \quad (2.10)$$

$$-\alpha \frac{d^2 y(s)}{ds^2} + \beta \frac{d^4 y(s)}{ds^4} + \eta(y(s) - y_{c.m.}) = \omega F_y(u(s)) \quad (2.11)$$

となる.

微分を差分の形にすると, (2.12) 式, (2.13) 式になる.

$$-\alpha(x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}) + \beta(x_{i+2} - 4x_{i+1} + 6x_i - 4x_{i-1} + x_{i-2}) + \eta(x_i - x_{c.m.}) = \omega F_{x_i} \quad (2.12)$$

$$-\alpha(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}) + \beta(y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2}) + \eta(y_i - y_{c.m.}) = \omega F_{y_i} \quad (2.13)$$

(2.12)式, (2.13)式の各点における連立方程式を, 行列に変換すると, また, 最小値を求めるため, 変分法を用いて微分の形に直し, 微分を差分の形に近似することによ

って、(2.14)、(2.15) 式のような連立方程式となる。

$$AX = \omega F_x \quad (2.14)$$

$$AY = \omega F_y \quad (2.15)$$

(2.14) 式、(2.15) 式で A 、 X 、 Y 、 F_x 、 F_y 、 ω はそれぞれ以下の式になる。

$$A = \begin{pmatrix} 2\alpha+6\beta+\eta & -\alpha-4\beta & \beta & \cdots & 0 & \cdots & \beta & -\alpha-4\beta \\ \vdots & & & & \vdots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \beta & -\alpha-4\beta & 2\alpha+6\beta+\eta & -\alpha-4\beta & \beta & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots \\ -\alpha-4\beta & \beta & \cdots & 0 & \cdots & \beta & -\alpha-4\beta & 2\alpha+6\beta+\eta \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

$$X = \begin{pmatrix} x_0 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_{n-1} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

$$Y = \begin{pmatrix} y_0 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_{n-1} \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

$$F_x = \begin{pmatrix} F_{x_1} \\ \vdots \\ F_{x_i} \\ \vdots \\ F_{x_{n-1}} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

$$F_y = \begin{pmatrix} F_{y_1} \\ \vdots \\ F_{y_i} \\ \vdots \\ F_{y_{n-1}} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

それぞれ、 A はパラメータを要素とした行列であり、 X, Y は Snake 曲線の x 座標、 y 座標を、 F_x, F_y は画像エネルギーを示している。 ω は画像エネルギーの大きさを定める。

Snake法のフローチャートを図2-5に示す.

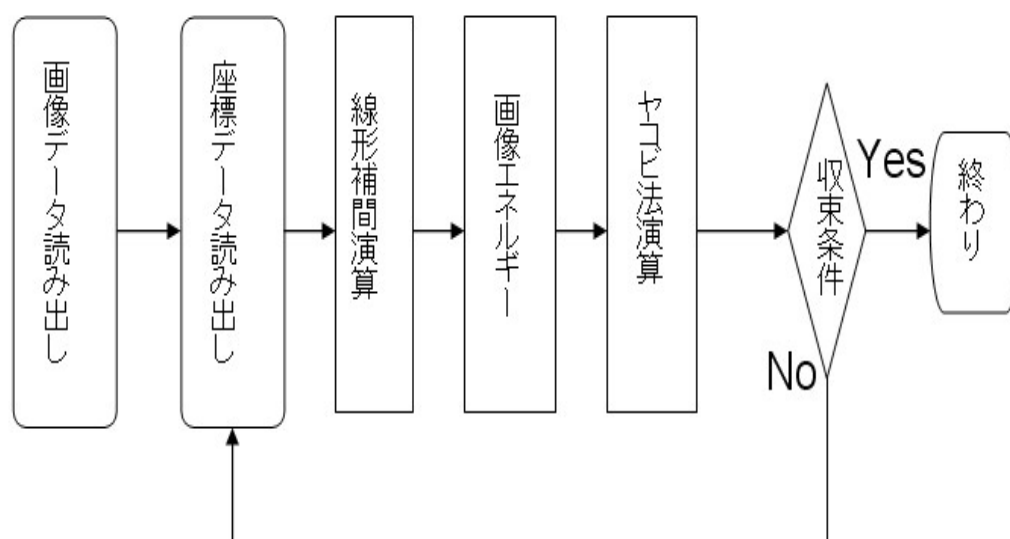


図 2-5: Snake 法フローチャート

まず、画像のデータを読み込む。次にSnake曲線の x , y 座標を読み込んで、線形補間、画像エネルギー、ヤコビ法演算を行い、収束を判定する。このループを、収束条件を満たすまで続ける。

2.3.1 線形補間演算

今回、より正確な演算を行うため、画素値よりも細かな座標の場合は、近傍 4 点の画素値を用いて線形補間を行った。

線形補間とは、存在しない点上の値を周辺の値を用いて近似する方法、図 2-5 にあるように、ある点の画素値 g を、近傍の 4 点の画素値 $g(i, j)$, $g(i+1, j)$, $g(i, j+1)$, $g(i+1, j+1)$ を用いて求める。図 2-5 の g の値を求める際に、まず $g(i, j)$, $g(i+1, j)$ の値を用いて g_A の値を求める。式(2.21)を示す。

$$g_A = (1-v)g_{(i,j)} + vg_{(i+1,j)} \quad (2.21)$$

次に $g(i, j+1)$, $g(i+1, j+1)$ の値を用いて g_B の値を求める。式(2.22)を示す。

$$g_B = (1-v)g_{(i,j+1)} + vg_{(i+1,j+1)} \quad (2.22)$$

最後に g_A , g_B の値を用いて g の値を求める式は(7.23)式になる。

$$\begin{aligned} g &= (1-u)g_A + ug_B \\ &= (1-u)\{(1-v)g_{(i,j)} + vg_{(i+1,j)}\} \\ &\quad + u\{(1-v)g_{(i,j+1)} + vg_{(i+1,j+1)}\} \\ &= (1-u)(1-v)g_{(i,j)} + v(1-u)g_{(i,j+1)} \\ &\quad + u(1-v)g_{(i+1,j)} + uv g_{(i+1,j+1)} \end{aligned} \quad (2.23)$$

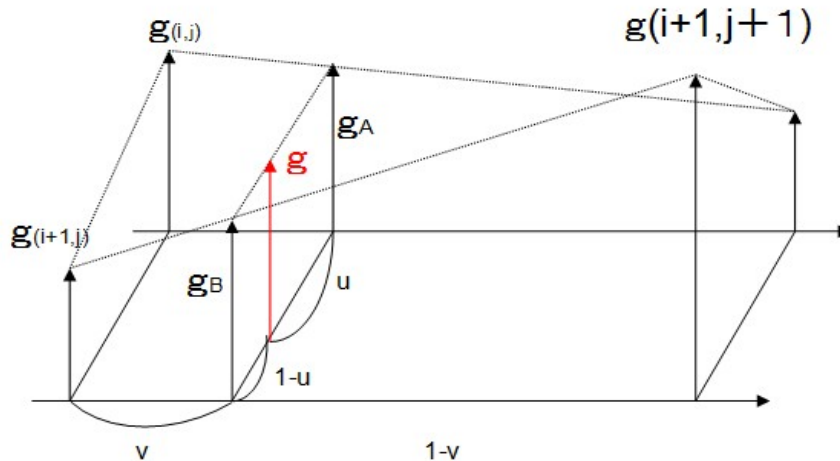


図 2-6: 線形補間

2.3.2 画像エネルギー

画像エネルギーは、抽出したい特徴量に依存し、その特徴量が大きな値を示す時に、より小さな値をとるようにすれば良い。ここでは、輪郭の抽出が目的であるから、画像の輝度勾配が大きいところで画像エネルギーが小さい値を取るよう、次のように定義する。

$$E_{imag}(s) = -\omega |\nabla I(u(s))|^2 \quad (2.24)$$

∇ は u による微分であり、 I は座標 u における画像輝度である。ここで、 ω は画像エネルギーの大きさを定める正定値のフリーパラメータである。ただし、この値も一意的に定めることはできない。これより、画像エネルギーは最大値がゼロ値であり、輝度勾配が大きくなればなるほど値が小さくなる。

2.3.3 ヤコビ法演算

ヤコビ法とは n 元の連立一次方程式 $A\vec{x} = \vec{b}$ を反復法で解く手法の1つである。ドイツの数学者カールグスタフヤコブヤコビの名前にちなむ。

n 次正方行列 A は、上三角行列 U 、下三角行列 L 、対角行列を D とすると、

$A = L + D + U$ と書ける。このようにすると、まず以下のような変形ができる。

$$\begin{aligned} (L + D + U)\vec{x} &= \vec{b} \\ D\vec{x} &= \vec{b} - (L + U)\vec{x} \end{aligned} \quad (2.25)$$

この式を満たす x を求める。初期値 $\vec{x}^{(0)}$ に対して、 k 回目の反復で得られた x_1 の値を $x_1^{(k)}$ と書くと、以下のような反復法の漸化式ができる。

$$D\vec{x}^{(k+1)} = \vec{b} - (L + U)\vec{x}^{(k)} \quad (2.26)$$

この式は以下のように変形できる。

$$\vec{x}^{(k+1)} = D^{-1} \{ \vec{b} - (L + U)\vec{x}^{(k)} \} \quad (2.27)$$

もし、解が収束した場合、その場合は $x_1^{(k+1)}$ と $x_1^{(k)}$ は共通の値 $\vec{x}_1^{(*)}$ を持つことになる。

このとき、

$$\vec{x}_1^{(*)} = D^{-1} \{ \vec{b} - (L + U)\vec{x}^{(*)} \} \quad (2.28)$$

となり、変形していくと元の連立方程式の形に戻る。したがって、ヤコビ法で解が収束した場合、その解は連立方程式の解となる。また、その収束の十分条件は、係数行列の対角要素の絶対値が非対角要素の絶対値よりも相対的に大きい場合、すなわち対角優位な行列である場合に収束する。これはガウス＝ザイデル法も同様である。ヤコビ法の式はベクトル \vec{x} の各成分ごとに次のような式で書くことができ、数値分析ではこの式が用いられる。

$$x_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} x_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_j^{(k)} \right) = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j \neq i}^n a_{ij} x_j^{(k)} \right) \quad (2.29)$$

n 元の H 連立一次方程式 $A\vec{x} = \vec{b}$ を反復法 H で解く手法としてヤコビ法を、本研究で用いた。

ヤコビ法の式は H ベクトル $H \vec{x}$ の各成分ごとに次のような式で書くことができ、 H 数値解析 H では(2.29)式が用いられる。

$$x_i^{(k)} = \frac{-(\beta x_{i-2}^{(k-1)} + (-\alpha - 4\beta)x_{i+1}^{(k+1)} + (-\alpha - 4\beta)x_{i+1}^{(k-1)} + \beta x_{i+2}^{(k-1)}) + \omega F_{x_i^{(k-1)}}}{2\alpha + 6\beta + \eta} \quad (2.30)$$

となる。

反復法では、正しい解に近づくと、 $x^{(k-1)}$ と $x^{(k)}$ との差が小さくなっていく。そのため、ヤコビ法演算前の値と演算後の値との差が最初にた定め誤差の範囲内になったとき、収束したとして演算終了となるようにする。

参考文献

- [1] 林宏雄, 斎藤光男, 増渕美生 : Cell Broadband Engine の設計思想. 東芝レビュー 61: 2-8, 2006
- [2] Barker K J, Davis K, Hoisie A et al: Entering the petaflop era: the architecture and performance of Roadrunner. SC '08 Proc. ACM/IEEE conference on Supercomputing: Article No.1, 2008
- [3] 岩井啓助, 菊池義浩, 河原邦彦: 高画質な 3D 表示を実現した CELL レグザ 55X2. 東芝レビュー 66: 41-44, 2011
- [4] Luttmann E, Ensign D L, Vaidyanathan V et al: Accelerating Molecular Dynamic Simulation on the Cell Processor and PlayStation 3. J Comput Chem 30: 268–274, 2009
- [5] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D: Snakes: Active Contour Models. Int J Comput Vision, 321-331, 1988
- [6] 栄藤稔 : 動的輪郭モデル Snakes の概観. Med Imag Tech 12: 9-15, 1994
- [7] http://www.cfme.chiba-u.jp/~haneishi/class/7_segmentation.pdf
- [8] <http://www.isl.titech.ac.jp/~nagahashilab/member/longb/iip/LectureNotes/lecture3.pdf>
- [9] <http://www.eb.waseda.ac.jp/murata/masato.hiruta/openhouse/newpage7.php>
- [10] E. Meijering (2002). [A Chronology of Interpolation. From Ancient Astronomy to Modern Signal and Image Processing.](#) Proceedings of the IEEE 9 (3), 319-342.
- [11] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A%E5%BD%A2%E8%A3%9C%E9%96%93>
- [12] <http://7ujm.net/etc/senkei.html>
- [13] <http://d.hatena.ne.jp/hecomi/20100710/1278786331>
- [14] <http://codezine.jp/article/detail/163>
- [15] <http://www.ka.riec.tohoku.ac.jp/~beto/lecture/ais/05/hout-051209.pdf>
- [16] <http://fussy.web.fc2.com/algo/algo12-1.htm>
- [17] <http://nkl.cc.u-tokyo.ac.jp/08s/CS01/GaussSeidel.pdf>
- [18] <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A4%E3%82%B3%E3%83%93%E6%B>

[3%95](#)

- [19] <http://hooktail.org/computer/index.php?Jacobi%CB%A1>
- [20] <http://pc-physics.com/jacobi1.html>
- [21] <http://homepage3.nifty.com/gakuyu/suti/renritu/hanpuku/index.html>
- [22] <http://case.f7.ems.okayama-u.ac.jp/statedu/eigen/node5.html>
- [23] http://akita-nct.jp/yamamoto/lecture/2004/5E/linear_equations/relaxation/html/node4.html
- [24] http://akita-nct.jp/yamamoto/lecture/2004/5E/linear_equations/relaxation/html/node3.html
- [25] http://akita-nct.jp/yamamoto/lecture/2004/5E/linear_equations/relaxation/html/node5.html

第3章 Cell への実装

今回はSONYから発売されているプレイステーション3（PS3）を用いた。

図3-1はCellプロセッサの構成図である。

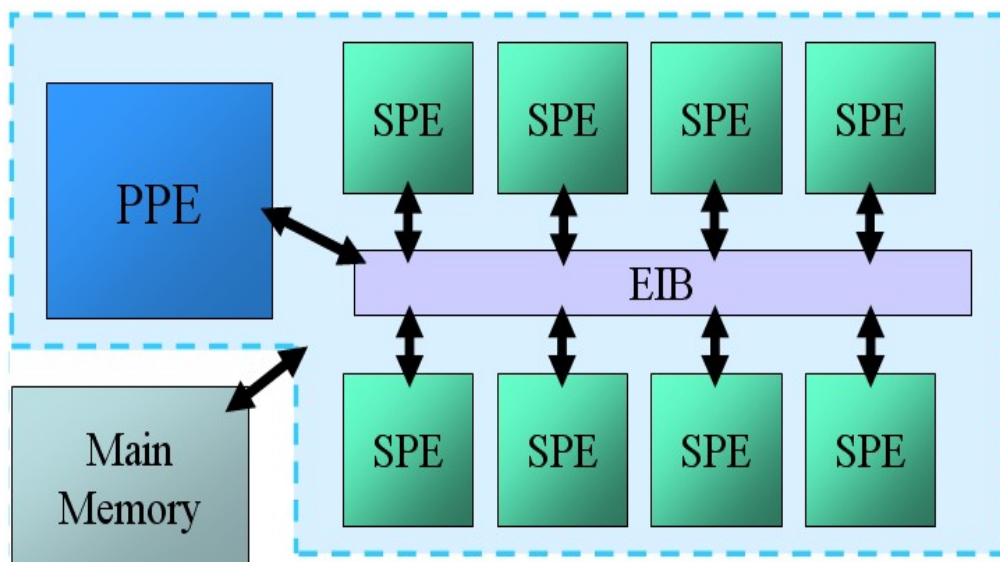


図 3-1 : Cell プロセッサの構成図

一つの制御系プロセッサコア(PPE: Power PC Processor Element)と複数の演算系プロセッサコア(SPE : Synergistic Processor Element)からなり、PS3では、ユーザプログラムから、PPEと6個のSPEが使用できる。

SPEは128ビットのSIMD演算に対応しており、扱うデータが32ビットの浮動小数点(float)型ならば、同時に4つのデータを処理することが可能になっている。また、PS3での動作周波数は3.2GHzである。



図 3-2 : PS3 を用いたクラスタシステム

本研究で使用した PS3 クラスタシステムは図 3-2 に示す。使用機器は以下の通りである。

- PLAYSTATION3 (CECHH00CW) 16 台
- スイッチングハブ : PLANWX FXG-08IM(1Gbps) corega FSW-16L (100Mbps)
- LAN ケーブル : ELECOM LD-GPE/LG2 CAT6E (エンハンスドカテゴリー6)

本研究で必要なのは各ノード間でのデータのやりとりである。今回のシステムでは、MPI (Message Passing Interface) を使用した。

システム全体の流れを示す。

- i) 各ノードの PPE 上で MPI を使う上で必要なノード数を取得する。
- ii) 一つのノードが物体点データをファイルから読み込む。
- iii) 各ノードへ物体点データ、および必要なパラメータを送る。
- iv) 各ノードの PPE から SPE を起動する。
- v) PPE から SPE に計算する領域を割り当て、物体点データを送る。
- vi) SPE でプログラムの計算を行い結果を PPE に戻す。
- vii) 一つのノードに計算結果を集める。
- viii) 結果を表示する。

今回は画像データの読み込みから、線形補間演算部、ヤコビ法演算部を Cell プロセッサに実装した。

3.1 Cell Broadband Engine (Cell)

Cell Broadband Engine(以後 Cell)は SCE (Sony Computer Entertainment Inc.), IBM, 東芝の 3 社が共同開発したヘテロジニアス型マルチコアプロセッサである。

3.1.1 構成

基本的な Cell の構成を以下のエラー! 参照元が見つかりません。に示す。Cell は大きく分けて、PPE(PowerPC Processor Element)と SPE(Synergistic Processor Element), 外部 IO, 主メモリ, それらを接続する EIB(Element Interconnect Bus)等で構成されている。以下にそれぞれの特徴を示す。

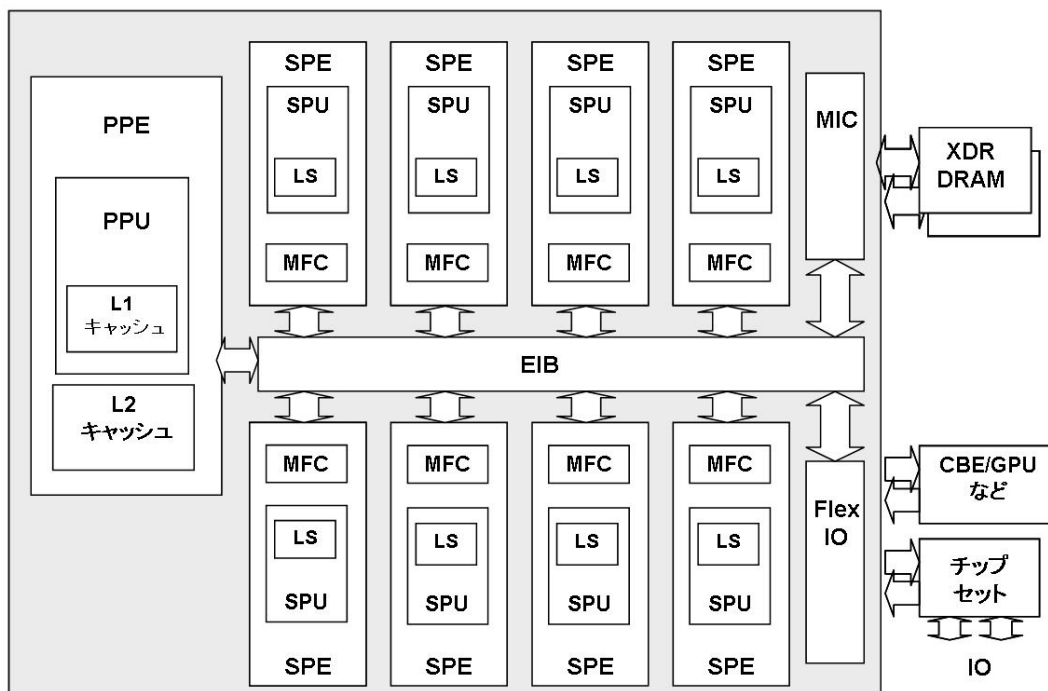


図 3-3 : Cell の構成図

3.1.1.1 PPE

PPE は 64bit POWER アーキテクチャで命令セットは PowerPC G5 互換ではあるが、既存の PowerPC 系 CPU とは異なる内部構造をもつ新設計のコアである。2 スレッドを交互に実行することが可能で、スレッドの切り換えが速い事から、OS の駆動などを受け持つ。PPE の浮動小数点演算性能は IBM の示したシミュレーションの例では、2.4GHz の PPE が Pentium4 3.2GHz 相当の CPU の 20%程度のパフォーマンスしか出ておらず、浮動小数点演算は得意ではないと言える。

通常はメインメモリや外部デバイスへの入出力制御に加えて、SPE を制御する役割も担う。処理の制御を主に行うため「制御系プロセッサ」とも言える。

3.1.1.2 SPE

SPE は演算部である SPU(Synergistic Processor Unit)とデータ転送を管理する MFC(Memory Flow Controller)から成る。IBM の示したシミュレーションでは、3.2GHz の Pentium4 と比較し、2.1GHz の SPE 1 基で 1.5 倍、8 基で 12 倍の性能差を記録した。

・ SPU

SPU は 128 ビット SIMD(Single Instruction Multiple Data)型のデータ処理向けのプロセッサである。図 3-4 にそのイメージ図を示す。

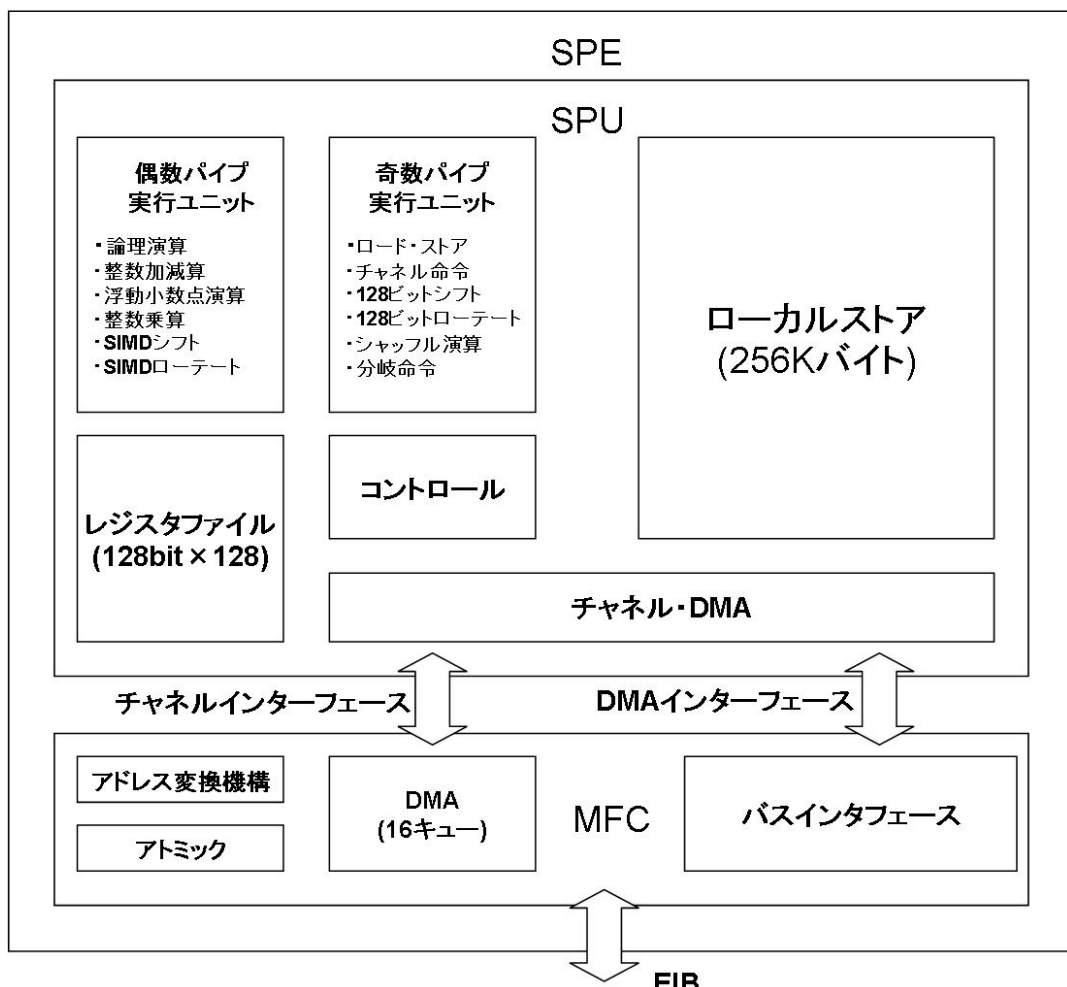


図 3-4: SPE 詳細図

・ パイプラインと命令発行の方式

SPU はパイプラインに 26 段の深さを持つことで動作周波数を向上させている。そのパイプラインは 2 系統に分かれており、それぞれが受け持つ命令が異なる。大まかにはデータの演算処理を受け持つパイプとデータのロード・ストア命令や分岐命令を

受け取るパイプがあり、アウトオブオーダー発行などの処理は取られないが、二つのパイプが受け持つ命令が順番に並んだ際は 2 命令が同時発行される。

- ・浮動小数点演算器による SIMD 演算

各パイプラインで一度に処理が行われるデータ幅は 128 ビットである。このデータ幅を演算するデータの幅によって使い分けて処理を行う。例えば、float 型(データ幅 32 ビット)の演算の場合、同じ計算であれば 4 データ分同時に処理することができる。

- ・ローカルストア(LS)

SPU は内部にローカルストアと呼ばれる 256kB の内部メモリを持つ。この領域に SPU プログラムと処理するデータが置かれる。

SPU のロード・ストア命令がアクセスできるのはローカルストアに限定され、外部メモリに直接アクセスすることはできない。ローカルストアと外部メモリ、各 SPU のローカルストア間のデータ転送は後述する MFC によって行われる。しかし、ローカルストアにはキャッシュミスが存在せず、固定レイテンシでアクセス可能なため、SPU によるデータ処理時間が正確に予想でき、それにより高速な処理が期待できる。

- ・大容量のレジスタファイル

SPU は 128 ビット×128 本のレジスタファイルを持つ。利用する演算パイプラインが深い場合やソフトウェアにおけるループアンローリングの利用の際に、高い性能を発揮させることができるようになっている。

3.1.1.3 MFC

MFC は SPU からのチャンネル命令によるリクエストや外部メモリ、PPE、他の SPE からの MMIO(Memory Mapped Input Output)アクセスによるリクエストに応じて SPU 内部のローカルストアと外部メモリや他の SPU のローカルストアとの間の DMA(Direct Memory Access)転送を行う。

MFC はチャンネルインターフェースと DMA インターフェースを介して SPU と接続されている。SPU がチャンネル命令を発行すると、チャンネルインターフェースが MFC に DMA コマンドを発行する形で DMA 転送等が行われる。DMA 転送時のデータは DMA インターフェースを通じて SPU とやり取りが行われる。

MFC 内部には 16 本の DMA キューが存在し、16 個まで同時に DMA 転送命令を保持できる。また、SPE 外部からの DMA リクエスト用に上記とは別に 8 本の DMA キ

ューが存在する。

SPU の命令実行と DMA 転送は独立して行われるので、演算処理と DMA 転送を巧く並列化することでデータ転送のレイテンシを隠蔽することが可能となる。

3.1.1.4 EIB

EIB のデータバスは**エラー! 参照元が見つかりません**。のように 16 バイトの幅を持つ 4 本のデータリングで構成されている。これは、将来的にプロセッサ数を変更する際の拡張性を考慮している。EIB はプロセッサコアの半分の周波数で動作し、データは 8 サイクルの固定長パケットとして転送される。

4 本のデータリングは 2 本が時計回り、残りの 2 本が反時計回りで接続されており、データ転送は論理的に近いほうのリングによって行われる。各データリングは 3 サイクルに 1 度アービトレーションを行い、データが衝突しなければ同じリングに複数のパケットが存在する。

EIB は 250GB/s 以上の帯域を持つ。この帯域を保証するために、バスに接続されたマスタ群をグループに分け、それぞれに使用できるバンド幅を割りふられている。各グループは割り当てられたバンド幅を使い切ると一時的にメモリや IO を使用できなくなり、ごく短い時間後にまた割り当てられたバンド幅を利用できるようになる。このような仕組みを利用することで、優先順位の高いプロセスが、より多くのバンド幅を使用できるように保証されている。

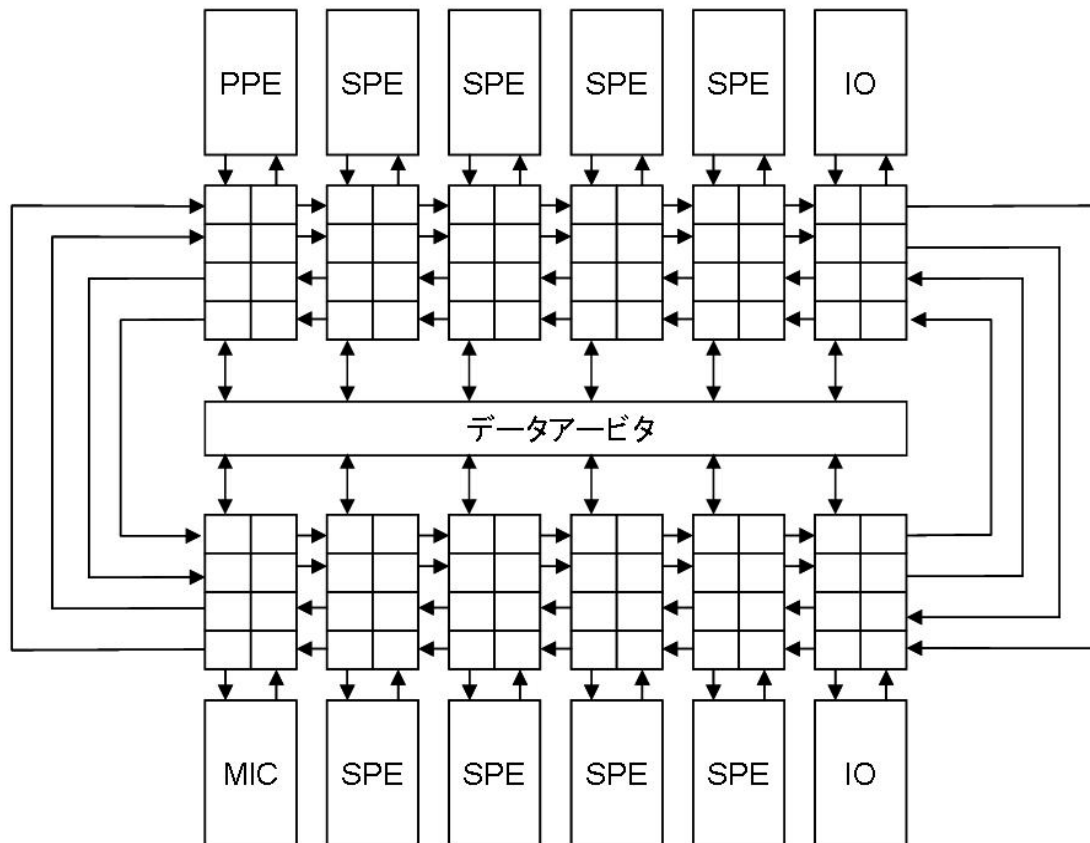


図 3-5: Cell のデータバス構造

3.1.1.5 周辺部との接続

メモリや外部 IO は Rambus 社のものを採用している. IO は総合で 76.8GB/s の帯域を持つ FlexIO を採用しており, 出力 7 バイトと入力 5 バイトを 2 つのチャンネルに分割している.

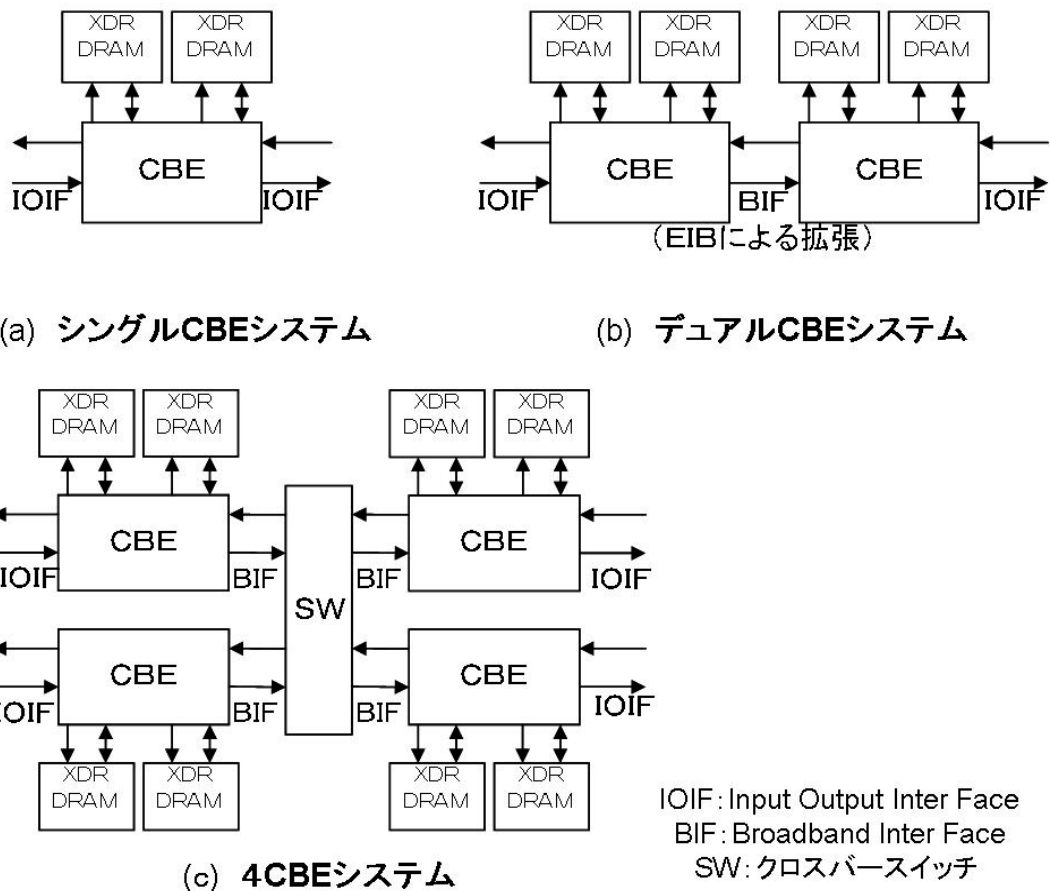


図 3-6: Cell のシステム構成例

IO の 2 つのチャネルを利用して、Cell は 4 個まで接続が可能となる。エラー! 参照元が見つかりません。図 3-6 に複数の Cell を利用したシステムの構成形態の例を示す。

このように、EIB を拡張したり、クロスバースイッチを介して接続されたりするシステムは、異なる Cell チップ内にある PPE や SPE が 1 つの Cell の中にある場合と同じように協調して動作させることが可能である。

3.1.2 Cell の特徴

Cell における最も大きな特徴は SPE の構造であろう。主に演算処理を受け持つ SPU が直接参照できるメモリは内部メモリであるローカルストアのみで、その容量は 256kB と非常に小さくなっている。つまり、構築するシステムモデルによっては、演算部分で一度に全てのデータを処理できない等の不具合が生じる可能性もある。さらに、複数ある SPE にタスクを効率よく割り振らなければ、Cell の性能を最大限利用することはできない。また、Cell を用いたシステムは並列処理がされている場合が多いため、クラスタ化によるさらなる並列化も容易であると考えられる。

3.2 PLAYSTATION3 (PS3)

プレイステーション 3 (PS3 : PLAYSTATION 3) は, 2006 年 11 月 11 日にソニー・コンピュータエンタテインメント(SCE)から発売された家庭用ゲーム機であるが, Cell を採用したことや, メモリに XDR DRAM, GPU に RSX, HDD, Ethernet インターフェースを備えるなどコンピュータとしても十分に利用できる仕様となっている。

3.2.1 メモリ

メインメモリには米国 Rambus 社が開発した「XDR DRAM」を採用している。XDR DRAM は, 32 ビット帯域ながら DDR2 SDRAM のデュアルチャンネル転送 12.8GB/s の 2 倍のスピード 25.6GB/s の帯域を持つ。I/O インターフェース FlexIO 技術を採用し, 高精細画像をリアルタイム処理する為に必要な転送速度を実現している。

CPU には XDR DRAM メインメモリが直結され, GPU には GDDR3 ビデオメモリが直結されており, NUMA (Non-Uniform Memory Access) 構成を取る。レイテンシペナルティがあるものの, CPU と GPU が相互に他方の専用メモリにアクセスすることも可能である。

3.2.2 ネットワーク

10BASE-T 及び 100BASE-TX, 1000BASE-T をサポートする Ethernet インターフェースを備える。また, 40GB モデル, 60GB モデルおよび 80GB モデルでは, IEEE 802.11 b/g 準拠の無線 LAN を搭載する。

3.2.3 GPU

GPU には, GeForce シリーズ等の PC 向け高性能 GPU を手がける NVIDIA と共同開発した「RSX Reality Synthesizer」を採用している。

RSX は, NVIDIA 社の PC 用グラフィックチップ「GeForce7800 GTX (G70)」に PS3 内部で採用されている「Flex IO」インターフェースを搭載したチップである。搭載されているバーテックスシェーダは 8 本, ピクセルシェーダは 24 本と, GeForce7800GTX とスペック的には同一の物だが, VRAM とのインターフェースは 256 bit から 128 bit へと削減されている。またシェーダ画像を最終的に出力するユニットの数も, 16 から 8 に削減されている。VRAM とのメモリインターフェースは, 一般的な GDDR3 接続で, 帯域幅は 22.4 GB/sec である。CPU の Cell とは, Flex IO インターフェースによって 35 の帯域幅で接続されている。PS3 には非常に高性能な GPU が搭載されているが, 残念ながら本実験での Linux 環境からは, この RSX を使

うことは許可されていない.

3.3 実装方法

Cell の性能を活かしきるには PPE 側から SPE に上手く仕事を振り分けて、実行することが大切である。PS3 では 6 つの SPE を使うことができるので、Cell 上でのプログラムは下記のような手順で実行される。

- i) PPE から SPE プログラムイメージをオープン.
- ii) SPE コンテキストを生成.
- iii) SPE プログラムを LS へロード.
- iv) SPE プログラムを実行.
- v) SPE 側で DMA 転送を行い物体点など必要なデータの取得.
- vi) SPE で計算(SIMD)を行い、結果を PPE に DMA 転送.
- vii) SPE コンテキストを破棄.
- viii) SPE プログラムのクローズ.

また、実際にコーディングを行うと LS のサイズが 256kB という制限が厳しく、実際にメモリとして確保できるのは 175kB 程度であった。

3.4 PS3 クラスタシステム

PS3のプロセッサである Cell のソフトウェア開発環境として、本研究では IBM から提供されている Cell Broadband Engine Software Development Kit 3.1(以下 Cell SDK)を利用した。Cell SDK にはシミュレーター、PPU および SPU 用 GNU C/C++ Compiler(GCC)、SPU 用の新しいライブラリ、PPU および SPU 用デバッカ(GDB)、SPE スレッドを利用するためのライブラリなどが含まれる。

Cell におけるプログラミングには C 言語や C++等が、従来の CPU のプログラミングとほぼ同じ感覚で利用できる。しかし、使用用途を特化した 2 つのコアを持つ Cell では PPE と SPE それぞれに使える関数群が本来の各言語からは多少変化している。さらに、それぞれのコア用に別々のプログラムを作る必要があり、SPE を利用する際には PPE 側のプログラムにおいて SPE 側のプログラムをスレッドとして起動することで、PPE 側で SPE の動作を制御することができる。

また、クラスタシステムで使用する MPI(Message Passing Interface)の実装としてはアメリカのアーゴン国立研究所が模範として開発し、無償でソースコードを配布したライブラリである MPICH2 を用いた。しかし、現時点で最新版の MPICH2-1.2.1 ではヘテロジニアスコアでの動作をサポート外としているので注意が必要である。今回は、MPICH2-1.0.8 を使用した。

使用機器としては、PLAYSTATION3(CECHH00CW)×16,スイッチングハブ：PLANEX FXG-08IM(1Gbps),LAN ケーブル：ELECOM LD-GPE/LG2 CAT6E(エンハンスドカテゴリ-6)を用いた。

3.4.1 MPI (Message Passing Interface)

MPI とは、並列コンピューティングを利用するための標準化された規格であり、実装自体を指すこともある。

複数の CPU が情報をバイト列からなるメッセージとして送受信することで協調動作を行える。ライブラリレベルでの並列化であるため、言語を問わず利用でき、プログラマが細密なチューニングをおこなえると言うメリットがある一方、利用には明示的に手続きを記述する必要があり、デッドロックへの対処などもプログラマ側に委ねられている。

業界団体や研究者らのメンバからなる MPI Forum によって規格が明確に定義されているため、ある環境で作成したプログラムが他の環境でも動作することが期待で

きる。基本的には、マルチプロセスとして動作する。

本研究では、自由に使える実装として最も広く使われている MPICH を用いた。今回のシステムで用いた MPI 関数表 3-1 をエラー! 参照元が見つかりません。にまとめた。

表 3-1 : MPI の関数

関数名	種別	
MPI_Init	環境管理	MPI の実行環境の初期化
MPI_Comm_size	連絡機構	コミュニケータ内のプロセス数を取得
MPI_Comm_rank	連絡機構	コミュニケータ内のランクを取得
MPI_Finalize	環境管理	MPI の実行環境の終了(全ての MPI 処理を終了)
MPI_Bcast	集団通信	メッセージのブロードキャスト
MPI_Gather	集団通信	データを一つのノードに集める

3.4.2 OpenMP

OpenMP は、並列コンピューティング環境を利用するために用いられる標準化された基盤である。主に共有メモリ型計算機で用いられる。マルチスレッドや MPI では明示的に並列化するためのソースコードを新たに記述する必要があるが、OpenMP は、OpenMP が使用できない環境下では、ディレクティブ(コンパイラへの指示文)を挿入することによって並列化を行う。

このため、並列環境と非並列環境でほぼ同一のソースコードを使用でき、過去に作成されたマルチコアプロセッサ用でないソースコードでも、簡単に並列動作させてパフォーマンスを上げることが可能である。

MPI との比較では、OpenMP は異なるスレッドが同一のデータを同じアドレスで参照できるのに対し、MPI では明示的にメッセージ交換を行わなければならない。そのため SMP(Symmetric MultiProcessing)環境に於いては大きなデータの移動を行わずにすむので高い効率が期待できる。ただし、並列化の効率はコンパイラに依存するのでチューニングによる性能改善が MPI ほど高くない。OpenMP は MPI に比べてメモリアクセスのローカリティが低くなる傾向があるので、頻繁なメモリアクセスがあるプログラムでは、MPI の方が高速な場合が多い。

また、自動で並列化を行ってしまうので、どのような並列化をするか理解することが非常に大切である。

3.5 Cell についての Snake 法の実装

3.5.1 開発環境

本研究では, Snake 法を PLAYSTATION3 に搭載されている CBE への実装を試みた. 表 3-2 に PC と PS3 それぞれの開発環境を示す.

表 3-2 : PC と PS3 の比較

プロセッサ	Pentium4 (3.2GHz)	Cellプロセッサ(3.2GHz)
OS	Linux(Fedora 10)	Linux(Fedora 10)
コンパイラ	g++4.1.2	g++4.3.0
オプション	-O3-funroll-loops	-O3-funroll-loops

3.5.2 PC 上での Snake 法のプログラミング

3.5.2.1 線形補間演算部

x, y の座標を画像データ, 画素幅を引数として関数として線形補間関数を定義し, その関数内で, 線形補間を行った. また, x, y 方向に 1 画素分ずつずれた点についてもその関数によって線形補間を行い, それらと求めたい点との差を求めることによって画像エネルギーの導出とした.

3.5.2.2 ヤコビ法演算部

次に, 線形補間演算部で求めた画像エネルギーと点の座標, 各種パラメータを引数として持つ関数としてヤコビ法演算を行った. その関数に x, y 座標両方で Snake 点数の全部の移動よりを合計したものを使い(dx, dy) を使い(8.1)式によって condition の値を求める. この値が, ある一定の値より小さくなったときに, Snake 法演算が収束したとして演算を終了することになる.

$$condition = \sqrt{dx \times dx + dy \times dy} \quad (3.1)$$

3.5.3 PS3 への実装

C 言語でプログラミングを行ったソースを元に, PS3 への実装を行った.

3.5.3.1 エンディアン

エンディアンとは、2 バイト以上のデータをメモリに格納するときの並び順のことで、その並び順によって、リトルエンディアン、ビッグエンディアンという 2 種類があるということである。

- リトルエンディアン (Little endian)

最下位ビット(Least Significant Bit)の属するバイト(Least Significant Byte)を低位のアドレスへ格納していく方式である。バイナリダンプすると、「順序が逆になって出てくる」のが特徴である。Intel x86 プロセッサはこの方式である。

- ビッグエンディアン (Big endian)

最上位ビット(Most significant Bit)の属するバイト(Most Significant Byte)を低位のアドレスへ格納していく方式である。良くあるバイナリダンプのプログラムを使ったとき、「そのまま読める」のが特徴である。

今回用いた CBE ではビッグエンディアンが採用されているが、Inter 社製の CPU はリトルエンディアンが採用されているため、PC からデータを転送し演算データと用いる際にはエンディアンの変更が必要になってくる。

3.5.3.2 エンディアン変更方法

エンディアンの変更手順は以下の通りである。

- ① PC 上で作成したデータを char 型で 1Byte ずつ読み込む。
- ② 読み込む後、データの型により 1 ずつ並び替える。
- ③ 並び替えたデータの先頭アドレスを演算で使うデータのポインタでキャストする。

3.5.4 SPE を用いた演算

PPE でデータの読み込みを行う。

SPE でそのデータを用いて演算を行わせる。

3.5.4.1 SPE プログラムの作成

SPE 演算を行わせる場合には、PPE でソースとは別に、SPE のソースを作成しなければならない。

3.5.4.2 SPE の起動と SPE での演算

SPE での演算を行わせる場合、まず PPE 側のソースで `libspe2.h` というヘッダーファイルをインクルードする必要がある。

SPE で演算を行わせる際には、PPE 上で以下の手順を踏む必要がある。

- i) `spe_image_open()`関数を用いて、実行したい SPE プログラムイメージをオープン
- ii) `spe_context_create()`関数を用いて SPE コンテキストを作成
- iii) `spe_program_load()`関数を用いて、SPE プログラムを LS にロード
- iv) `spe_context_run()`関数により、SPE プログラムを実行
- v) `spe_context_destroy()`関数を用いて、実行処理の終わった SPE コンテキストを廃棄
- vi) `spe_image_close()`関数を用いて、SPE プログラムイメージをクローズ

3.5.4.3 Direct Memory Access(DMA)転送

PPE と SPE 間でのデータ転送は DMA 転送を用いて行う。DMA 転送は SPE 側から制御することが可能であり、SPE によって制御を行う。

3.5.4.4 アラインメント

DMA 転送する際には転送データの PPE と SPE 上のメモリの先頭アドレスが 16Byte 境界である必要がある。通常転送効率の一番良い 128Byte 境界を、「`_attribute__((aligned(128)))`」という関数を用いて 128Byte 境界にアラインメントを行う。

3.5.4.5 転送データサイズ

また、通信サイズも 16Byte の倍数のサイズしか転送することができない。16Byte の倍数にならない場合はパットを入れて、16Byte の倍数のデータを転送する。また、最大で 1 度に 16KB までの転送を行うことができる。DMA 転送は以下の関数を用いて行う。

```
「void spu_mfcdma64(volatile void *lsa, unsigned int eahi, unsigned int eallow,unsigned int size, unsigned int tagid, unsigned int cmd);」
```

第 1 引数—LS 側の DMA 転送に用いる先頭アドレス

第 2 引数—メインメモリ側の DMA 転送に用いるアドレス上位 32-bit

第 3 引数—メインメモリ側の DMA 転送に用いるアドレス下位 32-bit

第 4 引数—DMA 転送するデータのサイズ

第 5 引数 --DMA 転送用のタグの指定

第 6 引数 --DMA 転送用の方向を指定

3.6 SIMD 演算を用いた高速化

3.6.1 SIMD 演算

SIMD 演算で用いられる、128bit の固定長のデータはベクタデータと呼ばれ、今回用いている float 型の演算データの場合、各ベクタデータには 4 つの float 型のデータが含まれる。SIMD 演算に用いた SIMD 関数を表 3-3 に示す。(v1, v2, v3 はベクタデータ)

表 3-3 : SIMD 演算関数

関数名	演算内容
spu_shuffle	v1 と v2 の 2 つのデータを使って決められたパターンでデータを並びかえる
spu_nadd	v1 と v2 を掛け合わせその値 v3 を足し合わせる
spu_sub	v1 から v2 を引く
spu_cmpgt	v1 の各要素が v2 の各要素より大きい判定する
spu_sel	決められたパターンで v1 と v2 の各 bit を選択する
spu_add	v1 と v2 の各要素を足し合わせる

3.6.2 ヤコビ法 SIMD 演算

通常ヤコビ法は以下の(3.2)式~(3.5)式によって $(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3})$ の 4 点の値を求め、この演算を SIMD 演算で行うことによって、通常 1 点での命令数を同じ命令数で 4 点同時に求めることができる。(8.6)(8.7)式

$$x_i = \{b * x_{i-2} + ab * x_{i-1} + ab * x_{i+1} + b * x_{i+2}\} / abh \quad (3.2)$$

$$x_{i+1} = \{b * x_{i-1} + ab * x_i + ab * x_{i+2} + b * x_{i+3}\} / abh \quad (3.3)$$

$$x_{i+2} = \{b * x_i + ab * x_{i+1} + ab * x_{i+3} + b * x_{i+4}\} / abh \quad (3.4)$$

$$x_{i+3} = \{b * x_{i+2} + ab * x_{i+2} + ab * x_{i+4} + b * x_{i+5}\} / abh \quad (3.5)$$

$$X_i = \{B * X_{i-2} + AB * X_{i-1} + AB * X_{i+1} + B * X_{i+2}\} / ABH \quad (3.6)$$

$$X_i = \{x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, x_{i+3}\} \quad (3.7)$$

また、SIMD 演算に伴い spu_shuffle を用いてデータの並び替えを行った。

3.6.3 線形補間 SIMD 演算

線形補間の演算は Snake 点数×ヤコビ法反復回数分行うため, Snake 法において演算時間の影響が大きいため SIMD 演算による高速化が必要不可欠である. 線形補間演算部もヤコビ法演算と同様に 4 点同時の演算を行った.

3.7 SPE の並列化

SPE の並列化は使うコアの分だけスレッドを作成し、各スレッド内で SPE を呼び出すことより SPE の同時演算を行うことができる。

スレッドの作成には PPE のソース内で「pthread_create」関数を用いて作成を行った。

SPE 上で動作するプログラムからは、プログラムコードも、使用するデータも、すべて LS (ローカルストレージ) の上に置かれている必要がある。なお、LS の容量はそれぞれ 256kB しかないので、本実験の 512×512 の画素の画像データは 256kB の LS 上に搭載することができない。また、転送時間の影響が大きくなるなどの問題点も増える。

そこで、対象部位の輪郭抽出を行うために、物体の初期座標の近傍の領域を予め定めおき、また SPE での SIMD 演算に向けて、画像データが単精度の予めキャストを行う、転送を行った。

Cell は 1 個の制御系プロセッサコア (PPE : Power PC Processor Element) と 8 個の演算系プロセッサコア (SPE : Synergistic Processor Element) からなり、PS3 では、ユーザプログラムから、PPE と 6 個の SPE が使用できる。各コアは 250 GB/sec の EIB (Element Interconnect Bus) で接続されている。動作周波数は 3.2 GHz である。

SPE は 128 ビットの SIMD (Single Instruction / Multiple Data) 演算に対応しており、32 ビットの浮動小数点 (float) 型の場合、同時に 4 つのデータを処理することが可能になっている。そのため、SPE は PPE に比べて高速に計算を行うことができる。また、SPE のローカルメモリは 256 kB である。本研究では、6 個の SPE すべてに計算を割り当て、16 台の PS3 クラスタにおいて、96 (6×16) の計算を並列に実行した。

計算の並列化については、1 つの SPE に 1 組のパラメータでのスネーク曲線の計算を割り当てている。計算開始時に、初期のスネーク曲線と必要となる画像のデータをローカルメモリに書き込み、計算終了後、スネーク曲線のデータを回収する。

3.8 PS3 クラスタを用いた並列処理

複数の PS3 を並列動作させるために、MPI (Message Passing Interface) を用いてプログラミングを行った。開発環境は表 3-4 の通りである。ネットワーク構成は、16 台の PS3 を 1 Gbps の Switching Hub で接続した。開発環境には、Cell B.E. SDK Ver. 3.1 を使用し、SPE のライブラリは、SPE Runtime Management Library Ver.2.2 を使用した。

表 3-4 : Cell プロセッサの開発環境 (宮, 他, Medical Imaging Technology, Vol.31, No.1, pp.72-74)

プラットフォーム	PS3
OS	Linux Fedora 9
コンパイラ	PPU: g++ 4.3.0 SPU: spu-g++ 4.3.0
オプション	-O3 -funroll-loops
MPI	MPICH2

線形補間演算部, ヤコビ法演算部ともに, SIMD (Single Instruction / Multiple Data) 演算を用いて, Snake曲線上の隣り合った 4 点に対して, 高速化を目指した。

今回使用したモデル画像を図 3-5 に示す。実験のパラメータによって同じ初期条件であっても, 収束しない場合や, 誤抽出があることを確認している。

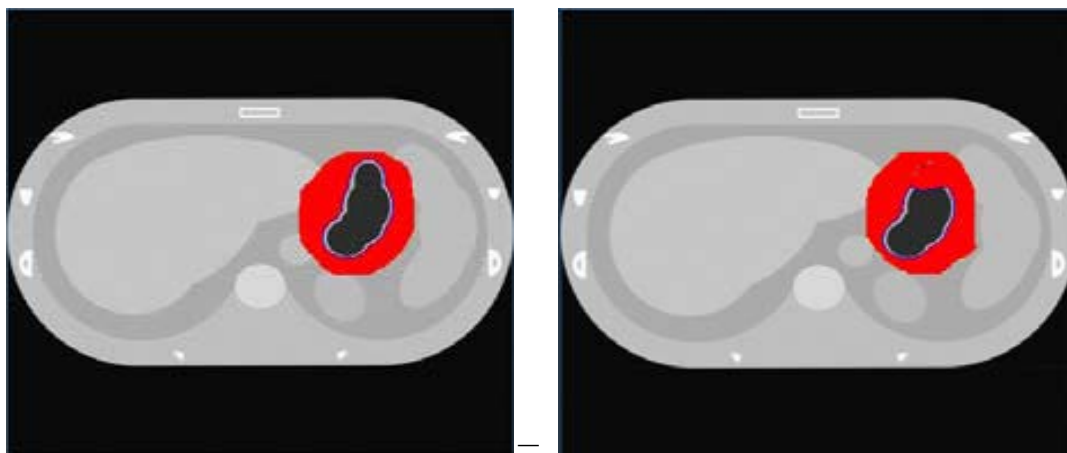


図 3-7 : Snake パラメータの違いによる正抽出 (宮, 他, Medical Imaging Technology,

Vol. 31, No. 1, pp. 72-74)

参考文献

- [1] 石川裕・佐藤三久・堀敦史・住元真司・原田浩・高橋俊行著：“Linux で並列処理をしよう”，共立出版(2002)
- [2] Intel Corporation : <http://www.intel.co.jp/index.htm> (2010年1月現在)
- [3] Wikipedia : <http://ja.wikipedia.org/wiki/> (2010年1月現在)
- [4] 牛島省：“OpenMP による並列化プログラミングと数値計算方”，丸善(2006)
- [5] 浦昭二編：“FORTRAN77 入門”，培風館(1996)
- [6] 大津真，まえだひさこ，向井領治：“Fedora 10 スタートアップバイブル”，毎日コミュニケーションズ(2009)
- [7] 株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント：
“Cell Broadband Engine™ アーキテクチャ バージョン 1.01”
- [8] 株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント：
“Cell Broadband Engine™ アーキテクチャ用 C/C++ 言語拡張 version 2.3”
- [9] 株式会社フィックスターズ著：“OpenCL 入門”，インプレスジャパン(2010)
- [10] Kevin Dowd 著：“High Performance Computing RISC ワークステーションで最高のパフォーマンスを引き出すための方法”
- [11] 塩田紳二，安田絹子，國司光宣，平初，川井義治，古坂大地，青柳信吾，八重樫剛史：“PLAYSTATION 3 Linux 完全攻略ガイド”，インプレスジャパン(2007)
- [12] Sony Computer Entertainment Inc : “Cell Broadband Engine”
<http://cell.scei.co.jp/> (2010年1月現在)
- [13] 千葉大学総合メディア基盤センター：
<http://www.imit.chiba-u.ac.jp/index.html> (2010年1月現在)
- [14] 辻内順平著：“ホログラフィー”，裳華房(1997)
- [15] David A. Patterson, John L. Hennessy : “コンピュータの構成と設計 第2版 上・下巻”，日経 BP 社(1999)
- [16] 中田潤也，北山洋幸：“IA-32 SIMD リファレンスブック(上)，(下)”，カットシステム(2007)
- [17] Sony Computer Entertainment Inc : “Cell Broadband Engine”
<http://cell.scei.co.jp/> (2010年1月現在)

- [18] 千葉大学総合メディア基盤センター：
<http://www.imit.chiba-u.ac.jp/index.html> (2010年1月現在)
- [19] 辻内順平著：“ホログラフィー”，裳華房(1997)
- [20] David A. Patterson, John L. Hennessy：“コンピュータの構成と設計 第2版 上・下巻”，日経BP社(1999)
- [21] 中田潤也，北山洋幸：“IA-32 SIMD リファレンスブック(上)，(下)”，カットシステム(2007)
- [22] P. パチェコ，秋葉博訳：“MPI 並列プログラミング”，培風館(2001)
- [23] 日向俊二著：“独習アセンブラ”，翔泳社(2008)
- [24] 日向俊二，ポチ：“C プログラムの中身がわかる本”，翔泳社(2008)
- [25] Fixstars Corporation：
<http://www.fixstars.com/company/index.html> (2010年1月現在)
- [26] 安田絹子，小林林広，飯塚博道，阿部貴之，青柳信吾：“マルチコア CPU のための並列プログラミング”，秀和システム(2007)
- [27] <http://d.hatena.ne.jp/keyword/Cell>
- [28] 齊藤 智隆 (2006年6月). “Cell と共に歩む (PDF)”. 株式会社東芝. 2009年11月9日閲覧。
- [29] 西川善司の 3D ゲームファンのための PS3 パフォーマンス考察講座, GameWatch, 2006年3月31日
- [30] IBM (2005年11月29日). “Cell Broadband Engine Architecture and its first implementation” (英語). 2012年1月13日閲覧。
- [31] K. Shimizu et al (2007). “Cell Broadband Engine processor vault security architecture”. IBM Journal of Research and Development 51 (5): 521-528. doi:10.1147/rd.515.0521.
- [32] 後藤弘茂の Weekly 海外ニュース - SCEI の PlayStation 3 の心臓「Cell」の正体 -, PC Watch 2003年5月29日
- [33] Cell Broadband Engine 技術資料公開
- [34] 新プロセッサ「SpursEngine™」の開発サンプルを CEATEC JAPAN で初公開, 株式会社 東芝, 2007年9月20日
- [35] Kahle, J. A; M. N. Day, H. P. Hofstee, C. R. Johns, T. R. Maeurer, and D. Shippy (2005). “Introduction to the Cell multiprocessor”. IBM Journal of Research and Development 49 (4): 589-604. doi:10.1147/rd.494.0589 2007年

10月19日閲覧。

- [36] メインメモリに比べ、ローカルストアは高速アクセス可能なため
- [37] 後藤弘茂 (2003年9月9日). “後藤弘茂の Weekly 海外ニュース:PlayStation 3の次は家庭内 Cell コンピューティング”. PC Watch. 2012年7月5日閲覧。
- [38] 東芝及びソニーによる半導体製造設備の譲渡に関する基本合意書の締結について, 東芝ニュースリリース, 2010年12月24日
- [39] 東芝及びソニーによる半導体製造設備の譲渡に関する基本合意書の締結について, ソニーニュースリリース, 2010年12月24日
- [40] 「東芝、半導体改革メド 大分は画像センサー中心 設計・生産、分業時代に」『日本経済新聞』2010年12月24日付日刊、第13版、第9面。
- [41] 高性能半導体の生産合弁会社の概要について, 東芝ニュースリリース, 2008年2月20日
- [42] 高性能半導体の生産合弁会社の概要について, ソニーニュースリリース, 2008年2月20日
- [43] ソニーの裏面照射型 CMOS センサー工場を訪ねる, デジカメ Watch, 2010年3月4日
- [44] ソニー、イメージセンサーの生産能力を倍増, ソニーニュースリリース, 2010年12月27日
- [45] 「東芝、サムスンと提携 先端 LSI 生産委託 投資競争から撤退 メモリー事業に集中」『日本経済新聞』2010年12月24日付日刊、第13版、第1面。
- [46] Transmeta プレスリリース (英語) : Accelerates LongRun2 Adoption for Cell Derivatives; Builds Technology Collaboration in Other Areas
- [47] ソニー、Cell に Transmeta の省電力技術「LongRun2」搭載, PC Watch 2005年4月1日
- [48] PS3 では 7SPE のうち 1SPE は OS が占有するため、アプリケーションが使用可能なのは実質 6SPE となる。
- [49] 22.^ IBM、ロスアラモス国立研究所のペタフロップスパコン計画を落札--情報筋が明らかに, CNET Japan, 2006年9月6日
- [50] “Beyond a Single Cell” . Los Alamos National Laboratory. 2006年10月25日閲覧。
- [51] PLAYSTATION 3 ハードウェアレポート【速報編】, PC Watch, 2006年11月

11 日

- [52] 「フル HD 時代に向け原点に立ち戻った」 --東芝、Cell ベースの新プロセッサを公開
- [53] 日本 IBM. “IBM 高性能プロセッサ「Cell/B.E.」搭載のブレードサーバ新製品”. 2007 年 10 月 20 日閲覧。
- [54] 新型 PS3 ハードウェアレポート ～大幅に縮小された冷却機構, PC Watch, 2007 年 11 月 12 日
- [55] ISSCC に次世代 Cell B.E. 45nm 版が登場 ～6GHz 動作、電力を 30%以上削減, PC Watch 後藤弘茂の Weekly 海外ニュース, 2008 年 2 月 6 日
- [56] フィックスターズ、最新型 Cell/B.E.を搭載したアクセラレータボードを発売
プレスリリース 2008 年 4 月 3 日
- [57] 東芝、Cell テレビや“超解像” テレビ/DVD など計画, AV watch, 2008 年 5 月 8 日
- [58] IBM、Cell ベースのブレード・サーバ「BladeCenter QS22」を発表
Computerworld News (2008 年 05 月 14 日)
- [59] 32.^ IBM みずほ証券へ Cell/B.E.搭載ブレードサーバーを納入 IBM プレス
リリース 2008 年 5 月 27 日
- [60] フィックスターズ、みずほ証券のデリバティブシステムを Cell/B.E.で高速化に
成功 プレスリリース 2008 年 5 月 27 日
- [61] 米エネルギー省、IBM のスパコン「Roadrunner」が 1PFLOPS を達成と発表
- [62] 東芝、SpursEngine 搭載/超解像度変換 AV ノート「Qosmio」, AV watch, 2008
年 6 月 23 日
- [63] 36.^ C R I ・ミドルウェア、東芝 SpursEngine™向けミドルウェアに参入,
CRI ・ミドルウェア プレスリリース, 2008 年 7 月 18 日
- [64] 「SpursEngine」のハード/ソフト開発環境が明らかに, HD Processing
FORUM, 2008 年 8 月 6 日
- [65] 米国市場に向けて Cell/B.E.および RSX®搭載 “ZEGO(ゼゴ)” コンピューティ
ングユニット年内発売, Sony プレスリリース, 2008 年 8 月 13 日
- [66] C R I ・ミドルウェア :「CRI SpursCoder」ダウンロード, CRI ・ミドルウェア,
2008 年 11 月 26 日
- [67] 三菱総合研究所、動産担保融資における在庫データのモニタリングに Cell/B.E.
を活用 プレスリリース 2008 年 12 月 8 日

- [68] フィックスターズ、Cell 活用の H.264 リアルタイムソフトウェアエンコーダ
マイコミジャーナル 2009年2月24日
- [69] 北部九州の研究者は Cell/B.E.を無償で活用 ITmedia エンタープライズニュー
ース 2009年5月22日
- [70] 43.^ 北九州産業学術推進機構、高性能プロセッサ「Cell/B.E.」を用いたシス
テム基盤を研究者に開放 エンタープライズ RBB TODAY 2009年5月22日
- [71] SCEJ、「プレイステーション」戦略発表会で新型 PS3 発表 「機動戦士ガンダ
ム戦記」同梱 BOX は 38,359 円で同時発売, GAME Watch, 2009年8月19日
- [72] 世界初「Cell Broadband Engine™」搭載 高画質液晶テレビ「CELL レグザ
55X1」の発売について ニュースリリース 2009年10月5日
- [73] Air Force To Expand PlayStation-Based Supercomputer InfomationWeek
2009年11月20日
- [74] Cell Broadband Engine/Sony Computer Entertainment Inc.
- [75] アーキテクチャ、モニター、SPE 向けの言語拡張など Cell に関する基本
情報を網羅している。 CELL: A New Platform for Digital Entertainment
- [76] 2005年の Game Developers Conference で Sony Computer Entertainment
US Research and Development が発表したスライド。
- [77] http://ja.wikipedia.org/wiki/Cell_Broadband_Engine
- [78] http://cell.scei.co.jp/index_e.html
- [79] http://kakaku.com/article/pr/09/new_ps3/
- [80] http://ja.wikipedia.org/wiki/Message_Passing_Interface
- [81] <http://www.mpi-forum.org/docs/docs.html>
- [82] http://www.fireproject.jp/pc_cluster/mpi/index.html
- [83] <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpi/>
- [84] <http://pccluster.web.fc2.com/MPI.html>
- [85] <http://www.nslabs.jp/mpi-setup.rhtml>
- [86] http://www.kurobuti.com/linux_server/?page_id=169
- [87] <http://tech.ckme.co.jp/mpi.shtml>
- [88] http://www.softek.co.jp/SPG/Pgi/TIPS/public/general/mpich2_use.html
- [89] <http://www.slideshare.net/HPCMametar/mpi>
- [90] http://www.cc.u-tokyo.ac.jp/support/kosyu/03/kosyu-openmp_c.pdf

[91] <http://www2.cc.kyushu-u.ac.jp/scp/system/library/OpenMP/openmp0109.pdf>

第4章 性能評価

表 3-4 開発環境について，それぞれの高速化手法を用いた際の結果を以下に示す．また，今回結果に用いたデータは Snake 点数 324 点，ヤコビ法反復回数 616 回で収束するデータを用いた．また，抽出対象データとして図 4-1 のようなファントムの画像を用いた．SPE 並列化や PS3 クラスタの演算時間の比較はデータの通信時間などを含めたものである．1SPE を用いて 1 枚の画像を処理するのにかかる時間は 28.55 ms である．

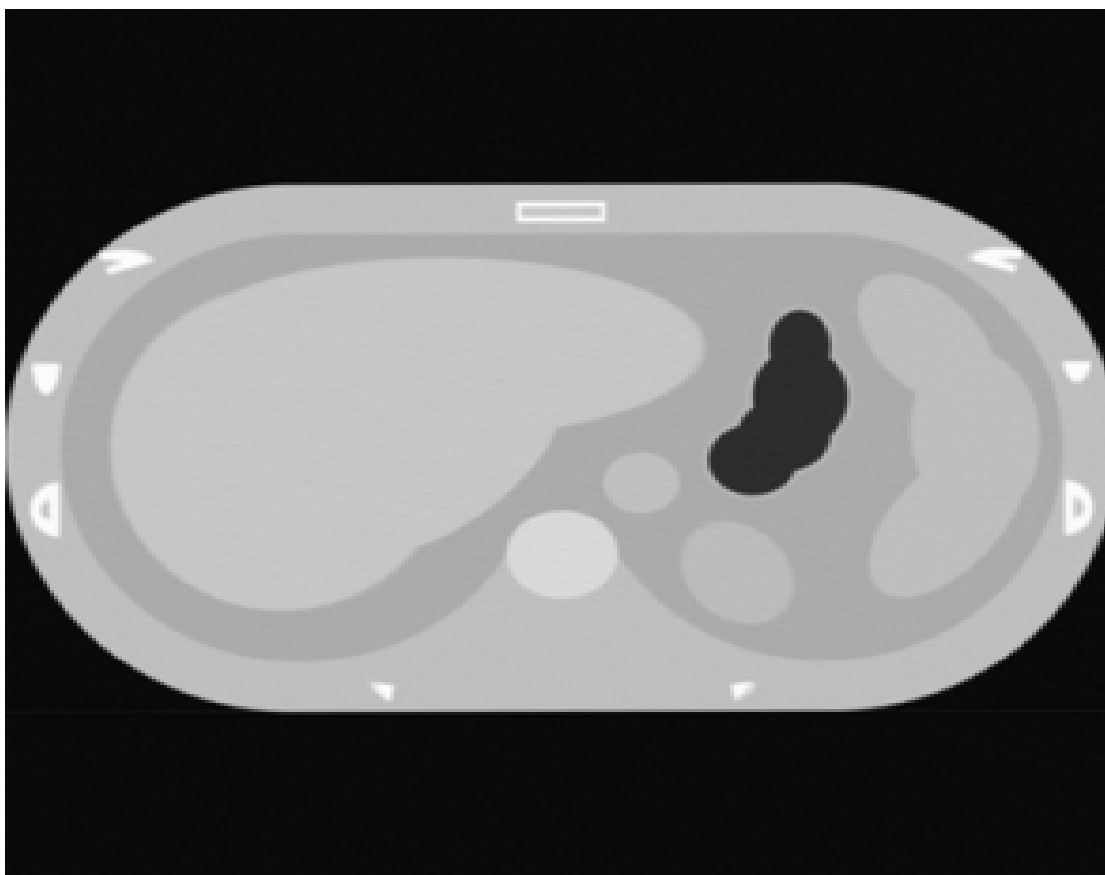


図 4-1: ファントム

4.1 SIMD 演算

ヤコビ法，線形補間演算部に題して SIMD 演算を行った結果を表 4-1 に示す．

SIMD 演算を行うことによって，線形補間演算部が 31.01ms から 4.52ms と約 7 倍の高速化，さらにヤコビ演算部が 20.00ms から 4.44ms と約 4 倍の高速化になった．

表 4-1 : SIMD 演算結果

	PPE のみでの演算	1SPE での SIMD(無)	1SPE でヤコビ法 SIMD	1SPE で線形補間 SIMD
線形補間 (ms)	69.4	31.01	31.01	4.52
ヤコビ法 (ms)	22.3	20.00	4.44	4.44
合計(ms)	91.73	51.01	35.45	8.96

4.2 SPE の並列化

SPE コアを用いた並列化の結果を表 4-2 に示す。それぞれの演算時間は各 6 枚の画像に対して輪郭抽出を行った結果である。

表 4-2 : SPE 並列化演算時間

	1 SPE (6 枚)	2SPE (6 枚)	3 SPE (6 枚)	6 SPE (6 枚)
演算時間(ms)	145.1	79.87	58.45	36.69
高速化率	1	1.81	2.48	3.95

また、SPE 増加に伴う、SPE 起動時に行う SPE コンテキストの作成時間を表 4-3 に、SPE での並列処理に対して行うスレッドの作成時間を表 4-4 に示す。

表 4-3 : SPE コンテキスト作成時間

	1 SPE	2 SPE	3 SPE	4 SPE	5 SPE	6 SPE
Context 作成時間(ms)	0.80	2.11	3.39	4.25	5.38	6.68

表 4-4 : スレッド作成時間

	1 SPE	2 SPE	3 SPE	4 SPE	5 SPE	6 SPE
SPE での実行 時間(ms)	0.13	0.29	0.43	0.59	1.1	1.35

表 4-2 より、演算時間は 1 つの SPE を用いて逐次的に演算を行った 145.1ms から 6 つの SPE を用いて同時に 6 枚の並列演算を行った 36.69ms に約 4 倍高速化になった。

しかし、6 つの SPE を用いての並列処理であるが、6 倍にはならなかった。

これは、表 4-3、表 4-4 を見るとわかる通り、SPE を使う数が増えるにつれ、SPE コンテキスト作成時間、またスレッドの作成時間が増加している。これらの時間を表 4-2 の結果から差し引くと、6 つの SPE を用いた演算時間は 28.66ms と 1 つの SPE を用いて 1 枚の処理を行った 28.55ms をいう結果とほぼ同じになる。今回の演算事体が全体で数十 ms と短いため、SPE の増加と共にこれらの部分の時間も増加するため、これらの時間の影響が大きく、単純に 6 倍とはならなかったと思われる。

4.3 PS3 クラスタ

次に PS3 クラスタを用いた演算時間を示す。SPE での並列化と同様に各ノード数で 16 枚演算を行った結果である。まず、1 つの PS3 で 1 つの SPE のみを用いて演算を行った時間を表 4-5 に示す。

表 4-5 : PS3 クラスタ演算時間

	PS3-1 台	PS3-2 台	PS3-4 台	PS3-8 台	PS3-16 台
演算時間 (ms)	413.73	232.77	141.77	93.38	54.59
高速化率 (倍)	1	1.77	2.92	4.43	7.07

表 4-5 より PS3-1 台での 16 枚の逐次処理の 413.73 ms に比べて PS3-16 台のクラスタを用いた演算時間 54.59 ms と 7.07 倍になった。これは、MPI のデータの転送が 16 台同時に行えるのではなく、ホストコンピュータから各 1 台ずつにしかデータを転送することができないため通信時間の関係で 16 倍にはならないのだと思われる。

また、最後に各 PS3 で SPE 6 つを用いた 96 並列を行った演算時間を表 4-5 に示す。それぞれ 96 枚の演算を行った際の演算時間を行った。

4.4 PS3 と PC の比較

PC との比較、表 3-2 開発環境について、並列化の効率について検証を行った。スネーク点数を 324 点とし、初期条件を 96 通り用意した。反復計算は収束条件によって回数が変わる。実際には、収束する場合、500~1,000 回程度の反復計算になっている。ここでは演算速度を評価するために、収束するしないにかかわらず、反復計算の回数を 1,000 回に固定した。

以下では、96 (初期条件) × 1,000 (反復計算回数) の演算処理に要した総時間 (CPU time) を示す。

同世代の CPU である Intel Pentium 4 (3.2 GHz) では 3.0454 秒であった。

表 4-6 : Cell プロセッサの計算並列高速化比 (宮, 他, Medical Imaging
Technology, Vol. 31, No. 1, pp. 72-74)

SPE コア数(個)	計算時間(sec)	高速化比
1	1.4188	1
6 (PS3-1 台)	0.4034	3.52
96 (PS3-16 台)	0.0465	30.5

Cell クラスタの結果は表 4-6 の通りである. SPE を 1 コアだけ使用した場合, 6 コア (PS3 を 1 台) 使用した場合, 96 コア (PS3 を 16 台) 使用した場合を示した.

SPE (1 コア) で, すでに PC より 2 倍ほど高速になった. 理論性能は, Pentium4 が 12.8 GFlops (単精度) で, SPE (1 コア) が 25.6 GFlops (単精度) であるため, 理論性能比は 2 であり, 実測の比もほぼ近い値となっている.

さらに, 6 コア (1 台の PS3) で PC の 7 倍, 96 コア (16 台の PS3 クラスタ) で 65 倍以上の高速化を記録し, Cell の優位性を示した.

第5章 おわりに

5.1 結言

第二部分の論文で、Cell プロセッサを搭載した PS3 を 16 台クラスタして、スネーク法の高速化を行った。また、96 並列の計算を行い、同時期にリリースされた Intel Pentium4 の PC と比較して 65 倍の高速化を達成した。

5.2 今後の展望

Snake 法の問題点であるパラメータ設定による輪郭抽出精度の向上は、複数のパラメータによる並列処理を行うことで改善が見込めると思われる。しかし、現在正確に抽出できたかどうかの判定は、出力されたファイルに対する目視での確認で行っているため、ノード数を増やすことによって、機械的に判定できるようなシステムの構築を行う予定である。

プロセッサのマルチコア化は急速に進展しており、本研究の結果は今後の医療画像処理システムに貢献できるものと考えている。

全体のまとめ

医療における画像処理の重要性が増している，二部の研究を開発した．

一部は数十万円程度で，実用的な VR システムの開発を行った．ドーム型スクリーンのほとんどに映像を投影することができ，水平方向に 180° ，垂直方向に 180° とまでは投影できなかったが，目標とした水平視野 100° 以上，垂直視野 85° 以上の視覚提示を行うことに成功した．

一般に市販されているドームスクリーン VR システムは，プロジェクタを複数台使用し，映像表現を追求しているため，数百万円～数千万円と高価であり，取り扱いも専門知識が必要である．個人用のエクスポージャー専用システムとして，プロジェクタを 1 つだけ使用したドームスクリーン VR エクスポージャーシステムの開発を試みた．開発費は 20 万円程度であり，取り扱いも容易にすることに成功した．

二部で代表的なマルチコア・プロセッサとしては，グラフィックス・プロセッサ GPU (Graphics Processing Unit) の進展が著しい．ただし，GPU は単純なプロセッサを多数搭載しているという構造から，計算アルゴリズムをパイプライン化（並列化）しやすい処理には有効であるが，同じアルゴリズムを多数同時に計算する並列化には適していない．同じアルゴリズムを多数同時に行うという観点からいえば，パソコン (PC) を複数台用いた PC クラスタに向いているが，価格性能費やシステムサイズにおいて，PS3 クラスタの方が有利である．

パラメータ依存の問題がアルゴリズム的には解決できなくても，計算資源を有効利用することで実用化に寄与できる可能性を示す．PS3 の利点はコストパフォーマンスの高さである．16 台をクラスタ化しても 50 万円程度で，収納サイズもデスクサイドに置ける程度に小さい．結果は，同時期にリリースされた PC (Intel Pentium4 プロセッサ) と比較して 65 倍以上の演算速度を記録した．

最後に，低コスト普及型を指向した医療画像システムを行うことに開発した．

謝辞

本研究を進めるにあたりご多忙な中、終始適切なご指導を頂き、快適な研究環境を揃えて頂いた、千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻伊藤智義教授に深く感謝致します。

VR エクスポージャーについて様々なご助言を頂いた、宮崎大学 安全衛生保健センター清武分室の宮野秀市講師に深く感謝致します。

光学系関連において様々なご助言を頂いた、千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻下馬場朋禄准教授に深く感謝致します。

コンピュータやネットワークなど技術的な面で多岐に渡りご助言を頂き、論文についてもご指導頂いた、長岡技科学大学電気系増田信之准教授に深く感謝致します。

光学系関連で様々なご助言を頂いた、木更津工業高等専門学校情報工学科白木厚司講師に深く感謝致します。

並列コンピューティングや性能比較について様々なご助言を頂いた、高知大学情報理学部高田直樹准教授に深く感謝致します。

ハードウェアの知識や、論文、研究室での様々な業務についてもアドバイスを頂いた、千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻博士課程 3 年の岡田直久様に感謝いたします。

また、研究室を卒業されました多くの先輩方に感謝致します。

一人暮らしを精神的・金銭的に支援して頂いた家族に感謝致します。

皆様のおかげでこの研究室で幸せな学生生活を送ることができました。

本当に、ありがとうございました。

付録

A) 本研究で用いたカメラ

機種・メーカー	Woodman Labs
商品名	Gopro HD
レンズ	魚眼レンズ : GLASS F2.8
本研究で用いた ビデオモード	1280×960 HD モード 170 度アングル 30 fps 12 Mbit/s



B) 本研究で用いたプロジェクター

機種・メーカー	NEC
商品名	ViewLight NP901WJ
画素数	1280×800
明るさ	2000lm
コントラスト比 (全黒/全白)	400 : 1



Cell(PS3)開発環境の構築

HDD の初期化

まず、HDD のフォーマットを行う。ゲーム OS で立ち上がらない場合は、電源投入時に電源ボタンを 5 秒間ほど長押しすることで強制的にゲーム OS が立ち上がる。または、kboot プロンプトで『ps3-boot-game-os (game)』と入力することでゲーム OS を立ち上げることができる。

XMB (クロスメディアバー) の『設定』→『本体設定』→『フォーマットユーティリティー』→『ハードディスクのフォーマット』を選択。

ハードディスクの領域設定で『カスタム』を選択し、今回は他のシステム(Linux)をメインとするので、『PS3 に 10GB を割り当てる』を選択。『クイックフォーマット』を実行後、再起動。

ブートローダのインストール

アドオン CD (20080609) を PS3 に挿入し、XMB の『設定』→『本体設定』→『他のシステムのインストール』を選択。

タイトル /PS3/others/otheros.bld 場所 ディスク という表示が出るので、『開始する』を選択。次に、ブートする優先システムを切り替える。

XMB の『設定』→『本体設定』→『優先起動システム』→『他のシステム』を設定する。その後、再起動をするように求められるので、再起動する。

Fedora のインストール

今回は、Fedora10 をインストールした。

Cell は、PPC (PowerPC) 系のプロセッサなので、Fedora10 の PPC 版の入った DVD を PS3 に挿入し、再起動する。kboot プロンプト画面が表示されたら、プロンプトから『linux noselinux video=720p』と入力する (『=』は初期設定において英字キーボードとして認識されるので、『^ キー』で入力できる)。このコマンドの意味は、SELinux を用いずに、ビデオ出力を 720p でインストールするということである (ビデオモードなどは各環境に合わせる。1080 出力では文字が潰れてしまうので注意が必要である)。SELinux とはセキュアな OS を目指し、セキュリティの強化を行った

ものであるが開発環境としては制約がきつくなり、不具合が生じるケースもあるので、今回は用いない。

メディアテストはスキップ。

Fedora のインストールでは、まず言語の設定で日本語を選ぶ。

キーボードシステムも **Japanese** を選択。

この時点で警告:パーティションテーブルを読み込めません, ドライブの初期化をし, データ消去を求められた場合は、『はい』を選択。

自分で決めたホスト名を入力し, 次へ。

タイムゾーンで東京を選択し, 次へ。

root のパスワードを入力し, 次へ

パーティションの設定など特に変更が無ければ, そのまま次へ。

『変更をディスクに書き込む』を選択。

ソフトウェアセットの選択では, オフィスとプロダクティビティのチェックを外し, ソフトウェア開発と **Web** サーバにチェックを入れ, リポジトリは全てにチェックを入れ, 次へ。途中で, ネットワークインターフェースを有効にする選択肢が出た場合は, 有効にするよう設定。この後, ソフトウェアの整合性や実際にインストールするため時間がかかる。

テキストモードログインへの変更

エディタで `/etc/inittab` 内の `id` を `3` に変更する。 `5` がグラフィカルモード。

GUI(Graphical User Interface)はメモリの少ない PS3 にとって大きな負担となるため, 基本的にはテキストモードで使用する。

Cell SDK のインストール

Cell SDK (Software Development Kit)は, Cell プログラミングで必要となるコンパイラやライブラリを集めたものである。今回は, 最新版の SDK3.1 を導入する。

以下の#マークは `root` 権限でのコマンドとする。

SDK のインストールに必要なパッケージ (`rsync`, `sed`, `tcl`, `wget`) をインストールする。

```
#yum install rsync sed tcl wget
```

ダウンロードしてきた ISO イメージをテンポラリディレクトリへ保存する。

```
#mkdir /tmp/cellsdkiso
```

CellSDK の CD を挿入し、マウントする.

```
#mkdir /mnt/cdrom
```

```
#mount /dev/cdrom /mnt/cdrom
```

```
#cd /mnt/cdrom
```

```
#cp -r CellSDK3.1 /tmp/cellsdkiso/
```

```
#cd /tmp/cellsdkiso/CellSDK3.1
```

RPM を使って、SDK インストーラをインストールする.

```
#rpm -ivh cell-install-3.1.0-0.0.noarch.rpm
```

インストーラを利用して、SDK をインストールする.

```
#cd /opt/cell
```

```
#!/cellsdk --iso /tmp/cellsdkiso install
```

ライセンスなどをよく読んで、内容を承諾するためにコマンド入力

I have read and accept the licenses above [no / yes]:

yes と入力

Press Enter to continue viewing the license agreement, or, Enter “1” to accept the agreement, “2” to decline it or “99” to go back to the previous screen, “3” Print, “4”

Read non-IBM terms.

1 を入力

/etc/yum.conf へ次の 1 行を追加

```
exclude=blas* lapack* numactl* oprofile
```

最後に停止させていた yum update daemon を start させる.

spu_timing のインストール

spu_timing は、spu 用ソースコードの静的解析ツールである。CellSDK-Extras 内にあるので、まずは Extras の iso イメージをマウントする.

```
#mount -o loop CellSDK-Extras-Fedora_3.1.0.0.0.iso /mnt
```

ディレクトリを移動し、実際にインストールする.

```
#cd /mnt/rpms
```

```
#yum localinstall --nogpgcheck cell-spu-timing-3.0-2.ppc.rpm
```

インストール後には

```
#cd /
```

```
#umount /mnt
```

でアンマウントする.

実行ファイルは/opt/cell/sdk/usr/bin/spu_timing にインストールされている.

```
#/opt/cell/sdk/usr/bin/spu_timing --help
```

でマニュアルが表示される.

解析したい SPE プログラムのソースコードが `spe.c` だとすると,

```
#spu-gcc -Wall -O2 -s spe.c
```

```
#/opt/cell/sdk/usr/bin/spu_timing spe.s
```

```
#cat spe.s.timing
```

以上を行うことで、解析結果を見ることができる。この結果からデュアルイシューや命令の実行状況などを判別し、より効率の良いプログラムを組むことができるようになる。

MPI(Message Passing Interface)の環境構築

MPICH2 のインストール

MPICH2の最新版バージョン1.2.1ではヘテロジニアスマルチコアプロセッサのサポートがされていないため、1.0.8を用いてPS3クラスタシステムを構築した。まず、サイト(<http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpich2/>)から目的のバージョンをダウンロードし、解凍する。

```
#tar -xvzf mpich2-1.0.8.tar.gz
```

tar コマンドは圧縮や解凍(展開)をするコマンドで、オプションはそれぞれ、-x(展開)、-v(詳細表示)、-z(gunzip -gz ファイル)、-f(ファイル名指定)である。

続いて、configure を行い、makefile を作成する。

このとき、prefix オプションを用いることによりインストール先を指定できる。

```
#./configure --prefix=/opt/mpich2
```

詳細については、ドキュメントファイルを参考にしながら環境に応じて設定を行う。次に、PATH を設定する。

```
#export PATH=/opt/mpich2/bin:$PATH
```

上記のコマンドをホームディレクトリにある~/.bashrc に書き加えることにより、起動時に自動で設定される。

環境設定

MPI を使用する時の設定ファイル.mpd.conf をホームディレクトリに作り、パーミッションを変更する(root の場合は、/etc/mpd.conf)。

```
#cd $HOME
```

```
#touch .mpd.conf
```

```
#chmod 600 .mpd.conf
```

さらに、この.mpd.conf ファイルに vi エディタ等でシークレットワードを書き加える(例)secretword=itotlabo

これを各ノードのホームディレクトリに置いておく。

コンピュータの一覧を記したファイル mpd.hosts を作成する。

(例)PS3-1.localdomain

— PS3-2.localdomain

— PS3-3.localdomain

— PS3-4.localdomain

以上で準備は整ったので、実際に動作させる。

```
#mpdboot -n 4 -f mpd.hosts
```

mpdboot では mpd デーモンを起動する。-n で台数を、-f でホスト名を記したファイルを指定する。デーモンがきちんと動作しているか確認するためには

```
#mpdtrace
```

それぞれのホスト名が表示されればインストール及び、動作の確認完了である。

実際にプログラムを動かす際には、

```
#mpiexec -n [並列数] プログラムのフルパス
```

で並列数を変えて実行することができる。

最後に

```
#mpdallexit
```

を入力し、各ノードのデーモンを終了させる。

ssh パスワードなしでのログイン

MPICH2 では、SSH を用いて認証を行うので毎回、パスワードを入力する必要がある。

そこで RSA を用いてパスワードなしのログインを導入した。

```
#ssh-keygen
```

と入力し、パスワード欄は空欄で Enter。公開キーをリモートホストにコピー。

```
#scp ~/.ssh/identity.pub name@remort.host:/home/name/
```

続いてリモートホストにログインし、authorized_keys ファイルを生成。

```
#ssh name@remort.host
```

```
#cd .ssh/
```

```
#touch authorized_keys
```

```
#chmod 600 authorized_keys
```

```
#cat ~/identity.pub >> authorized_keys
```

```
#rm ~/identity.pub
```

以上で ssh パスワードなしのログインが可能となる。

業績リスト

査読付論文

1. 宮兆喆, 大島哲平, 宮野秀一, 増田信之, 関根正樹, 伊藤智義, "高所恐怖症克服支援を目的とする簡易な背面投影ドームスクリーン VR システムの試作", ライフサポート学会(The Society of Life Support Engineering), ライフサポート, Vol.24-No.4, P 194-200 (2012)
2. 宮兆喆, 岡田直久, 増田信之, 伊藤智義, "Cell プロセッサを用いた並列処理によるスネーク法", 日本医用画像工学会(MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY) Vol.31 No.1 January 2013
3. 高田直樹, 滝沢努, 宮兆喆, 増田信之, 伊藤智義, 下馬場朋禄, "統合型シェーダを搭載した GPU による 2 次元 FDTD 法差分計算の高速化", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J91-D, No.10, pp.2562-2564, 2008

国際会議

1. Gong Zhaozhe, Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito , “Prototype System of Digital Holographic Microscopy Observable in Multi-view and Multi-resolution” The 15th MICROOPTICS CONFERENCE (MOC'09) , J-97, October 27, Tokyo (2009)

口頭発表

1. 伊藤智義研究室(代表：宮兆喆，市橋保之，伊藤智義)， “GPU を用いたリアルタイム電子ホログラフィ再生”， 第 16 回大学ホログラフィ展， 日本大学生産工学部(2009)
2. 宮兆喆， 増田信之， 伊藤智義， 高田直樹， “FDTD 法専用計算機の研究，” 平成 20 年度第 6 回情報処理学会東北支部研究会， C-3-4， 2009.

受賞

1. Speed-up of Computer Generated Hologram Using Cell Broad Engine 千葉大学 工学研究科博士課程 1 年宮 兆喆 (Gong Zhao Zhe) 中国 (2009) KDDI 財団は、日本国内の大学院正規課程において情報通信関連の研究を進める外国人留学生の奨学金.
2. 日揮・実吉奨学会奨学金 (2010)