

博士学位論文

4次元光線再生方式ディスプレイに関する  
理論的検討とその応用

2008 年 12 月

指導教員 苗村 健 准教授

東京大学大学院情報理工学系研究科

電子情報学専攻 67403

小池 崇文

# Abstract

---

In recent year, high-performance image displays are available with the progress in image media technologies. Evolution of displays, which begins in high-resolution, is achieving wide color space, high dynamic range, and high frame rate, thus contents can't keep up with the evolution of displays. This fact was caused by the digitization in many of display technologies, and we think this situation will continue for a while. Meanwhile, if we think image displays as devices to reproduce light ray, we can easily understand there are five parameters to describe any light ray. Three parameters show positions and other two parameters show directions. Thus, if we can reproduce light ray with 5-D, we can display correct light fields into real space, and it will be an ultimate display. For example, integral photography (IP) is well known as autostereoscopic display, and it also one of light field display, which can reproduce 4-D light fields. In recent years, several light field displays have been developed toward ultimate displays. Autostereoscopic images with reality are counted on in the near future.

In this paper, we focus attention on 4-D light field displays to realize 5-D light filed displays in the future. The objective of this paper is quantification of light field displays. The goal of this paper is to propose comprehensive framework to describe whole 4-D light field displays, and theoretically analyze 4-D light field displays. Another goal of this paper is to propose design and implementation methods for light field displays based on above analysis. Indeed, we propose a novel display, which is richly expressive beyond conventional displays as novel applications. To achieve these goals, we treat 4-D light field display technologies as optics and computer graphics and signal processing.

One of the main contributions of this paper is a study of theoretical analysis of light field displays. I propose comprehensive framework of light field displays using image-based rendering in computer graphics and point-spread function in optics. In real space, it's not sufficient to consider light ray have simple line without width, so this paper introduces point-spread function to the theory for describing correct light ray with width. By using the theory, we can apply many of image-based rendering techniques to analyze light field displays. Next, this paper analyzes light field displays in a ray space and its frequency domain and a ray density space, and we show relations in real parameter of light displays. There are many kinds of light field display methods, so it is very difficult to compare each method. By the proposed theory and

its analysis, we can compare these light field displays.

Another important contributions of this paper are design and application based on the theory. Generally, samplings by a discrete pixel layout and a lens array cause moire. We can analyze moire of light field displays in ray space, and we have implemented an IP display with moire reductions and increased number of rays. Indeed, I propose and implement a bi-directional reflectance distribution function (BRDF) display as an application of 4-D light field display. BRDF representation needs 4-D light fields same as several 3-D displays need; we can design the 4-D light field display specialized for BRDF representation when we don't represent depth of images. Thus, the BRDF display can display realistic image with unreality; the BRDF display is one of the ultra-realistic displays beyond realistic displays.

The methods proposed in this paper realize technologies, which treat light ray in real space as information theory, and will be more refined and applied for comprehensive framework for light field displays and autostereoscopic displays. The theoretical studies in this paper try to approach to the problem of displaying visual information into real space with reality from the three technical fields, computer graphics, optics, and signal processing, beyond their boundaries. This approach will be expected for what will happen when we can control light ray with perfect freedom. I hope this approach indicates the way to a new research field of displays, in which researches in related areas would be compared, related and integrated with each other.

# 目次

---

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 本研究の目的	2
1.2 本論文の構成	3
<b>第 2 章 研究の背景</b>	<b>6</b>
2.1 はじめに	7
2.2 光線情報	7
2.2.1 光線情報の記述方式	8
2.2.2 光線情報の生成技術	8
2.2.3 光線情報の解析技術	8
2.3 光学	10
2.3.1 光学素子の動向	10
2.3.2 光学系の全体最適化	15
2.3.3 まとめ	15
2.4 立体ディスプレイ	16
2.4.1 3次元光線情報再生	16
2.4.2 4次元光線再生方式	22
2.4.3 5次元光線再生方式	25
2.5 本研究の位置づけ	25
<b>参考文献</b>	<b>26</b>
<b>第 3 章 点像分布関数を導入した光線空間理論</b>	<b>31</b>
3.1 はじめに	32
3.2 光線空間と光線情報	32
3.3 光線再生方式ディスプレイとしての立体ディスプレイの分類	33
3.3.1 3次元光線情報再生ディスプレイ	33
3.3.2 4次元光線情報再生ディスプレイ	34
3.3.3 5次元光線情報再生ディスプレイ	34
3.4 光線情報記法	34

3.5	点像分布関数を用いた光線情報の定式化	35
3.6	提案手法による解析	36
3.6.1	光線空間領域での解析	36
3.6.2	周波数領域における解析	40
3.7	提案手法の応用	41
3.7.1	3次元像の見え方シミュレーション	42
3.7.2	光線再生方式ディスプレイの性能定量化	43
3.7.3	光線再生方式ディスプレイの解析方法	43
3.8	むすび	44
<b>参考文献</b>		<b>45</b>
<b>第4章 光線空間理論を用いた IP ディスプレイの解析</b>		<b>46</b>
4.1	はじめに	47
4.2	光線空間での解析	47
4.2.1	IP ディスプレイのモアレ解析	47
4.2.2	IP ディスプレイの視域の改善	47
4.3	周波数領域での解析	49
4.3.1	飛び出し量の解析	49
4.3.2	IP ディスプレイに要求されるレンズ性能	50
4.3.3	新しい映像表現の可能性	50
4.4	光線密度での解析	51
4.4.1	はじめに	51
4.4.2	3D/BRDF/HDR 表示の原理	52
4.4.3	3D/BRDF/HDR 表示条件の検討	52
4.4.4	まとめと今後の課題	55
4.5	むすび	56
<b>参考文献</b>		<b>57</b>
<b>第5章 モアレ削減と光線数増加を行った IP ディスプレイの検討と実装</b>		<b>58</b>
5.1	はじめに	59
5.2	IP ディスプレイの設計	59
5.2.1	IP ディスプレイの情報量	59
5.2.2	IP ディスプレイの設計指針	60
5.3	カラーフィルタ配置を変更した IP ディスプレイ	60
5.3.1	はじめに	60

5.3.2	モアレの低減	61
5.3.3	設計方針とトレードオフ	64
5.3.4	実装と評価	70
5.3.5	まとめ	74
5.4	フィールドシーケンシャルカラー方式液晶パネルを用いた IP ディスプレイ	75
5.4.1	はじめに	75
5.4.2	既存手法の問題点	76
5.4.3	提案手法	77
5.4.4	実装	79
5.4.5	実験	80
5.4.6	まとめ	82
5.5	むすび	83
<b>参考文献</b>		<b>87</b>
5.6	付録	89
5.6.1	レンズアレイ	89
5.6.2	レンズアレイの製造方法	89
5.6.3	印刷方式レンズアレイ	89
5.6.4	スクリーン印刷方式	90
5.6.5	スクリーン印刷方式のレンズアレイにおける泡の取り扱いについて	92
5.6.6	まとめ	94
<b>第 6 章 IP ディスプレイを用いた新しい光線再生方式ディスプレイの検討と実装</b>		<b>95</b>
6.1	はじめに	96
6.2	準備	97
6.2.1	座標系	97
6.2.2	BRDF 表示の原理	98
6.2.3	IP ディスプレイの光線空間と周波数空間	98
6.3	解析	99
6.3.1	解析手順	99
6.3.2	光線空間での解析	100
6.3.3	周波数領域での解析	101
6.3.4	一次微分を用いた解析	102
6.4	設計とアルゴリズム	102
6.4.1	BRDF ディスプレイの設計	102
6.4.2	BRDF 映像の生成アルゴリズム	103

6.5	実装	105
6.5.1	表示装置	105
6.5.2	入力装置	106
6.6	実験	106
6.6.1	周波数領域に関する実験	106
6.6.2	見え方に関する実験	107
6.7	むすび	108
<b>参考文献</b>		<b>110</b>
<b>第7章 結論</b>		<b>112</b>
7.1	本研究の成果	113
7.1.1	光線再生方式ディスプレイを記述する理論の提案	113
7.1.2	提案理論による立体ディスプレイの理論解析	113
7.1.3	光線再生方式ディスプレイのデザインと実装	113
7.1.4	光線再生方式ディスプレイの応用	114
7.2	今後の展望と課題	114
7.2.1	提案理論の拡張	114
7.2.2	提案理論の実光線再生方式ディスプレイへの適用	115
7.2.3	光線再生方式ディスプレイの設計最適化	115
7.2.4	4次元から8次元へ	115
7.2.5	デバイス技術	116
7.2.6	実用面・産業面での課題	116
<b>参考文献</b>		<b>117</b>
<b>発表文献</b>		<b>118</b>
研究論文(査読付き論文)		118
国際会議論文		118
国内会議論文		120
書籍		121
<b>謝辞</b>		<b>122</b>

# 目次

---

1.1	本論文の構成	4
2.1	光線情報の表記法	9
2.2	DMD 外観 (文献 [15] より引用)	11
2.3	DMD の構造 (文献 [15] より引用)	11
2.4	DMD の内部構造 (文献 [15] より引用)	12
2.5	DLP プロジェクタ (文献 [15] より引用)	13
2.6	Varioptic レンズの原理 (文献 [26] より引用)	14
2.7	Origamo lens の構造 (文献 [31] より引用)	16
2.8	スキャンバックライトを用いた 2 眼方式の原理	17
2.9	指向性反射スクリーンを用いたプロジェクション方式裸眼立体ディスプレイの原理	17
2.10	Depth Fused 3D の原理 (文献 [43] より引用)	19
2.11	Seelinder の原理 (文献 [45] より引用)	19
2.12	DMD と回転ミラーを用いた 360 度ディスプレイ (文献 [48] より引用)	20
2.13	DMD と回転ミラーを用いた 360 度ディスプレイの見え方 (文献 [48] より引用)	20
2.14	レーザープラズマ方式自由空間点群ディスプレイの原理 (文献 [52] より引用)	21
2.15	インテグラルフォトグラフィの原理	22
2.16	カメラプレーン 表記 (文献 [11] より引用)	22
2.17	マルチプロジェクタを用いたインテグラルフォトグラフィシステム	23
2.18	6D 再生 (文献 [59] より引用)	23
2.19	ホログラフィの原理	24
3.1	光線情報再生の観点から行った立体ディスプレイの分類	33
3.2	光線情報の表記法	35
3.3	PDP と 2PP 座標系の幾何学的関係	37
3.4	MV ディスプレイの $(s, z)$ における光線サンプリング	38
3.5	IP ディスプレイの $(s, z)$ における光線サンプリング	38
3.6	$(s, u)$ におけるサンプリング点の分布	39
3.7	$(s, u')$ におけるサンプリング点の分布	39
3.8	周波数領域における帯域分布	40



3.9 コリメート光と集光の光線追跡結果 . . . . .	41
3.10 奥行き ( $z$ ) に対する限界周波数 ( $\mu/\pi$ ) の変化 . . . . .	41
3.11 IP ディスプレイの見え方シミュレーション結果 . . . . .	42
4.1 光線空間でのモアレの解析 . . . . .	48
4.2 レンズの内寄せ効果 . . . . .	48
4.3 Inward move of lenses. . . . .	48
4.4 IV ディスプレイの表示周波数領域 . . . . .	49
4.5 ディスプレイの設計 . . . . .	50
4.6 非ランバートシーンのフーリエ変換 . . . . .	51
4.7 IP ディスプレイを用いた 3D/BRDF/HDR 表示の原理 . . . . .	53
4.8 3D/BRDF/HDR 表示の必要条件 . . . . .	54
5.1 インテグラルフォトグラフィの原理 . . . . .	61
5.2 液晶パネルの画素構造 . . . . .	62
5.3 液晶パネルとレンズアレイによるモアレの発生 . . . . .	63
5.4 色モアレを防ぐカラーフィルタとレンズ配置 . . . . .	64
5.5 1 レンズの再生する光線の領域 . . . . .	66
5.6 IV ディスプレイの映像表示領域 . . . . .	67
5.7 最大映像表示領域 . . . . .	67
5.8 提案カラーフィルタ配置とレンズ配置 . . . . .	68
5.9 裸眼立体視ディスプレイ比較図 . . . . .	70
5.10 運動視差 . . . . .	71
5.11 色モアレの比較 . . . . .	72
5.12 輝度モアレの残存エネルギー . . . . .	73
5.13 デフォーカスによる輝度モアレ削減 . . . . .	74
5.14 IV の原理図 . . . . .	75
5.15 既存 IV ディスプレイにおける擬色の例 . . . . .	76
5.16 FSC の原理 . . . . .	78
5.17 IV ディスプレイの周波数特性 . . . . .	79
5.18 5 インチ FSC IV ディスプレイの要素画像形状 . . . . .	80
5.19 4.5 インチ HD-FSC IV ディスプレイの要素画像形状 . . . . .	80
5.20 CCF 方式と FSC 方式の比較 . . . . .	81
5.21 5 インチ FSC と 4.5 インチ HD-FSC 方式の比較 . . . . .	85
5.22 スクリーン印刷で製造したレンズアレイの拡大写真 . . . . .	90
5.23 印刷条件が悪い場合のレンズアレイ . . . . .	92

5.24	気泡が混入した状態のレンズアレイ . . . . .	93
5.25	気泡が抜けた状態のレンズアレイ . . . . .	93
6.1	光線情報表記方法 . . . . .	97
6.2	$u$ と $\theta$ の関係 . . . . .	98
6.3	IP ディスプレイの原理 . . . . .	99
6.4	IP ディスプレイが表示可能な光線空間とその周波数領域 . . . . .	99
6.5	光線空間における平行光源と点光源 . . . . .	100
6.6	点光源の光線空間とその周波数領域における解析 . . . . .	101
6.7	BRDF IP 画像の生成方法 . . . . .	104
6.8	カメラを用いた光の取得装置 . . . . .	106
6.9	XZ ステージ外観写真 . . . . .	107
6.10	BRDF ディスプレイの計測方向 . . . . .	108
6.11	視点位置による見え方の変化 . . . . .	109

# 表目次

---

2.1	光学デバイスの定性的比較 . . . . .	10
3.1	立体ディスプレイの仕様 . . . . .	37
5.1	液晶パネルの仕様 . . . . .	69
5.2	カラーフィルタ配置を変更した IV ディスプレイの仕様 . . . . .	69
5.3	通常のカラーフィルタ配置と提案カラーフィルタ配置を用いた IV ディスプレイの 比較 . . . . .	71
5.4	FSC 液晶を用いた IV ディスプレイの仕様 . . . . .	84
5.5	IV ディスプレイ間の比較結果 . . . . .	86
6.1	BRDF ディスプレイの仕様 . . . . .	105

# 第1章

---

## 序論

## 1.1 本研究の目的

近年、映像メディア技術の発達により、高性能な映像ディスプレイが登場しつつある。高解像度化に始まった、ディスプレイの進化は、広色域、広ダイナミックレンジ、高フレームレートを実現しつつあり、コンテンツがこうしたディスプレイの進化に追いつかないほどである。この事実は、ディスプレイを支える技術の大部分がデジタル化されることによってもたらされた結果であり、今後もこうした状況がしばらく続くと考えられる。一方、映像ディスプレイを、光線を再生する装置であると考えた時に、任意の光線を記述するためには、3次元の位置と2次元の方向を表す5次元のパラメータが必要である。つまり5次元の光線情報が再生出来れば、実空間における光の正確な再現が可能となり、究極のディスプレイが実現すると言える。光線情報のうち、特に、4次元光線情報を再生するディスプレイとしては、例えば、立体ディスプレイの原理としてもよく知られている写真技術のインテグラルフォトグラフィ (Integral Photography: IP) を用いたものがある。近年では、この、究極のディスプレイを目指して、光線情報を再生するディスプレイである光線再生方式ディスプレイ (light field display) に関して様々な研究がすすめられており、近い将来には、あたかも、そこに実物体が存在するかのような、リアリティあふれる立体映像の実現が期待される。しかしながら、多種多様な光線再生方式ディスプレイや立体ディスプレイが存在するため、それらの比較は難しい問題であり、その理論基盤の欠如から、比較のための定量化も困難であった。よって、実際に比較を行うための理論的解析手法が必要とされてきた。こうした手法は、方式間の比較だけでなく、より高性能な光線再生方式ディスプレイを実現するためにも必要である。

そこで、本論文では、究極の5次元光線再生方式ディスプレイの実現を未来の目標とするために、4次元光線再生方式ディスプレイに着目する。本論文の目的は、光線再生方式ディスプレイの定量化にある。本論文の目標は、4次元光線再生方式ディスプレイを記述する理論を提案し、その解析を行うことによって、定量化を行うことである。本論文のもう一つの目標は、解析に基づき、より優れた光線再生方式ディスプレイをデザインし、実装まで結び付けることである。さらに応用として、既存のディスプレイを超えた表現能力を持つ、新しいディスプレイの提案も挙げる。目標を達成するために、光学、コンピュータグラフィクス、信号処理の3分野の横断的技術として、光線再生方式ディスプレイ技術を捉える。

本論文の主たる成果の一つは、光線再生方式ディスプレイの理論的検討である。コンピュータグラフィクスの一技術である自由視点映像合成技術と信号処理の融合である光線情報の理論に、光学における点像分布関数の考え方を導入し、光線再生方式ディスプレイを記述する理論を提案する。実空間では、光を単純な(幅を持たない)光線と考えるだけでは不十分であり、光を広がりのあるものとして扱うために、点像分布関数を導入する。これにより、自由視点映像合成で行われてきた様々な技術が光線再生方式ディスプレイの研究に適用可能となり、光線再生方式ディスプレイの解析が可能となる。提案理論に基づく解析は、光線空間、その周波数空間、および光線密度空間などの様々なパラメータ空間において行い、実際の光線再生方式ディスプレイにおける

種々の物理量との関係を明らかにする。従来、光線再生方式ディスプレイは、非常に多くの原理が存在し、異なる方式間の比較は困難であった。提案理論と解析により、種々の光線再生方式ディスプレイの定量化と比較を可能とするための試みである。

本論文のもう一つの重要な成果は、提案理論に基づいた、光線再生方式ディスプレイの設計、実装、及び応用技術である。離散的な画素構造を持つデジタルディスプレイとレンズアレイ系を組み合わせた場合には、複数のサンプリングが行われているため、必ず、何らかのモアレが発生する。光線再生方式ディスプレイのモアレは、光線空間で解析を行うことが可能であり、モアレを削減し光線数を向上させた IP ディスプレイを実装した。続いて、4次元光線再生方式ディスプレイの応用として、IP を用いた BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) 表示ディスプレイの提案と実装を行った。BRDF 表示は、立体表示と同じく 4次元光線情報を必要とするが、奥行き表示は行わずに、質感の再生に特化した設計が可能である。つまり、現実には存在しえないが、現実感あふれる映像表示が可能なディスプレイが実現でき、現実感を含む臨場感を越えた、超臨場感ディスプレイの一つであるとも考えられる。

本論文で提案する理論とその解析手法は、実世界での光線を情報理論として扱うものであり、光線再生方式ディスプレイ、ひいては立体ディスプレイ全般の基盤理論として、今後、発展することが期待できる。また、本論文の理論的検討は、仮想世界を含むデジタル情報を、実世界にリアリティを持った視覚情報として提示する問題に対し、コンピュータグラフィクス、光学、および信号処理という三つの学問分野の境界を越えたアプローチを試みるものであり、光を自由自在に制御できた場合何ができるかの予想に結びつくことが期待される。このアプローチは、関連分野の研究が相互に刺激され、関連づけられ、統合され、ディスプレイの新たな研究分野と産業の確立への道筋を示すものになることが期待される。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

### 第 1 章：序論

### 第 2 章：研究の背景

### 第 3 章：点像分布関数を導入した光線空間理論

### 第 4 章：光線空間理論を用いた IP ディスプレイの解析

### 第 5 章：モアレ削減と光線数増加を行った IP ディスプレイの検討と実装

### 第 6 章：IP ディスプレイを用いた新しい光線再生方式ディスプレイの検討と実装

### 第 7 章：結論

図 1.1 は、各章の関係を示したものである。以下、本報告の流れを簡単に説明する。

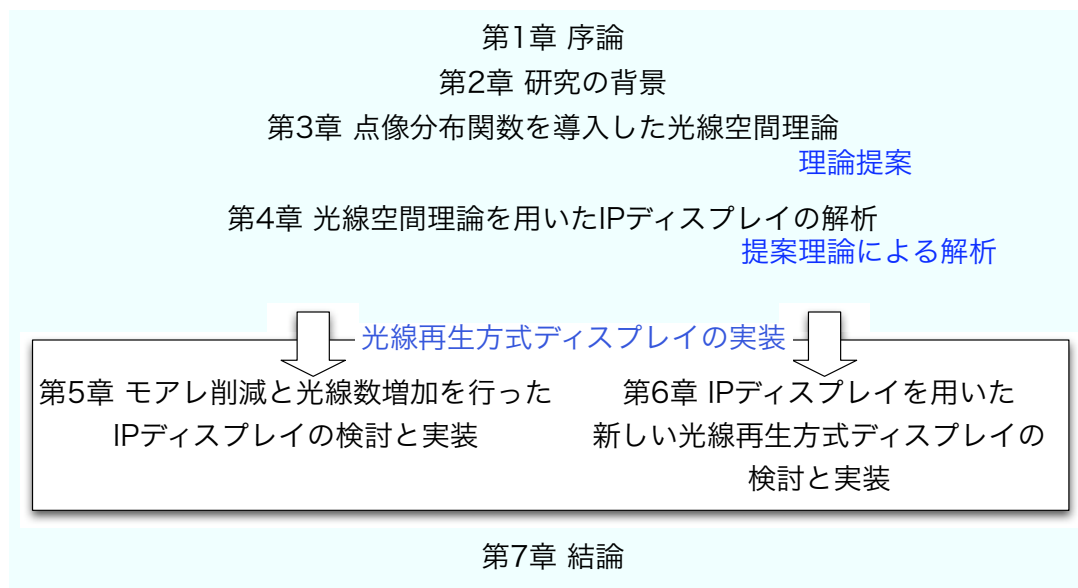


図 1.1: 本論文の構成

第2章では、本研究の背景について述べる。本報告の主題である4次元光線再生方式ディスプレイについて、以下の3つの観点から関連研究を紹介する。1) 光線情報処理, 2) 光学, および 3) 立体ディスプレイ。

第3章では、光線情報の次元の観点から立体ディスプレイを分類し、光線再生方式ディスプレイを定量的に記述するために、点像分布関数を用いた光線理論の提案を行う。

第4章では、第3章で提案した理論に基づいて、代表的な4次元光線再生方式ディスプレイである、integral photography (IP) ディスプレイの解析を行う。実際に、光線空間、その周波数空間、光線密度空間といった、各種の情報空間で多面的な解析を行う。こうした解析によって、直感的に分かりにくい光線再生方式ディスプレイの定量化を試みる。

第5章では、第4章で得られたモアレ解析結果を基に、モアレを削減し、光線数増加を行ったIPディスプレイの実装を行う。液晶パネルとレンズアレイを用いた実装を念頭におき、設計と実装を行った。第4章のモアレ解析からは、視距離や視点位置が自由である場合には、モアレ削減が非常に難しいことが得られるが、液晶パネルのカラーフィルタ配置を変更することにより、原理的に色モアレが発生しない方法を提案している。さらに、フィールドシーケンシャル液晶を用いることより、こちらも原理的に色モアレが発生しない方法の提案も行った。

第6章では、第4章で得られた新しい映像表現の可能性に注目し、4次元空間に拡張した立体ディスプレイの概念をさらに拡張し、4次元光線空間を超えた次元表現を持つ、IPディスプレイを用いた新しい光線再生方式ディスプレイとしてBRDFディスプレイの提案と実装を行う。BRDFは、実際には6次元の関数であり、2次元の位置成分と2次元の方向成分からなる4次元の光線情報再生に加えて、入力光線を表す2次元の方向成分を必要とするため、厳密な実装は困難であ

る。しかしながら，本論文では，BRDF 表示の可能性を世界で初めて示し，実際にその新しさを示すための設計と実装を行った。本章で提案・実装するディスプレイは，本当の質感が再生可能な，今までにないディスプレイである。

第7章では，本研究の成果をまとめるとともに，今後の課題と展望にふれ，全体の結論とする。



## 第2章

---

# 研究の背景

## 2.1 はじめに

本論文では、光線再生方式の立体ディスプレイの理論と設計、応用を確立することを目標とする。光線再生ディスプレイの目標は、実空間に光線を正しく再生することで、それはコンピュータグラフィックスが2次元ディスプレイ上で目指してきた実写的な映像生成を、実空間で実現することが目標である。様々な立体ディスプレイが提案されているが、これらを扱うための理論は提案されていない。また、実際に設計するには、適切な光学素子の選択し、適切な設計を行う必要がある。さらに、光線情報の本質を理解することによって、光線再生方式ディスプレイの立体ディスプレイ以外への応用を示ことも目標の一つである。

本章では、このような研究の背景について、下記の三つの観点からまとめる。まず、2.2 では、本論文における理論面での研究背景として、物理的な空間を満たす実際の光を情報理論で扱うための光線情報を扱う。2.3 では、本論文における設計面での研究背景として光学を扱う。実現可能な立体ディスプレイを設計するためには、デバイスの特性や限界について良く知っておく必要がある。2.4 では、本論文における応用面での研究背景として、立体ディスプレイとその応用について扱う。3章で行う、表現次元に基づいた分類を用いて関連研究を整理する。2.5 では本章を締めくくる。

## 2.2 光線情報

幾何光学の範疇で光の物理空間を考えた場合に、光線場は5次元パラメータ空間として記述可能である。位置3次元と方向2次元の5次元を表すパラメータがあれば良い。実際に、コンピュータグラフィックス分野では、2次元、3次元、4次元、5次元での研究が行われており、Zhang らによりまとめられている [1]。例えば、2次元は、既存の2次元ディスプレイを指し、今までコンピュータグラフィックスが対象としてきた分野である。

この中で、光線場を4次元で記述する研究は、通信分野での三次元画像通信と、コンピュータグラフィックスにおける自由視点映像合成がある。三次元画像通信は、原島は「三次元次元統合画像通信」なる枠組みを提案しており[2]、藤井によって基礎検討され [3]、苗村らによって実装されている [4]。

一方で、コンピュータグラフィックスの一分野である、自由視点映像合成技術 (Image-Based Rendering, 以下 IBR) の研究の過程において、光線空間の表記の一つとして、4D light field が提案されている [5, 6]。4D light field は、IBR 研究だけにとらわれず、コンピュータビジョンの研究や、CG における光線輸送問題の研究で用いられている。実際に、高橋によって、IBR とコンピュータビジョンとの融合が試みられている [7]。しかし、近年、light field 技術の本質は、光の情報を扱う次元を高めることにより、高次信号処理として扱えることである、ということが理解されてきた。Light field は、光線情報を扱う情報処理技術であるので、裸眼立体視ディスプレイを light field の再生装置としてとらえることにより、画像の取得から生成、再生までを一つの理

論的な枠組みで取り組むことが可能であると期待できる。

### 2.2.1 光線情報の記述方式

Camahort ら [8] が, Light field の記述方式について整理し分類をしている. Camahort の分類を参考にしつつ, 本稿での後の説明に必要となる記述方式である, 3 種類について簡単に記す.

#### 1. 2 平面方式 (two-plane parameterization, 以下 2PP)

元々の Light field の記述方式で, 2 つの平面 ( $(s, t)$  面と  $(u, v)$  面) を通る光線を, 光線と平面とが交わる座標で記述する方式 (図 2.1(a)).

#### 2. 平面と方向 (plane and direction parameterization, 以下 PDP)

平面の座標毎に方向座標が付随する記述方式で,  $(s, t)$  面からの方向  $(u, v)$  で表現する (図 2.1(b)).

#### 3. 円柱面と方向方式 (cylinder and direction parameterization, 以下 CDP)

円柱面と, その座標毎に方向座標が付随する記述方式で,  $(s, \theta)$  面からの方向  $(u, v)$  で表現する (図 2.1(c)).

全ての記述方式は, その記述方法の違いであって, 光線情報を 4 次元で記録していることに相違は無い. 以下で, 裸眼立体視ディスプレイを分類する際には, 各方式と, その座標の自由度を同時に表記することにより行う. 例えば, 2PP  $(u, v, s, 0)$  と表記した場合には,  $t$  座標の自由度 (取りうる値) は 0 (つまり, 定数) であるとする.

### 2.2.2 光線情報の生成技術

Light field の生成技術は, イメージベース技術として利用されることが多かったが, Global Illumination を考慮した Light field 生成することにより, 立体ディスプレイのシミュレーションが可能であることが容易に想像できる. 今まで, Global Illumination 技術と, Light field 技術は, Computer Graphics の別分野として発展してきたが, Global Illumination の Light Transport の周波数解析を Light field 空間で行う研究を, Durand ら [9] が行った. こうした研究により, 実写から Light field を生成するだけでなく, フォトリアルな Light field を効率よく生成することが可能になると予想される.

その他の応用技術としては, 実空間と仮想空間の 4 次元光線情報を重ねあわせる技術として, Cossairt らによって, Light Field Transfer [10] が提案されている.

### 2.2.3 光線情報の解析技術

光線情報は, Isaksen ら [11] によって, 光線情報と焦点調整の関係が示され, Chai らによって, 光線情報のサンプリング理論である Plenoptic Sampling が提案されている [12]. Plenoptic Sampling は, IBR で任意の飛び出し量を実現するために必要な多視点画像についての理論であ

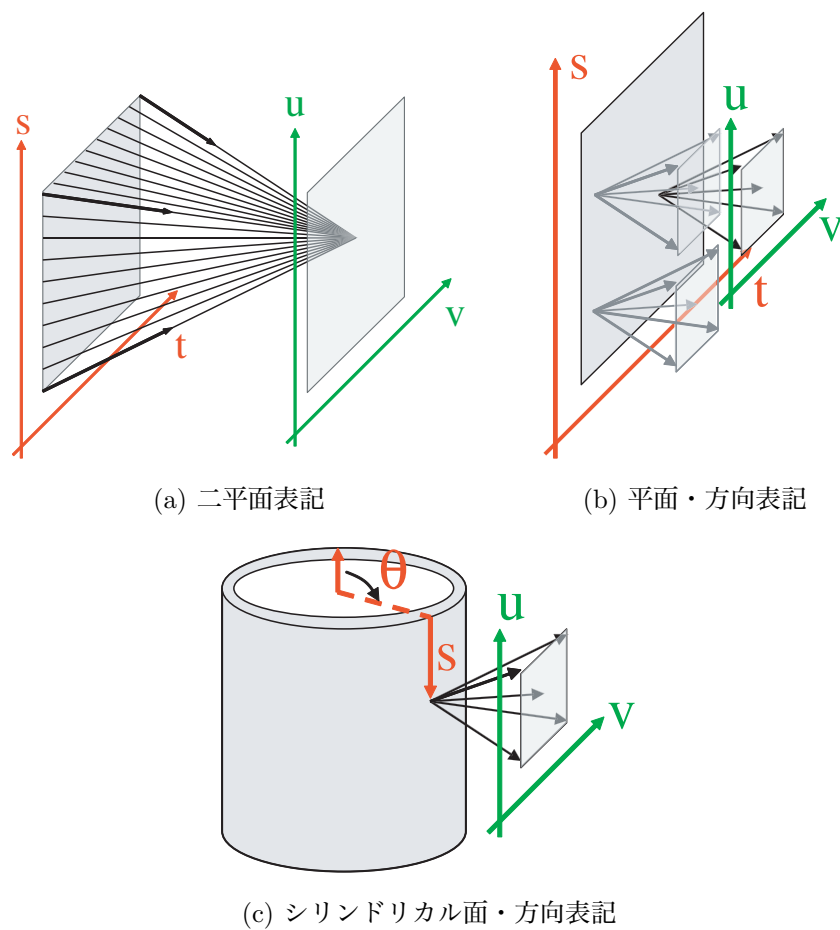


図 2.1: 光線情報の表記法

る。近年では、Ravi ら [13, 14] により、様々な側面から光線情報が解析がされている。

## 2.3 光学

光学の研究は、実質的には Newton によって始められ、様々な物理学者・工学者によって探求され、新しい技術が発明されている。近年における光学研究は、主に工学的な研究が主であるが、本節では、本研究に深く関わってくる、新しい光学素子と、光学系の全体最適化の2つの流れについて概観する。

### 2.3.1 光学素子の動向

光学素子は、非常に多数あり、その全てを列挙するのは難しいが、ここでは、光線再生方式ディスプレイの実装に用いることが出来そうな、液晶、DMD (Digital Micro-mirror Device)、電気光学素子、流体レンズ、MEME レンズ、流体ミラー、固体レンズアレイなどを挙げる。こうしたら光学素子の、定性的な性能比較を表 2.1 に示す。

表 2.1: 光学デバイスの定性的比較

	LCD	DMD	PLZT	Fluid Lens	MEMS	MLA	Camera Array
Response speed	Normal	Fast	Very Fast	Slow	Slow	-	Normal
Resolution	High	High	Normal	Low	Normal	Normal	Low
Transmittance & Reflectance ratio	Normal	Good	Good	Very good	Very good	Very good	Very good
Lens effect	-	-	Normal	Very good	Good	Good	Very good
Thickness	Good	Good	Good	Bad	Normal	Normal	Bad
Cost	Good	Normal	Bad	Normal	Normal	Normal	Normal

以下に個々の光学素子について説明する。

#### 液晶デバイス

液晶デバイスは、液体と結晶の中間状態を持つ物質である液晶を用いる。液晶は、電圧により複屈折率が変化するため、光の透過/非透過を電氣的に制御可能である。

液晶デバイスとして代表的なものとしては、液晶ディスプレイがあり、マトリックス回路により駆動する。駆動周波数は比較的lowく、60~120Hz 程度である。

## DMD

DMD (Digital Micro-mirror Device) は、米 TI (Texas Instruments) 社により開発された MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) デバイス (図 2.2) で、多数のミラーアレイ素子を制御することにより、光の反射方向を制御するデバイスである。



図 2.2: DMD 外観 (文献 [15] より引用)

図 2.3 に DMD の構造を示す。図は 2 枚の DMD を示しており、スイッチのオン/オフによりミラーの角度が $-10$  度から $+10$  度まで 2 値変化する。

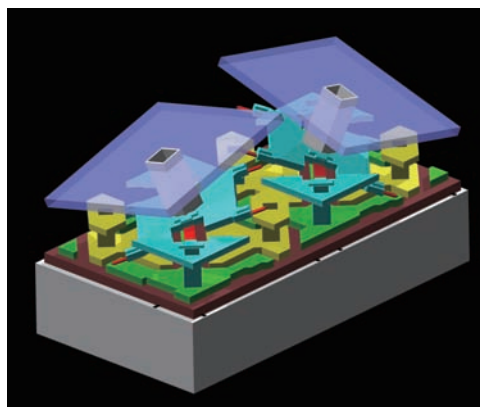


図 2.3: DMD の構造 (文献 [15] より引用)

DMD 素子は、ミラー素子が格子状に配置されており、図 2.4 のような 3 層構造を持つ。

図 2.5 に示すように、光源と光吸収版、そして投影光学系と組み合わせることにより、プロジェクタが構成可能である。実際に、プロジェクタ用途として急激に広まっている。光線情報を取得す

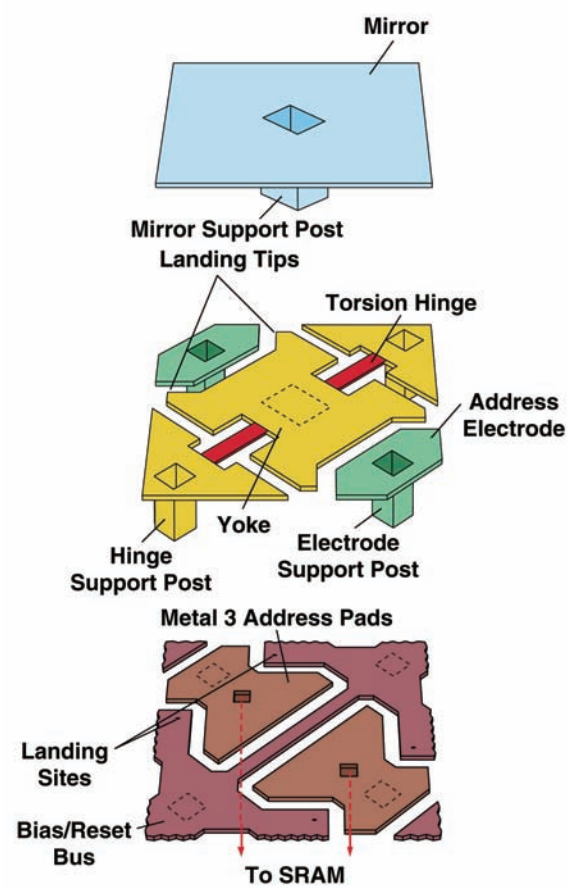


図 2.4: DMD の内部構造 (文献 [15] より引用)

る場合には、屈折光学系として使用することになる。駆動周波数は比較的早く、8000～13000Hz

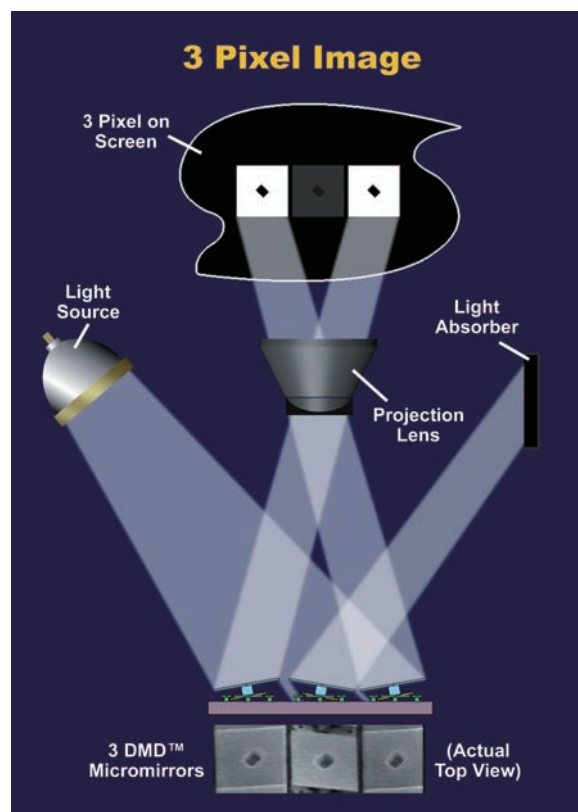


図 2.5: DLP プロジェクタ (文献 [15] より引用)

程度である。

DMD は、プロジェクションディスプレイ以外の用途としても、いろいろなアプリケーションが提案されており、例えば、可視光通信 [16] や、HDR カメラ [17] が提案されている。

### 電気光学素子

電気光学素子 (Electro-optic element) とは、電界の影響により、光学的特性が変わる電気光学効果を持つ物質のことである。次に解説する PLZT の他に、LN 結晶 ( $\text{LiNbO}_3$ ) や KTN 結晶 ( $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ) がある。

**PLZT** PLZT (lanthanum modified lead zirconate-lead titanate:  $(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ) は、圧電素子の一種で、1969 年に Heartring らにより発見された [18]。PLZT は電気光学セラミックスの一種であり、電圧の変化により複屈折率が変化する圧電素子である。電界が 0 で、複屈折率も 0 となることから、光学シャッタとして利用可能である。特性の詳細は、文献 [19] に詳しい。



電圧による屈折率の変化 ( $\Delta n$ ) は、次のような簡単な式で記述される。

$$\Delta n = -\frac{n^3 R_c E^2}{2} \quad (2.1)$$

ここで、 $n$  は電圧 0V 時の屈折率、 $R_c$  はカー定数、 $E$  は電圧 (V) である。PLZT の場合、 $n = 2.462$ 、 $R_c = 4 \times 10^{-16}$  である。

電圧に 2 次で比例することもあり、実用的に用いるには、駆動電圧が、他のデバイスに比べて比較的高いが、応答速度が非常に速いのが特徴である。駆動周波数はとても早く、10000Hz 以上であり、数 ns で動作させることも可能である。

応用面では、デジタルミラボのプリントヘッドとして実用化されており [20]、光の偏光状態を撮影するカメラ [21] や可変焦点レンズ [22, 23] としての研究も行われている。Shibaguchi ら [22] は、直方体の PLZT 素子に適切に電極を貼り付けて制御した際のシミュレーションを行っており、また、実際にレーザービーム用の可変焦点レンズを試作し、400KHz で動作させることに成功している。

PLZT 素子は、フルウチ化学 (株) によって製造・販売されている。鉛を含んでいるため、環境基準を考慮して利用する必要がある。

## 流体レンズ

流体レンズは、フランスの Varipotic 社により開発されたレンズで、Electrowetting を原理とする [24]。Electrowetting は 1981 年に Beni らによって発見された効果 [25] で、“電位差の変化によって、固体と電解質の接触角が変化する現象” のことを指している。

図 2.6 に流体レンズの動作原理を示す。絶縁体 (例えば油) と導体 (例えば水) にあたる 2 種類の透明な液体を密封して、書けた電圧により、接触角が変化することを利用し、レンズの焦点距離を変化される方式である。駆動周波数は数 10Hz で、他のデバイスに比べ低い、レンズとして機能するメリットは大きい。

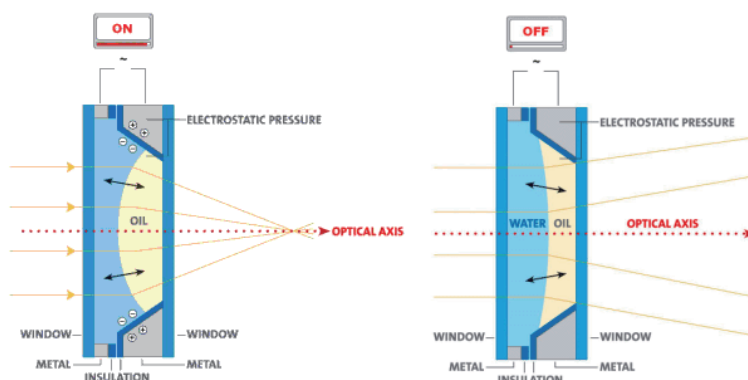


図 2.6: Varioptic レンズの原理 (文献 [26] より引用)

## 流体ミラー

流体ミラーは、皿上の容器に水銀などを入れて、回転させて遠心力と重力の釣り合いにより、放物面形状を作り出し鏡として利用する技術である。天文観測などに用いる、非常に大きなサイズであると、通常の鏡やレンズに比べて安く製作可能であるので、天文分野への適用を目指して研究されている [27, 28].

## MEMS レンズ

Nguyen らによって、開発された MEMS 光学素子で、液体真空封止法と呼ばれる手法により実現する [29].

## 固体レンズアレイ

固体レンズアレイは、ここでは通常のレンズアレイのことを指す。流体レンズなどの他のレンズと明確に区別するために固体レンズと呼ぶ。

固体レンズは、日本板硝子や日立マクセルなど、多数のメーカーで商品化されている。光ファイバーを束ねて作る GRIN レンズアレイや、型と光硬化樹脂を用いる方法、印刷により生成する手法など多数ある。IP に用いるレンズアレイも、沢山の製作手法があるが、例えば印刷を用いた製作手法の歴史的な経緯については、文献 [30] が詳しい。

### 2.3.2 光学系の全体最適化

既存の光学系では、例えばデジタルカメラでは、性能の良いレンズと性能の良い CCD を組み合わせるのが一般的であった。しかしながら、カメラが、単純な球面レンズの組合せから、非球面レンズなどの複雑なレンズの生成と組み合わせが可能となり複数のレンズにより最適化が進んだように、現在は、光学系と撮像素子を組み合わせた上での最適化研究がなされている。

例えば、Eric らによって提案された、通称 Origami lens [31] は、反射光学系に対して画像処理も加えることにより、全体最適化を行う撮影システムである。反射光学系を用いることにより、開口径を大きくし、かつ薄型を実現し、Wavefront Coding [32] を用いて画質の低下を防いでいる。

### 2.3.3 まとめ

以上に示したように、こうした光学の研究動向が示すことは、近い将来、光学素子は自由にデザインが可能となり、また、光学素子自体が、静的な素子から動的な素子への変化することである。さらに、様々な計算コストの低下により、光学系系全体の最適化が進むと予想される。以上の研究背景から、動的な光学系と、設計の全体最適化が大きな研究の流れとして見えてくる。

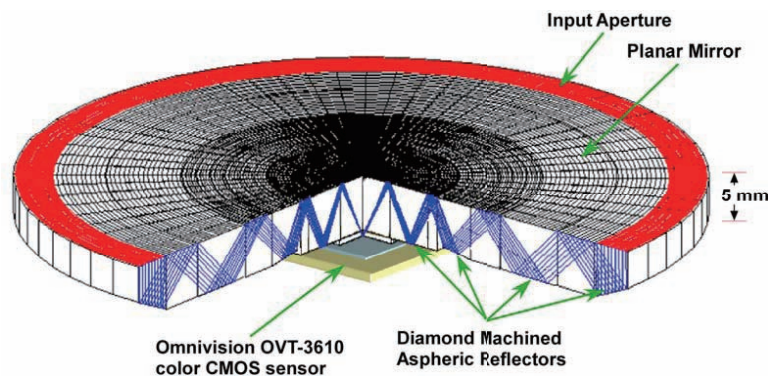


図 2.7: Origamo lens の構造 (文献 [31] より引用)

## 2.4 立体ディスプレイ

立体ディスプレイとは、光線を再生するディスプレイにとらえ、再生する光線の次元に基づき分類する。

### 2.4.1 3次元光線情報再生

#### 位置+1 方向:二眼方式

二眼方式裸眼立体視ディスプレイは歴史が古く、商用化もされており、商品化一歩手前の試作機レベルの開発も盛んである。何らかの方法で、左右の眼に視差のある映像を映し出すことにより、実現が可能である。最も単純な方法は、ガラス板などに黒線を印刷するなどしたバリアを用いて、左右の眼から見える画像を変えることである。

最近では、液晶方式バリアを用いることにより、2D と 3D の切り替えを電氣的に可能にした方式を Harrold ら [33] が、開発している。具体的には、液晶の複屈折を利用し電氣的に屈折率を変更させ、レンズ効果の On/Off を切り換えることにより 2D と 3D の切り替えを実現している。液晶方式のバリアの応用技術として、バリア用液晶と画像表示用液晶との距離を狭くすることにより、視域を広くして、左右で違う画像が閲覧可能なデュアルビュー液晶をシャープが発表し [34] しており、カーナビゲーションシステムなどへの応用が期待されている。

その他の方式として、結城 [35] は、120Hz でフィードフォワード駆動 (FFD: Feed-Foward Drive) させた液晶と、レンチキュラと三角形プリズムを貼り合わせた形状の両面プリズムシートを組み合わせて、時分割で右目用画像と左目用画像を切り替える二眼方式ディスプレイを試作している (図 2.8)。バックライト用の光源を左右に 2 つ用意して、液晶の駆動と連動させて点灯させている。液晶バリアや単なるレンチキュラ方式に比べて視野角が広いことが特徴であり、左右 20 度を実現している。また、時分割で立体視を実現しているため、通常の二眼方式のように解像度が半分に減ることがないのも特徴である。試作機の大きさは、2.2 型で、携帯電話などへの搭載が

予想される。宮下 [36] も、3.5ms 応答のフィールドシーケンシャル方式液晶パネルとそれに同期

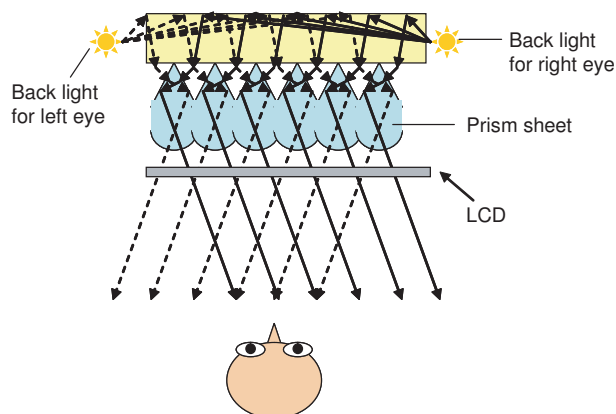


図 2.8: スキャンバックライトを用いた2眼方式の原理

したバックライトで実現する時分割方式の二眼方式裸眼立体視ディスプレイを開発している。

裸眼立体視ディスプレイの開発においては、提示できる情報量を多くすることが、課題の一つであり、高速な応答性能を持つ液晶を用いて、二次元解像度を落とさずに、二眼方式を実現した良い例である。

投影を用いた方式に関しては、文献 [37] にて提案されており、2002年に、金子ら [38] が、2台のLEDプロジェクタと指向性反射スクリーンを用いた裸眼立体視ディスプレイを試作している(図 2.9)。2台のプロジェクタの間隔をだいたい目の間隔と同程度に設置し、指向性反射特性を持

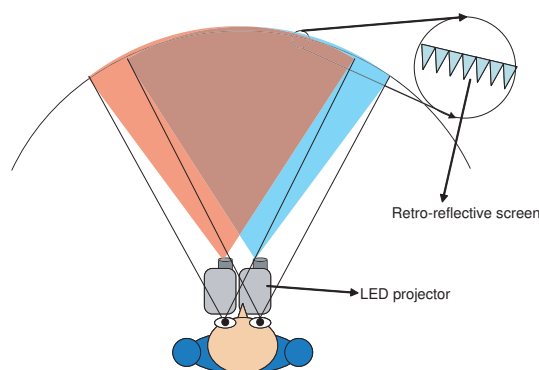


図 2.9: 指向性反射スクリーンを用いたプロジェクション方式裸眼立体ディスプレイの原理

つスクリーンに画像を投影すると、それぞれの目には、別のプロジェクタの画像が映ることとなる。ここで、用いている指向性反射素材としては、横方向に対しては反射作用を持ち、上下方向に対しては拡散作用を持つようなスクリーンであり、通常の再帰反射性スクリーンにおいては、非常に限定されてしまう視域を、本スクリーンによってある程度拡大している。ここで開発された再帰反射性スクリーンは、Transpost [39] でのキーデバイスとしても利用されている。

二眼方式は、その欠点を逆に利用して、解像度を高めたり、2D と 3D を動的に切り替える、クロストークを減らすなどの工夫が行われている。Light field の記述方式としては、1つの平面と

二方向で記述できる.

### 位置 2 次元+1 方向: 多眼方式

前節に述べたように, IP と多眼方式は, 技術の違いというより, Light field の記述方式の違いとしてとらえることが出来る. この方式も, 二眼方式と同じく, 非常に多くの方式が古くから研究されているので, 特に目立った話題についてのみ触れる. 現在の多眼方式のディスプレイは, ほぼ全て,  $PDP(s, t, 0, v)$  と記述できる.

高木 [40] らは, 72 光線を密に再生することにより, 瞳に 2 光線以上がはいる超多眼を満たす立体ディスプレイを開発している. さらに, このディスプレイが質感表現に関しても, 非常に表現力が高いことを指摘している. 光が内部で屈折するガラス細工や, 光沢を持った金属などのコンテンツで実際に実験している. 通常のディスプレイで表示した場合と, 立体表示した場合との心理比較実験を行っており, 立体の方がより良いとの結果を得ている.

高木の実験結果から分かることは, 質感再生の重要性である. 通常, ディスプレイの性能は, 色域・解像度・明るさの 3 つで決定され, カタログスペックとして公表されている (動画の場合は応答性能・フレームレートなどが加わるが, 人間の知覚からは, ある程度以上は必要ないと, 静止画では関係ないので除外して考える. なお, 明るさも相対的なパラメータであり, こちらも, 人間の目の開口に依存するので, 除外しても差し支えない). これに, 質感を表現するのに必要な, 光線方向解像度を加えた 4 つで評価することが適切だということが予想される. このことは, BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), や BTF (Bidirectional Texture Function) の再現が, 映像のリアリティや立体感の心理的要因として重要であること示していると考えられる. BRDF や BTF の研究は, Computer Graphics の分野で活発に行われており, リアリティの高い裸眼立体視ディスプレイの実現問題は, BRDF/BTF を再現するのに必要な Light field のサンプリング問題として定量的な帰着が可能であることを示唆している.

その他の最新の研究成果としては, Dodgson [41] は, ヘッドトラッキングを行う裸眼立体視ディスプレイで, 適切な視点数の検討などが挙げられる.

### 位置 2 次元+奥行き: DFD (Depth Fused 3D) 方式

二枚のディスプレイによって挟まれた空間内に立体像を提示する DFD 方式を陶山ら [42] が発見し, 開発している (図 2.10). 前後のパネルに表示する画像の濃淡で立体像の奥行き位置を決定する. 手前パネルの画像を濃くすると, 画像は手前に出てきて, 奥のパネルの画像を濃くすると, 画像は奥に引っ込むように表示される. 視域が非常に狭いのが欠点であるが, 大画面化も容易に可能な利点があり, また 2 枚の画像を用意すれば済むので, 情報量は 2 次元画像の 2 倍で済む. 256 階調の奥行き値を用いて, 約 1.3 倍にまで圧縮することも可能である. DFD 方式の Light Field 再生方式は,  $2PP(s, t, s, t)$ , または  $PDP(s, t, s, t)$  (この場合, どちらも同じ) であると記述できる.

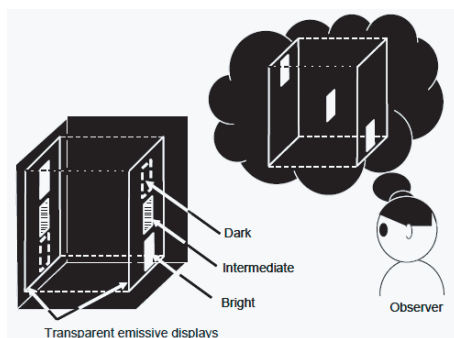


図 2.10: Depth Fused 3D の原理 (文献 [43] より引用)

### 位置 3 次元: ボリューム再現方式

ボリューム再現方式に分類されるものも多く、物理的な回転機構や、物理的なスペースをうまく利用することにより実現している。ただし、ディスプレイの物理領域から立体像を飛び出させるのが難しいなどの特徴がある。Favalora [44] が、最近のボリューム表現方式研究成果をまとめている。

圓藤らの Seelinder [45] は、低速に回転する LED アレイと、その外側で高速に回転するスリット付き遮光板との組み合わせにより、左右方向のみの光線を再生している (図 2.11)。多人数で同

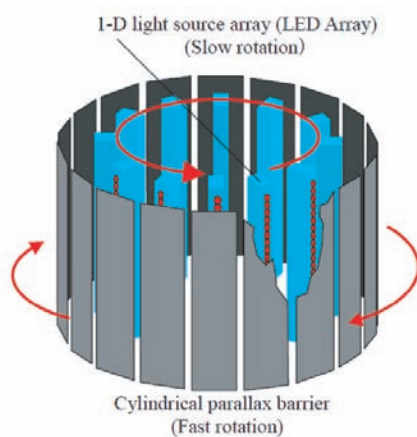


図 2.11: Seelinder の原理 (文献 [45] より引用)

時に見ることが可能、回り込んで側面や背面が見ることが可能、運動視差を再現可能、などの特徴を備えている。この方式は、 $CDP(s, \theta, u, v)$  と記述できるが、Cylinder 面のサンプリング間隔 ( $\theta$  の自由度) が 70 と少し疎である。

大塚らの Transpost [39] は、スクリーンの回転機構を導入することにより、円柱面を持つ light field の再生を行う裸眼立体視ディスプレイを開発している。Transpost の Cylinder 面のサンプリング間隔は 24 と非常に疎である。



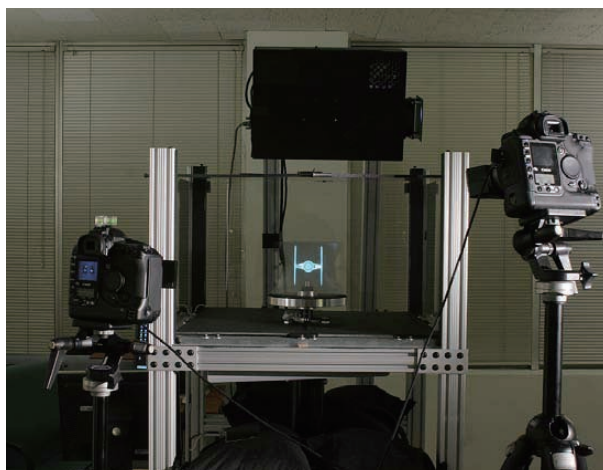


図 2.12: DMD と回転ミラーを用いた 360 度ディスプレイ (文献 [48] より引用)

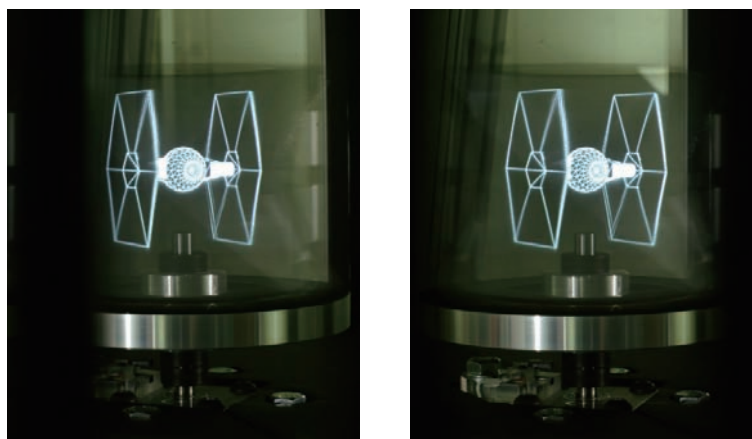


図 2.13: DMD と回転ミラーを用いた 360 度ディスプレイの見え方 (文献 [48] より引用)

田中ら [46] も、Live Dimension と称して、12 視点ながら、実時間で実写の撮影と表示が可能な、同じく円柱面タイプの裸眼立体視ディスプレイを試作している。

Favalora らの Perspecta [47] は、球面スクリーンを物理的に回転させることにより、ボリューム表現可能な立体ディスプレイを実現している。

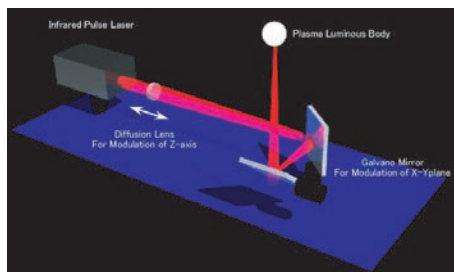
Jones [48] らは、DMD と回転ミラーを用いて、360 度から観察可能な立体ディスプレイを試作している。

機械的な動作機構を有しない方式としては、Sullivan [49] の、20 枚の液晶パネルを奥行き方向に並べるディスプレイがある。各パネルは、対応する深度の画像を表示する。

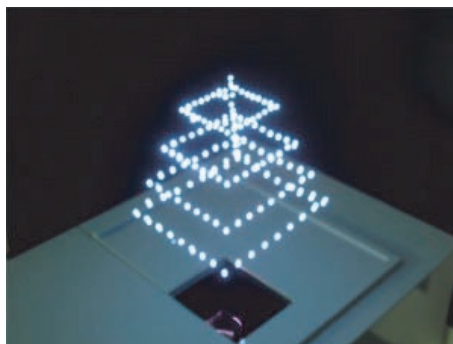
ボリューム再現方式の場合、コンテンツの立体データを必要とする方式がある。こうした方式に対応するため、Open GL のラップソフトウェアも開発されており、GLInterceptor [50] や、Trebilco [51] の GLIntercept などがある。これらのソフトウェアは、通常のアプリケーションが

呼び出す Open GL コマンドを途中で割り込み取得し、立体ディスプレイの描画データとして利用する。このようなソフトウェアを利用することにより、ディスプレイ専用のソフトウェアを開発するコストを省くことが可能である。

前述のボリューム再現方式は、デバイス部より立体像を飛び出させる表示が原理的に難しいものであったが、何もない空間上に立体像を表示する方式も、検討されてきている。Kitamura ら [52] は、レーザー光線を三次元上の認知の位置に集光し、空気を瞬間的にプラズマ化することにより、三次元空間上にプロットするディスプレイを開発している (図 2.14)。



(a) 原理



(b) 自由空間点群表示例

図 2.14: レーザープラズマ方式自由空間点群ディスプレイの原理 (文献 [52] より引用)

Kitamura ら [52] のボリューム方式は、 $(x, y, z)$  の光点を再現する能力があるが、2PP のような light field 表現形式で書き表すことが出来る。ただし、元々の、ボリュームレンダリング方程式は、五次元 (位置と方向) の方程式であるので、この解をカバーするには、light field では不十分である。しかし、現在、この方式は、任意の空間点を当方に発光させているので、拡散成分の表現のみが可能であり、いくつか紹介した回転スクリーン方式も、同様に拡散成分のみの表現が可能である。本来、ボリュームレンダリングの方程式は、雲・煙・牛乳などの白濁な液体・大理石・皮膚などの関与媒質を表現するために必要な方程式であり、現状のボリューム再現方式のディスプレイで表現できる範囲を超えている。よって、当分は light field の表現の範囲内で考えても、大きな問題とはならないと予想される。また、これらの方式は、後ろが透けて見えるファントムイメージも大きな問題であり、今後の解決課題である。



### 2.4.2 4次元光線再生方式

#### Integral Photography 方式

Integral Photography は, 1908 年に Lippmann [53] により提案された (図 2.15). 元々は, 写

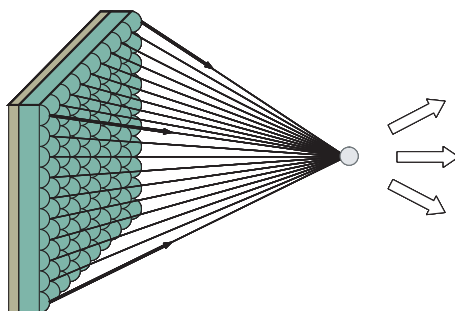


図 2.15: インテグラルフォトグラフィの原理

真技術の一つで, レンズアレイを通して, 光を写真乾版に記録し, 現像フィルムの逆側から光を当てることにより, もともとの光を再現できるという技術であった. マイクロレンズアレイや高解像度ディスプレイなどの要素技術が揃わなかったこともあり, これまで, 研究は余りなされてこなかったが, 今後の発展が期待されるている方式である.

基本的には, 左右だけでなく上下方向にも視差がある多眼式であり, 十分視点数の多い多眼式を IP 方式と呼んで, ほぼ間違いない. ただ, 通常他眼式と違うのは, light field の記述として, 2PP か, PDP かの違いである. 2PP は, 正しい画像が見える点が視点数分存在するが, IP は, 視点数 (光線方向のサンプリング数) が少ない場合には, どこから観察しても, 不正確な画像しか見えない. そのため, 十分なサンプリング数を必要とする.

IP 方式は, 1つの平面と, それらに付随するカメラ面で記述 (図 2.16) される. つまり  $PDP(s, t, u, v)$  と記述できる.

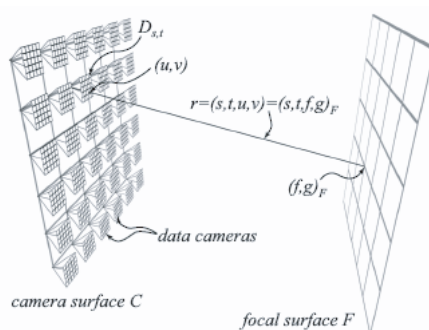


図 2.16: カメラプレーン表記 (文献 [11] より引用)

IP 方式の研究は, 近年, 岡野ら [54] によって, 本格的に始まっている. 最近では, 9 台のマルチプロジェクタを用いて, 高解像度な二次元ディスプレイを実現し, その上で, IP ディスプレイ

を実現する Liao ら [55] の研究があり (図 2.17), また, 実時間の IP 放送システムを将来に見据えた荒井 [56] の研究がある. IP において, 2D と 3D を切り替えるシステムの研究も, Choi [57] らによってなされている. 横方向に限った IP 方式も研究はされており, 平ら [58] は, 既存のディスプレイを用いて, 比較的立体感のある裸眼立体視ディスプレイの実現に成功している.



図 2.17: マルチプロジェクタを用いたインテグラルフォトグラフィシステム

Fuchs [59] らによって, IP を原理に持つが, 光の入力も行うパッシブ型 6D reflectance ディスプレイが提案されている. 4D の出力が可能であれば, 当然 4D の入力が必要である.

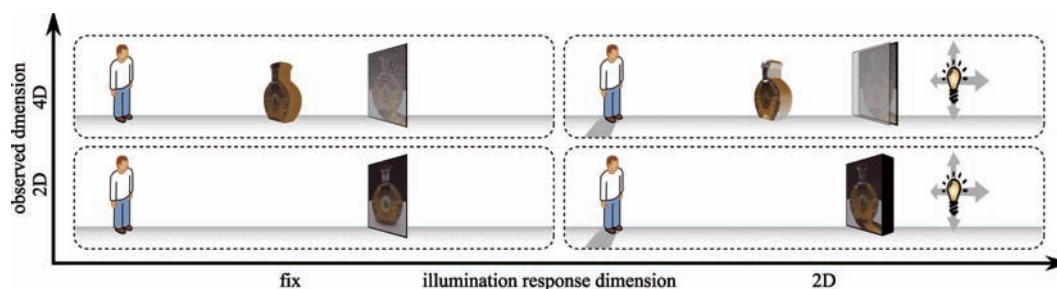


図 2.18: 6D 再生 (文献 [59] より引用)

## Holography 方式

ホログラフィは, 1948 年に Gabor [60] により提案された. コヒーレントな光の干渉を利用し物体の情報を記録し (図 2.19(a)), 記録時と同様な光を当てることにより, 物体の情報を再生する (図 2.19(b)). ホログラフィ自体は, 光の干渉と回折を用いて光波の位相と振幅を記録, 再生する技術全般を指し, 裸眼立体像の提示技術以外にも, 近年ではホログラフィックメモリなどにも利用されている.

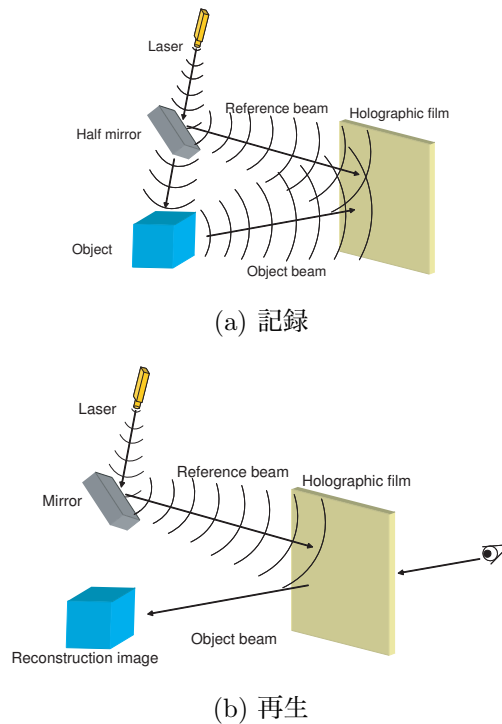


図 2.19: ホログラフィの原理

ホログラフィの特徴としては下記が挙げられる。

1. 完全な立体像の再生が可能
2. 高い冗長性を持つため、スクリーンの損傷に強い
3. 高解像度のディスプレイ (又は記録デバイス) が必要

非常に理想的な方式であるが、波動光学の範囲の現象を応用した技術であり、原則、幾何光学に基づいた IP 方式に比べてより高度な技術開発が必要であり、現状、大学研究室レベルでの実験を超える成果は出ていない。

三科らが、スーパーハイビジョン (映像の解像度は  $7,680 \times 4,320$  ドットで、ハイビジョンの 16 倍の情報量を持つ) 用プロジェクトに用いる高解像度液晶パネル ( $3840 \times 2048$  画素, 画素間隔  $10\mu\text{m}$ ) を二枚を使用することにより、従来のホログラフィ方式に比べて視域を二倍に広げたホログラフィディスプレイを試作している [61]。

Holography と light field の等価性については、まだ、厳密な証明はされておらず、情報量における比較を行う上で、今後の研究が必要である。この分野では、三科ら [62] は、撮影した IP 画像を Hologram 画像に変換する手法について提案している。

### 2.4.3 5次元光線再生方式

5次元の光線再生方式については、まだ提案がなされていない。空間中で光の方向が任意に変更できる必要があり、現在の光学デバイス技術では、現実的な方法が見つかっていない。光が直進する場合には、4次元で光線を記述可能であることから、一般には4次元で十分であるかと考えられるが、大気中の光の散乱など、4次元では厳密に再現しきれない現象も多く存在する。十分に4次元光線を再生すれば十分なのか、それとも5次元光線の再生が必要であるかは、人間の知覚面からの研究も含んだ、今後の大きな課題の一つとなると予想される。

## 2.5 本研究の位置づけ

本研究では、4次元光線再生方式ディスプレイの理論、設計、応用について検討する。この検討は、実空間へ、正確で、実在感を伴う光線場の提示を目指すものである。光線場を実空間へ提示することによって、立体映像や、高質感映像の提示が可能となる。従って、本研究は、2.2で述べたコンピュータグラフィクス技術の実空間への適用であると位置づけることが可能である。つまり、今までは2次元のデジタル映像を最終出力する問題と位置づけられていたコンピュータグラフィクスを、実空間への映像提示の問題へと発展させることができる。さらに、光線情報の信号処理が、光線再生方式ディスプレイの設計する上の研究と位置づけられる。

2.3では、実際のディスプレイを実現するための光学素子について述べた。光線再生方式ディスプレイを実装するには、理論面の整備だけではだめで、適切な光学素子を適切に用いる必要がある。光学素子の適切なパラメータでの分類は、今後の光線再生方式ディスプレイを設計する上で、大きな助けになる。また、膨大な情報を実空間へ提示する光線再生方式ディスプレイを実装するには、すべてを効率よく機能させる必要がある。本研究も、ここで述べた光学での全体最適化手法の一つであると位置づけられることができる。

2.4では、光線再生方式ディスプレイの典型的な応用の一つである立体ディスプレイと、その他の応用例について述べた。立体ディスプレイの実現方式は、ここ2～3年の間だけでも、非常に沢山の種類が考案・開発されており、本稿でも、全てを網羅できないほどである。本研究は、既存の立体ディスプレイ技術の延長であり、かつ、包括的に体系化するための手法であると位置づけられることができる。

# 参考文献

---

- [1] Cha Zhang and Tsuhan Chen. A Survey on Image-based Rendering – Representation, Sampling and Compression. *Signal Processing: Image Communication*, Vol. 19, No. 1, pp. 1–28, January 2004.
- [2] 原島博. 三次元画像符号化に向けて. 画像符号化シンポジウム (PCSJ92), pp. 9–12, 1992.
- [3] 藤井俊彰. 三次元統合画像通信の基礎検討. 博士論文, 東京大学大学院 工学系研究科, 電子工学専攻, 1994.
- [4] 苗村健. 光線記述に基づく空間符号化と空間共有メディアに関する研究. 博士論文, 東京大学大学院 工学系研究科, 電子工学専攻, 1996.
- [5] Marc Levoy and Pat Hanrahan. Light field rendering. *Computer Graphics*, Vol. 30, No. Annual Conference Series, pp. 31–42, 1996.
- [6] Steven J. Gortler, Radek Grzeszczuk, Richard Szeliski, and Michael F. Cohen. The lumigraph. *Computer Graphics*, Vol. 30, No. Annual Conference Series, pp. 43–54, 1996.
- [7] 高橋桂太. 多眼画像を用いた全焦点自由視点画像の実時間合成に関する研究. 博士論文, 東京大学大学院 情報理工学系研究科, 電子情報学専攻, 2005.
- [8] E. Camahort and D. Fussell. A geometric study of light field representations. Technical Report TR9935, Department of Computer Sciences, University of Texas, 1999.
- [9] Frédo Durand, Nicolas Holzschuch, Cyril Soler, Eric Chan, and François X. Sillion. A frequency analysis of light transport. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 1115–1126, August 2005.
- [10] Oliver Cossairt, Shree Nayar, and Ravi Ramamoorthi. Light Field Transfer: Global Illumination Between Real and Synthetic Objects. *SIGGRAPH (ACM Transactions on Graphics)*, 2008.
- [11] Aaron Isaksen, Leonard McMillan, and Steven J. Gortler. Dynamically reparameterized light fields. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 297–306, July 2000.

- [12] Jin-Xiang Chai, Shing-Chow Chan, Heung-Yeung Shum, and Xin Tong. Plenoptic Sampling. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 307–318, 2000.
- [13] Ravi Ramamoorthi and Pat Hanrahan. A Signal-Processing Framework for Reflection. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 23, No. 4, pp. 1004–1042, 2004.
- [14] Ravi Ramamoorthi, Dhruv Mahajan, and Peter Belhumeur. A First-order Analysis of Lighting, Shading, and Shadows. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 26, No. 1, p. 2, 2007.
- [15] 日本 TI. [http://web.tij.co.jp/news/photolibrary/dlp/dlp\\_d\\_index.htm](http://web.tij.co.jp/news/photolibrary/dlp/dlp_d_index.htm).
- [16] Sho Kimura, Masahiko Kitamura, and Takeshi Naemura. EmiTable: A Tabletop Surface Pervaded with Imperceptible Metadata. In *2nd Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop 2007)*, pp. 189–192, oct 2007.
- [17] Shree K. Nayar, V. Branzoi, and T. Boulton. Programmable Imaging using a Digital Micromirror Array. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Vol. I, pp. 436–443, Jun 2004.
- [18] G. H. Haertling and C. E. Land. Hot-Pressed (pb,la)(zr,ti)o<sub>3</sub> Ferroelectric Ceramics for Electrooptic Applications. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 54, pp. 1–11, 1971.
- [19] A.J.Moulson and J.M. Herbert. *Electro-optic Ceramics*, chapter 8, pp. 433–468. John Wiley & Sons Ltd, 2nd edition, 2003.
- [20] 藤井雄一, 北野博久. 高画質デジタルミニラボ r2super 用プリントヘッド. コニカミノルタテクノロジーレポート, Vol. 2, pp. 169 – 172, 2005.
- [21] Daisuke Miyazaki, Noriyuki Takashima, Akira Yoshida, Eiki Harashima, and Katsushi Ikeuchi. Polarization-based Shape Estimation of Transparent Objects by Using Raytracing and PLZT Camera. In *Polarization Science and Remote Sensing II, Proceedings of SPIE*, Vol. 5888, pp. 1–14, aug 2005.
- [22] Takashi Shibaguchi and Hiroyoshi Funato. Lead-Lanthanum Zirconate-Titanate (PLZT) Electrooptic Variable Focal-Length Lens with Stripe Electrodes. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1*, Vol. 31, pp. 3196–3200, 1992.
- [23] Bruce R. Peters, Patrick J. Reardon, and K. J. Wong. Preliminary Investigation of an Active PLZT Lens. In *Integrated Optics Devices V, Proceedings of SPIE*, Vol. 4277, pp. 242–248, 2001.

- [24] Bruni Berge and Jérôme. Peseux. Variable Focal Lens Controlled by an External Voltage: an Application of Electrowetting. *Eur. Phys. J. E*, Vol. 3, No. 2, pp. 159–163, 2000.
- [25] Gerardo Beni and Susan Hackwood. Electro-wetting Displays. *Applied Physics Letters*, No. 4, pp. 207–209, 1981.
- [26] Varioptic’s Technology - Overview. [www.varioptic.com/en/tech/technology-overview.php](http://www.varioptic.com/en/tech/technology-overview.php).
- [27] E. F. Borra. The Liquid-mirror Telescope as a Viable Astronomical Tool. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, Vol. 76, No. 4, pp. 245–256, 1982.
- [28] B. K. Gibson. Liquid Mirror Telescopes: History. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, Vol. 85, No. 4, pp. 158–171, 1991.
- [29] Binh-Khiem Nguyen, Eiji Iwase, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama. Electrically Driven Varifocal Micro Lens Fabricated by Depositing Parylene Directly on Ldliquid. In *Micro Electro Mechanical Systems, 2007*, pp. 305–308, jan 2007.
- [30] David E. Roberts and Trebor Smith. The History of Integral Print Methods.
- [31] Eric J. Tremblay, Ronald A. Stack, Rick L. Morrison, and Joseph E. Ford. Ultrathin Cameras Using Annular Folded Optics. *Applied Optics*, Vol. 46, No. 4, pp. 463–471, 2007.
- [32] Jr. Edward R. Dowski and W. Thomas Cathey. Extended depth of field through wave-front coding. *Applied Optics*, Vol. 34, No. 11, pp. 1859–1866, 1995.
- [33] J. Harrold, D. J. Wilkes, and G. J. Woodgate. Switchable 2d/3d display - solid phase liquid crystal microlens array. In *IDW’04*, pp. 1495–1496, 2004.
- [34] シャープ. 世界初※ 左右に異なる情報を同時表示する『デュアルビュー液晶』を量産. <http://www.sharp.co.jp/corporate/news/050714-b.html>, 2005.
- [35] 結城昭正. スキャンバックライト方式3D液晶ディスプレイ. 月刊ディスプレイ, Vol. 11, No. 4, pp. 94–98, 2005.
- [36] 宮下崇. フィールドシーケンシャル (時分割) 方式3D技術. 月刊ディスプレイ, Vol. 12, No. 4, pp. 69–71, 2006.
- [37] 大越孝敬. 三次元画像工学, pp. 79–115. 産業図書, 1972.
- [38] Hiroki Kaneko, Tetsuya Ohshima, Osamu Ebina, and Akira Arimoto. 55.3: Desktop autostereoscopic display using compact led projectors and cdr screen. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol. 33, No. 1, pp. 1418–1421, 2002.

- [39] Rieko Otsuka, Takeshi Hoshino, and Youichi Horry. Transpost: A novel approach to the display and transmission of 360 degrees-viewable 3d solid images. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12, No. 2, pp. 178–185, 2006.
- [40] Y. Takaki and T. Dairiki. 72-directional display having VGA resolution for high-appearance image generation. In *Proceedings of the SPIE, Volume 6055*, pp. 307–314, February 2006.
- [41] Neil A. Dodgson. On the number of viewing zones required for head-tracked autostereoscopic display. Vol. 6055, p. 60550Q. SPIE, 2006.
- [42] S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira, and S. Sakai. Apparent 3-d image perceived from luminance-modulated two 2-d images displayed at different depths. *Vision Research*, Vol. 44, No. 8, pp. 785–93, April 2004.
- [43] 伊達宗和, 高田英明, 陶山史朗. フィールドシーケンシャルカラー液晶パネルを用いた奥行き融合型3次元(dfid)表示. 第16回VMA研究会, 2006.
- [44] Gregg E. Favalora. Volumetric 3d displays and application infrastructure. *Computer*, Vol. 38, No. 8, pp. 37–44, 2005.
- [45] Tomohiro Yendo, Toshiaki Fujii, and Masayuki Tanimoto. Ray-space acquisition and reconstruction within cylindrical objective space. Vol. 6055, p. 60550W. SPIE, 2006.
- [46] Kenji Tanaka and Soko Aoki. A method for the real-time construction of a full parallax light field. Vol. 6055, p. 605516. SPIE, 2006.
- [47] Gregg E. Favalora, Joshua Napoli, Deirdre M. Hall, Rick K. Dorval, Michael Giovinco, Michael J. Richmond, and Won S. Chun. 100-million-voxel volumetric display. Vol. 4712, pp. 300–312. SPIE, 2002.
- [48] Andrew Jones, Ian McDowall, Hideshi Yamada, Mark Bolas, and Paul Debevec. Rendering for an Interactive 360° Light Field Display. In *SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 papers*, No. 40, 2007.
- [49] Alan Sullivan. Depthcube solid-state 3d volumetric display. Vol. 5291, pp. 279–284. SPIE, 2004.
- [50] LightSpace Technologies, Inc. DepthCube™Technology White Paper, 2003.
- [51] Damian Trebilco. Glintercept. <http://glintercept.nutty.org/index.html>.
- [52] Hidei Kimura, Taro Uchiyama, and Satoru Shimada. True 3d display using laser plasma in the air. In *ACM SIGGRAPH 2006, Emerging Technologies*, 2006.



- [53] M. G. Lippmann. Epreuves reversibles donnant la sensation du relief. In *J. de Phys*, Vol. 7, pp. 821–825, 1908.
- [54] F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama. Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography. *Applied Optics*, Vol. 36, pp. 1598–1603, 1997.
- [55] Hongen Liao, Makoto Iwahara, Takefumi Koike, Nobuhiko Hata, Ichiro Sakuma, and Takeyoshi Dohi. Scalable high-resolution integral videography autostereoscopic display by use of seamless multi-projection. *Applied Optics*, Vol. 44, No. 3, pp. 305–315, 2005.
- [56] Jun Arai, Makoto Okui, Yuji Nojiri, and Fumio Okano. Imaging properties of microlens arrays for integral imaging system. Vol. 6055, p. 605511. SPIE, 2006.
- [57] Heejin Choi, Joohwan Kim, Yunhee Kim, and Byoungcho Lee. Comparative study on 3d-2d convertible integral imaging systems. Vol. 6055, p. 605512. SPIE, 2006.
- [58] K. Taira and Y. Hirayama. Development of lenticular-type autostereoscopic liquid crystal display based on one-dimensional integral imaging. In *Proceedings of International Display Workshop '05*, pp. 1773–76, 2005.
- [59] Martin Fuchs, Ramesh Raskar, Hans-Peter Seidel, and Hendrik P. A. Lensch. Towards Passive 6D Reflectance Field Displays. *ACM Transacion on Graphics*, Vol. 27, No. 3, pp. 1–8, 2008.
- [60] D. Gabor. A new microscopic principle. *Nature*, Vol. 161(4098), pp. 777–778, 1948.
- [61] Tomoyuki Mishina, Makoto Okui, Keiichiro Doi, and Fumio Okano. Holographic display with enlarged viewing-zone using high-resolution lc panel. Vol. 5005, pp. 137–144. SPIE, 2003.
- [62] T. Mishina, M. Okui, and F. Okano. Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography. *Appl. Opt.*, Vol. 45, pp. 4026–4036, 2006.

## 第3章

---

# 点像分布関数を導入した 光線空間理論

### 3.1 はじめに

第2章の関連研究で述べたように、立体ディスプレイの種類は非常に多く、適切な分類を行うのは難しい。本論文では、記法の違いが立体ディスプレイの原理の違いであると考え、理論提案を行う。まず、提案理論で用いる基本概念である、光線空間と光線情報について述べる。続いて、光線再生方式ディスプレイの観点から立体ディスプレイを整理する。具体的には、今まで行われてこなかった、再生する光線情報の次元で分類を行う。さらに、提案理論を記述するのに必要であり、光線再生方式ディスプレイの方式にも対応する光線情報記法について説明する。最後に、点像分布関数を導入した光線空間理論について説明する。

### 3.2 光線空間と光線情報

物理空間を満たす光は、電磁波の一種であり、厳密には Maxwell 方程式で記述できる。Maxwell 方程式から導き出される解は、光は波の一種であり、実際に電磁波の一種であることが確認されている。しかしながら、通常の電波と呼ばれている電磁場に比べて、波長が短いため、あるオーダーでは、直進性を仮定できる。直進性を仮定した場合には、光は最大7次元で記述できる。この考え方は、人間の視覚を解析する上で、最大の情報を持つ関数として、Plenoptic Function として Adelson らによって提案されている [1]。Plenoptic は、理想的な光学の、との意味を表す、7次元は、位置 (3次元) と方向 (2次元)、波長 (1次元) と時間 (1次元) から構成されている。位置を  $(x, y, z)$ 、方向を  $(\theta, \phi)$ 、波長を  $(\lambda)$ 、時間を  $(t)$  として、Plenoptic Function は、式 3.1 として記述される。

$$f(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t) \quad (3.1)$$

今、単波長で静的な光を考えた場合には、5次元で任意の光線が記述でき、この空間を**光線空間**と呼ぶ。本論文では、最大5次元までを扱う。

さらに、光の直進性を仮定した場合には、次元を一つ省略可能で、4次元で光線の記述が可能である。この手法は、Levoy らによって提案され [2]、4D Light Field (LF) と呼ばれており、4次元**光線情報**と呼ぶ。

その後、Izaksen らによって、Integral Photography (IP) が、4D Light Field の表示装置として考えられることが提案されている。IP は、本論文でも主に取り扱う。また、Light Field Display を**光線再生方式ディスプレイ**と呼ぶ。

理想的な立体ディスプレイの一つである IP が光線再生方式ディスプレイであるなら、逆に様々な立体ディスプレイは光線再生方式ディスプレイの一つであることが可能である。つまり、大部分の裸眼立体視ディスプレイは、Light Field の実空間へ再生するディスプレイである光線再生方式ディスプレイと捉えられることできる。光線情報の表記方式(パラメータ化)の違いが、裸眼立体視ディスプレイの方式の違いで、Light Field のサンプリングが、各方式の数値パラメー

タと密接に関連している。

大まかな性能は総情報量で決まり、総情報量は Light Field のサンプリング量を表す。最終的に光学系を用いることから、クロストークなどの詳細性能の違いは、前述の LFSF のような関数でモデル化可能である。

つまり、裸眼立体視ディスプレイの性能向上において、i) デバイスの提示可能な総情報量を増やすこと、ii) 効率よい Light Field 記述方式を採用すること、iii) その記述方式を実現するデバイスを開発すること、が重要であると予想される。Light Field を用いることで、問題が明確になり、今後の研究指針を立てやすくなると思われる。このことにより、コンテンツに応じた最適なディスプレイ設計も、コンテンツを表すのに最適な Light Field 記述を探る問題と同値ととらえられ、定量的な議論が可能となる。

### 3.3 光線再生方式ディスプレイとしての立体ディスプレイの分類

立体ディスプレイの分類は、過去においても、色々な議論がされているが、ここでは、光線再生の次元の観点から分類を行う。図 3.1 が、光線再生の観点からの立体ディスプレイ分類図である。ここでは、3次元光線情報再生方式であっても、位置1次元、方向2次元などの、現実的でないものは除外した。

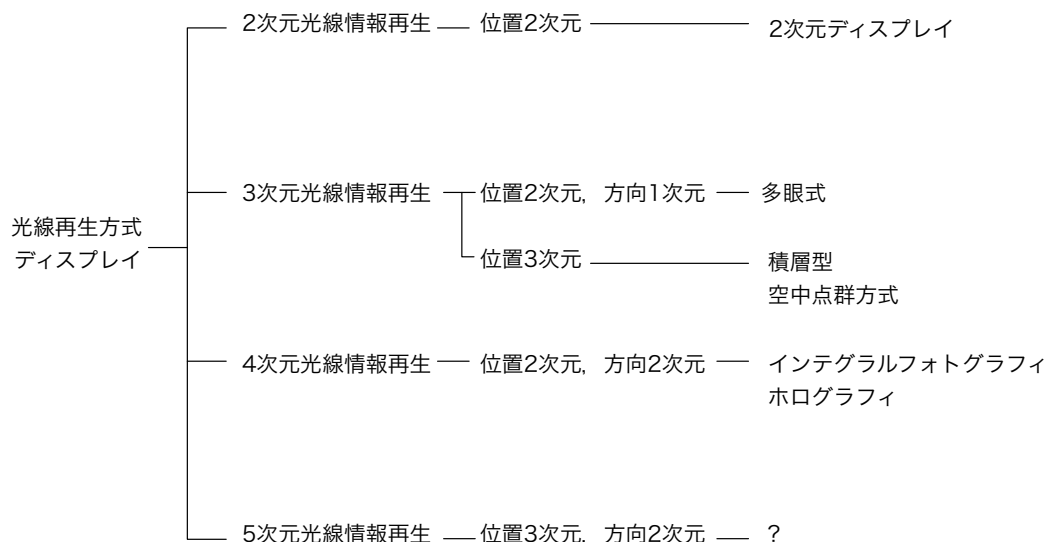


図 3.1: 光線情報再生の観点から行った立体ディスプレイの分類

#### 3.3.1 3次元光線情報再生ディスプレイ

3次元光線情報を再生する立体ディスプレイは、通常、2次元位置と1次元方向をもつ。そのため、一方向のみ視差を持つ立体ディスプレイを意味する。3次元光線情報を再生する立体ディス

プレイとしては、2眼式、多眼式 (Multi-View: MV) がある。1次元インテグラルイメージング (1-D Integral Imaging) も、3次元光線情報で記述できるため、同じ分類とする。積層型のディスプレイは、複数のパネルを物理的にならべたり、時分割で制御したりする方式であるが、光の位置に関しては3次元の成分を持つが、方向に関しては自由度がないため、おなじ3次元光線情報として分類する。ディスプレイパネルを回転させる方式なども、ここに分類される。

### 3.3.2 4次元光線情報再生ディスプレイ

4次元光線情報を再生する立体ディスプレイは、通常、2次元位置と2次元方向をもつ。そのため、縦横方向の両方に視差を持つ立体ディスプレイを意味する。このことは、観察者が任意の回転を含む任意の自由な視点移動が可能であることを示している。4次元光線情報を再生する立体ディスプレイとして代表的なものに、インテグラルフォトグラフィ (Integral Photography: IP) がある。レンズアレイを用いた IP は、光線の出射方向が2次元であるので、4次元光線情報を再生と言える。複数台のプロジェクタを用いた複数の IP を重畳する方式も、ここに分類される。ホログラムの扱いは難しいが、次に述べる5次元光線情報を再生する立体ディスプレイが満たすべき定性的な性質である、オブジェクトの裏面も表現できる、という条件を満たしていないので、4次元光線除法再生であると分類できる。ホログラムは、2次元の写真プレート (位置2次元) に、光波の振幅と位相のみが記録されていることから、情報次元として4次元しか持たないことが理解できる。

### 3.3.3 5次元光線情報再生ディスプレイ

究極の立体ディスプレイは、5次元光線情報を再生できることであるが、残念ながら、現在は、そのような原理を持つ立体ディスプレイは存在しない。自由空間点群方式であっても、輝点の光の広がりが任意に制御できれば、条件を満たすと言えるが、現時点では、根本的な解決方法が提案されていないため、すぐに実現するのは難しいと予想される。5次元の光線情報再生が実現出来ると、例えば、霧や雲などの空中で光が散乱する、光が直進しない現象である、SSS (Sub Surface Scattering) の正確な再現が可能となる。その結果、よりリアルな立体映像が提示可能となる。SSS は、現在のフォトリアリスティックレンダリング時には欠かせない手法であり、人間の皮膚のレンダリングにも使われている。5次元光線情報再生ディスプレイは、将来の大きな研究テーマの一つになりうると予想される。

## 3.4 光線情報記法

まず、実際の光線情報を記述するための、光線情報記法を定義する。図 3.2 に代表的な2つの記法を示す。 $st$  平面はディスプレイデバイス面と定義する。図 3.2(a) は、1枚の平面と、その面上の各点に付随する2次元平面パラメータにより表現する記法で、Camahort らの表記 [3] に従っ

て, Plane and Direction Parameterization (PDP) と表す. 図 3.2(b) は, 2 枚の平面により表現する記法で, Two-Plane Parameterization (2PP) と表す.

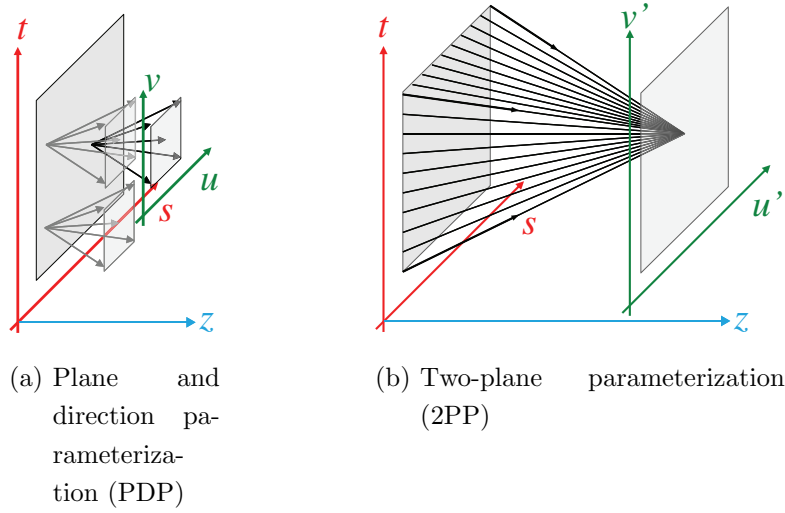


図 3.2: 光線情報の表記法

PDP では,  $st$  面上のある点から  $uv$  平面に光線が再生されると考える. 観察者の視点位置は定義しないが, 観察者は任意の視点位置をとれる.  $(u, v) = \text{const.}$  としたときに,  $(s, t)$  は平行投影画像となる. PDP は, 一般的な IP 方式のディスプレイに対応する.

2PP では, 座標  $(u', v')$  は観察者の視点位置を表し,  $u'v'$  面上のある点から  $st$  平面を見た中心射影画像を一視点分の画像と定義する. つまり,  $(u', v') = \text{const.}$  としたときに, 輝度  $I(s, t)$  は透視投影画像となる. 2PP は, 一般的な MV 方式のディスプレイに対応する. この対応関係は, 通常, MV 用の画像を生成する際に透視投影でレンダリングするのに対し, IP 用の画像を生成する際には平行投影でレンダリングすることからも理解ができる.

無限連続空間での PDP と 2PP は記法の違いのみであるが, 有限離散空間では, サンプル特性などにおいて, 両者に違いが生じる. 例えば, 撮影系を考えると, PDP では,  $(s, t)$  面に撮影カメラを置き,  $(u, v)$  面を撮影し, 2PP では,  $(u', v')$  面に撮影カメラを置き,  $(s, t)$  面を撮影することとなり, 両者のサンプリングに相違が生じている.

### 3.5 点像分布関数を用いた光線情報の定式化

実空間に再生される LF を RLF(Reproduced Light Field)( $r$ ) として,  $LF(l)$  とサンプリングパターン ( $q$ ) の積と,  $PSF(p)$  との畳み込み積分として以下に定義する.

$$r(s, t, u, v, z) = (l(s, t, u, v)q(s, t, u, v)) * p(s, t, u, v, z) \quad (3.2)$$

ここで,  $*$  は畳み込み積分を表す.

式 (3.2) は, Plenoptic Sampling [4] におけるフィルタを, 奥行き方向 ( $z$ ) の関数である PSF に置き換えたものである. また,  $r$  は連続空間で定義される関数である.

$p$  は光学系に依存する関数であり, 例えば, 単レンズの PSF は, ベッセル関数を用いてあらわされる [5] が, 通常は, PSF をガウス関数で近似して問題なく,

$$p(u, v, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(z)} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma(z)^2}} \quad (3.3)$$

と表される. 簡単のため, ここでは PSF は  $s, t$  には依存しないとした. また,  $\sigma(z)$  はガウス関数の分散を表し, PSF の幅を特徴づける変数である. 実際の値は, 光学系に依存するため, 後で議論するように,  $\sigma(z)$  は奥行きに応じて変化する.

光線空間は, 本来, 位置と向きの 5 次元の変数により記述可能であるが, LFR では 4 次元の変数で記述を行い, 理論展開をおこなってきた. しかしながら, 3 次元ディスプレイを記述するには不十分であるため, 第 5 の次元である  $z$  を PSF に導入することにより, 必要以上の複雑さを避けている. 一方で, 5 次元目の変数  $z$  を導入したため, 単なる光線近似ではなく, 光線束として取り扱うことが可能となる. さらに, RLF と瞳関数との畳み込み積分を行うことにより, カメラや人間の目に映る像を計算することが可能である. すなわち, 視点位置の移動によるフリッピングや, サンプリングパターンによるモアレの影響も入れることが可能である.

### 3.6 提案手法による解析

本節では, 提案した光線空間理論を元にいくつかの解析を行う. IP を前提にした, より細かい解析は次章で行う.

#### 3.6.1 光線空間領域での解析

##### 光線空間の変換

ここでは, 各々の表記が相互に変換可能であることを示す.  $PDP(s, t, u, v)$  と  $2PP(s, t, u', v')$  とし, 図 3.3 のような座標系をとるとする. 考えているオブジェクト上の任意の点と,  $s$  軸上の任意の点を結ぶ線と,  $z$  軸とのなす角度を  $\theta$  とすると,  $u = f \tan \theta$  である. 幾何学的な関係から, 以下のように変換できる.

$$\begin{cases} u' = s + z/f \cdot u \\ v' = t + z/f \cdot v \end{cases} \quad (3.4)$$

なお, 図 3.3 は, 簡単のために  $(s, u)$  空間で図示している.

このように, 光線情報記法の違いによる座標の違いは, 変数変換することで吸収可能である. しかしながら, 離散空間ではサンプリングの影響は排除できず, 違う記法間の比較は難しい. ただし, PSF を導入したことにより, 連続量として扱えるため, 必要に応じて, 議論しやすい記法を用いることが可能となる.

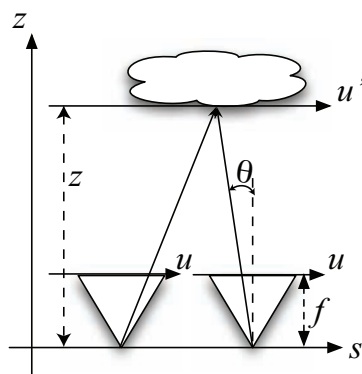


図 3.3: PDP と 2PP 座標系の幾何学的関係

### 光線空間領域におけるサンプリング特性

続いて、光線再生方式ディスプレイが、光線空間をどのようにサンプリングしているかを解析することによって、典型的な IP ディスプレイと、MV ディスプレイとの差違を検討する。まず、典型的な IP ディスプレイと MV ディスプレイを、表 3.1 に示すように設定する。この仕様は、中小型の液晶パネルを想定し、現実の設計としても適切な値を選んでいる。

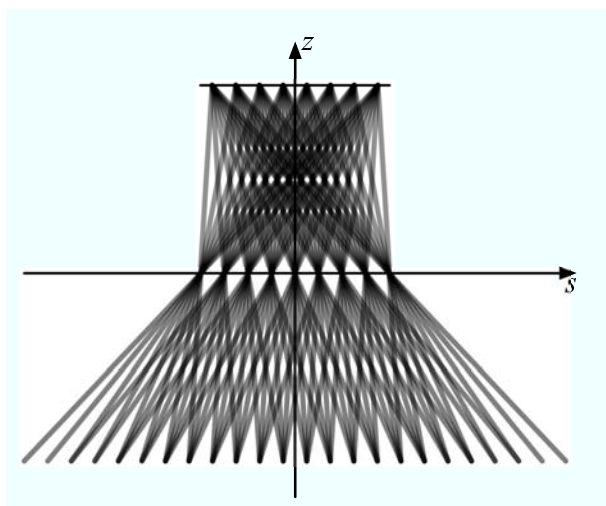
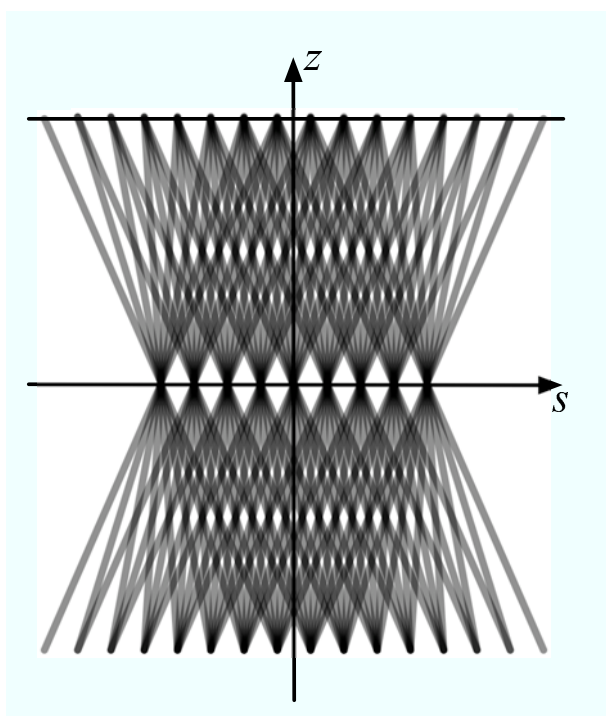
表 3.1: 立体ディスプレイの仕様

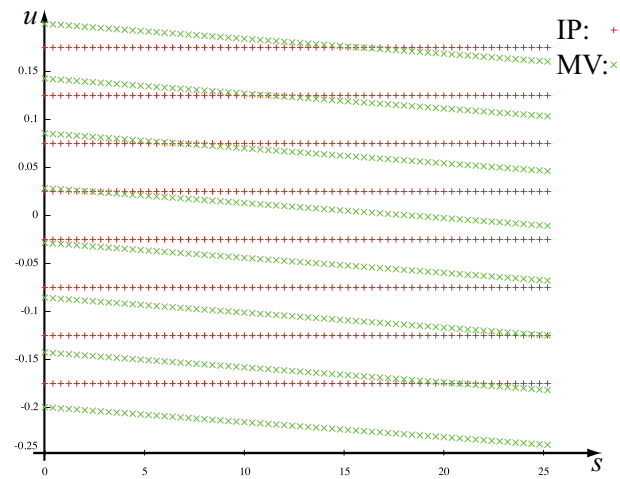
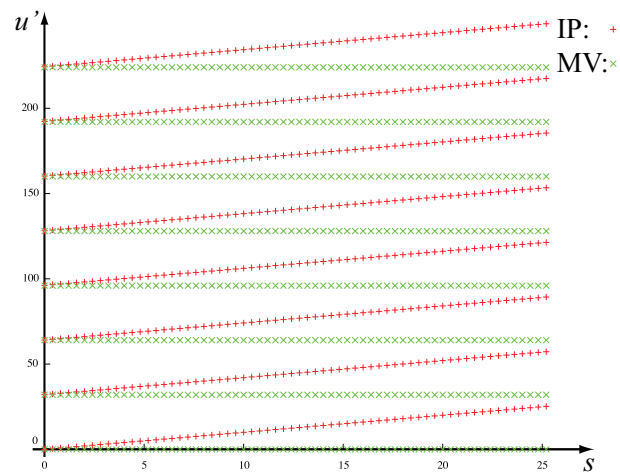
Pixel pitch	0.05 mm
Lens pitch	0.4 mm
Number of rays per lens	8
Focal length	1 mm
Viewing distance	500 mm

この仕様を元に、MV の光線サンプリングを図 3.4 に、IP の光線サンプリングを図 3.4 に示す。図から分かるように、MV は、光線のサンプリング密度が、 $z > 0$  の領域では密であるが、 $z < 0$  の領域では粗である。一方の、IP は、光線のサンプリング密度が、すべての領域でほぼ同じである。

2PP と PDP のそれぞれにおいて、位置 ( $s$ ) と方向 ( $u$ ) に関しての等間隔なサンプリング点を考える。2PP でのサンプリング点を PDP に変換すると図 3.6 のようになる。つまり、IP は等間隔にサンプリング点が並ぶ (図 3.6 の実線内) が、MV は傾いたサンプリング点の分布 (図 3.7 の破線内) を持つ。



図 3.4: MV ディスプレイの  $(s, z)$  における光線サンプリング図 3.5: IP ディスプレイの  $(s, z)$  における光線サンプリング

図 3.6:  $(s, u)$  におけるサンプリング点の分布図 3.7:  $(s, u')$  におけるサンプリング点の分布

### 3.6.2 周波数領域における解析

次に、提案理論における IP ディスプレイの周波数解析を行う。

PDP における  $(s, u)$  面をフーリエ変換した周波数空間  $(\Omega_s, \Omega_u)$  を考える。一例として IP を考える。IP はレンズアレイ面に対して、前後に同量の奥行き表示領域 (飛び出し、または、凹み量) を持つため、Chai らの理論 [4] により、IP の 3 次元像表示可能領域は、 $\Omega_s$  軸に対して対称な周波数帯域を持つとする (図 3.8(a) の暗部)。IP の場合、 $\Delta p$  は画素ピッチ、 $\Delta a$  はレンズピッチに対応する。なお、ディスプレイ自体の表示可能領域は、 $\pm\pi/\Delta p$  と  $\pm\pi/\Delta a$  で囲まれる方形領域 (図 3.8(a) の太線領域) 内であるが、飛び出し量が多いと、スペクトルを表す直線の傾きが大きくなり、スペクトルがディスプレイの表示可能領域をはみ出してしまい、3 次元像はぼけてしまうので、ここでは除いている。

一方、PSF の導入により、像表現可能な限界周波数 ( $\mu$ ) を上限値とする、再生可能周波数領域が決まる (図 6.4 の破線)。畳み込み積分では、フィルタとして作用するため、PSF を考慮した場

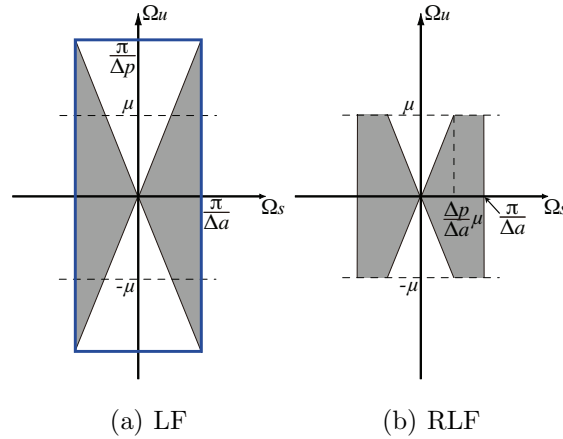


図 3.8: 周波数領域における帯域分布

合には、領域が狭まる (図 3.8(b) の暗部)。

次に、 $\mu$  の決め方について考察する。図 4.3 に、レンズ位置を変化させた時の光線の経路を示す。図は、簡単のために、レンズ径と開口径の長さを同じにしてある。一般的な光学系では、点光源から出た光線がレンズを通った後の軌跡を任意の  $z$  面で切ったときに円形の像ができるが、この像の大きさで PSF が決定でき、円の幅を  $\pi/\mu$  と考えて問題ない。PSF をガウス関数と近似した場合に、分散  $\sigma$  が、その大きさと関連するパラメータであるので、 $\sigma = \pi/\mu$  であると考え。

焦点位置にレンズを置いた場合には、収差の影響を無視すれば平行光であるので、 $\mu$  は一定であり、一般的な IP ディスプレイに対応する。

図 3.10 に、奥行きの変化に対応した限界周波数の変化を示す。高精細な IP ディスプレイを想定し、焦点距離は 1mm、レンズ開口は 0.5mm とした、幾何光学を仮定し、光線追跡法により、光線幅の逆数をプロットしたものである。 $z_0$  が結像位置に対応する。 $z_1$  までは、集束光の方が  $\mu$  は

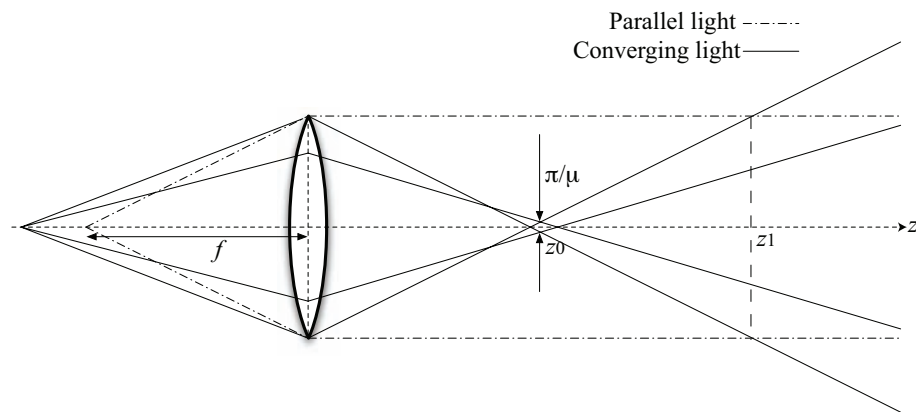
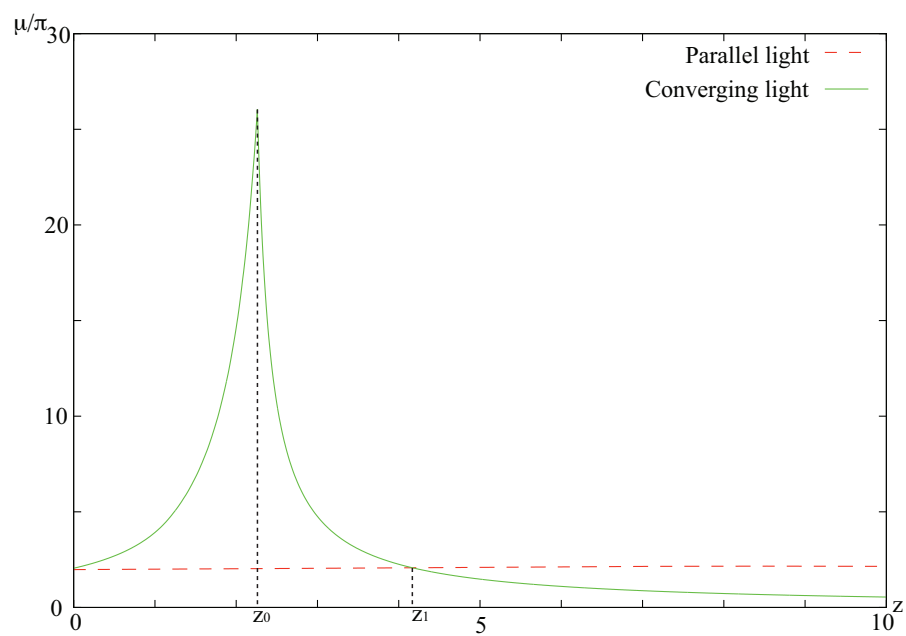


図 3.9: コリメート光と集光の光線追跡結果

大きい、それより遠い場合には、平行光の方が  $\mu$  は大きくなる。

図 3.10: 奥行き ( $z$ ) に対する限界周波数 ( $\mu/\pi$ ) の変化

### 3.7 提案手法の応用

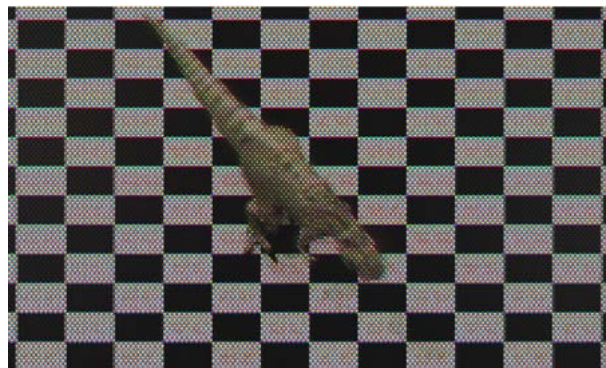
提案理論を用いることによる応用をいくつか示す。

### 3.7.1 3次元像の見え方シミュレーション

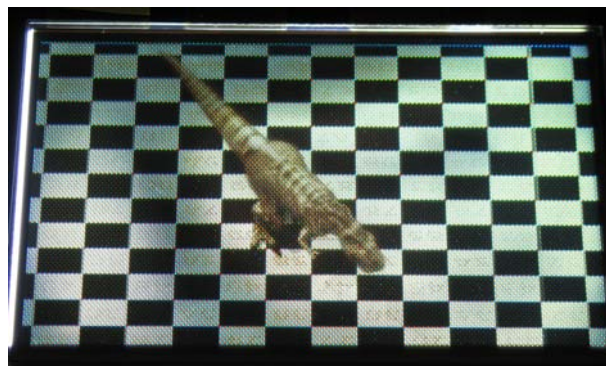
3次元ディスプレイは、一般的に、試作してみるまで、その見え方など、わからないことが多い。IP方式などは、レンズの焦点距離やレンズピッチ、要素画像の形状や大きさなど、パラメータの自由度が高いため、適切な設計を行うのが非常に難しい。よって、事前にシミュレーションで見え方が確認できることの利点は大きい。

通常、シミュレーションには、光線追跡法や大域照明の手法を用いるが、単純な光線追跡法では、PSFや光学系の各種特性(焦点ぼけ、など)を表現することは難しく、一方の大域照明の手法では計算時間が非常に長くなる問題がある。提案のRLFを計算することで見え方のシミュレーションが可能となる。

図3.11に、実際に著者らが、以前に試作したIPディスプレイ[6]で表示した立体像と、そのシミュレーション結果を示す。PSFとしては式(3.3)のガウス関数を用いた。現在のシミュレーションでは、色域やモアレの影響については考慮していないが、実機の印象を得るには充分実用に耐える結果が得られた。



(a) Simulation result.



(b) Real display.

図3.11: IPディスプレイの見え方シミュレーション結果

### 3.7.2 光線再生方式ディスプレイの性能定量化

前記の光線空間領域や周波数領域の解析により、光線再生方式ディスプレイの性能定量的化が可能となる。全空間で、表示したい光線情報と実際に表示される RLF との誤差を計算することにより、3次元ディスプレイの性能を定量評価することが可能となる。目標とする RLF を  $r_0$  とし、視点位置  $(u, v, z)$  での誤差  $\epsilon(u, v, z)$  を以下のように定義する。

$$\epsilon(u, v, z) \equiv \int (r_0(s, t, u, v, z) - r(s, t, u, v, z)) ds dt \quad (3.5)$$

ディスプレイ間の比較を行うのであれば、下式のような両者の差分  $\Delta\epsilon$  を用いる。

$$\Delta\epsilon(u, v, z) = \epsilon_{MV}(u, v, z) - \epsilon_{IP}(u, v, z) \quad (3.6)$$

解析的な計算は易しくないが、例えば、ガウス関数で近似した PSF の大きさが誤差に比例するとすれば、図 3.10 から、 $z_1$  より前では、集束光方式の方が誤差が少なく、 $z_1$  より後ろでは、平行光方式の方が誤差が少なくなることが予想される。一般的な3次元ディスプレイでは、MV は集束光方式、IP は平行光方式を用いることが多いので、同じ光学性能のレンズを用いた場合でも差が生じる可能性が高い。

また、3次元ディスプレイに必要な情報量の計算も可能である。 $s$  の自由度を  $d_s$  等と表記することになると、IP の情報量 ( $i_{IP}$ ) は、

$$i_{IP} = d_s \times d_t \times d_u \times d_v \quad (3.7)$$

と計算でき、同様に、レンチキュラなどを用いた横方向のみ視差をもつ MV の情報量 ( $i_{MV}$ ) は、

$$i_{MV} = d_s \times d_t \times d_u \quad (3.8)$$

と計算できる。 $i_{IP}$  や  $i_{MV}$  は、通常、2次元ディスプレイの総画素数である。

### 3.7.3 光線再生方式ディスプレイの解析方法

以下に示す手順で、新しい方式の光線再生方式ディスプレイを解析することが可能である。

1. 光線サンプリング手法を解析する。
2. 立体ディスプレイの原理から光線情報の記法を定義する。  
前段階の光線サンプリング手法を考慮することによって、適切な記法が定義できる。
3. 立体ディスプレイの光学系より、点像分布関数を定義する。
4. 記法上でのサンプリング光線に対して、点像分布関数を畳み込み積分することによって、次章で提案する様々な解析が可能となる。

### 3.8 むすび

本章では、まず、光線情報と光線空間の導入を行った。続いて、立体ディスプレイを再生可能な光線情報の次元の観点から分類を行い、立体ディスプレイを光線再生方式ディスプレイの一種として位置づけた。光線空間を、光線情報と点像分布関数の畳み込み積分であるとして定義した。このことにより、離散空間での光線情報を連続空間で取り扱うことが可能となる連続空間であるため、定量的な比較が容易となり、光線再生方式ディスプレイを定量的に評価する可能性がひらけた。物理的には、光線情報記法が、光線再生方式ディスプレイの方式を表し、点像分布関数は、光線再生方式ディスプレイの光学性能を表している。

本章では、主に IP と MV を扱ったが、Transpost のような、スクリーンが回転する方式の 3 次元ディスプレイは、円柱面とその方向を用いた光線記述方式を用いることで記述が可能である。さらに、レーザーなどで、実際にボリュームを表示する方式の 3 次元ディスプレイ [7] においても、十分なサンプリング数と、必要に応じて複数の LF 記法を導入 (例えば立方体の面上に 6 つの PDP 平面を定義する) することによって、記述が可能である。提案手法を用いることにより、3 次元像のシミュレーション、3 次元ディスプレイの定量比較や設計手法、3 次元ディスプレイ以外のディスプレイ用途の可能性についても示した。今後は、ホログラフィ等の取り扱いについても考慮し、3 次元ディスプレイ全体を光線再生方式ディスプレイとして体系的記述を目差す。

## 参考文献

---

- [1] Edward H. Adelson and James R. Bergen. The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision. In *Computational Models of Visual Processing*, pp. 3–20. MIT Press, 1991.
- [2] Marc Levoy and Pat Hanrahan. Light Field Rendering. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1996*, pp. 31–42, 1996.
- [3] Emilio Camahort and Donald Fussell. A Geometric Study of Light Field Representations. Technical report, Dept. of Comp. Sci., Univ. of Texas, 1999.
- [4] Jin-Xiang Chai, Shing-Chow Chan, Heung-Yeung Shum, and Xin Tong. Plenoptic Sampling. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 307–318, 2000.
- [5] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. Roberts & Co., Third Edition edition, 2004.
- [6] 小池崇文, 及川道雄, 宇都木契. モアレを削減したインテグラルビデオグラフィ. 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 6, pp. 814–821, 2007.
- [7] Hideki Kimura, Taro Uchiyama, and Satoru Shimada. True 3D Display using Laser Plasma in the Air. In *ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies*, 2006.



## 第4章

---

# 光線空間理論を用いた IPディスプレイの解析

## 4.1 はじめに

本章では、第3章で導入した光線空間理論に基づいて、レンズアレイと液晶パネルで構成される IP ディスプレイの解析を行う。光線空間、その周波数空間、光線密度空間において解析を行い、提案理論の有用性と、光線空間解析の重要性を示す。まず、光線空間での解析ではレンズを用いた立体ディスプレイであれば、避けられないモアレの解析を行う。続いて光線空間の周波数領域での解析では、レンズ精度についての検討や、立体表示以外の新しい映像表現の可能性が得られる。最後に光線密度空間での解析では、両眼間距離や瞳孔径を導入することにより、単なる光線の物理的観点からだけでなく、人間の観点からの解析が可能となる。周波数領域での解析より得られる新しい映像表現の可能性について、より詳細な検討を行う。

## 4.2 光線空間での解析

レンズアレイを用いた IP ディスプレイに必ずつきまとうモアレについての解析を行う。

### 4.2.1 IP ディスプレイのモアレ解析

通常、IP ディスプレイは、レンズアレイと液晶パネルなどのフラットパネルディスプレイで実装される。レンズアレイでなく、ピンホールアレイや、レンチキュラを2枚重ねた物が代替品として使われることもあるが、議論には影響しない。

この時の、PDP 表記での光線空間は図 4.1 のようになる。一般的な液晶パネルとレンズアレイで構成される IP ディスプレイが再生する光線空間である。任意の視距離から観察することは、任意の直線でスライスすることと同じであるため、たとえば、2つの異なる距離から観察した場合には、図の右のような色パターンが再生されることとなる。青が視距離が近い場合で、緑が視距離が遠い場合である。視距離が無限遠の時は、スライスの直線は  $s$  軸に平行になる。この図から分かるように、視距離に応じて、見える色パターンが変わってくる。視点位置を限定しない限り、このスライスを行う直線は任意であるため、色モアレを防ぐことは困難である。

### 4.2.2 IP ディスプレイの視域の改善

IP においても、立体像の再生領域を拡げるために、レンズを内寄せする手法がある。IP においては要素画像とレンズ位置の位置関係を変えることにより再生光線方向を制御することが可能である。図 4.3 が内寄せの実際の手法と効果で、レンズ位置と画像位置との関係により、光線の向きが制御可能となる。数学的には座標  $u$  が  $s$  に比例すると記述でき、内寄せ量  $c(\geq 0)$  を用いて、

$$u \longrightarrow u - c \cdot s \quad (4.1)$$

の変換を行うことである。IV におけるサンプリング点の分布は内寄せ量に対応して傾きはじめ、例えば、 $c = f/z$  とした場合には、MV と全く同じサンプリング点を持つ。つまり、ある程度最適

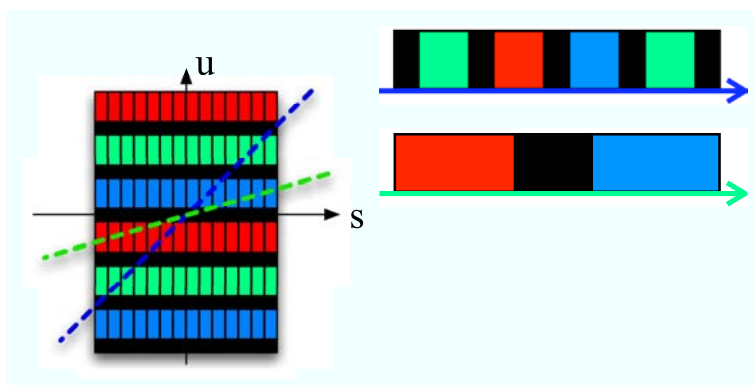


図 4.1: 光線空間でのモアレの解析

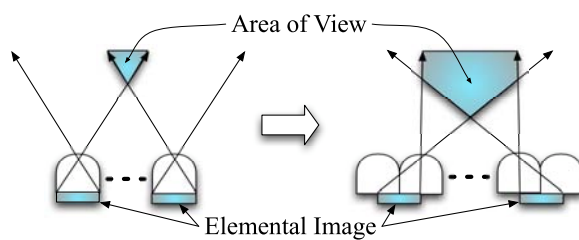


図 4.2: レンズの内寄せ効果

図 4.3: Inward move of lenses.

化された IP と MV は、サンプリング特性は同じで、PSF の違いのみであることがわかる。

### 4.3 周波数領域での解析

ここでは、光線空間の周波数領域での解析を行う。まず、飛び出し量の検討を行う。IP ディスプレイにおける飛び出し量の検討は、光学の観点から行われているが、光線情報処理の観点からの検討を行う。続いて、IP ディスプレイに要求されるレンズ性能を、光線空間の周波数領域の観点から検討する。最後に、光線再生方式ディスプレイの主な用途である立体映像表示以外の映像表現の可能性について検討する。

#### 4.3.1 飛び出し量の解析

自由視点画像合成に用いられる Plenoptic Sampling 理論 [1] からは、エイリアシングを起こさない光線密度について検討がなされており、単純に適用すると、光線密度は、立体奥行き解像度に影響を与える。図 4.4 に一般的な IV ディスプレイが再生可能な周波数領域を示す。表示立体映像が拡散面のみを持つと仮定すると、図中の灰色部分が、実際の表示可能領域である。 $(\Omega_s, \Omega_u)$  を、 $(s, u)$  をフーリエ変換した周波数空間とし、 $\Delta p$  を画素ピッチ、 $\Delta a$  をレンズピッチ、 $f$  をレンズの焦点距離とすると、最大飛び出し量 ( $z_{\max}$ ) は、

$$z_{\max} = f \frac{\Omega_u}{\Omega_s} = f \frac{\Delta a}{\Delta p} \quad (4.2)$$

と、記述できる。飛び出し量が、この  $z_{\max}$  以内であれば、信号処理の観点から、エイリアシングが起こらないと考えられる。

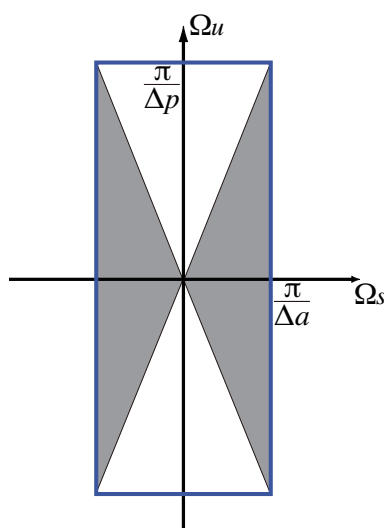


図 4.4: IV ディスプレイの表示周波数領域

### 4.3.2 IP ディスプレイに要求されるレンズ性能

画素ピッチ，レンズピッチ，レンズ性能は，立体ディスプレイの性能において相関を持つ設計パラメータであり，以下の関係が成り立つ．

- $\mu > \pi/\Delta p$  の時 (図 4.5(a))  
 レンズ性能が，2次元ディスプレイの性能 (画素ピッチ) より高い．3次元像の画質をあげるには，2次元ディスプレイの画素ピッチを狭める必要がある．
- $\mu = \pi/\Delta p$  の時 (図 4.5(b))  
 最もバランスの良い設計．
- $\mu < \pi/\Delta p$  の時 (図 4.5(c))  
 2次元ディスプレイの性能が，レンズ性能より高い．レンズ性能を良くするか，2次元ディスプレイ性能をさげる余地がある．ただし，後述のように HDRI ディスプレイとして機能する可能性がある．

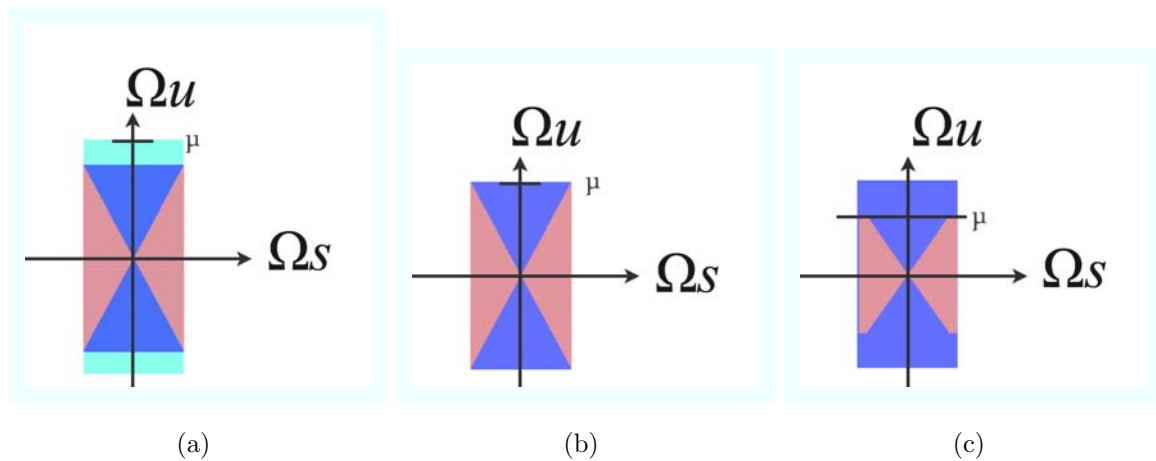


図 4.5: ディスプレイの設計

### 4.3.3 新しい映像表現の可能性

光線再生方式ディスプレイの主な用途は立体ディスプレイであるが，光線情報を，奥行き，方向，階調など，いろいろな成分の表現として用いる可能性が考えられる．奥行きを表現する3次元ディスプレイに対して，方向を表現する BRDF (Bidirectional Reflection Distribution Function) ディスプレイや，階調を表現する HDR (High Dynamic Range) ディスプレイが考えられる．

## BRDF

非ランバート成分を持つ物体の表示に対しては、周波数特性を表す線が太くなることが知られている [2]. また、鏡のようなオブジェクトでは、鏡に映った光源やオブジェクトは、仮想的により距離が遠い ( $st$  面から鏡までの距離 + 鏡から光源やオブジェクトまでの距離) ので、3次元ディスプレイの表示性能を超えてしまう可能性がある.

一方、奥行き値0の面 (IP であれば、ディスプレイ面) のオブジェクトは、周波数領域においては、横軸に対応する (図 4.6 の破線内部分). よって、エイリアシングの影響が無視できるとすれば、 $z = 0$  の面に BRDF を考慮したオブジェクトを表示した場合は、 $z > 0$  の面に表示するより、帯域に余裕があり、質感の再現性能が高くなると予想される. つまり、3次元表示を犠牲にすれば、高品質な2次元 BRDF 画像を再生するディスプレイが実現できる.

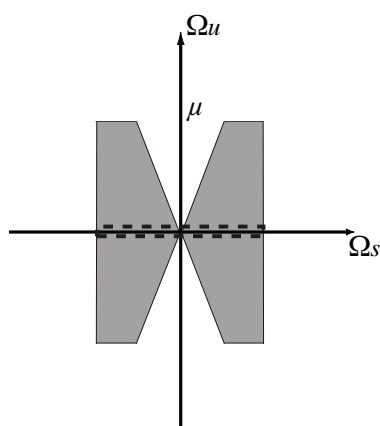


図 4.6: 非ランバートシーンのフーリエ変換

## HDR

PSF 性能が位置分解能より悪い場合 ( $\mu < \pi/\Delta p$ ) は、複数の光線によって、一つの画素を再生する状態となる. IP で言えば、1 レンズ内の像を複数の画素で構成する状態であり、複数の画素の階調を適切に制限することにより、元のディスプレイの持つダイナミックレンジを超えた表現を持つことが可能性がある. このとき、HDR の表示が可能となる.

## 4.4 光線密度での解析

### 4.4.1 はじめに

ディスプレイにおいて光の出射位置と出射方向を制御する手段として、IP (Integral Photography) が知られている [3]. IP は3次元ディスプレイ方式の一つであり、高解像度 LCD<sup>1</sup> とレ

<sup>1</sup>2次元平面ディスプレイであれば何でも良い.

レンズアレイによって構成される。筆者らは、IP を用いることで、3D/BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)/HDR(High-Dynamic Range) という3つの異なる表現が可能になると考え [4]、実際に BRDF ディスプレイを提案・実装してきた [5]。本稿では、IP を用いて 3D/BRDF/HDR それぞれの機能が成立するための条件について検討する。

#### 4.4.2 3D/BRDF/HDR 表示の原理

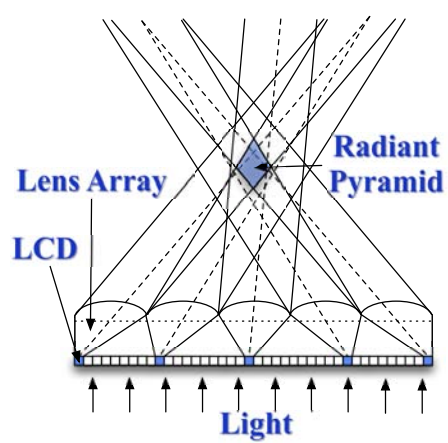
IP を用いて 3D/BRDF/HDR をそれぞれ実現した場合の光学的状態を図 4.7 に示す。図 4.7(a) の 3D 表示は、IP 本来の使い方であり、複数の光線が交差する位置に Radiant Pyramid が再現され、そこに物体が飛び出して見える。この Radiant Pyramid をバランスよく形成することが 3D ディスプレイとしての最適設計となる。図 4.7(b) の BRDF 表示では、視域を拡大することで、物体表面の見え方の変化などを表現することが目的となる。このためには、3D 表示に比べて、レンズの焦点距離を短くすることが有効である。図 4.7(c) の HDR 表示では、レンズを通過した異なる画素の光線をオーバーラップさせることで、1つの明るい点を表現する。これは、3D 表示に比べて、レンズの焦点距離を長くして視域を狭めることで達成される。ただし原理的には、表示を平滑化するための光学的な工夫がさらに必要である<sup>2</sup>。

#### 4.4.3 3D/BRDF/HDR 表示条件の検討

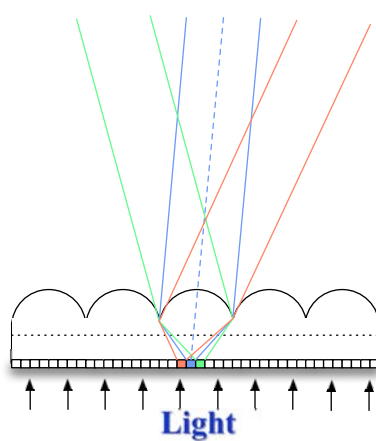
さらに詳しく検討するために、本稿では、IP によって表示される 1) 視域角、2) 光線間隔角密度、3) 光線幅について考える。視域角 ( $x$ ) は、一般の定義通り、各レンズから出射された光がユーザの目に届く範囲である。光線間隔角密度 ( $y$ ) とは、1つのレンズから出射される隣り合う2本の光線がなす角度 ( $\phi$ ) の逆数であり、レンズから出射される光線の密度を表す。レンズの焦点距離を  $f$ 、レンズ背後の LCD の画素間隔を  $d$  とした場合に、光線間隔角は、 $\phi = 2 \arctan(d/2f) = 1/y$  である。一方、光線幅は、点像分布関数の考え方を導入することで、光線が広がりながら幅を持って出射されることをモデル化することができる [4]。本稿では、議論を簡単にするため、レンズの焦点距離に各画素が配置されている状態を考え、レンズから出る光を平行光として扱う。このとき、光線幅はレンズの開口径である。光線幅の制御を含めた議論は今後の課題とする。

以上の前提の元で、3D/BRDF/HDR 表示のそれぞれにおける必要条件を図 4.8 に示す。ただし、ある視距離 ( $L$ ) に対する状態を図式化しており、視距離に応じてこの図は変化する。1つのレンズの背後に配置している画素数 (出射光線数) を固定すると、視域角と光線間隔角密度はトレードオフの関係 ( $x \cdot y \equiv M (= \text{const.})$ ) にある (実線で示した曲線)。レンズの焦点距離  $f$  をパラメータとして、左上 ( $f$  大) から右下 ( $f$  小) に曲線が描かれている。定数  $M$  は1レンズあたりの出射光線数であり、 $M$  の増大に伴って (レンズの背後の画素を高密度化するに従って)、この曲線は図中の右上に移動する。

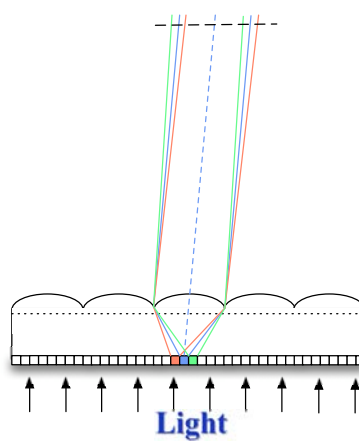
<sup>2</sup> レンズ光軸をずらして表示領域が中央に集まるように制御したり、レンズアレイより前に拡散スクリーンを配置するなど。



(a) 3D



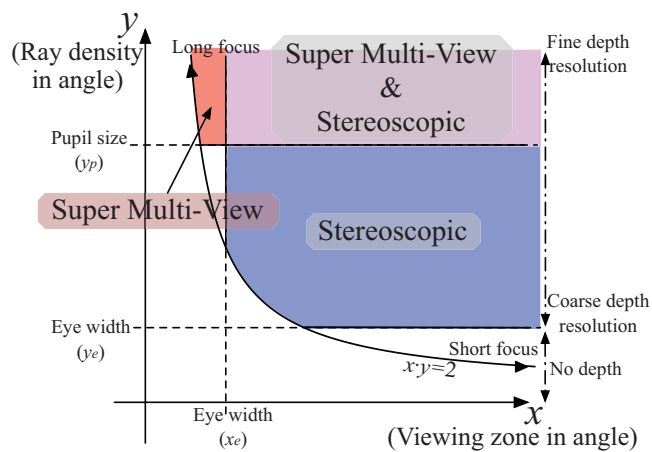
(b) BRDF



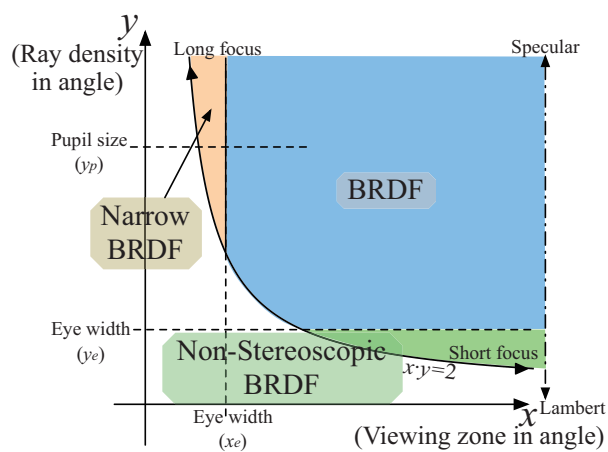
(c) HDR

図 4.7: IP ディスプレイを用いた 3D/BRDF/HDR 表示の原理

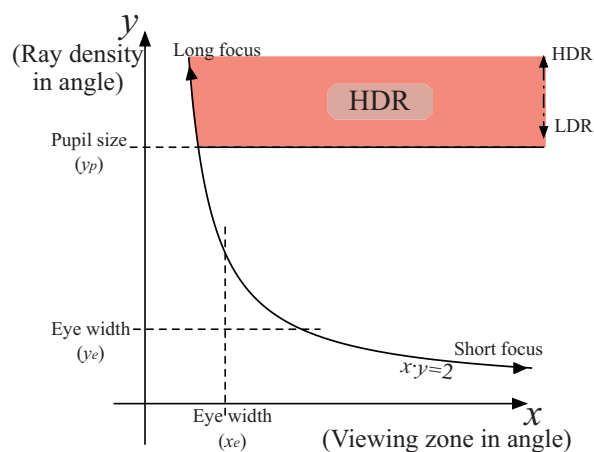




(a) 3D



(b) BRDF



(c) HDR

図 4.8: 3D/BRDF/HDR 表示の必要条件

### 3D 表示の条件

図 4.8(a) は 3D 表示のための条件で、まず両眼視差が成り立つことが立体視のために必要である。この場合には、視域角と光線間隔角密度の両者に対して下限  $(x_e, y_e)$  が存在する。IP の特性である「飛び出すほど像がぼける」という現象は、光線間隔角密度が増えるに従って低減され、結果的に飛び出し量が増すことになる。さらに、瞳の大きさに対応する角密度  $(y_p: y_p > y_e)$  より上方の領域では、超多眼が成立する。よって、図 4.8(a) のように、超多眼のみ成立する領域と、超多眼かつ立体視が成立する領域が存在する。

### BRDF 表示の条件

図 4.8(b) は BRDF 表示のための条件で、 $M \geq 2$  であることが必要である。光線間隔角密度が増えるに従い、ランバート成分のみからスペキュラ成分を含めた表現が可能となる。図中 Narrow BRDF と表記した領域は、スペキュラ成分の表示に適しているが、視域が狭く、両眼での観察はできない。一方、Non-stereoscopic BRDF と表記した領域は、広い範囲での視点移動に対応できるが、緩やかな変化に留まり、両眼にはほぼ同じ光が届くことになる。この領域では、本来の目的からは外れるが、複数のユーザに異なる画像を提示するような用途（ドライバにはナビ、助手席には映画など）にも利用できる。

### HDR 表示の条件

図 4.8(c) は HDR 表示のための条件で、瞳に 2 光線以上が入射することが必要である。したがって、この HDR 表示可能領域では超多眼も成立することになる。先に述べた光学的な工夫を施すことで、この条件を緩和できるものと考えられる。 $M$  の増加に伴って、LDR(Low-Dynamic Range) から HDR へと変化する。

#### 4.4.4 まとめと今後の課題

以上をまとめると各表示の条件は下記となる。

- $y \geq 2/x$ : BRDF 成立
- $y > y_e$  &  $x > x_e$ : 立体視成立
- $y > y_p$  &  $y \geq 2/x$ : HDR・超多眼成立

この条件から、立体視は成立しないが、BRDF のみ、もしくは HDR・超多眼のみが成立する領域が存在することがわかる。これらの領域は、従来の IP 研究では対象とされてこなかった領域であり、比較の実装が容易な場合もある。一方、全てが成立する領域は、高密度化が必須である。焦点距離  $f$  の変更により、実線の曲線上の任意の状態が実現可能であり、またレンズあたりの光線数  $M$  を変更することで図 4.8 の右上方向に特性をシフトすることができる。このような動的な

設定が可能な光学系を設計することで、映像コンテンツに応じて適切な表示特性を実現できるものと考えられる。

今後は、光線幅や視点移動を考慮した条件について詳細に検討を行う。実際のディスプレイを実装するには、解像度なども含めた、より多角的な解析も必要である。例えば、BRDF 表示は、本来、入射光に依存するものであるため、入射光に対する動的な変化も実装する必要がある。また、奥行き解像度とスペキュラ成分の再現性に関する検討も 3 次元表示性能を定量化する上で必要である。引き続き、上記に挙げた検討を行い、動的な光学系を用いた新しいディスプレイの実現を目指していく。

## 4.5 むすび

本章では、第 3 章で提案した理論を元に、光線再生方式ディスプレイである IP ディスプレイの解析を行った。解析は、主要な光線情報空間である、光線空間と、その周波数領域と、光線密度空間の 3 つの側面から行った。解析の結果、様々な定性的・定量的な結果が得られた。光線空間で解析することにより、初めて得られたり、より簡単に得られたりする結果である。各解析によって得られる知見は、それぞれ違うものであるが、これらを統合することによって、初めて光線再生方式ディスプレイの適切な設計が可能となる。

こうした光線空間の多面的・多角的解析を行うことは、直感的に分かりにくい光線再生方式ディスプレイの定量化を可能とする。第 6 章で行うような、光線情報の一次微分空間で行うなど、他の解析手法も可能である。

次章では、ここで得られた解析を元に、実際の IP ディスプレイの設計と実装を行う。

# 参考文献

---

- [1] Jin-Xiang Chai, Shing-Chow Chan, Heung-Yeung Shum, and Xin Tong. Plenoptic Sampling. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 307–318, 2000.
- [2] Cha Zhang and Tsuhan Chen. Spectral Analysis for Sampling Image-based Rendering Data. *IEEE Transaction on Circuit and System on Video Technology*, Vol. 13, No. 11, pp. 1038–1050, 2003.
- [3] Gabriel M. Lippmann. Epreuves Reversibles Donnant la Sensation du Relief. *J. de Phys*, Vol. 7, pp. 821–825, 1908.
- [4] 小池崇文, 高橋桂太, 苗村健. 点像分布関数を用いた光線情報記述法の提案–3次元ディスプレイの体系的記述に向けて–. 3次元画像コンファレンス 2007, No. 6-2, pp. 89–92, jul 2007.
- [5] 小池崇文, 苗村健. BRDF ディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, No. 1C1-4, sep 2007.

## 第5章

---

# モアレ削減と光線数増加を行った IPディスプレイの検討と実装

## 5.1 はじめに

本章では、まず、液晶パネルとレンズアレイを用いた IP ディスプレイの設計について検討する。続いて、通常の液晶パネルを改良することによる IP ディスプレイの実装方法について検討する。通常の液晶パネルを用いる場合には、色モアレの削減が非常に重要である。続いて、フィールドシーケンシャルカラー液晶パネルを用いた IP ディスプレイの実装方法について検討する。

なお、本論文では、Lippmann による提案時の名称である Integral Photography (IP) を一般論を議論する際に用いるが、IP の実装方法としては Integral Videography (IV) の名称を用いる。これは、元々の IP が撮影(写真)技術を指すためであり、IV は、IP を動画対応へ拡張した技術の名称と定義する。ただし、他にも、Integral Imaging, Integral 3D などの呼称があるが、基本光学系は全て IP と同じである。

## 5.2 IP ディスプレイの設計

### 5.2.1 IP ディスプレイの情報量

IP ディスプレイの総情報量は、元となる 2 次元パネルの情報量により決定される。情報量について議論するために、自由視点画像合成に使われる、4 次元光線情報 (LF: Light Field) の考え方 [1] を導入する。LF は、光の直進性を利用し、2 平面を通る光線や、1 平面と 2 つ角度で表した光線などを表現可能な、4 次元パラメータ空間である。IP は、離散的に考えると、LF そのものを実空間に再現していると考えられるため、光線の広がりなどの影響を無視すれば、LF の研究結果が、そのまま適用できると考えられる。

IP においては、画素数、光線数、光線密度、視域にはトレードオフがあり、次の 2 式で表される。

$$\text{総情報量} = \text{光線数} \times \text{画素数} \quad (5.1)$$

$$\text{視域} = \text{光線数} / \text{光線密度} \quad (5.2)$$

ここで、光線数は、縦横の光線数の総和である。要素画像の形状が、正方形であれば、光線数 = 縦光線数  $\times$  横光線数である。画素数は、レンズ数であり、正方格子に並んでいれば、画素数 = レンズ数 = 縦レンズ数  $\times$  横レンズ数となる。光線密度は、隣り合う光線間隔の逆数である。光線数は多いほど良いし、光線密度も高いほど良いが、情報量の総和が一定である限り、その範囲内の最適化が必要となる。具体的に、光線数を  $(u, v)$  空間に対応させ、画素数を  $(s, t)$  空間に対応させると、4 次元の  $\text{LF}(s, t, u, v)$  に一対一に対応することとなる。光線密度や 2 次元解像度が目に与える影響に関しては、ほとんどデータが無いため、今後の課題となる。

以上のように、立体ディスプレイのパラメータ設計は、情報配分の最適化の問題と見なすことができる。

### 5.2.2 IPディスプレイの設計指針

IPディスプレイの設計は、2次元の情報量の総和が決定された時に、どのようにLFに分配するかという問題に帰着される。限られた情報を適切に再配分するために、適切な設計をする必要がある。しかしながら、先に示したように、パラメータが多岐にわたり、トレードオフの関係があるために、適切な設計を行うことは、容易ではない。そのため、設計の指針が必要であるが、我々は、2次元のディスプレイを拡張するという考え方をする。

**2次元解像度の設計** まず、2次元解像度を設定して、それから他のパラメータを設定することとする。既存データとの親和性などを考慮して、最低限の2次元解像度を設定する。

解像度の見積もりとしては、人間の視力をベースとする。例えば、5インチ程度のディスプレイを、500mm離れたところで見ると想定する。視力1.0程度とすると、必要なレンズピッチ(立体映像の画素ピッチ)は0.145mmとなる。この中には、2次元ディスプレイの画素が数個入る必要があるが、300ppiだと画素は0.084mmであるので、2個弱しか入らないこととなる。視力0.5程度と条件を緩めるとレンズピッチは、0.29mmとなり、4個程度の画素が入ることとなる。

また、レンズを偶数列と奇数列で、ピッチを半分ずらすような配置(デルタ配置)にすると、見た目の解像度がだいぶ増すこととなるため、出来る限りデルタ配置を採用する。

**要素画像形状の設計** 要素画像形状は、視域の形状を決定するため、全てが同じ形状であるのが望ましい。要素画像を2次元ディスプレイの画素に対応させた時に余りが出ないような形状を採用する必要もある。また、縦横で長さが違うと、視域も、縦横で長さが変わってくるため、アプリケーションなどによって、適切に選ぶのが良い。

**飛び出し量の設計** 飛び出し量を考慮して視域を決定する。飛び出し量は、式(3)から求まるが、実際の飛び出し量は光線に幅があることもあり、経験上、2倍弱程度まで許容されるようである。

**最適化** 最後に、必要に応じて最適化を行う。例えば、次のような、最適化が可能である。

- 光線方向を制御した視域の最適化
- 目の間隔を考慮した光線密度や視域の最適化

## 5.3 カラーフィルタ配置を変更したIPディスプレイ

### 5.3.1 はじめに

裸眼立体視ディスプレイの方式は多数あり、古くはスリットやバリアを用いた2眼式に始まり、レンチキュラを用いた他眼式や、DFD方式[2]、ボリュームを再現する方式など、多数の研究が行われてきた。理想的な原理の一つとして、Lippmannにより発明されたIntegral Photography(以

下, IP) 方式がある [3]. IP 方式の原理は, 図 5.1 に示すように, レンズアレイなどの光線制御素子を用いて光線の方向を制御し, 実際に物体が存在する場合と同じ光線束 (Radiant Pyramid) を記録し, 空間中に再生する方式である.

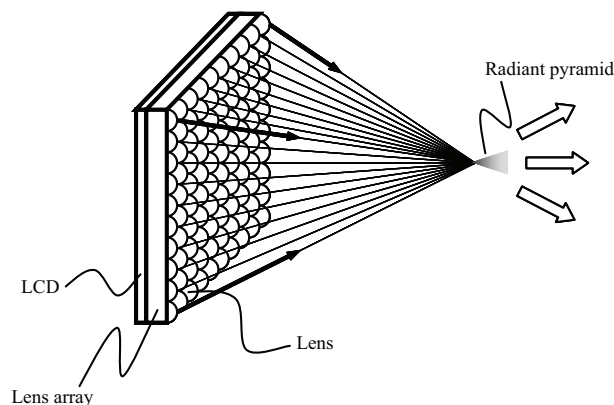


図 5.1: インテグラルフォトグラフィの原理

IP 方式は, その潜在能力の高さから, 古くから研究が行われてきており [4, 5], 立体テレビへの応用を目指した研究 [6] も行われている. しかしながら, 現実的な IP ディスプレイの実現のために必要なデバイスの要求仕様が高く, 実用化には至っていなかった. IP ディスプレイの解像度低下を補うための研究として, 横方向のみ IP を用いた方式 [7] や, LCD アレイ [8] を用いた研究がなされている. 著者らは, IP を原理に持ち, 動画対応へ拡張した技術として, Integral Videography(以下, IV) と称した研究を行っており, マルチプロジェクタを用いて高解像度高密度ディスプレイを実現している [9]. マルチプロジェクタを用いる方式は, 高解像度化には有効であるが, 複数台のプロジェクタを用いるために, 信頼性に問題があった.

IV の実現には, レンズなどの光学系が必須であるため, モアレの改善も大きな課題となっている. モアレは, レンズなどの光学系と印刷やプリンタ出力画像とを組み合わせた裸眼立体視印刷の頃から発生が問題になっており [10], 液晶ディスプレイと組合せた場合のモアレの削減方法の研究 [11] も行われている.

本稿では, 5.3.2 で, モアレは 2 種類あることを示し, それらの削減方法を提案する. 5.3.3 では, 設計方法について示し, 5.3.4 では, 実際に本手法を適用した試作と評価を行い, 最後の 5.3.5 でまとめを行う.

### 5.3.2 モアレの低減

#### モアレの要因

液晶パネルの画素構造を図 5.2 に示す. 各ピクセルは三つのドットにより構成され, 通常, 各ドットは, 赤 (R), 緑 (G), 青 (B) の 3 色である. 各ドット間にはブラックマトリックス (以下,



BM) と呼ばれる非点灯領域が存在する。BM は、液晶の駆動の為の回路領域であり、液晶パネルには必須の領域である。そのため、液晶パネルを用いたIVディスプレイにおいては、3色のドットに起因する色モアレと、BM に起因する輝度モアレの、2種類のモアレが発生する可能性がある。

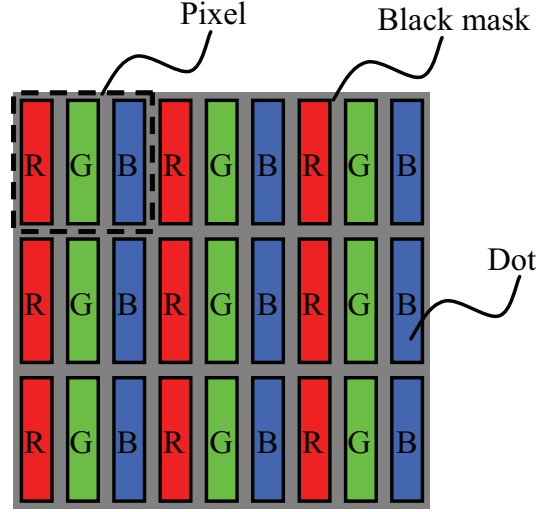


図 5.2: 液晶パネルの画素構造

まず、モアレの周波数について検討する。IV ディスプレイにおけるモアレは、小林ら [11] により指摘され、計算されているように、レンズアレイのレンズによって、液晶パネルの画素をサンプリングするために発生する。モアレの周波数は以下の方法で計算できる。モアレの周波数  $\omega_m$  は、二つの元周波数 ( $\omega_a$ ,  $\omega_b$ ) を用いて、以下のように表される。

$$\omega_m = \omega_a - \omega_b \quad (5.3)$$

この時、モアレの幅  $d_m$  は、以下のように表される。

$$d_m = \frac{1}{\omega_m} = \frac{1}{\omega_a - \omega_b} = \frac{1}{1/d_a - 1/d_b} \quad (5.4)$$

ここで、 $d_a$ ,  $d_b$  は、それぞれ周波数  $\omega_a$ ,  $\omega_b$  に対応する長さである。

図 5.3 に、IV におけるモアレ発生の様式図を示す。今、視距離  $L$  から IV ディスプレイを見たときに、レンズを通してサンプリングされる画素の間隔  $d_l$  (つまりサンプリング周期) は、レンズピッチを  $p_l$ 、レンズの焦点距離を  $f$  として、単純な幾何学的な関係から、

$$d_l = p_l \frac{L + f}{L} \quad (5.5)$$

と表されるので、モアレの周期は画素ピッチを  $d_p$  として、以下のように計算できる。

$$d_m = \frac{1}{1/d_p - 1/d_l} \quad (5.6)$$

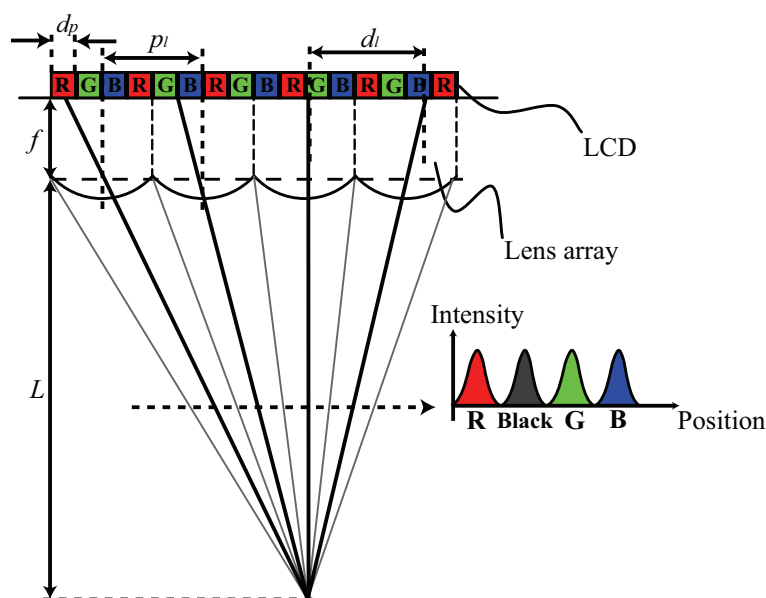


図 5.3: 液晶パネルとレンズアレイによるモアレの発生

ここで、考えているIVディスプレイは、焦点位置と光源位置(液晶ディスプレイの場合は、カラーフィルタの位置)が一致するような一般的なIV方式を仮定し、今後も、特に触れない限りこの仮定を用いることとする。

実際には、より高次のモアレも見える可能性があり、画素の $i$ 次、レンズの $j$ 次を考える必要がある。 $i, j$ は、正負の整数を取りうるため、以下の間隔を持つモアレが発生する可能性がある。

$$d_m(i, j) = \frac{1}{|i/d_p - j/d_l|} \quad (5.7)$$

通常は、画素を有効利用するため、かつ、エイリアシングを防ぐために、レンズピッチは画素ピッチの整数倍となるように設計される。そのため、 $d_m$ は比較的長くなり、モアレは、大きなうなりとなって観察される。また、式(5.6)において、例えば $L = 500\text{mm}$ 、 $f = 1\text{mm}$ 程度を仮定すると、見た目の画素ピッチが0.2%程度変化する。さらに、レンズアレイの製作精度誤差により、レンズピッチが数%程度変化することも珍しくない。よって、以下に提案するモアレの削減を実施する必要がある。

### 色モアレの削減

色モアレは、視点位置によって、レンズアレイを通して見える画素が変化することにより生じる。通常、液晶ディスプレイは、RGBを表示する3ドットにより、1ピクセルを表示するため、視点位置によって、レンズを通して見える色が、RかGかBかの画素が変化し、非常に見にくくなる。

小林ら [11] は、レンズアレイをデフォーカスさせる方法と、拡散板とを組合せ、モアレを低減

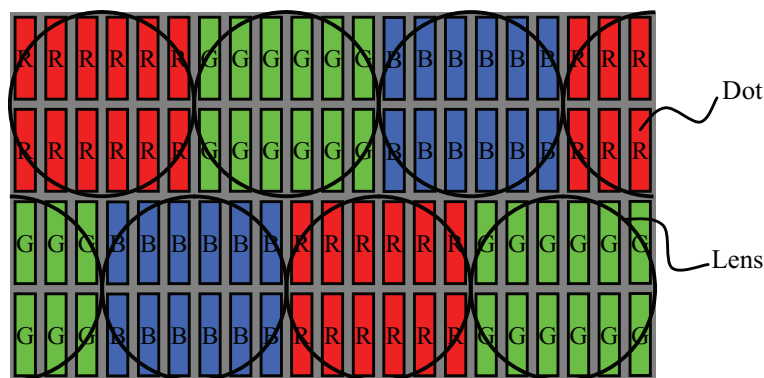


図 5.4: 色モアレを防ぐカラーフィルタとレンズ配置

させる方法を提案している。しかしながら、拡散板を用いた場合には、3ドットを混在させる必要があり、どうしても、立体像の解像度が低下してしまう。また、拡散板は、通常デフォーカスを実施するよりもパラメータ調整が難しい問題がある。

これを根本的に防ぐための方法として、図 5.4 に示す、1 レンズ下の画素を一色に統一する方法を用いる。レンズの配置もデルタ配置とすることによって、3 色間の距離が同等となり、自然なディザによる色表現が可能となる。この手法を用いると、設計映像表示領域内であれば、どの視点位置から観察しても、あるレンズは単色に見えるので、立体像の定位感を増加させることができる。通常、ドットの色は、液晶ディスプレイ内のカラーフィルタ (以下、CF) により決定される。CF は、通常、印刷技術により製作されるので、画素自体の位置を変更することに比べて変更コストが低く、現実的な手法である。

### 輝度モアレの低減

液晶ディスプレイにおいては、隣り合うドット間には、必ず光を透過しない BM が存在する。これは、駆動に用いる配線部分であるため必須で、かつ、液晶ディスプレイのコントラストを上げる効果がある。同じプロセスルールを用いた場合には、高密度のディスプレイであるほど、配線の線幅の占める割合が大きくなり、ドット幅と同等程度の大きさとなることもある。

輝度モアレは、色モアレに比べると目立ちにくいので、色モアレと同等に、完全に削減しなくても、ディスプレイの実用度は、それほど低下しない。輝度モアレを低減させるには、デフォーカスを用いる方法を用いる。また、モアレの周波数が非常に低く、映像表示領域幅以上である場合には、モアレの位置を設計映像表示領域からずらす方法も用いることができる。

### 5.3.3 設計方針とトレードオフ

設計可能なパラメータとしては、液晶ディスプレイのサイズ・画素数・解像度、レンズアレイの解像度・焦点距離などが挙げられ、調整可能なパラメータは多い。さらに、各パラメータは、そ

れぞれトレードオフの関係にある。そのため、何らかの設計指針が必要である。

非常に理想的と言われている裸眼立体視ディスプレイの方式としては、瞳に2光線以上が同時に入射する、超多眼方式 [12] がある。一つの設計方針として、これと同じ状態をIVで実現するような設計値とする方法も考えられるが、現状のデバイスでは、非常に高価なシステムになるか、多数のデバイスを必要とする。さらに、超多眼方式と類似の、高密度指向性表示方式では、横方向だけの光線数増加では輻輳の不一致が解決しないという実験結果がある [13]。

そこで我々は、2次元的な解像度を高めることによって、立体像のリアリティを高めて、かつ、光線数を保ちつつ、画素密度を上げる方針を採用した。現在のディスプレイ画素密度では、大型のIVディスプレイを適切な設計で試作することは難しいと考え、以下では、モバイル用途を想定した設計を行う。

### 解像度の設計

IVディスプレイにおける解像度は、光線数とのトレードオフであるが、実用性を考えると、最低でも、QCIF(Quarter Common Intermediate Format)の持つ、 $176 \times 144$ ピクセル以上の解像度を実現する必要があると考えた。さらに、レンズ配置をデルタ配置にすることにより、見た目の解像度が向上する効果がある。また、携帯電話や携帯用ゲーム機の解像度などを参考とし実際の解像度を決定する。

### 映像表示領域の設計

IVディスプレイでは、1レンズが再生する画像をIV要素画像と呼ぶ。IV要素画像の解像度が再生可能な光線数となる(図5.5)。図5.5はIV要素画像の大きさが4ドットの場合を示している。光線制御素子の再生範囲が映像表示領域を決定し、レンズアレイなどの光学系を用いる場合には、焦点距離 $f$ によって決定される。映像表示領域 $\theta$ は、レンズピッチ $p_l$ を用いて下式のように求められる。

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left( \frac{p_l/2}{f} \right) \quad (5.8)$$

このことは、縦と横とで、レンズピッチを変えた場合には、縦と横の映像表示領域が異なることを示しており、要素画像の外形が映像表示領域となることを示している。

1レンズに対応するIV要素画像が、そのレンズが再生する光線である。逆に考えれば、横長のIV要素画像であれば、再生領域つまり、映像表示領域が横長になると考えられる。例えば、IV要素画像が横長六角形とすれば、ディスプレイ全体の映像表示領域が、同形の横長六角形になる。映像表示領域の角をなるべく少なくすることで、画素の無駄をなくすることができる。

通常、IVディスプレイでは、レンズアレイの並びを正方格子状にするか、最密充填などにする。しかし、正方格子状であると、頂点部分のIV要素画像が再生する光線が、実際に目に届くことが少なく、さらに、最密充填であると、縦横比が無理数となってしまうため、効率よく画素を用いることが難しい。しかし、映像表示領域を調整することにより、少ない光線数で立体感と見えや

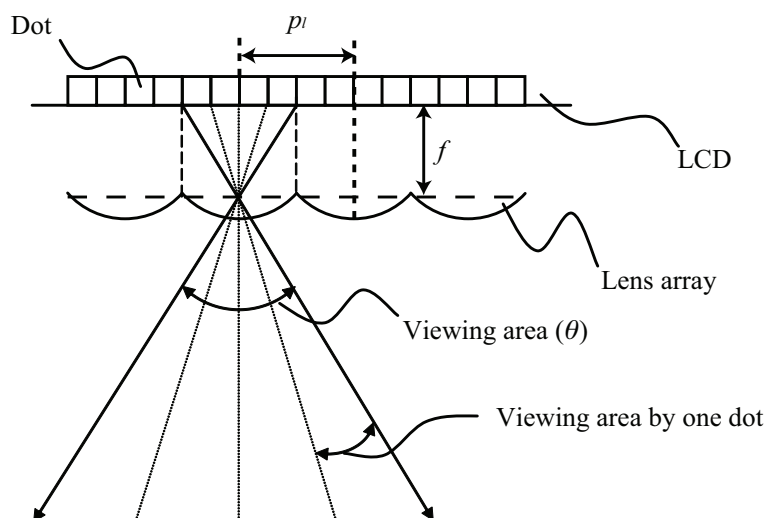


図 5.5: 1 レンズの再生する光線の領域

すさを向上させることが可能である。

### 映像表示領域の拡大化

IV ディスプレイは解像度が低いため、少しでも無駄がないように、通常、レンズピッチを画素ピッチの整数倍とする設計を行う。しかしながら、この場合は、各々のレンズは等方向に光線を再生するため、左端と右端のレンズが再生する光線の重なる領域 (図 5.6 の灰色部分) のみが、立体像の観察可能な映像表示領域となり、領域が狭くなる。そこで、映像表示領域の拡大化を以下に示す方法で行う。

レンズピッチを補正することにより、映像表示領域に関しての拡大化が可能である。図 5.7 に示すように、左右のレンズが再生する領域を中央に寄せることにより、両端のレンズが再生する領域の重なり部分の面積が広がる。実際には、画面の中央から両端にいくに従いレンズのピッチを少しずつ内寄せするような形で、光線の再生方向を制御する。光線方向の制御が、各レンズと、そのレンズに対応する要素画像の角度により調整できることは、前記の、映像表示領域の設計に関する議論から明らかである。内寄せの値を適切に設定することにより、設計視距離での映像表示領域を最大化することが可能である。今、画面サイズを  $W$ 、画素ピッチを  $p_d$ 、1 レンズ当りの視点数を  $m$  とする。最小視距離  $z_e$ 、最大映像表示領域時視距離  $z_{\max}$ 、最大映像表示領域  $\Delta x$ 、レンズずらし量  $a$  は、幾何学的条件により、以下の式で記述できる。

$$x_0 = \frac{W}{2} \quad (5.9)$$

$$z_0 = \frac{fW}{2a} \quad (5.10)$$

$$\Delta x = \frac{W - m \cdot p_d}{2a - m \cdot p_d} \times 2a - W \quad (5.11)$$

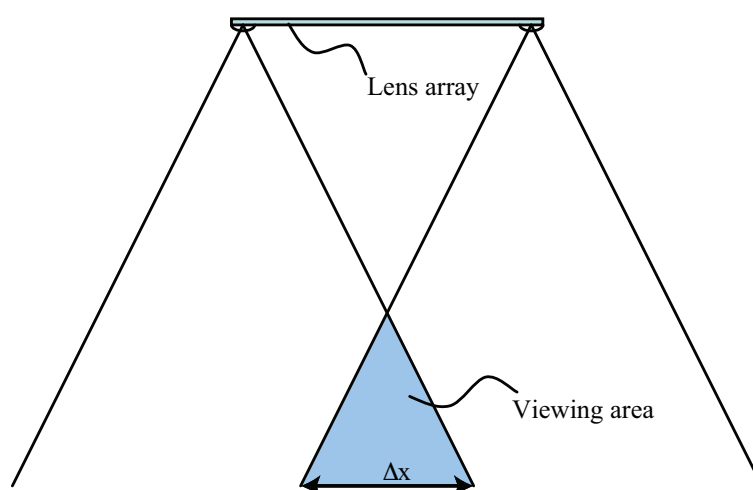


図 5.6: IV ディスプレイの映像表示領域

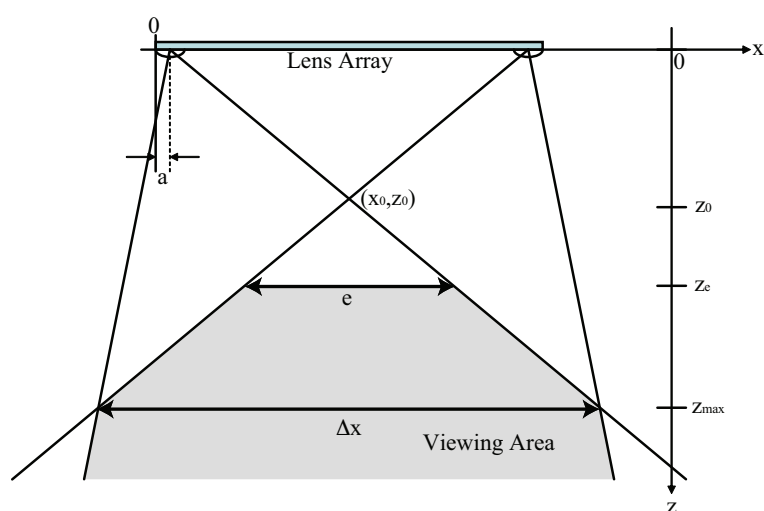


図 5.7: 最大映像表示領域

$$z_{\max} = \frac{W - m \cdot p_d}{2a - m \cdot p_d} f \quad (5.12)$$

$$z_e = \frac{W + e}{2a} f \quad (5.13)$$

$$a = \frac{m \cdot p_d (\Delta x + W)}{2(\Delta x + m \cdot p_d)} \quad (5.14)$$

ここで、 $e$  は両眼の間隔で、成人で  $e = 65\text{mm}$  程度である。

### 光線数の向上

視点数が増えると、滑らかな視点移動により、より自然な立体像を観察できる。今、液晶ディスプレイにおいて、ドットはピクセル数の3倍存在している。そこで、色再現の空間解像度を減らせば、光線数を増やすことが可能である。第2章で述べた、色モアレを解決するためのCFレイアウト (図5.4) は、元々4ピクセルの光線再生能力しかなかったものを、12ドットとして扱うことにより、3倍の光線数が得られる。色再現の空間解像度の低下による画質の劣化に関しては、適切な指標が存在しないため、見た目の印象で確認することとした。

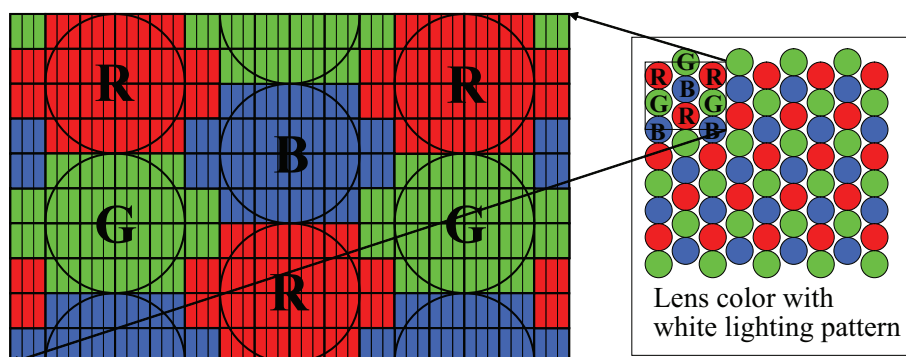


図 5.8: 提案カラーフィルタ配置とレンズ配置

### 仕様の決定

以上で述べた、CF 配置変更・映像表示領域の設計・映像表示領域の拡大化・光線数の向上を適用して、仕様を決定した。図5.8に、カラーフィルタの配置とレンズ配置を示す。1レンズに60ドットを割り当てて、60光線の再生を可能とした。横方向は最大18視差で、縦方向は最大4視差である。通常の利用では、横方向の視差が重要であるため、横方向に関しては、なめらかに視域が観察できるような設計を行った。また、顔を傾けても、立体に見える最低の視差を縦方向に用いている。レンズ配置はデルタ配置とし、かつ、縦方向と横方向でレンズピッチを変更している。

実装に使用する液晶ディスプレイの仕様を表5.1に示す。続いて、IVディスプレイの仕様を表5.2に示す。ここで、映像表示領域に幅があるのは、横方向と縦方向のレンズピッチが異なるためである。

表 5.1: 液晶パネルの仕様

Display size	5 inches
Resolution	3840 × 768 dots
Density of dot	900 × 300 dpi

表 5.2: カラーフィルタ配置を変更した IV ディスプレイの仕様

Size	5 inches
Resolution	256 × 192 lens
Lens Layout	delta
Viewing area	±9.5 ~ 14 degrees
Number of rays	60 rays/lens

次に、設計した仕様の位置づけを検討する。図 5.9 に、液晶パネルを用いた裸眼立体視ディスプレイにおける比較を示す [14, 15, 16, 17]。横軸は、1 レンズあたりの光線数を示す。光線数が多いほど、提示可能な視差数が増えるため、視点の移動に対して、より自然な立体像の提示が可能となる。縦軸は、立体像の最大空間解像度を示す。なお、提案仕様では、縦横の空間解像度は異なっている。立体像の最大解像度  $\beta_{\max}$  は、文献 [18] によれば、視距離  $L$ 、立体像の飛出し位置  $z$ 、レンズピッチ  $p_l$ 、レンズ幅  $w$  で、回折周波数  $\alpha_{\text{dif}}$ 、ナイキスト周波数  $\beta_{\text{nyq}}$  を求めて、

$$\alpha_{\text{dif}} = \frac{w}{\lambda} \quad (5.15)$$

$$\beta_{\text{nyq}} = \frac{L}{2p_l} \quad (5.16)$$

を用いて、

$$\beta_{\max} = \min \left( \alpha_{\text{dif}} \frac{L-z}{|z|}, \beta_{\text{nyq}} \right) \quad (5.17)$$

となる。ここで、今、ターゲットとしているのは、モバイル用途を考慮した IV ディスプレイであるため、 $L = 500\text{mm}$  程度、 $z = 30\text{mm}$  程度であり、この場合は、

$$\beta_{\max} = \beta_{\text{nyq}} \quad (5.18)$$

となり、レンズ密度により最大空間解像度が決定される。

図中の曲線は、二つのパラメータのトレードオフを示しており、同じ解像度のデバイスを利用していることを表す。解像度の高いデバイスを用いた場合、このトレードオフを表す曲線は、斜め上に移動する。レンズのピッチを変更することによって、同一曲線上の任意の仕様を持つ IV ディスプレイの実現が可能である。



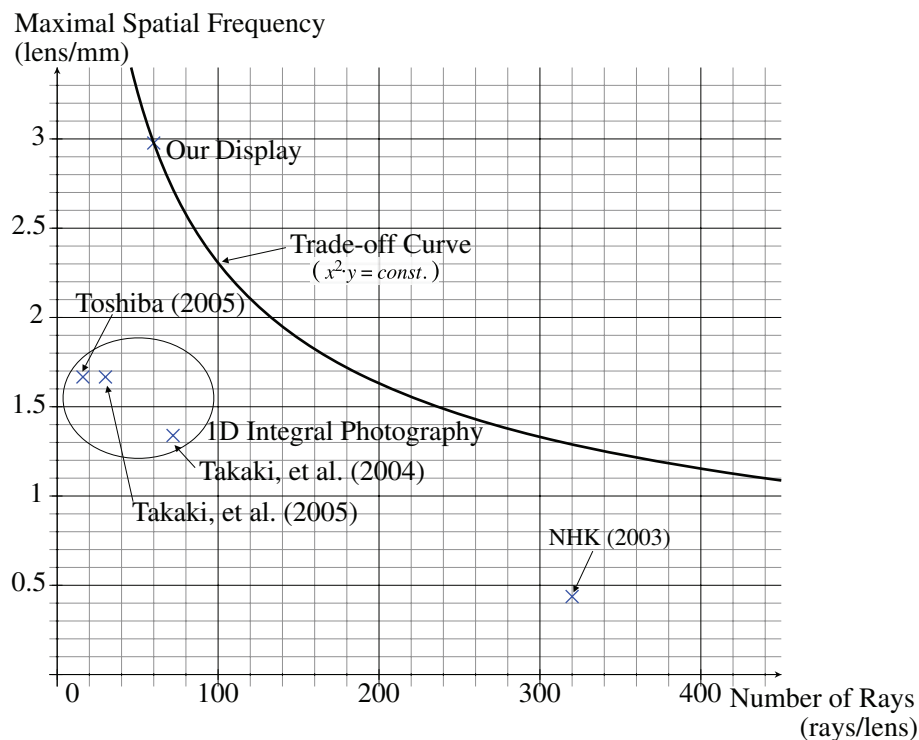


図 5.9: 裸眼立体視ディスプレイ比較図

#### 5.3.4 実装と評価

提案手法と仕様の検証のために、カラーフィルタ配置を変更した液晶パネルと、専用に設計したレンズアレイを用いた IV ディスプレイを実装した。横長のレンズアレイを試作するのは難しいため、レンズ間の隙間はブラックマスクで被うこととした。通常の 2 次元ディスプレイにおいても、画像をシャープにするために、ブラックマスクを用いている。図 5.10 に、実装した IV ディスプレイを用いて観察した際の、視域における視差の例 (運動視差) を示す。テスト用の画像作成は、まず、CG を用いて 60 視点の分の画像をレンダリングした。続いて、レンズアレイの配置にあわせて、色成分を抽出し、IV 画像として生成した。ディスプレイ面に対して、前後 20mm 程度は、ぼけも少なく、充分立体感のある立体像を提示可能なことが確認できた。

続いて、本ディスプレイの効果を検証するために、異なった画素構造を持つ液晶ディスプレイを用いた IV ディスプレイとの立体感の比較評価と、デフォーカスによる輝度モアレの低減効果の評価を行った。

300ppi のフィールドシーケンシャル方式と比較を行うことにより、色解像度の低下と光線数の向上の比較を行った。比較には、CG で作成した画像を用いた。本方式の立体像は、色解像度が低下することにより、彩度が落ちた印象を受けるが、立体感はより高いことが確認できた。また、同程度のデフォーカスで充分に輝度モアレが低減できたので、立体像のシャープさも、ほぼ同じであった。

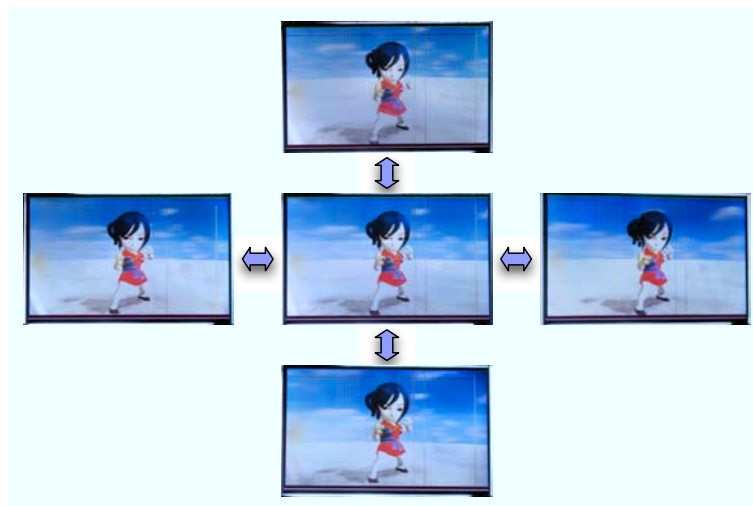


図 5.10: 運動視差

### 通常 CF 配置との比較

通常 CF 配置を持つ 300ppi(横 900dpi) の液晶ディスプレイを用いたものとの比較を行った。比較には、CG で作成した画像を用いた。通常 CF 配置を用いた IV ディスプレイでは、色モアレが発生するため、デフォーカスと拡散板の組み合わせ、または、より大きなデフォーカスを行う必要があった。

表 5.3: 通常のカラースフィルタ配置と提案カラースフィルタ配置を用いた IV ディスプレイの比較

	Conventional	Same	Proposed
Reality	5	1	14
Sense of pop-up	6	2	12
Beautifulness of color	7	2	11

比較実験は、20 代から 40 代までの男女 20 人に対して行った。通常 CF 配置と提案配置との二つの IV ディスプレイを 50cm ほど並べて机の上に設置し、同じ CG 画像を 5 枚を繰り返し表示し、見比べてもらった後の印象を答えてもらった。回答項目は、実在感、飛び出し感、色の綺麗さの 3 項目で、どちらか良い方、または、ほぼ同じであるかを評価してもらった(表 5.3)。実在感に対しては、通常 CF 配置が 5 名、提案配置が 14 名、ほぼ同じが 1 名との結果が得られた。飛び出し感に対しては、同様に、6 名、12 名、2 名との結果が得られた。色の綺麗さに対しては、同様に、7 名、11 名、2 名との結果が得られた。

得られた結果の信頼性を確認するために、 $\chi^2$  検定を行った。実在感に関しては危険率(有意水準)は 0.12%であった。飛び出し感の危険率は 2.2%，色の綺麗さの危険率は 4.7%であった。よっ

て、統計的に、二つのディスプレイ間に有意な差があると考えて問題ない。

立体感の定義は難しいが、ここでは、実際にそこに物が存在するような感覚である実在感と、ディスプレイの前後に像がある感覚である飛び出し感を合わせて立体感と考える。上記の結果は、6から7割の被験者が提案配置を用いたIVディスプレイの方が立体感があると感じたことを表している。両者の比較の意味では、2から3倍の被験者が通常CF配置より提案配置の方が立体感が高いと感じた結果であり、提案配置の方が立体感がより高いことを確認できた。色の綺麗さに関しても、立体感ほどでないが、提案配置の方が良いとの結果が得られている。実際には、提案配置の色周波数は通常CF配置のと比べて1/3であるが、立体感が増すことにより、色も綺麗に見える可能性があるという興味深い結果が得られた。このことは、今後のIVディスプレイ設計にヒントを与える結果である。ただし、IVディスプレイ比較実験手法としては、まだ、明確な指標が存在していないため、今後、より正確な評価手法を考案する必要がある。

続いて、色モアレ削減の効果を確認するために、それぞれの液晶ディスプレイに対して、白色画像を表示した際の結果を、図5.11に示す。左が通常CF配置を用いたIVディスプレイで、右が提案CF配置のIVディスプレイである。比較のために、デフォーカスにより輝度モアレをある程度低減した状態にし、計測画像の赤成分のみを抽出している。

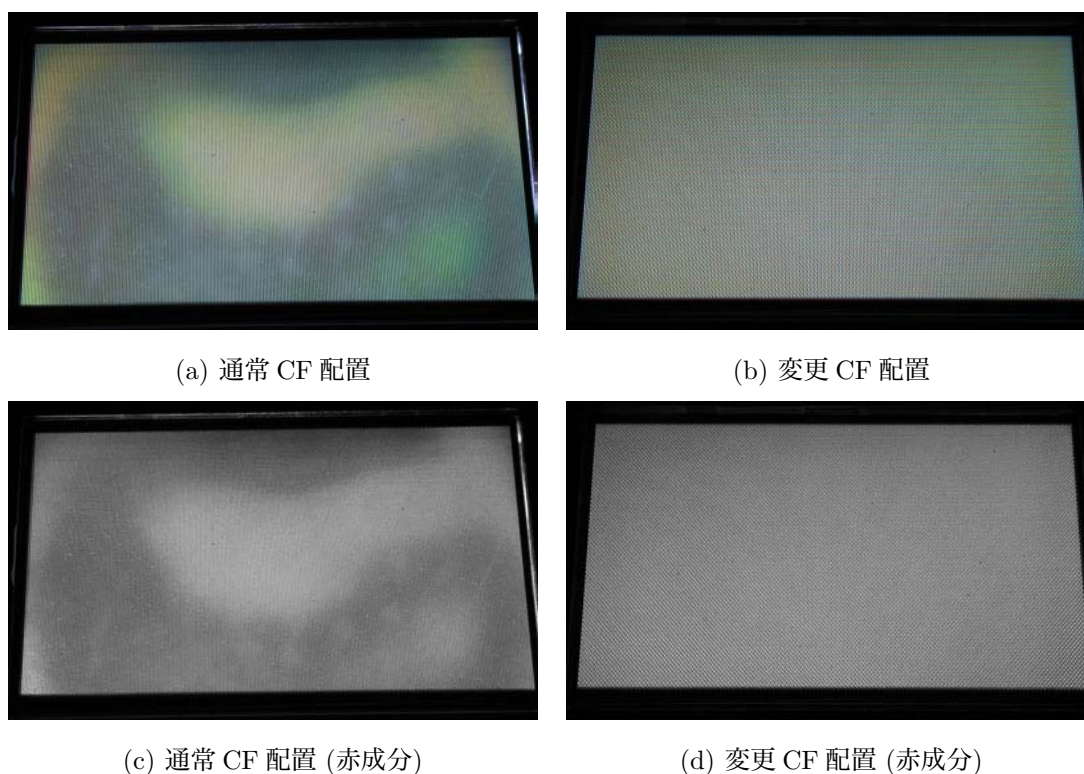


図5.11: 色モアレの比較

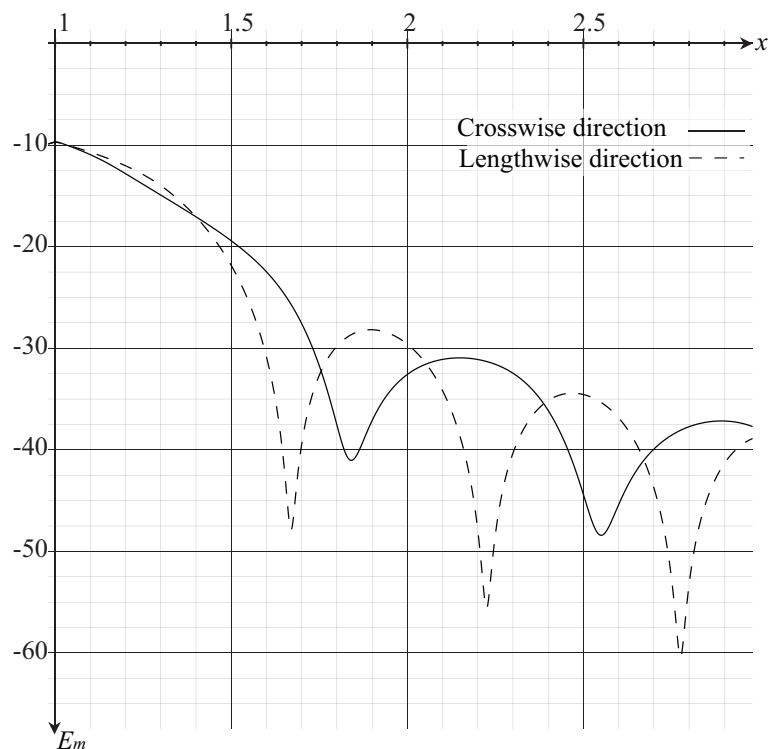


図 5.12: 輝度モアレの残存エネルギー

### デフォーカスによる輝度モアレ低減

モアレの残存エネルギー  $E_m$  は、デフォーカスを考慮したIVディスプレイの周波数特性  $H(\omega)$  を用いて、

$$E_m = 2 \sum_{n=1}^{\infty} |H(n\omega_l)|^2 \quad (5.19)$$

のように記述される [11]. ここで、 $\omega_l$  はレンズピッチを表す周波数である. また、周波数特性  $H(\omega)$  は、

$$H(\omega, \beta) = c \frac{\sin(\alpha\omega/2)}{\alpha\omega/2} \frac{2J_1(\beta\omega)}{\beta\omega} \quad (5.20)$$

と表される.  $c$  は比例係数で、 $\alpha$  は液晶の開口率で  $J_1$  は第1次ベッセル関数である.  $\beta$  は、デフォーカスによる錯乱円半径で、レンズアレイと液晶パネルのカラーフィルタ位置との距離を  $x$  として、

$$\beta = w \left\{ \frac{x}{f \cdot L} (L - f) - 1 \right\} \quad (5.21)$$

と表される.

今回の試作IVディスプレイにおいては、モアレの残存エネルギーをプロットすると、図5.12のようになる. 開口率を50%, レンズの焦点距離を1mm, 視点位置を500mm, レンズ径は0.3mm, レンズピッチは0.42mmとした. プロット結果より、焦点距離の数%から数十%までの現実的なデフォーカスの範囲では、単調減少関数であることがわかる. また、映像表示領域の拡大化を行っ

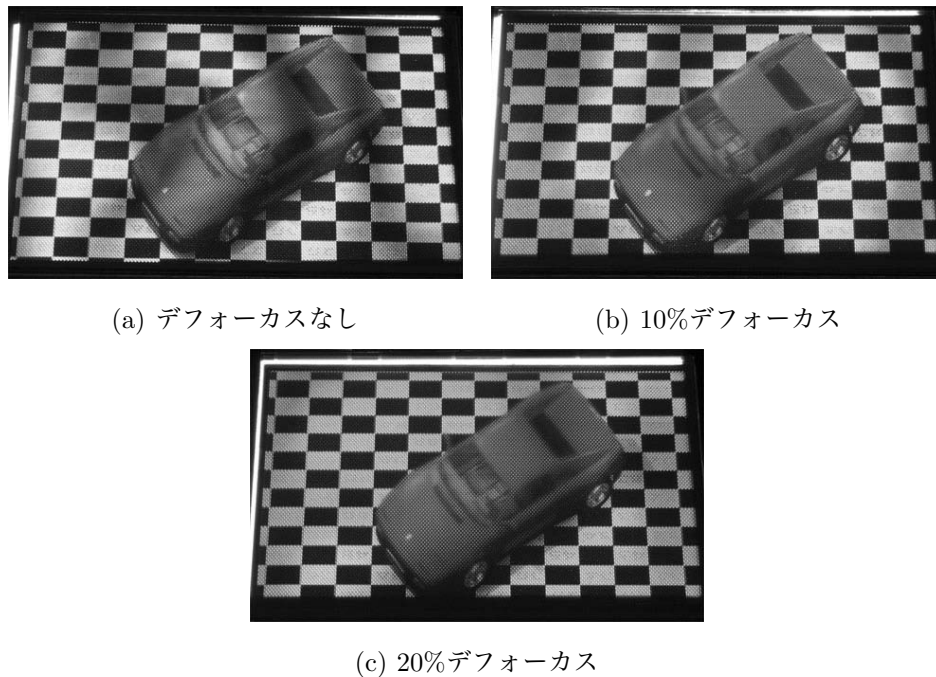


図 5.13: デフォーカスによる輝度モアレ削減

た場合には、縦横方向でレンズピッチが異なるため、デフォーカスによるモアレの残存エネルギー変化も異なる。よって、最適なデフォーカス量の決定が難しい。さらに、レンズアレイは製法によって大幅に形状精度やMTFが変わり、実際には、この結果より悪くなることが予想される。そのため、今回は、デフォーカス量を単純に増やしながら、見た目でデフォーカス量を決定することとした。

次に、デフォーカスによる輝度モアレ低減の影響を評価した。白画像を表示し、デフォーカス量の違いによるモアレの低減をデジタルカメラを用いて計測した。最も明るい部分と最も暗い部分のSN比を比較したところ、デフォーカス無しの-2.9に対して、デフォーカス10%で-2.2、同20%で-1.5、同30%で-1.1であり、デフォーカスによって、モアレが低減できたことを確認した。また、図5.13のように実際に立体画像を表示した場合の結果を示す。左からデフォーカスなし、同10%、同20%デフォーカスした結果である。20%程度デフォーカスしても、レンズ径が0.3mmと小さいため、像のシャープさは損なわれていないことがわかる。さらに、映像表示領域が限られており、モアレの間隔が広いので、モアレ位置を調節することにより、デフォーカスなしでも、映像表示領域内の大部分でモアレが見えないことも確認した。

### 5.3.5 まとめ

本節では、カラーフィルタ配置を変更することにより色モアレをなくし、かつ、デフォーカスにより輝度モアレも低減した、IV方式の裸眼立体視ディスプレイを提案した。同時に、IVディスプレイの映像表示領域の設計方法についても示し、レンズピッチの変更は映像表示領域拡大化

の点において意味があることを示した。さらに実際に、5 インチサイズのモバイル用途を想定した IV ディスプレイを試作し、評価を行った。

今後の課題として、より最適なパラメータを決定するための設計手法の検討が挙げられる。さらに、再生光線数を増やす方式やディスプレイデバイスの検討、本提案ディスプレイに出力するための実写映像撮影方法の検討とコンテンツ製作手法の開発に取り組む予定である。

## 5.4 フィールドシーケンシャルカラー方式液晶パネルを用いた IP ディスプレイ

### 5.4.1 はじめに

Integral Photography (IP) は光線を再生することにより、実在感高い立体像を再生する立体ディスプレイ方式の一つであり、1908 年に M.G.Lippmann により発明 [3] されて以来、各種の研究がなされてきた [4, 6, 18, 14, 11, 17]。著者らは、IP を動画対応へ拡張した Integral Videography (IV) の研究を行っており [9]、液晶パネルを用いた際に起こるモアレを低減し、同時に光線数を増やす手法について提案し、実装している [19]。図 5.14 に IP/IV の原理を示す。IP/IV ディスプレ

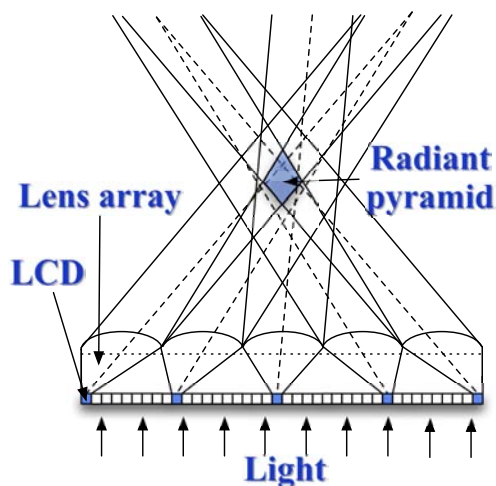


図 5.14: IV の原理図

イは、レンズアレイと高解像度の 2 次元ディスプレイで構成されている。ディスプレイから出た光線は、レンズを通して屈折し、任意の場所に任意の光線を再生する。つまり、物体が見えるとおりの光線束を再生する立体ディスプレイ方式である。通常レンズとディスプレイの距離は、焦点距離と等しく、レンズ幅の平行光が出ることとなる。

IV ディスプレイは、簡単なデバイス構成であり、かつ、正確な立体映像を再現できるため、理想的な立体ディスプレイの方式の一つであるが、高解像度なディスプレイを必要とし、視域・2 次



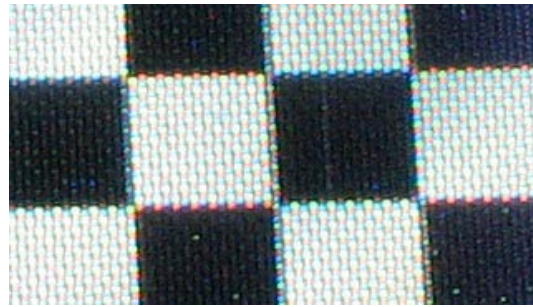


図 5.15: 既存 IV ディスプレイにおける擬色の例

元解像度・飛び出し量などのパラメータにはトレードオフがあるため、設計の最適化も大きな課題の一つである。また、著者らが文献 [19] で提案した方式は、カラーフィルタ配置を変更しているため、IV ディスプレイ専用の液晶パネルとなり、さらに、レンズアレイと一対一で設計する必要があるため、レンズアレイの仕様のみを変更して、試作・実験することが難しかった。

一方、液晶パネルに用いるバックライト技術において、高速で、色再現性が高く、液晶パネルの薄型化につながる、LED バックライトが近年登場し製品化されている。LED バックライトを用いた液晶パネルの一つに、フィールドシーケンシャルカラー (Field Sequential Color: FSC) 液晶パネルがある。本研究では、この FSC 液晶パネルを用いた IV ディスプレイを提案する。

本稿では、まず、第2章で、既存の手法の問題点を述べ、第3章で、提案手法について述べ、設計方針や IV ディスプレイの飛び出し量を決定する要因についても述べる。第4章で、IV ディスプレイの実装について述べ、第5章で比較評価を行い、最後の6章でまとめを行う。

#### 5.4.2 既存手法の問題点

筆者らが、文献 [19] で提案した手法は、液晶パネルだけでなく、プラズマディスプレイや有機 EL ディスプレイなど、光の三原色に対応する画素が、空間的に異なって配置されているディスプレイ全般に対して適用可能な手法であるが、先に挙げた試作・実験のコスト以外にも、以下に挙げるような3つの問題が存在する。

##### 色再現性

文献 [19] の手法では、光線数を3倍にするためと、色モアレの発生を防ぐためとの、2つの効果のために、1 レンズに対応する画素 (1 要素画像) を1色にする手法を用いている。その結果、再生される立体像の、各色成分の空間周波数は  $1/3$  に減少している。

この時、例えば図 5.15 に示すような、白黒の格子模様を表示した際に、境界に色が付く不具合が生じる。文字などを表示した時にも、細い線の部分には色が付く。また、赤などの単色を表示した際に、緑と青に割り当てたレンズ部分は点灯しないため、立体像が暗くなる問題も生じる。

### 光線密度の不均衡

一般的な液晶パネルでは、3つのサブ画素で1画素を構成するために、サブ画素の形状は3:1の長方形である。そのため、光線密度の不均衡が起こる。光線密度の不均衡は、運動視差の不均衡として観察される。例えば、文献 [19] の手法では、横方向の運動視差は滑らかであるが、縦方向の運動視差は滑らかではなかった。

### 画像生成コスト

IV ディスプレイ用の画像 (IV 画像) を生成するには、一般に、平行投影の画像を光線数分レンダリングする必要がある。しかしながら、既存 IV ディスプレイは、特殊なカラーフィルタの配置のため、Graphics Processing Unit (GPU) などを用いたレンダリングにおいても、無駄な処理が発生する。一般的に、GPU では、赤・青・緑の単色成分のみをレンダリングする機能がサポートされていないため、3 倍の演算コストがかかる。また、レンズアレイのレンズはデルタ配置のため、偶数列は奇数行の画素、奇数列は偶数行の画素といった、互い違いの画素をレンダリングする必要がある。しかし、この機能もサポートされていないため、2 倍の演算コストがかかる。多視点画像から IV 画像へ変換する、画素再配置のレンダリングコストが 1 倍であることを含めると、同じ解像度の 2 次元画像をレンダリングする場合に比べて、ピクセルレートで約 7 倍のレンダリングコストがかかる。

#### 5.4.3 提案手法

##### フィールドシーケンシャル液晶

本論文では、前記の問題を解決するために、フィールドシーケンシャルカラー (Field Sequential Color, 以下、FSC) 液晶パネルを用いた IV ディスプレイを提案する。FSC 液晶パネルは、時分割に R, G, B のバックライトを点灯させ、それに同期して画素の液晶透過率を変化させる方式で、例えば、図 5.16 のように色が 1/180 秒枚に切り替わるような時分割で発光を行う。1 画素が時分割で三原色に発光するので、色モアレは発生せず、輝度モアレの影響のみを考えれば良くなる。

### 設計方針

我々は、IV ディスプレイの特徴を生かすには、単純な飛び出しよりも、まるで、そこに実在の物体が存在しているかのような、現実感の高い立体映像表現が大事であると考えた。それを実現するための設計方針として、下記の 4 要素が特に重要であると考えた。

#### 1. 2 次元画質

立体映像においても、2 次元画質が見た目に与える影響は大きい。ピクセルサイズが大きかったり (画素密度が低い場合)、解像度が低い場合には、現実感が損なわれると考えた。IV の場合、画素密度はレンズ密度にほぼ対応し、解像度はレンズの個数に対応する。



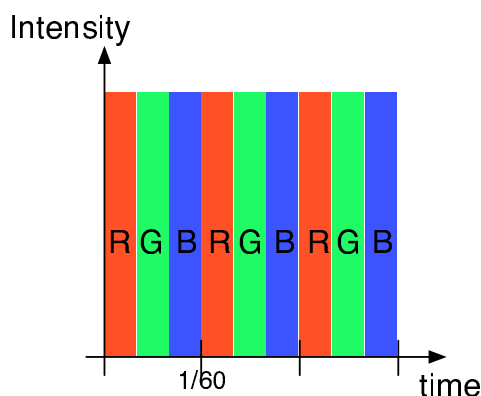


図 5.16: FSC の原理

## 2. 光線密度

光線密度は、立体映像の質感だけでなく、視域や飛び出し量にも関係する。次節で詳しく述べる。

## 3. モアレの低減

液晶などの離散的な画素構造を持つ2次元ディスプレイ装置と、レンズアレイを組合せた時には、原理的に、必ず、モアレは発生する。今回は、文献 [19] で用いたような、デフォーカスを主に用いることとする。

## 4. 色再現性

現実感のためには、正確な色や記憶色が再現できることが必要である。

## 飛び出し量

IP/IV ディスプレイの解像度は、通常、飛び出した位置  $z$  での解像度で決定される。例えば、回折の影響がない領域では、解像度  $\beta(z)$  はナイキスト周波数であり、視距離を  $L$ 、レンズピッチを  $\Delta a$  として、

$$\beta(z) = \beta_{\text{nyq}} = \frac{L}{2\Delta a} \quad (5.22)$$

と計算できることが知られている [18].

一方、自由視点画像合成の観点からは、Plenoptic Sampling により、エイリアシングが起こらない条件が求められる。IP/IV ディスプレイの周波数特性は、文献 [20, 21] により、図 5.17 のようになる。ここで、 $(\Omega_s, \Omega_u)$  は、ディスプレイ面上の座標  $s$  と、光の出射方向を表す座標  $u$  をフーリエ変換した周波数空間を表し、 $\Delta p$  は画素ピッチである。外枠の長方形が再生可能周波数領域であるが、表示物体の表面特性が Lambert 反射であると仮定すれば、この中で、灰色の部分が実際の立体映像表示に用いられている周波数領域である。

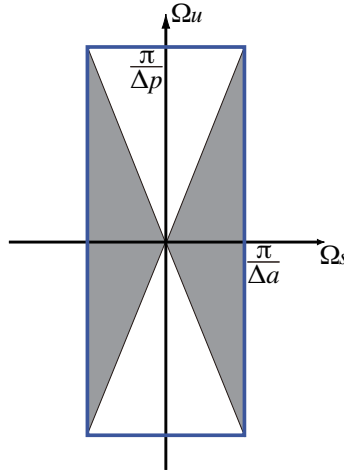


図 5.17: IV ディスプレイの周波数特性

このとき，最大飛び出し量  $z_{\max}$  は，レンズの焦点距離  $f$  として，

$$z_{\max} = f \frac{\Omega_u}{\Omega_s} = f \frac{\Delta a}{\Delta p} \quad (5.23)$$

と，記述できる．飛び出し量が，この  $z_{\max}$  以内であれば，信号処理の観点から，エイリアシングが起こらないと考えられる．しかし，実際には，光線は，レンズ径の幅を持つため，この値の2倍程度以内であれば，エイリアシングが知覚できない可能性が高い．また，これを十分に越える場合でも，多眼状態となり，立体像に見える可能性はあるので，設計の指針の一つとして用いることにする．

#### 5.4.4 実装

実装した IV ディスプレイの仕様を表 5.4 に示す．表 5.4(a) は，文献 [19] で提案した IV ディスプレイ (CCF IV) である．表 5.4(b) は，(a) と，フィールドシーケンシャルカラー方式である以外は，レンズも含めて，同じ仕様の IV ディスプレイ (FSC IV) である．表 5.4(c) は，ディスプレイの大きさは 4.5 インチであり，最初の 2 つのディスプレイより少しサイズが小さいが，HD 解像度を持つフィールドシーケンシャルカラー方式の IV ディスプレイ (HD-FSC IV) である．視域や飛び出し量は，ほぼ同じ値になるように設計した．

続いて，図 5.18 に，FSC IV の要素画像の形状を示す．要素画像の形状は，視域を決定し，画素数が光線数に対応する．無駄なく画素を利用するためには，各要素画像を密に埋める必要がある．形状に制限がある．CCF IV も横の画素密度が 3 倍である以外は同じ形状である．図 5.19 に，HD-FSC IV の要素画像の形状を示す．横方向に奇数個の画素を持つ要素画像形状としている．奇数個であると，ディスプレイの正面方向にも光線が再生されるため，ディスプレイとレンズアレイを合わせやすい利点がある．

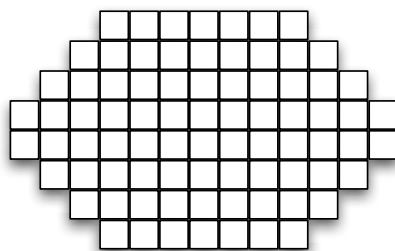


図 5.18: 5 インチ FSC IV ディスプレイの要素画像形状

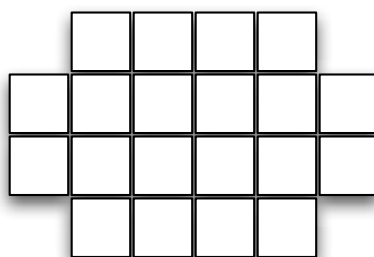


図 5.19: 4.5 インチ HD-FSC IV ディスプレイの要素画像形状

#### 5.4.5 実験

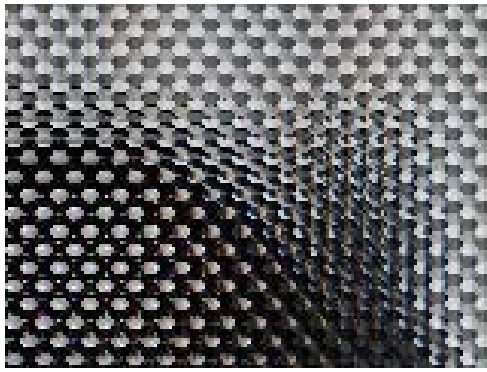
CCF IV ディスプレイと今回提案の2種類のFSC IV ディスプレイの、計3種類のIV ディスプレイを用いて、比較評価実験を行った。

##### 色再現生の与える影響

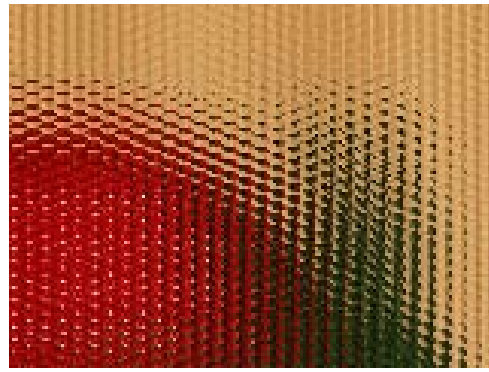
CCF IV と FSC IV に同じ立体像を表示することで、色再現生が立体像の視覚に与える影響について比較評価した。図 5.20 に、結果を示す。IV 画像の拡大図 (図 5.20(a)(b)) を見ると、単色に近い部分の明るさに、違いがあることがわかる。これは、CCF IV では3つのレンズで1色を構成するため、赤色などの単色の立体映像を表示した場合に、赤成分を表示するレンズだけが光り、残りの緑と青を表示するレンズは黒となってしまうことが原因である。実際に、(図 5.20(c)(d)) を見ると、イチゴの陰の部分に関して、CCF IV の方が暗くなっていることがわかる。

##### 光線数の与える影響

続いて、光線数の与える影響について、ほぼ同じサイズで光線数が違う、5 インチ FSC IV と 4.5 インチ HD-FSC IV とで同じ大きさの立体像を表示することで比較した。図 5.21(a)(b) に、比較に用いた IV 画像を示す。拡大した IV 画像 (図 5.21(c)(d)) を見ると、HD-FSC 用の IV 画像上



(a) 5 インチ CCF 用 IV 画像の拡大図 (イチゴの CG)



(b) 5 インチ FSC 用 IV 画像の拡大図 (イチゴの CG)



(c) 5 インチ CCF IV ディスプレイの写真



(d) 5 インチ FSC IV ディスプレイの写真

図 5.20: CCF 方式と FSC 方式の比較

では、テクスチャの詳細に大きな違いが出ていることがわかる。

### 被験者による比較評価

続いて、20代から40代までの男女20人の被験者を用いて比較評価を行った。実験方法は、各々のIVディスプレイを30cmほど離して机の上に設置し、CG画像7枚を5秒間隔で繰り返し表示し、見比べてもらった後の印象を答えてもらった。CG画像は、図5.20、図5.21で用いたものを含む静止画を用いた。回答項目は、

1. 色の綺麗さ (鮮やかな色が再現出来ている感覚)
2. 飛び出し感と奥行き感
3. 滑らかさ (画素の大きさや形状が気になりにくい感覚)
4. 自然さ (頭を動かした時に自然に見える感覚)
5. 在感 (実際にそこに物が存在するような感覚)

の5項目で、どちらか良い方、または、同じであるかを評価してもらった。表5.5に、結果を示す。各項目は、その回答を行った人数である。得られた結果の信頼性を確認するために、 $\chi^2$  検定

を行い、危険率(有意水準)も載せてある。

## 考察

結果を整理すると、まず、色の綺麗さはFSC方式が良いという結果が得られている。飛び出し感も、光線数が十分多ければ、FSC方式が良いと考えられる。滑らかさは、レンズの大きさ(ピッチ)の影響が大きいという結果が得られている。ただし、運動視差と実在感に関しては、ディスプレイ間に有意な差があるとは言えない。

しかし、実在感の観点で言えば、表2(c)の結果からは、色の綺麗さと飛び出し感で勝っているHD-FSC IVが、有意な差とはいえないまでも、実在感において、CCF IVに劣っている傾向が見られたのは興味深い。このことは、解像度の影響が非常に大きいこと、また色の綺麗さが必ずしも、実在感に結びつかない(鮮やかすぎて現実的でないなど)ことを示唆していると思われる。

よって、現実感の高い立体映像表示が可能なIVディスプレイの実現には、色の綺麗さ、色再現性、二次元解像度、運動視差など、様々な要因をバランス良く設計することが大事だと考えられる。

また、今回は、5インチと4.5インチで違う製法のレンズを用いており、パネルも試作レベルの物であるので、多少の線欠陥などがある物を実験に使用している。よって、レンズ製法の違いや、パネルの線欠陥などが影響している可能性もある。

### 5.4.6 まとめ

本稿では、フィールドシーケンシャルカラー液晶を用いたIVディスプレイを提案した。同時に、IVディスプレイの設計方針と、飛び出し量について議論した。さらに、実際に5インチと4.5インチのサイズのモバイル用途を想定したフィールドシーケンシャルカラー方式IVディスプレイを試作し、評価を行った。

FSC液晶パネルは、今後、市場に出回ってくることが予想され、IVディスプレイが容易に実現できる可能性がある。また、FSC液晶パネルを用いると、色モアレを考慮する必要がなくなるため、1種類のパネルに対して、多くの種類のレンズを試作することが可能となり、最適なIVディスプレイの設計を検討する上の実験に用いることが可能になってくる。

今後の課題として、より最適なパラメータを決定するための設計手法の検討が挙げられる。そのためには、評価手法の確立が必要であり、今回の成果を踏まえて、提示映像も検討するなど、評価手法の改良を行いたい。さらに、再生光線数を増やす方式やディスプレイデバイスの検討も行う予定である。

## 5.5 むすび

本章では、前章の光線空間での解析結果に基づき、設計方法を提案し、2つの異なる種類の液晶パネルを用いた IP ディスプレイの検討と実装を行った。通常のカラースフィルタを持つような液晶パネルを用いる場合、前章の光線空間における解析結果が示すように、色モアレは避けられない。よって、本章での提案手法のように、レンズ毎に異なるカラースフィルタを持つか、そもそもカラースフィルタを持たない方式を採用する必要がある。提案手法を実際の実装し、複数の観察者による主観評価を行い、提案手法の効果の確認が出来た。現在、一般的になりつつある、高解像度の液晶ディスプレイを用いて、実用的な画質をもつ IP/IV ディスプレイを実装した意義は大きい。よって、本章の結果は、今後、より高画質な光線再生方式ディスプレイを実現する上での、一つの良い指針となることが期待できる。

次章では、IP/IV ディスプレイの応用として、新しい映像表現の可能性について検討を行う。

表 5.4: FSC 液晶を用いた IV ディスプレイの仕様

(a) 5 インチ CF IV ディスプレイの仕様

Size	5 inches
Pixel density	300 ppi
Pixel resolution	1280 × 768 pixels (3840 × 768 sub pixels)
Lens resolution	256 × 192 lenses
Lens layout	delta
Number of rays	60 rays/lens
Viewing angle (lateral)	±14 degrees
Viewing angle (longitudinal)	±9.5 degrees
Pop-up amount	±18 mm

(b) 5 インチ FSC IV の仕様

Size	5 inches
Pixel density	300 ppi (square pixel)
Pixel resolution	1280 × 768 pixels
Lens resolution	256 × 192 lenses
Lens layout	delta
Number of rays	20 rays/lens
Viewing angle (lateral)	±14 degrees
Viewing angle (longitudinal)	±9.5 degrees
Pop-up amount	±6 mm

(c) 4.5 インチ HD-FSC IV の仕様

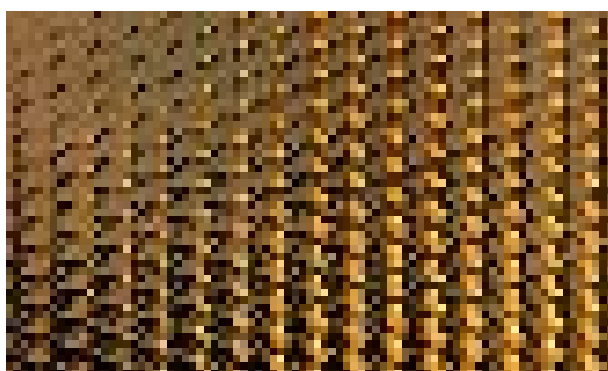
Size	4.5 inches
Pixel density	498 ppi (square pixel)
Pixel resolution	1920 × 1200 pixels
Lens resolution	192 × 150 lenses
Lens layout	delta
Number of rays	80 rays/lens
Viewing angle (lateral)	±18 degrees
Viewing angle (longitudinal)	±12 degrees
Pop-up amount	±13 mm



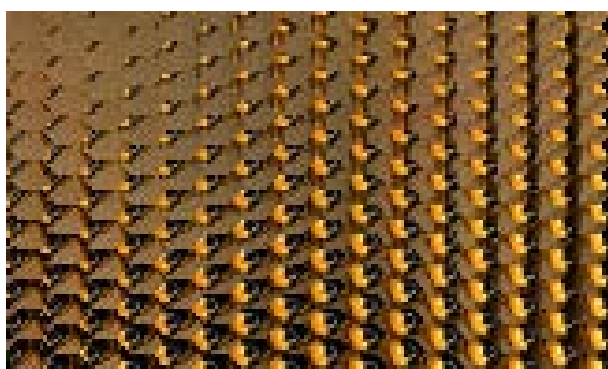
(a) 5 インチ FSC 用 IV 画像 (蜂の CG)



(b) 4.5 インチ HD-FSC 用 IV 画像 (蜂の CG)



(c) 5 インチ FSC 用 IV 画像の拡大図 (蜂の CG)



(d) 4.5 インチ HD-FSC 用 IV 画像の拡大図 (蜂の CG)

図 5.21: 5 インチ FSC と 4.5 インチ HD-FSC 方式の比較



表 5.5: IV ディスプレイ間の比較結果

(a) CF と FSC の比較結果

	CF	Same	FSC	significance level
Beautifulness of color	8	0	12	0.37%
Sense of pop-up	9	5	6	52.2%
Resolution	7	2	11	4.7%
Motion Parallax	10	6	4	24.7%
Reality	11	3	6	8.6%

(b) FSC と HD-FSC の比較結果

	FSC	Same	FSC-HD	significance level
Beautifulness of color	2	0	18	0.37%
Sense of pop-up	2	2	16	0.006%
Resolution	16	3	1	0.005%
Motion Parallax	4	8	8	44.9%
Reality	6	7	8	86.7%

(c) CF と HD-FSC の比較結果

	CF	Same	FSC-HD	significance level
Beautifulness of color	3	1	16	0.005%
Sense of pop-up	4	2	14	0.20%
Resolution	11	2	7	4.7%
Motion Parallax	9	2	9	8.6%
Reality	11	4	5	11.7%

# 参考文献

---

- [1] Marc Levoy and Pat Hanrahan. Light Field Rendering. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1996*, pp. 31–42, 1996.
- [2] S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira, and S. Sakai. Apparent 3-D Image Perceived from Luminance-modulated Two 2-D Images Displayed at Different Depths. *Vision Research*, Vol. 44, No. 8, pp. 785–793, April 2004.
- [3] Gabriel M. Lippmann. Epreuves Reversibles Donnant la Sensation du Relief. *J. de Phys*, Vol. 7, pp. 821–825, 1908.
- [4] 大越孝敬. 三次元画像工学. 産業図書, 1972.
- [5] 大越孝敬. 三次元画像工学. 朝倉書店, 第二版, 1991.
- [6] F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama. Real-Time Pickup Method for a Three-Dimensional Image Based on Integral Photography. *Applied Optics*, Vol. 36, No. 7, pp. 1598–1603, 1997.
- [7] T. Saishu, Kazuki Taira, R. Fukushima, and Y. Hirayama. Distortion Control in a One-Dimensional Integral Imaging Autostereoscopic Display System with Parallel Optical Beam Groups. In *SID 04 Digest*, pp. 1438–1441, 2004.
- [8] Yasuhiro Takaki. A Novel 3D Display Using an Array of LCD Panels. In *SPIE*, Vol. 5003, pp. 1–8, 2003.
- [9] 廖洪恩, 岩原誠, 小池崇文, 桃井康行, 波多伸彦, 佐久間一郎, 土肥健純. マルチプロジェクション Integral Videography 三次元画像表示装置の開発. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-D-II, No. 12, pp. 2198–2208, 2004.
- [10] 山田千彦. レンチキュラー板 三次元画像表示技術の基礎, pp. 40–43. デジタルパブリッシングサービス, 2002.
- [11] 小林真樹, 奥井誠人, 荒井淳, 岡野文男. インテグラル立体テレビの色モアレ低減手法. 映像情報メディア学会誌, Vol. 59, No. 3, pp. 439–447, 2005.

- [12] 梶本善裕. 超多眼領域を用いた 3d ディスプレイ. 第 36 巻, pp. 624–631, 1998.
- [13] 福富武史, 名手久貴, 高木康博. 高密度指向性画像で表示した 3 次元画像における調節応答. 映像情報メディア学会誌, Vol. 58, No. 1, pp. 69–74, 2004.
- [14] J. Arai, H. Hoshino, M. Okui, and F. Okano. Effects of Focusing on the Resolution Characteristics of Integral Photography. *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 29, No. 6, pp. 996–1004, 2003.
- [15] 海老沢廣喜, 高木康博. 72 指向性画像を表示する薄型三次元ディスプレイ. 三次元画像コンファレンス予行集, pp. 17–20, 2004.
- [16] 堀越力, 壺井雅史, 榛葉敏彦, 高木康博. モバイル用途の 3d ディスプレイ端末の試作. 三次元画像コンファレンス予稿集, pp. 45–48, 2005.
- [17] Kazuki Taira and Y. Hirayama. Development of Lenticular-Type Autostereoscopic Liquid Crystal Display Based on One-Dimensional Integral Imaging. In *IDW'05*, pp. 1773–1776, 2005.
- [18] H. Hoshino, K. Okano, and I. Yuyama. Analysis of Resolution Limitation of Integral Photography. *Journal of the Optical Society America A*, Vol. 15, No. 8, pp. 2059–2065, 1998.
- [19] 小池崇文, 及川道雄, 宇都木契. モアレを削減したインテグラルビデオグラフィ. 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 6, pp. 814–821, 2007.
- [20] Jin-Xiang Chai, Shing-Chow Chan, Heung-Yeung Shum, and Xin Tong. Plenoptic Sampling. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 307–318, 2000.
- [21] Matthias Zwicker, Wojciech Matusik, Fredo Durand, and Hanspeter Pfister. Antialiasing for Automultiscopic 3D Displays. In *Eurographics Symposium on Rendering 2006*, 2006.
- [22] Dan Daly. *Micro lens Arrays*. Taylor & Francis, 2001.
- [23] 小池崇文. 泡コントロールと消泡・脱泡事例集, 第 6 章 14 節 レンズアレイ製造, pp. 227–231. 技術情報協会, 2007.
- [24] ドウジェンヌ, プロシヤール-ヴィアール, ケレ. 表面張力の物理学. 吉岡書店, 2003.

## 5.6 付録

### 5.6.1 レンズアレイ

レンズアレイの用途は、均一な光を作るためのものから、光通信に用いたり、多視点撮影にいたるまで、様々である。主に、プロジェクタや、光通信などの分野でレンズアレイは利用されてきたが、近年の光学設計技術の発展により、ますます、各分野で利用されるようになってきた。レンズアレイのサイズとしては、数 mm から数十 cm であり、レンズ個数は、数個から数十万個と非常に広範囲に渡っている。そのため、レンズアレイのサイズや要求される精度などに応じて、様々な製法が用いられる。

実際に、立体ディスプレイに使うためには、

- ある程度の精度で良い
- 大型化 (数インチ以上) が可能な製法
- コスト競争力が高い

といった特徴を持つ、レンズアレイ製法を採用するのが望ましい。我々は、各種手法を検討し、実際に、いくつかの試作を行ってみた。この中で、印刷手法が、精度は少し低いが、大型化や低コスト化が可能な方式であり、上記の条件を満たすと分かった。よって、本付録では、印刷方式によるレンズアレイ製造方法中心に述べる。

### 5.6.2 レンズアレイの製造方法

レンズアレイの製法は、複数のレンズを並べる方法、エッジングする方法、型を作り光硬化樹脂などにより生成する方法、印刷により生成する方法などがある。製法に関しては、文献 [22] が詳しいが、型を作る手法や、直接エッジングする手法などが主に用いられている。しかしながら、近年の印刷技術の発展により、印刷を用いたレンズアレイの製造が可能になりつつある。本節では、比較的、製造精度要求が低い、コスト要求が高い場合に利用される、印刷方式のレンズアレイについて述べる。文献 [22] でも触れられていない比較的新しい方式である。

### 5.6.3 印刷方式レンズアレイ

印刷方式は、凸版、凹版、平版、孔版など大きく分けて 4 種類存在する。どの印刷方式も、レンズアレイ製造に使える可能性があるが、我々は、孔版方式の一つである、スクリーン印刷方式の開発を行った [23]。

**スクリーン版作成** まず、円形のレンズが集まったレンズアレイパターンを形成したスクリーン版を作成する。スクリーン版の細かさ (メッシュ数) で形状精度が有る程度決まり、スクリーン版の厚さでインキの量が有る程度調整できる。スクリーン版の素材の選定も、面精度を保つために

は重要である。

**インキ選定** 原理としては、印刷後のインキの表面張力により、球形になることを利用する。そのため、インキの粘性が低いと、印刷時にインキがだれてしまい、レンズを形成しない。逆に粘性が高くと、印刷ムラが出来やすいなどの現象が発生する。そこで、粘性のバランスが良いものを選定する。

**スクリーン印刷** 印刷時は、スキージ圧で調整を行う。インキとしては、紫外線などで硬化する光硬化樹脂を用い、印刷後、速やかに硬化させる。通常、気泡が入り、光線の制御に影響を与えるため、真空中で印刷するなどの対応をとる必要がある。

**遮光マスク印刷** 多くの印刷方式では、隣り合うレンズを接触させることが難しい。これは、硬化前に接触すると、より大きな球を形成してしまうためである。そこで、レンズが隣接しないような大きさにし、非レンズ部分を遮光するマスクが必要となる。マスクは、別のスクリーン版を用いるなどして、事前または、事後に印刷する。

図 5.22 に、印刷によって作成したレンズの一部を拡大した写真を示す。条件を整えれば、このように、個体差も少なく、形状の安定したレンズの製作が可能である。

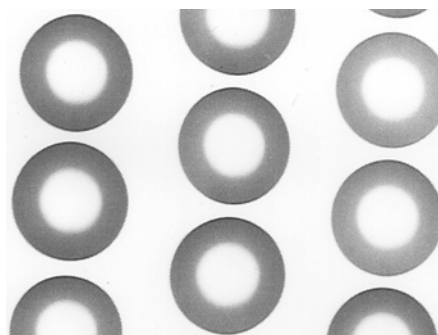


図 5.22: スクリーン印刷で製造したレンズアレイの拡大写真

#### 5.6.4 スクリーン印刷方式

一言に、印刷手法と言っても、スクリーン印刷、凹版印刷など、多種の方法がある。凹版印刷で、少しずつインキを盛ることにより、レンズアレイを製作する手法もあるが、ここでは、特にレンズアレイの生産性にすぐれるスクリーン印刷について述べる。

まず、印刷方式でレンズアレイを製造する場合における注意点として、各レンズが隣接するようなレンズアレイの製造は非常に難しいという事実がある。複数回の印刷により、隣接させる方法も考えられるが、レンズの持つ不均一な凹凸により、印刷を制御することは非常に難しい。よっ

て、非レンズ部分がレンズアレイ上に必ず発生する。レンズアレイの用途によっては、非レンズ部分に遮光マスクをするなど、別途対策が必要である。一方、印刷方式では大きなサイズのレンズアレイの製作が容易であり、既存のレンズアレイ製法では数 cm 角が標準的なのに対し、1m 角といったレンズアレイの製作も可能であり、その利点は大きい。レンズができる原理は、原則としてインキの表面張力を利用する。レンズ径が、ある程度より小さければ、重力より表面張力が勝る状態となり、綺麗な単球面レンズの生成が可能となる。表面張力と重力の関係は、毛管長 ( $1/\kappa$ ) と表面張力 ( $\gamma$ )、液体密度 ( $\rho$ )、重力 ( $g$ ) とで次の関係式が成立する [24]。

$$1/\kappa = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \quad (5.24)$$

通常、 $1/\kappa$  は 2mm 程度のサイズである。よって、レンズ径が 2mm 以下の場合には、表面張力が支配的であり、単球面レンズが成立する。ただし、この関係式が成立するのは、非常に綺麗な表面上である。実際の印刷の際には、クリーンルームを使用や、印刷対象となる基板の取り扱いに注意を要する必要がある。毛管長より大きな径のレンズを製造する場合には、携帯電話などに用いられる小型レンズを並べる等の手法を用いてレンズアレイを製造する方が効率的と思われる。

なお、非レンズ部分にふっ素樹脂を混ぜたような撥水性のインキなどを事前に印刷することにより、はじきによって、レンズの印刷をより簡易にする手法もある。

続いて、スクリーン印刷の原理について、簡単に紹介する。最初に、スクリーン版を作製する。スクリーン版は線上の版素材をメッシュ状に張った物であり、メッシュの間隔や厚さなどにより印刷条件を調整する。CAD で製作したデータを用いてメッシュを印刷形状に合わせて取り除くことにより、印刷用の版が完成する。このスクリーン版上にインキを流し込み、スキージすることにより、スクリーン印刷を行う。スクリーン印刷は、他の印刷手法に比べて、ドットなどの印刷は得意であり、点字印刷などにも使われている。スクリーン印刷においては、メッシュ数でレンズ形状の精度を調整し、メッシュ厚みでレンズ高さを調整するが、インキの成分についても、十分に検討する必要がある。また、版の伸び縮みがあるため、スキージ圧やスキージ速度なども含めて総合的に検討・調整する必要がある。レンズアレイの利用用途によっては、耐熱性や耐紫外線性、耐水性、経年耐久性などを考慮する必要がある。硬化手法に関しても、自然乾燥させるか、紫外線硬化などさせるか等を用途によって選択する必要がある。スクリーン印刷は、版の厚みやインキの粘性などにより、レンズアレイの厚みの制御が可能である。ただし、硬化樹脂を用いるため、硬化後の収縮については、別途検討が必要である。図 5.23 に、条件が悪い場合にスクリーン印刷手法で製作したレンズアレイの写真を示す。各種条件が適切でない場合、図 5.23 のように、形の歪みや、気泡の混入が見られ、さらには、隣り合うレンズが接合してしまう等の現象が生じる。レンズアレイにおいては、レンズ径とレンズ高さを均一に保つことが重要であるため、こうしたことを避けるように、素材選びをふくめ、十分な条件だしをする必要がある。実際に、印刷方式によって、製作可能なレンズアレイとしては、レンズ径は、 $100 \mu\text{m}$  から 2mm 程度で、レンズの高さは、数  $\mu\text{m}$  から  $100 \mu\text{m}$  程度である。レンズアレイ自体の大きさは、前述の通り、数 cm から 1m 程度である。

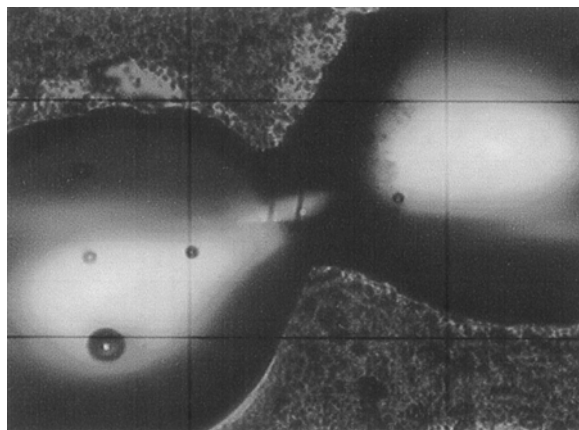


図 5.23: 印刷条件が悪い場合のレンズアレイ

#### 5.6.5 スクリーン印刷方式のレンズアレイにおける泡の取り扱いについて

スクリーン印刷方式は、スキージによって版のメッシュ中の隙間にインキを流し込む手法である。よって、スキージ時に空気を巻き込む可能性があり、このことが原因でレンズに泡が混入することがある。泡を除去する手法としては、下記の二つの手法が考えられる。

**手法 1.** 真空環境内でレンズアレイを生成する手法

**手法 2.** 印刷後、硬化前に脱泡させる手法

手法 1 は、理想的な手法であり、印刷時に泡を発生させないが、適切な環境を準備する必要がある。そのため、大型レンズアレイを製作する場合などは、設備投資コストが高くなる。手法 2 は、安易に実現できるが、条件出しに十分時間をかける必要がある。以下、手法 2 について、詳細に説明する。経験上、条件にもよるが、印刷後、数十秒から数分で気泡が抜けることがわかっている。気泡の大きさは、様々であり、気泡の大きさにほぼ比例する時間で、気泡は無くなるので、テスト印刷を重ねて、最適値を探る必要がある。スキージ速度が速かったり、メッシュ圧が弱かったりすると、大きな気泡を生じる可能性がある。また、レンズのだれが生じるので、粘性の低すぎるインキの使用も避けた方がよい。図 5.24 に、UV 硬化樹脂をインキとして用いた、印刷直後のレンズアレイの顕微鏡写真を示す。各レンズ内に数個の気泡が存在することが見える。図 5.25 は、印刷後に 2 分間、自然放置したレンズアレイの顕微鏡写真で、気泡の無くなっていることが見える。レンズのだれは、ほとんど無いことも確認できる。本写真のレンズ径は  $400\ \mu\text{m}$  程度であるので、泡は数～数十  $\mu\text{m}$  程度の小さいものであるが、光学系に与える影響は無視できない。

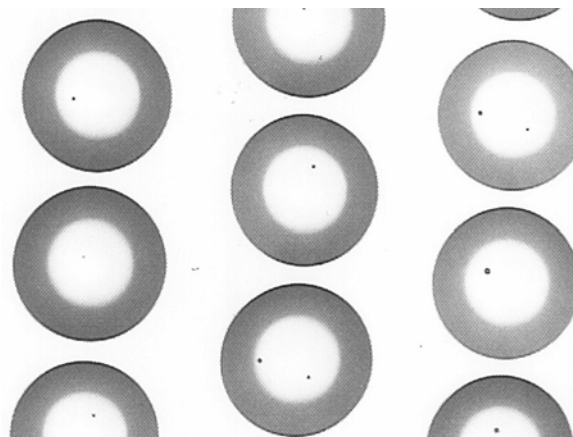


図 5.24: 気泡が混入した状態のレンズアレイ

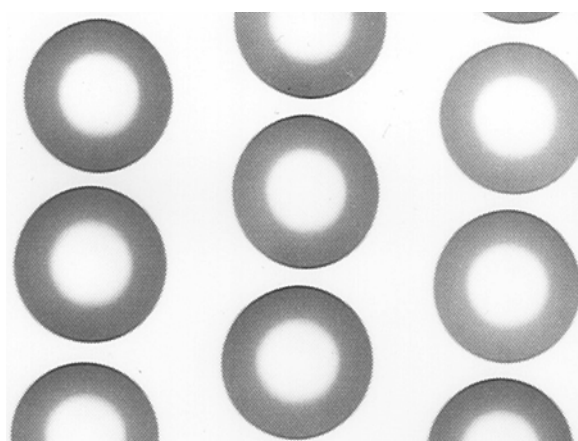


図 5.25: 気泡が抜けた状態のレンズアレイ



### 5.6.6 まとめ

以上、本節では、実際のレンズアレイ製造方法の紹介として、スクリーン印刷方式について、特に詳しく紹介し、気泡の取り扱いについて解説した。事前に、印刷条件を調整することにより、発生する気泡の数と大きさを最小限に抑えることが可能で、さらに数分間放置することにより、全て除去することが可能である。

## 第6章

---

# IPディスプレイを用いた 新しい光線再生方式ディスプレイの 検討と実装

## 6.1 はじめに

近年、2次元の映像表示装置であるディスプレイは、高解像度 (High-Definition) 化が進み、さらに、高ダイナミックレンジ (High-Dynamic Range) 化や、広色域化が進んでいる。また、2次元以上を表示するディスプレイとして、立体 (3次元) ディスプレイの研究開発も盛んとなっている。ディスプレイを光線情報を再生する装置と考えた場合には、立体ディスプレイは、2次元の映像が2次元の視点移動によって変化するものである。実際には4次元光線情報を再生するディスプレイ (光線再生ディスプレイ) であると考えられる。では、映像表示装置は、4次元で十分であろうか? 例えば、BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) は6次元の関数であり、これを忠実に再現するには、(入力光も含めて)6次元の光線再生ディスプレイが必要となる。出力と同じように、入力にも4次元光線情報を考慮した場合には、8次元が必要であり、入力系も含めて8次元の光線再生ディスプレイが必要である。

一方、2次元ディスプレイにおいて、依然足りない要素は何だろうか? 高解像度化と広色域化により、綺麗な青色の羽根を持つモルフォチョウが、非常に綺麗に見えるのは確かである。しかしながら、モルフォチョウは、見る角度によって色や光沢が変わるのが、その大きな特徴であり既存のディスプレイで、それを再現するのは不可能である。そこで、我々は表示する物体表面の質感 (材質感・光沢感・透明感など) の表示にあると考え、質感表示を行う BRDF ディスプレイのアイデアを提案している [1]。

BRDF とは物体の入射光に対する任意の反射方向の反射率を表す関数で、通常、入射ベクトル ( $\vec{\omega}_{in}$ )、反射ベクトル ( $\vec{\omega}_{out}$ ) とオブジェクト表面位置 ( $x, y$ ) を表す6次元成分を持つ関数 ( $\rho(x, y, \vec{\omega}_{in}, \vec{\omega}_{out})$ ) として導入される [2]。コンピュータグラフィクス (CG) 分野の発達により、より物理的に正しい BRDF モデルの提案や、より見た目にリアリティの高い物質のレンダリングやが可能となりつつある。BRDF を再現できれば、ベルベットなどの光沢を持つ異方性反射成分をもつ材質や、金属などの鏡面反射成分をもつ材質、ダイヤモンドなどの宝石、モルフォチョウや玉虫、ネオンテトラなどの構造色 [3] をもつ表面、さらには CD (Compact Disc) などの回折光や干渉光が観察できる表面の再生が可能となる。

写真技術として発明された IP (Integral Photography) [4] は、理想的な裸眼立体ディスプレイ原理の一つとしても知られているが、自由視点映像合成の技術として知られている Light field [5] を、直接見るための装置とも考えられている [6]。近年、この Light field を実空間に再生することで立体ディスプレイを実現するという考え方で、光線再生方式ディスプレイ (Light field display) の研究が行われている。IP ディスプレイは、レンズの光学的な観点からの性能解析が行われており、立体映像の、ある飛び出し位置での周波数特性解析と、レンズピッチより導き出されるナイキスト周波数による解析が一般的である [7]。また、近年、IP ディスプレイを含む立体ディスプレイは、光線再生の周波数の観点からの解析も行われており、エイリアシングが起きない飛び出し量の計算が可能となっている [8, 9]。IP ディスプレイでは、飛び出しが無い場合には BRDF 表示が可能なことも示唆され、実装が行われている [1]。質感表示可能なディスプレイに関しては、

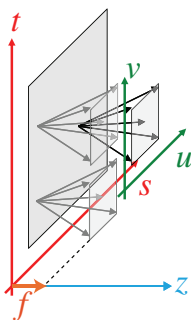


図 6.1: 光線情報表記方法

再生光線数の多い立体ディスプレイにおいて、金属やガラスなどの質感表示性が備わっていることが、高木らによって示されており [10]、視点検出とプロジェクタを用いた質感表示に特化したディスプレイの研究 [11] も行われている。

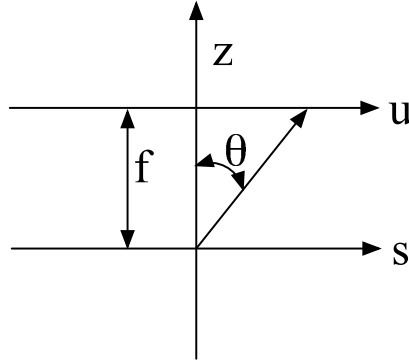
一方、CC 分野では、実空間における光線の振る舞いを求める問題である光輸送問題を効率よく解くことによって、より現実に近い映像をレンダリングする試みが行われている。近年は特に Light field の観点での解析が行われており、周波数特性の解析 [12] や、一次微分を用いた解析 [13] が行われている。IP ディスプレイにおいても、より現実に近い立体映像を表示するためには、光輸送問題を解き、4次元 Light field を求めることが必要であると考えられる。実際に、IP ディスプレイは、4次元 Light field で記述できるという性質上、より多くの情報量を必要とするため、光輸送問題を効率よく解くための手法の適用に効果があると予想できる。

本稿では、8次元ディスプレイの実現に向けて、光輸送問題の解析手法を IP ディスプレイの設計に適用することを目標とする。光輸送問題における周波数特性の解析や一次微分を用いた解析を IP ディスプレイの解析に適用し、どのような BRDF を持つ物体が表示できるのかを検討する。本稿で提案する BRDF ディスプレイでは、BRDF 表示に特化した設計と画像生成を行うことによる最適化を行う。第2節で、解析のための準備を行い、第3節で実際の解析を行う。第4節で、BRDF ディスプレイの設計と画像生成アルゴリズムについて述べ、第5節で実装について記述する。第6節で実装したディスプレイに実際に画像を表示する実験を行い、最後に第7節で本稿のまとめを行う。

## 6.2 準備

### 6.2.1 座標系

Light field として、図 6.1 に示すような、平面と方向を表す座標系を考える。この座標系は、IP ディスプレイのレンズ座標に  $(s, t)$  が、レンズ内の要素画像座標に  $(u, v)$  が対応するため、解析が容易になる。

図 6.2:  $u$  と  $\theta$  の関係

一方，光線の反射などを解析する際には，角度方向  $(\theta, \phi)$  で解析するのが容易である．なお，ここからは，1次元 ( $\theta$ ) 方向のみを考える．レンズの焦点距離を  $f$  として，図 6.2 に示すように，

$$u = f \tan \theta \quad (6.1)$$

と関連づける．なお， $\theta \ll 1$  の時は， $\tan \theta \simeq \theta$  であるため，本稿では，計算を容易にするため，その仮定が成り立つ領域で議論を行う．実際に， $0.2 \text{ rad}(=11 \text{ 度})$  程度であれば，誤差が 1% 程度であり，文献 [14] に用いられている実際の IP ディスプレイの視野角は 14 度であるので，その範囲内では，問題なく，定性的な振る舞いも変わらないので，容易に議論を拡張できる．

### 6.2.2 BRDF 表示の原理

IP で BRDF 表示を行う際の原理を説明する．簡単のために， $z = 0$  面 (ディスプレイ面) に像を表示する場合を考える．図 4.7(b) に，IP ディスプレイの原理を示す．通常，IP ディスプレイは，高解像度の液晶パネルとレンズアレイで構成されるため，ここでは，液晶パネルの座標を  $(x, y)$ ，レンズアレイの座標を  $(s, t)$ ，レンズ内の要素画像の座標を  $(u, v)$  とする．レンズピッチは  $\Delta s$ ，画素ピッチは  $\Delta u$  として，離散化の最小単位とする．また， $\Delta \theta = f \tan \Delta u$  である．

入射光の種類や輝度・方向を決めてやれば，各画素の任意の反射方向における輝度が求まるので，BRDF の表示が可能となる．入射光を  $L$ ，BRDF を  $\rho$  として，出射光の輝度  $B$  は，

$$B(s, t, u, v) = \int L(x, y, \vec{\omega}_{in}) \rho(x, y, \vec{\omega}_{in}, \vec{\omega}_{out}) \cos(\vec{\omega}_{in}) d\vec{\omega}_{in} \quad (6.2)$$

と，計算可能である．

### 6.2.3 IP ディスプレイの光線空間と周波数空間

IP ディスプレイは，図 6.4(a) の矩形領域内に収まる光線空間を再現する．ここで  $u_{max}$  は，各レンズから出射する光線の最大角度に対応し， $s_{max}$  は，ディスプレイの大きさに対応する．また，

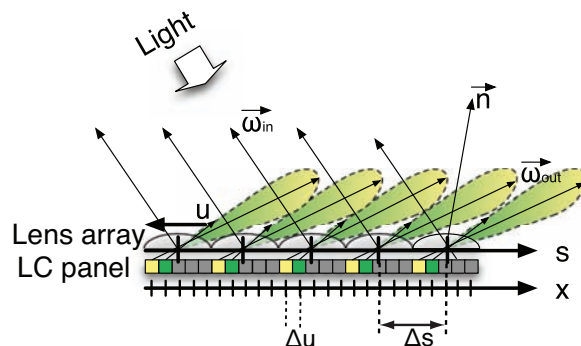


図 6.3: IP ディスプレイの原理

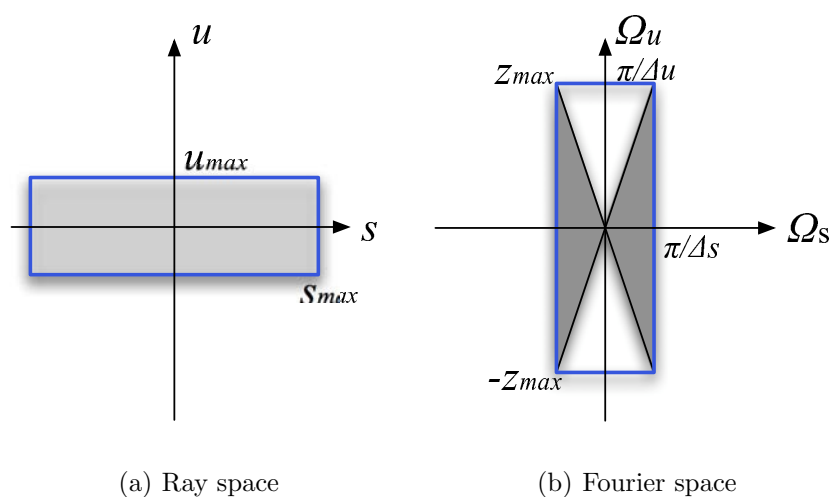


図 6.4: IP ディスプレイが表示可能な光線空間とその周波数領域

図 6.4(b) に示すように、周波数特性を持つ光線再生ディスプレイとして表される [9]. 表示物体として、典型的な拡散成分のみを考えた場合には、任意の奥行位置の物体は一本の直線で表される. よって、奥行き  $z = -z_{max}$  から  $z = +z_{max}$  までの物体を表示した場合、図 6.4(b) の灰色領域部分のみが使用される. 一方、今回は、BRDF 表示を考えるため、矩形の領域内の全ての情報を利用していることとなる.

## 6.3 解析

### 6.3.1 解析手順

本稿では、IP ディスプレイに (仮想の) 光線が入射し、実際の光線がディスプレイから反射 (出射) すること考え、その時の物理的条件による定式化を試みる. 具体的には、1) 光線空間と、その、2) 周波数空間、さらに、3) 光線空間の一次微分空間の、3つの空間における物理的条件を元

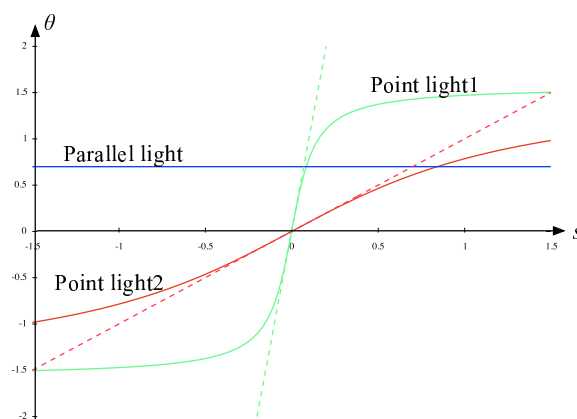


図 6.5: 光線空間における平行光源と点光源

にする。光線空間は光線の表示領域(視域など)に対応し、周波数空間は表示画像の特性に対応し、一次微分空間はディスプレイの階調表現能力に対応する。

入射から反射までの振る舞いは、文献 [12] の順にならひ解析する。本稿における具体的な解析手順を図 6.6 に示す。青線枠は、再生可能領域を表し、赤線は入射光を、緑線は出射光を示す。まず、光線空間を、1) ディスプレイの座標系で光線を考える。続いて、2) 表示物体面の法線 (Bump mapping を行わない場合には、ディスプレイの法線と同じである) に対応した光線空間の回転を行い、 $(s, \theta')$  面を考える。次に、3) 法線に対して鏡面反射したとした変換を行う。さらに、4) BRDF との畳み込み積分で反射光を光線空間で計算する。最後に、5) ディスプレイの座標系  $(s, \theta)$  に光線空間を回転させる。

以上のような手順に従ひ解析を行う。なお、本稿の解析では、オクルージョンの影響は考えない。

### 6.3.2 光線空間での解析

入射光としては、ディスプレイに対する入射角が  $\theta_i$  である平行光 ( $\theta_i = \text{一定}$ ) と、ディスプレイからの距離が  $L$  の点光源を仮定する。図 6.5 に、光線空間における、平行光と、距離 ( $L$ ) の異なる 2 つの点光源 (図中の Point light 1 と Point light 2, それぞれ,  $L = L_1, L_2$  とする) を表す光線を示す。今,  $L_1 < L_2$  とした。図に示すように、点光源は直線にはならないが、単調増加であり,  $L_1 < L_2 (s \geq 0)$  の時、常に,  $\theta_1(s) \geq \theta_2(s)$  が成り立つので、解析を容易にするために、直線 (図の点線部分,  $s = 0$  における接線を示す) に近似して考えることとする。

今、図 6.6 に示すような、法線が垂線となす角度を  $\theta_n$ 、BRDF から求まる光線の広がりをも  $\theta_b$  である場合を検討する。この時、光線空間では、図 6.6 に示すように、斜めの直線となり、 $\theta_i$  が変化しても上下に直線がシフトするだけである。IP ディスプレイの物理的制限を満たすには、

**条件 1** 再生される光線が IP ディスプレイの再生可能な光線空間の領域に収まること、が必要である。

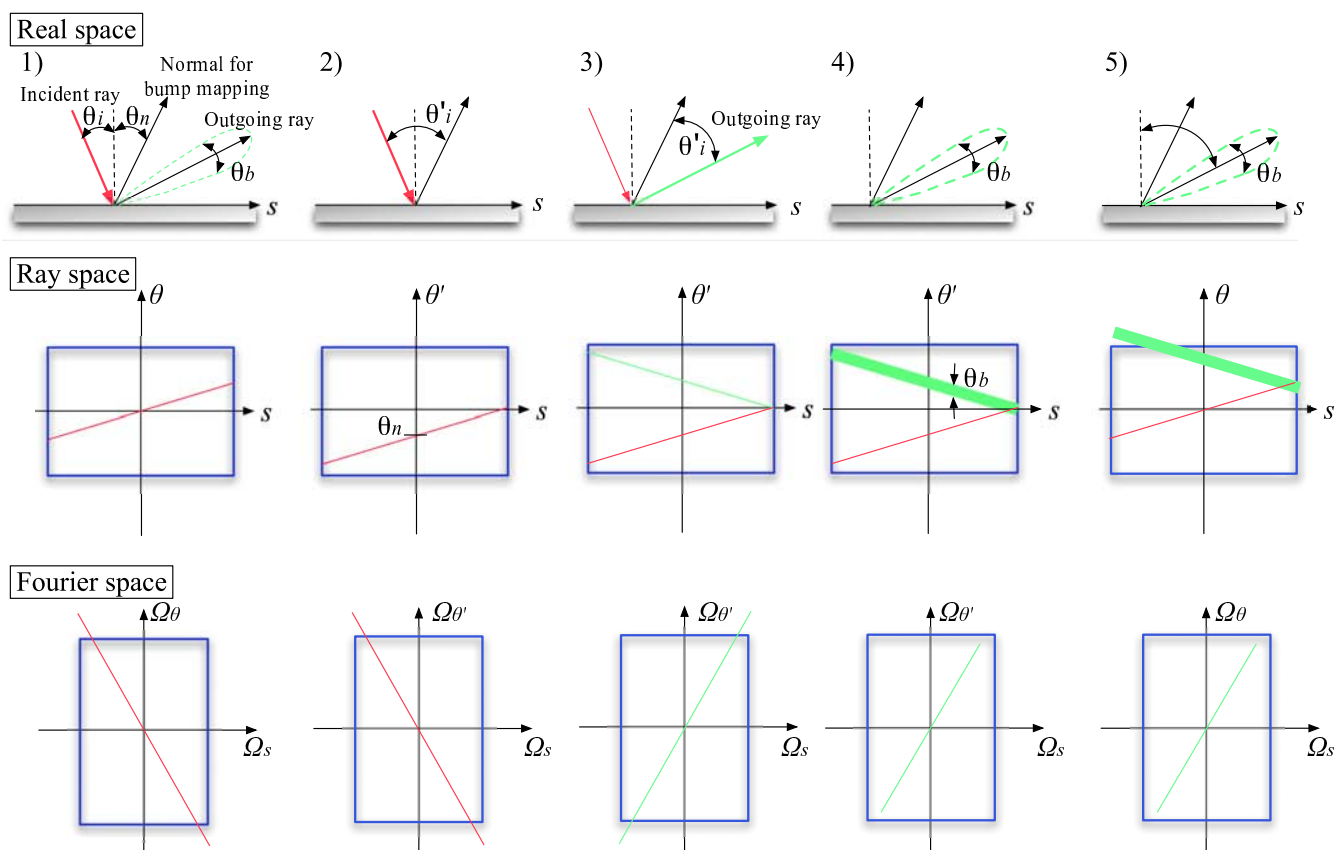


図 6.6: 点光源の光線空間とその周波数領域における解析

よって,  $\theta_{max} = \tan^{-1}(u_{max}/f)$  として,

$$2\theta_n + \theta_i + \theta_b/2 \leq \theta_{max} - \tan^{-1} \frac{s_{max}}{L} \quad (6.3)$$

が条件 1 を満たす式である. 平行光の時は, 上式の右辺第 2 項が 0 になる場合である.

この式は, 具体的にはディスプレイの視域に関する条件となっている.

### 6.3.3 周波数領域での解析

光線空間における任意の物体の反射光は, 入射光と BRDF の畳み込み積分であることが知られている [15]. 周波数領域では, 畳み込み積分は単なるかけ算を行うことと同等である. 平行光は周波数領域では, 縦軸に沿った直線に変換されるので, この直線と BRDF の持つ周波数成分との積が反射光を表す.

周波数領域においては,

**条件 2** 再生される光線が IP ディスプレイの再生可能な周波数領域に収まること,

が必要である.



傾き  $\theta_i$  の平行光を入射光とした時に、図 6.6(上段) のように、Ray Space で記述でき、この時の周波数特性は、図 6.6(中段) である。前述の通り、光線空間での畳み込み積分は、周波数領域でのかけ算であるので、今、BRDF の持つ周波数を  $\Omega_b$  とすると、

$$\Omega_b \leq \frac{2\pi}{\Delta s} \quad (6.4)$$

が条件 2 を満たす式である。

この式は、ディスプレイのレンズピッチの条件となっている。

#### 6.3.4 一次微分を用いた解析

続いて、一次微分を用いた解析を行う。ディスプレイの表現できる階調数に依存するパラメータの解析が可能である。

Ramamoorthi らの研究 [13] によれば、反射光の一次微分 ( $B_s, B_\theta$ ) は、入射光の一次微分 ( $L_s, L_\theta$ )、法線の一次微分 ( $n_s = \partial n / \partial s$ )、 $\theta_r = 2n(s) - \theta$  を用いて、下記のように表される。

$$B_s(s, \theta) = (L_s \otimes \rho)(s, \theta_r) + 2n_s \cdot (L_\theta \otimes \rho)(s, \theta_r) \quad (6.5)$$

$$B_\theta(s, \theta) = -(L_\theta \otimes \rho)(s, \theta_r) \quad (6.6)$$

ここで、 $\Delta s$  は、 $s$  の最小差分値 (ここではレンズピッチ) であり、 $\Delta \theta$  は、角度の最小差分値である。最後の条件として、

**条件 3**  $s$  方向と、 $\theta$  方向のそれぞれの方向において、となり合う再生光線の輝度変化が IP ディスプレイの最小単位輝度に収まること、

が必要である。輝度階調の解像度が低すぎると、光の鏡面反射成分の表現が出来ず、拡散反射成分の表現になってしまうことと同様である。

この 2 つの条件は、BRDF 表示に用いる IP ディスプレイの最小単位輝度を  $\Delta i$  とすると、

$$B_s(s, \theta) \geq \frac{\Delta i}{\Delta s} \quad (6.7)$$

$$B_\theta(s, \theta) \geq \frac{\Delta i}{\Delta \theta} \quad (6.8)$$

と表される。

この式は、ディスプレイのダイナミックレンジに関する条件となっている。

## 6.4 設計とアルゴリズム

### 6.4.1 BRDF ディスプレイの設計

続いて、BRDF 表示を行うためのディスプレイの設計について述べる。(1) 光線の幅と密度、(2) 視域の拡大、(3) 画像表示面、の主に 3 つの要素が大きく設計に影響する。

### (1) 光線の幅と密度

BRDF ディスプレイでは、その構成要素であるレンズアレイの仕様が、性能を決定する要因の一つである。レンズ径により光線幅が、レンズピッチにより光線密度が決定できる。前章で解析した結果を元に、BRDF ディスプレイに表示する BRDF 画像の性質をある程度制限すれば、設計の最適化が可能である。

### (2) 視域の拡大

通常の IP ディスプレイの用途では、飛び出し量を多くするために、レンズの焦点距離を短くし、画角をなるべく狭くする、つまりディスプレイの視域を狭くする設計を用いる。また、IP では、両眼に違う映像が入ることが、立体視を成立させるための必要条件である。

一方、BRDF ディスプレイにおいては、質感を表現できれば、両眼に同じ映像が入っても構わない。さらに、BRDF ディスプレイにおいては、飛び出す必要もないため、視域を広くする設計が可能である。もちろん、厳密な BRDF 再現性を考えた場合には、光線の角度解像度を上げる方が好ましいが、運動視差による色変化や輝度変化の効果が大きいので、この観点からも、視域を広くする設計が採用可能である。

### (3) 画像表示面

IP ディスプレイにおいては、飛び出した画像ほど、レンズの性能に依存して光学的にぼけることが分かっていて [7]。また、IBR の理論である、Plenoptic Sampling 理論 [16] より、飛び出した画像ほど、エイリアシングが発生することも分かっている。

つまり、通常、IP ディスプレイにおいては、 $z = 0$  面の解像度が高く、像も安定して提示できる。また、BRDF を含む画像の周波数特性により、 $(\Omega_s, \Omega_\theta)$  空間の、縦方向に周波数が分布するため、この観点からも、 $z = 0$  面に BRDF 画像を提示するのが、もっとも画質が高くなる。実際の BRDF ディスプレイにおいては、この効果を利用するために、3次元オブジェクトであっても、そのまま表示せずに、2次元画像として、必要に応じて奥行き圧縮を行い表示する。

## 6.4.2 BRDF 映像の生成アルゴリズム

前記、インテグラルビデオグラフィディスプレイをベースとする場合には、BRDF ディスプレイに合わせた IP 画像 (以下、BRDF IP 画像) を生成する。図 6.7 に、BRDF IP 画像の作成方法の例を示す。

まず、レンズピッチやパネル解像度などの BRDF ディスプレイの仕様を決定することにより、 $\omega_{out}$  が決まる。このデータを Outgoing ray map ( $\omega_{out}(x, y) = R_{out}(x, y)$ ) として生成する。

次に、カメラや光センサなどの入力デバイスからの入力値より光源を決定するか、または仮想の光源を仮定することにより、 $\omega_{in}$  を表す、Incoming ray map ( $\omega_{in} = R_{in}(s, t, u, v)$ ) を生成する。図では、広がりをもつ平行光を仮定している。BRDF は、適切な反射モデルを仮定するか、実測値により得られたデータから任意の値を決定できるので、必要に応じて BRDF map( $T$ ) として生成する。図では、表面が均一でテクスチャ成分を持たない単純な場合を仮定し、かつ、横軸に入

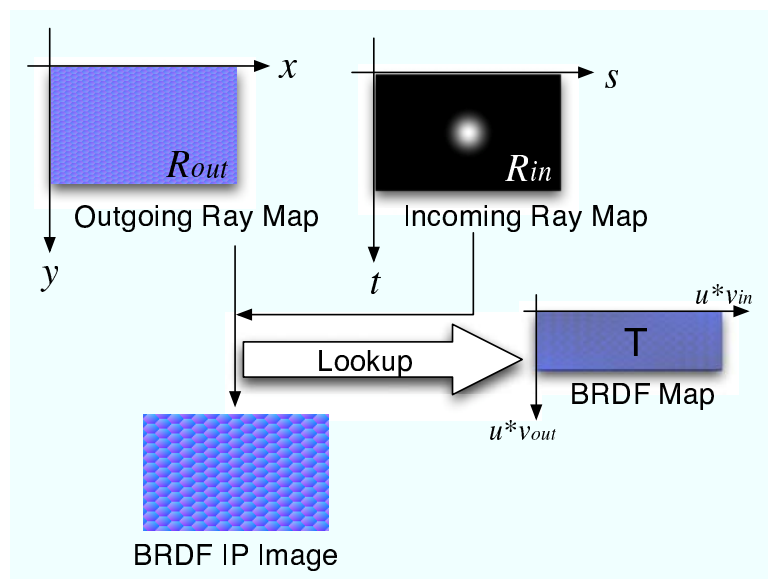


図 6.7: BRDF IP 画像の生成方法

射光 ( $\omega_{in}$ ), 縦軸に反射光 ( $\omega_{out}$ ) をマッピングした 2 次元のルックアップテーブルと簡略化して示している.

最後に, 実際の二次元ディスプレイの画素に合わせて,

$$B(s, t, u, v) = T(s, t, \omega_{out}(x, y), \omega_{in}(s, t)) \quad (6.9)$$

のように, BRDF map から必要な情報を参照することにより, BRDF IP 画像を生成する. このとき, 前節の議論のように,  $z = 0$  面にオブジェクトを表示するような BRDF IP 画像を生成すると, 最も像が安定し, 高解像度な BRDF 再生が可能となる.

次に, 実際の BRDF 画像生成方法について説明する. 本 BRDF ディスプレイにおけるコンテンツ制作手法としては, (1)CG を用いた BRDF 画像生成, (2) 実写画像を用いた BRDF 画像生成, (3) 実写画像と CG の両方を用いた BRDF 画像生成, の 3 種類が挙げられる.

### (1)CG を用いた BRDF 画像生成

もっとも一般的な手法で, 全て CG により, BRDF IP 画像を生成する手法である. 写実的な画像を生成するには, 反射モデルを用いてレンダリングを行う. 物体の反射モデルに関しては, Lambert モデルではなく, Phong モデルや, Cook-Torrance などの各種反射モデルが提案されている. また, 多くの物質において, BRDF データは取得されており [17], BRDF を取得する手法も多く開発されている.

### (2) 実写画像を用いた BRDF 画像生成

前記, CG のみを用いた場合, 現時点で最も優れた CG レンダリング手法を用いても正確な表現が難しい場合がある. 例えば, 光の回折や干渉の影響が見られる CD (Compact Disc) の記録面などは, だいたいの見た目を再現することは可能であるが, 正確な再現が難しい物体の一つで

表 6.1: BRDF ディスプレイの仕様

Display type	Field sequential LCD
Size	4.5 inches
Lens layout	Delta layout
Pixel density	498 ppi
2D display resolution	$1920 \times 1200$ pixels ( $= x \times y$ )
BRDF display resolution	$192 \times 150$ pixels ( $= s \times t$ )
Lens pitch (lateral)	0.51 mm ( $= \Delta s$ )
Lens pitch (longitudinal)	0.42 mm ( $= \Delta t$ )
Lens radius	0.36 mm
Number of rays	80 rays/lens ( $= u \times v$ )
Viewing angle (lateral)	$\pm 18$ degrees
Viewing angle (longitudinal)	$\pm 12$ degrees

ある。CD をレンダリングする手法も開発されている [18, 19] が、レンダリング時間やリアリティを考慮して、実写から作る方法を述べる。レンズアレイやカメラアレイ等を用いた多視点画像撮影系で撮影した多視点画像から IP 画像を生成する。今回は、 $z = 0$  面に表示する IP 画像を生成するため、撮影した多眼画像から、補正を行い BRDF IP 画像を生成する。

### (3) 実写画像と CG を用いた BRDF 画像生成

前記、実写画像のみを用いた手法だと、動画への対応が難しい、撮影条件が厳しい、などの問題がある。一方、前記 CG を用いた手法で述べたように、BRDF は既知または取得可能であるので、BRDF は既知とし、テクスチャデータは実写画像を用いる手法がある。実写画像のみから生成する手法では、被写体を平面的な物に限定するか、奥行き圧縮を行う必要があるが、本手法であれば、そうした考慮を行う必要はない。本手法では、既にある写真の中の物体の材質を変えるシミュレーションなどが可能となる。

## 6.5 実装

### 6.5.1 表示装置

フィールドシーケンシャルカラー (Field Sequential Color: FSC) 方式の高解像度液晶ディスプレイとマイクロレンズアレイを用いて BRDF ディスプレイの実装を行った。試作した BRDF ディスプレイの仕様を表 6.1 に示す。

FSC 方式の液晶ディスプレイは、通常の液晶ディスプレイのように 1 画素が 3 つのサブ画素 (R, G, B) に分かれておらず、R と G と B の三色のバックライトの点灯タイミングに合わせて光の透過率を変えることによってカラー表示する方式である。例えば、300ppi のディスプレイを比べた場合に、通常の液晶ディスプレイは横方向 900dpi となるので、FSC 方式の光線数は 1/3 に減って



図 6.8: カメラを用いた光の取得装置

いるが、各レンズはフルカラー表示が可能となる。また、視点の移動によりレンズの色が変化してしまう、色モアレの問題も発生しないので、色再現性が重要となる BRDF ディスプレイには適している。FSC 方式では、カラーブレイキングと呼ばれる色残像現象が見られるが、本実装では、60Hz のフルカラー動画表示性能を持つ FSC 方式液晶ディスプレイを用いており、かつ、BRDF の効果を実感する際には、高速な視点移動を行わないので、実装上の問題は現れなかった。

レンズアレイの 1 レンズのレンズ径は 0.36mm である。1 レンズあたり、横最大 18、縦最大 8 光線、縦横の両方向合計で 80 の違う光線を再生している。

### 6.5.2 入力装置

図 6.8 に示すように、BRDF ディスプレイに IEEE 1394 カメラを設置し、画像認識による光の入力装置を構築した。図に示すように、LED ライトを BRDF ディスプレイの入力光として利用することが可能である。現在の、入力光の認識は、輝度値を用いた閾値による簡単な領域分割を行い、2 次元座標とその広がりのみを取得している。簡易な方法であるが、実験環境を制御することによって、十分な認識が可能であった。

## 6.6 実験

### 6.6.1 周波数領域に関する実験

Phong モデルのオブジェクトをレンダリング・表示し、実際に提案解析手法における角度依存性について実験を行った。簡単のために、ディスプレイの真上から平行光で照らした場合を仮定し、Phong シェーディングの指数部分の値を変化させた様子を観察した。その結果、解析で予想されるように、高周波成分を持つモデルの表示は難しいことが確認できた。

### 6.6.2 見え方に関する実験

上記仕様で開発した BRDF ディスプレイに前記3つの提案手法のそれぞれで生成した BRDF 画像を表示し、図 6.10 のように、左・中心・右の3方向から BRDF ディスプレイを観察した結果を図 6.11 に示す。視点位置の変化による BRDF ディスプレイの見え方の変化の様子を表している。

図 6.11(a)(b)(c) は、前記、(1) CG を用いた BRDF 画像生成手法であり、Bump mapping を持ち、かつ、スペキュラ成分を持つ表面を CG でレンダリングした結果である。視点位置によって、スペキュラの成分が大幅に変わっていることがわかる。

図 6.11(d)(e)(f) は、前記、(2) 実写を用いた BRDF 画像生成手法であり、コンピュータ制御の xz ステージ (図 6.9) とデジタルスチルカメラにより撮影した画像から生成した DVD-ROM 画像の結果である。DVD-ROM の虹色の模様は回折により生じるものであり、視点位置によって模様は変化する。CG で正確にレンダリングするのは非常に時間がかかり難しいが、視点の移動により模様が変わっていることがわかる。

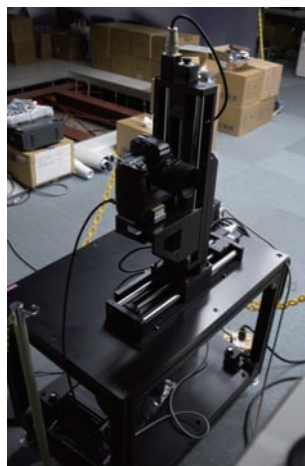


図 6.9: XZ ステージ外観写真

図 6.11(g)(h)(i) は、前記、(3) 実写と CG を用いた BRDF 画像生成手法である、構造色を持つ生物として有名なモルフォチョウ画像の結果である。モルフォチョウは、その羽根が独特の構造をもっており、見る位置によって、羽根の色や光沢感が変化する特徴を持っている。具体的な BRDF 画像生成は、モルフォチョウの羽根部分のテクスチャデータを抽出し、BRDF を変化した複数枚のモルフォチョウの 2D 画像を生成、これらを結合することで、BRDF IP 画像を生成している。羽根の色変化は、文献 [3, 20] と実際の標本を参考にした。視点位置によって、羽根の色が変化していることがわかる。

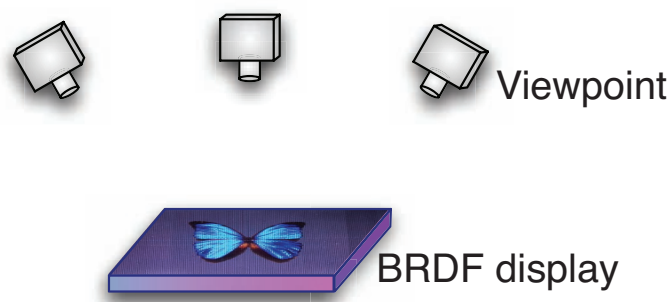


図 6.10: BRDF ディスプレイの計測方向

## 6.7 むすび

本稿では、IP ディスプレイに BRDF 画像を表示する場合の、その表示性能について、光線空間と、その周波数空間、さらには光線空間の一次微分空間で検討を行い、条件式を導いた。本条件により、実際の IP ディスプレイにおいて、どのような映像表現が可能かを見積もったり、また、逆に、映像コンテンツが決まったときに、どのような仕様の IP ディスプレイを製作すれば良いのかの見積もりが可能となる。

また、BRDF ディスプレイとして、設計方針についての検討を行い、検討に基づき実装を行った。BRDF ディスプレイのための、コンテンツ制作手法についても検討し、実装することにより、BRDF ディスプレイの検証を行った。提案 BRDF ディスプレイは、IP を原理として用いているが、光学パラメータを最適化し、さらに、ディスプレイ面に 2D コンテンツを表示することにより、飛び出した画像がぼけるという IP の欠点を補いつつ、新しい映像表現の可能性を提示した。奥行き方向の表現がないので、現実にはあり得ない映像であるが、リアリティの高い映像、今までに無かった映像表現が可能である。

今後の課題としては、1) 本手法を奥行き (飛び出し量) を考慮した解析に適用することと、光や物質として、より具体的な解析、2) より良い BRDF ディスプレイを設計指針の検討、3) BRDF ディスプレイのための正確な光線取得システムの検討、4) より効果的なコンテンツの検討が挙げられる。特に、3) の正確な光線情報の取得は難しい問題であるが、Computational Photography として、様々な映像技術が関連づけられ、再構築されつつある新しい研究分野であり、こうした研究の成果を取り入れながら検討を行っていく予定である。



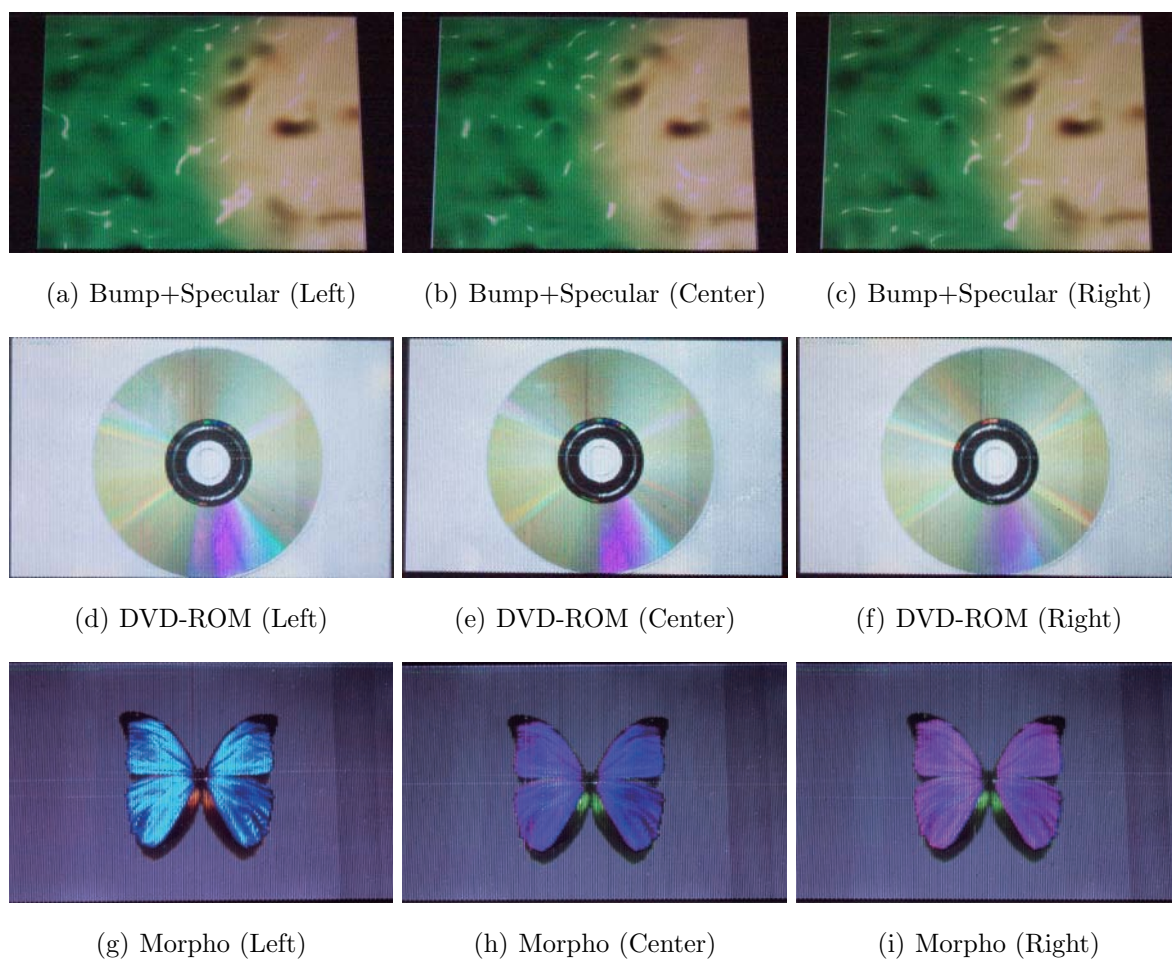


図 6.11: 視点位置による見え方の変化



## 参考文献

---

- [1] T. Koike and T. Naemura: “BRDF Display”, ACM SIGGRAPH 2007 Posters, No. D03 (2007). (SRC Finalist).
- [2] F. Nicodemus, J. Richmond, J. Hsia, I. Ginsberg and T. Limperis: “Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance”, Monograph 161, National Bureau of Standards (US) (1977).
- [3] S. Yoshioka and S. Kinoshita Eds.: “Structural Colors in Biological Systems”, Osaka Univ. Press (2005).
- [4] G. M. Lippmann: “Epreuves Reversibles Donnant la Sensation du Relief”, J. de Phys, **7**, pp. 821–825 (1908).
- [5] M. Levoy and P. Hanrahan: “Light Field Rendering”, Proceedings of ACM SIGGRAPH 1996, pp. 31–42 (1996).
- [6] A. Isaksen, L. McMillan and S. J. Gortler: “Dynamically Reparameterized Light Fields”, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, pp. 297–306 (2000).
- [7] H. Hoshino, F. Okano, H. Isono and I. Yuyama: “Analysis of Resolution Limitation of Integral Photography”, Journal of the Optical Society America A, **15**, 8, pp. 2059–2065 (1998).
- [8] M. Zwicker, A. Vetro, S. Yea, W. Matusik, H. Pfister and F. Durand: “Resampling, Anti-aliasing, and Compression in Multiview 3-D Displays”, IEEE Signal Processing Magazine, **24**, 6, pp. 88–96 (2007).
- [9] 小池, 高橋, 苗村: “点像分布関数を用いた光線情報記述法の提案-3次元ディスプレイの体系的記述に向けて-”, 3次元画像コンファレンス 2007, No. 6-2, pp. 89–92 (2007).
- [10] Y. Takaki and T. Dairiki: “72-Directional Display having VGA Resolution for High-Appearance Image Generation”, Stereoscopic Displays and Applications XVII, pp. 6055A–32 (2006).

- [11] S. Yamamoto, M. Tsuruse, K. Takase, N. Tsumura, T. Nakaguchi and Y. Miyake: “Real-time Control of Appearance on an Object using a High-Luminance PC Projector and Graphics Hardware”, 13th Color Imaging Conference, pp. 31–35 (2005).
- [12] F. Durand, N. Holzschuch, C. Soler, E. Chan and F. X. Sillion: “A Frequency Analysis of Light Transport”, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005, pp. 1115–1126 (2005).
- [13] R. Ramamoorthi, D. Mahajan and P. Belhumeur: “A First-order Analysis of Lighting, Shading, and Shadows”, ACM Trans. Graph., **26**, 1, p. 2 (2007).
- [14] 小池, 及川, 宇都木: “モアレを削減したインテグラルビデオグラフィ”, 映像情報メディア学会誌, **61**, 6, pp. 814–821 (2007).
- [15] R. Ramamoorthi and P. Hanrahan: “A Signal-Processing Framework for Reflection”, ACM Trans. Graph., **23**, 4, pp. 1004–1042 (2004).
- [16] J.-X. Chai, S.-C. Chan, H.-Y. Shum and X. Tong: “Plenoptic Sampling”, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, pp. 307–318 (2000).
- [17] W. Matusik, H. Pfister, M. Brand and L. McMillan: “A Data-Driven Reflectance Model”, ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2003), **22**, 3, pp. 759–769 (2005).
- [18] J. Stam: “Diffraction Shaders”, ACM SIGGRAPH 1999, pp. 101–110 (1999).
- [19] Y. Sun, F. D. Fracchia, M. S. Drew and T. W. Calvert: “Rendering Iridescent Colors of Optical Disks”, Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000, pp. 341–352 (2000).
- [20] S. Iwasawa, N. Shichijo and Y. Kawaguchi: “Rendering Methods for Models with Complicated Micro Structures”, ICAT 2004 (2004).

## 第7章

---

## 結論

## 7.1 本研究の成果

近年のデバイス技術のめざましい発展と、次世代のテレビ技術の模索を背景に、立体ディスプレイに期待が集まっている。本研究では、立体ディスプレイの有力な候補である4次元光線再生方式ディスプレイの、理論と設計、応用の3面から検討を行った。特に、既存の研究分野の枠組みにとらわれず、光線情報処理、コンピュータグラフィクス、光学のアプローチを融合することで、点像分布関数を導入した光線情報理論を提案し、提案理論をベースにした様々な解析により、光線再生方式ディスプレイについて検討を行った。解析結果を元に、4次元光線再生方式ディスプレイを実装し、さらに、新しい映像表現の可能性を示した。ここでは、本研究の主たる成果をまとめる。

### 7.1.1 光線再生方式ディスプレイを記述する理論の提案

第3章で、光線情報の次元の観点から立体ディスプレイを分類し、光線情報と点像分布関数の畳み込み積分を導入した光線空間を提案した。コンピュータグラフィクスの自由視点画像合成技術と立体ディスプレイ技術をつなぐ試みを行っている。本論文で目指す、4次元光線再生方式ディスプレイのための理論的基盤となるものである。

### 7.1.2 提案理論による立体ディスプレイの理論解析

第4章で、第3章で導入した光線空間理論に基づいて、代表的な4次元光線再生方式ディスプレイあるintegral photography (IP) 方式ディスプレイに対して、実際の解析を行っている。具体的には、光線空間、その周波数空間、光線の一次微分空間で解析を行い、光線再生方式ディスプレイの実物理量との関連性を示し、モアレについて解析し、IPディスプレイの設計指針の提案を行った。また、光線再生方式ディスプレイの新しい映像表現の可能性を示し、直感的に分かりにくい光線再生方式ディスプレイの定量化を試みた。

### 7.1.3 光線再生方式ディスプレイのデザインと実装

第5章で、液晶パネルとレンズアレイを用いたIP方式ディスプレイの設計と実装を行った。第4章での解析結果からは、モアレを削減することが難しいことが分かっているが、カラーフィルタ配置を変更するか、FSCパネルのような時分割パネルを用いることによって、原理的にモアレが発生しない方法を提案した。特に、カラーフィルタ配置を変更する方法は、表示される映像の色周波数を減らすか、一方で、再生光線数を増やしており、人間の視覚特性に合った方法となっている。

#### 7.1.4 光線再生方式ディスプレイの応用

第6章で、IPを用いた4次元光線再生方式ディスプレイで、BRDF表示を行うための検討と実装を行った。一般には、光線再生方式ディスプレイは立体ディスプレイの一種であると考えられていたが、質感再生に特化したディスプレイの実装が可能であることを示した。このことは、光線再生方式ディスプレイの可能性を示すものであり、適切な光学パラメータ設計や光線情報処理を行うことによって、様々な映像表現が可能になることを示している。その可能性の一つである、BRDF表示可能なディスプレイは、世界初の提案かつ実装であり、新しいディスプレイの方向性を世の中に示した価値は大きい。

### 7.2 今後の展望と課題

本論文では、光線再生方式ディスプレイを記述するための理論提案と、解析、設計、実装を行った。本節では、本研究によって明らかになった今後の課題をまとめ、将来の展望について述べる。

#### 7.2.1 提案理論の拡張

提案理論は、IPなどの、典型的な光線再生方式ディスプレイを想定したものであり、本理論を、そのままホログラフィへ適用することは難しい。しかしながら、4次元光線情報とホログラムの変換に関しての試み [1] や、実写 IP 映像をホログラムデータへ変換し、ホログラムディスプレイに出力する試み [2] も行われている。こうした理論を参考にすることで、ホログラムも扱えるようになる可能性は高く、提案理論を拡張することで、より一般的な理論を構築することは大きな課題の一つである。

また、4次元光線情報は情報量が多く、また、冗長性の高さや、情報を利用する際の局所性の高さのため、その圧縮や符号化は、おおきな課題である。現状は、光線情報を多視点映像とみなすことによる符号化・圧縮が主であるが、立体情報、質感に特化した符号化・圧縮が考えられる。さらに、高解像度の4次元光線情報の取得がデバイスの制限などにより難しいこと、通信などでは、なるべく少ない4次元光線情報をやりとりする必要性があることから、2次元映像の超解像処理 [3] を、光線情報に適用することも、今後の課題の一つである。

4次元光線情報の取得や生成も大きな課題の一つである。通常、4次元光線情報の取得には、カメラアレイやレンズアレイカメラが用いられるが、それぞれ、装置が複雑であったり、画質の面での課題があり、効率よく、かつ、高解像度な4次元光線情報を取得する研究は、今後も、大きな課題となる。この分野は、近年、Computational Photography [4] として、研究が盛んな分野であり、こうした研究と融合させていく必要がある。また、BRDFなどの限られた情報から効率よく光線情報を生成することも大きな課題である。

つまり、非常に高性能な光線再生方式ディスプレイが実現した場合には、そこに表示するコンテンツとして、光線情報を、いかに効率よく取得し、効率よく処理・符号化し、効率よく再構成す

るかが、重要となってくる。

### 7.2.2 提案理論の実光線再生方式ディスプレイへの適用

提案理論では、光線再生方式ディスプレイの大部分に適用できると予想されるが、実ディスプレイの解析については、IPを除いて、まだ進んでいない。今後は、色々な光線再生方式ディスプレイの解析を進めつつ、必要に応じて理論の拡張を行っていく必要がある。このことは、光線再生方式ディスプレイや立体ディスプレイの分類方法にも影響する。本論文では、再生可能な光線情報の次元の観点から光線再生方式ディスプレイの分類を行ったが、立体ディスプレイの分類方法は、非常に多岐にわたっている。パラメータが多いためとデバイスの多様性が、分類方法が多岐にわたっている主な原因であるが、個々の方式に対して、一つずつ丁寧に本質を抜き出し、分類する必要がある。

### 7.2.3 光線再生方式ディスプレイの設計最適化

光線再生方式は、元々扱う次元が既存ディスプレイより多く、設計可能なパラメータが多いため、設計も非常に難しい問題である。本論文では、基本的な設計方針提示を行い、その有効性について確認したが、より良い設計を実現するための最適化を行う必要がある。

例えば、IPで用いるレンズアレイのレンズ配置には、通常、正方配列や最密充填配置が用いられる。これは、製造上の理由や、一般に知られている高密度化の理由による。一方で、こうした配置が最適かという疑問が起きる。CGのレンダリングで用いられるモンテカルロ積分では、超低食い違い数列を用いることによって、少ない光線で誤差の少ないCG映像のレンダリングが可能である。こうした手法を取り入れることによって、少ないレンズ数・光線数でより正確な光線の再生が可能となることが予想できる。

### 7.2.4 4次元から8次元へ

第6章で提案したBRDFディスプレイは、光の入出力2次元を含む6次元の関数である。入力光も、当然、4次元光線情報として取得できるので、これらを統合して8次元の光線情報を扱う必要がある。実際に、IPを2入力と2出力として、アレイ状に並べることによって、6Dディスプレイを実現しようという研究がある[5]。プロジェクタとレンズアレイのみで4Dを実現する手法もあり[6]、原理的にプロジェクタ内部にカメラの設置が可能である。

光線情報の取得に関しては、近年のComputational Photography分野[4]として、急速に立ち上がりつつある研究分野で、こうした非常に新しい研究分野との連携を行っていく必要がある。非常に多くの情報量を扱う必要があり、今後の大きな課題の一つである。

### 7.2.5 デバイス技術

第4章や、第6章で示したように、光学パラメータの設計次第で、ディスプレイの特性が大きく変わることが本研究で結論づけられた。光学パラメータは用いるデバイス特性によって大きく制限されるため、任意の光学パラメータを実現可能なデバイス研究が必要である。屈折率が負となる光学素子としては、微細構造を持った物質 [7] があり、スーパーレンズと呼ばれている。

また、一部の立体ディスプレイでは用いられているが、動的に光学パラメータが変更可能であると、ある時は飛び出し量に特化して、ある時は質感に特化した映像再生が可能となる。こうした動的な光学パラメータの変更は、第2章でも述べたような、電気光学素子等の、高速に光学特性が変化する光学素子を用いることにより、将来実現可能になると予想される。

### 7.2.6 実用面・産業面での課題

従来の映像ディスプレイは高解像度化や、高ダイナミックレンジ化など、高機能化が一段落している。一方で、ディスプレイのコモディティ化が始まっており、低価格化による国際競争の激化が始まっている。産業の活性化の観点からも、立体ディスプレイの理論的基盤を構築することが必要である。

また、誰でも使えるディスプレイとするためには、国際標準化も必須である。現在、立体ディスプレイの観点で、デジュール規格である ISO/IEC や、デファクト規格である ICDM [8] や SEMI などの規格化が始まっている [9]。立体ディスプレイを、光線再生ディスプレイとして捉えることにより、より見通し良く、系統だった国際標準化を実施する必要がある。

以上、本研究を発展させてゆく上で明らかになった課題や、今後の可能性について述べた。光線情報処理技術は、様々な研究分野にまたがって展開されており、日々めざましい進歩を遂げている。今後は、分野の境界を越えて技術や研究者の交流が活発になり、光線再生ディスプレイとして新しい研究分野が体系化されることで、さらなる発展をとげていくことが期待される。

## 参考文献

---

- [1] R. Ziegler, S. Bucheli, L. Ahrenberg, M. Magnor, and M. Gross. A Bidirectional Light Field - Hologram Transform. In *EG 2007*, 2007.
- [2] Tomoyuki Mishina, Makoto Okui, and Fumio Okano. Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography. *Applied Optics*, Vol. 45, pp. 4026–4036, 2006.
- [3] S. C. Park, M. K. Park, and M. G. Kang. Super-resolution Image Reconstruction: a Technical Overview. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 20, No. 3, pp. 21–36, may 2003.
- [4] Shree K. Nayar. Computational Cameras: Redefining the Image. *Computer*, Vol. 39, No. 8, pp. 30–38, 2006.
- [5] Martin Fuchs, Ramesh Raskar, Hans-Peter Seidel, and Hendrik P. A. Lensch. Towards Passive 6D Reflectance Field Displays. *ACM Transacion on Graphics*, Vol. 27, No. 3, pp. 1–8, 2008.
- [6] 山崎真見, 小池崇文, 宇都木契. 重畳投影した複数の実像と偏向光学系を用いたライトフィールド高密度化技術. 3次元画像コンファレンス 2008, 4-4, jul 2008.
- [7] John B. Pendry and David R. Smith. Reversing Light with Negative Refraction. *Physics Today*, Vol. 57, No. 7, pp. 37–43, 2004.
- [8] Joe Miseli. ICDM Display Measurement Standard for Flat Panel Displays. In *IDW'08*, No. VHF3-1, 2008.
- [9] Goro Hamagishi, Kazuki Taira, Kuniaki Izumi, Shin ichi Uehara, Toshio Nomura, Ken Mashitani, Atsushi Miyazawa, Takafumi Koike, Akimasa Yuuki, Tsutomu Horikoshi, Y. Yoshihara, Yuzo Hisatake, Hiroyasu Ujike, and Yoshihiko Nakano. Ergonomics for 3D Displays and Their Standardization. In *IDW' 08*, pp. 3D2–1, 2008. (Invited).



# 発表文献

---

## 研究論文 (査読付き論文)

- [1] 小池崇文, 苗村健. (仮) 光線情報理論を用いた立体ディスプレイの体系化. 映像情報メディア学会誌, Vol. 63, , 2009. (投稿予定).
- [2] 小池崇文, 苗村健. インテグラルフォトグラフィを用いた BRDF 表示の理論と実装. 映像情報メディア学会誌, Vol. 63, , 2009. (投稿中).
- [3] 小池崇文, 及川道雄, 小林美保. フィールドシーケンシャルカラー液晶パネルを用いたインテグラルビデオグラフィディスプレイ. 映像情報メディア学会誌, Vol. 63, , 2009. (投稿中).
- [4] Yuichi Taguchi, Takafumi Koike, Keita Takahashi, and Takeshi Naemura. TransCAIP: A Live 3D TV System using a Camera Array and an Integral Photography Display with Interactive Control of Viewing Parameters. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*. (accepted).
- [5] 小池崇文, 及川道雄, 宇都木契. モアレを削減したインテグラルビデオグラフィ. 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 6, pp. 814–821, 2007.

## 国際会議論文

- [6] Takuro Wada, Takafumi Koike, and Takeshi Namura. Optically Multilayered Light Field Display for Enhancing Depth of Field. In *Stereoscopic Displays and Applications XX*, pp. 7237–86, 2009.
- [7] Yuichi Taguchi, Takafumi Koike, Keita Takahashi, and Takeshi Naemura. TransCAIP: Live Transmission of Light Field from a Camera Array to an Integral Photography Display. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 Emerging Technologies*, 2008.
- [8] Takafumi Koike, Akimasa Yuuki, Shin-ichi Uehara, Kazuki Taira, Goro Hamagishi, Kuniaki Izumi, Toshio Nomura, Ken Mashitani, Atsushi Miyazawa, Tsutomu Horikoshi, and

- Hiroyasu Ujike. Measurement of Multiview and Integral Photography Displays based on Sampling in Ray Space. In *IDW' 08*, 3D2–5, 2008. (Invited).
- [9] Masahiro Ota, Takafumi Koike, and Takeshi Naemura. Floating 3D Display using Integral Photography Display and Afocal Lens System. In *IDW' 08*, 3D3–4, 2008.
- [10] Takuro Wada, Takafumi Koike, and Takeshi Naemura. Semi-transparent Light Field Display using Dual Integral Videography. In *ACM SIGGRAPH 2008 Poster*, 2008. (SRC Semi-finalist).
- [11] Kensuke Ueda, Dongha Lee, Takafumi Koike, Keita Takahashi, and Takeshi Naemura. Multi-Focal Compound Eye: Liquid Lens Array for Computational Photography. In *ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demo*, 2008.
- [12] Takafumi Koike and Takeshi Naemura. BRDF Display: Interactive View Dependent Texture Display using Integral Photography. In *EDT-IPT 2008*, 2008.
- [13] Kensuke Ueda, Takafumi Koike, Keita Takahashi, and Takeshi Naemura. Adaptive IP Imaging with Variable-Focus Lens Array. In *Stereoscopic Displays and Applications XIX*, No. 68031A, jan 2008.
- [14] Takafumi Koike, Miho Kobayashi, and Michio Oikawa. Integral Videography Display with Field Sequential LCD. In *Stereoscopic Displays and Applications XIX*, No. 680319, jan 2008.
- [15] Takafumi Koike and Takeshi Naemura. BRDF Display. In *ACM SIGGRAPH 2007 Posters*, No. D03, aug 2007. (SRC Finalist).
- [16] Takafumi Koike, Michio Oikawa, Kei Utsugi, Miho Kobayashi, and Masami Yamasaki. Autostereoscopic Display with 60 Ray Directions Using LCD with Optimized Color Filter Layout. In *Stereoscopic Displays and Applications XVIII*, No. 64900T, jan 2007.
- [17] Takafumi Koike, Michio Oikawa, and Kei Utsugi. Moire Reduction for Integral Videography. In *IDW '06 Proceedings of The 13th International Display Workshops*, 3D4–4L, 2006.
- [18] Takafumi Koike, Michio Oikawa, Kei Utsugi, Miho Kobayashi, and Masami Yamasaki. Interactive Autostereoscopic Display with 60 Ray Directions. In *ACM SIGGRAPH 2006*, No. Research Posters, No. 147, 2006.

- [19] Takafumi Koike, Michio Oikawa, Masami Yamasaki, Nobutaka Kimura, Fumiko Beniyama, and Toshio Moriya. Integral Videography of High-Density Light Field with Spherical Layout Camera Array. In *Stereoscopic Displays and Applications XVII*, No. 605510, jan 2006.

## 国内会議論文

- [20] 李同夏, 小池崇文, 高橋桂太, 苗村健. 流体レンズアレイを用いた光学焦点と合成焦点の制御. PRMU 研究会, IEICE-PRMU2008-192, jan 2009.
- [21] 小池崇文, 苗村健. IP ディスプレイにおける BRDF 表示性能の理論検討. 日本バーチャルリアリティ学会 第 13 回大会, 2B4-4, sep 2008.
- [22] 田口裕一, 山本和明, 小池崇文, 高橋桂太, 苗村健. TransCAIP: カメラアレイからインテグラルフォトグラフィへのインタラクティブな 3 次元映像提示. 3 次元画像コンファレンス 2008, P-10, jul 2008.
- [23] 太田昌宏, 小池崇文, 高橋桂太, 苗村健. 線情報記述法に基づく 3 次元ディスプレイの見え方のモデル化. 3 次元画像コンファレンス 2008, P-2, jul 2008.
- [24] 和田拓朗, 小池崇文, 苗村健. インテグラルフォトグラフィの光学的多層化に関する基礎検討. 3 次元画像コンファレンス 2008, P-11, jul 2008.
- [25] 和田拓朗, 小池崇文, 苗村健. インテグラルフォトグラフィの光学的多層化. CREST 自由空間に 3 次元コンテンツを描き出す技術シンポジウム, pp. 33-36, jul 2008.
- [26] 小池崇文, 及川道雄, 小林美保, 宇都木契. 高解像度液晶パネルを用いたインテグラルビデオグラフィ立体ディスプレイ. 第 14 回 画像センシングシンポジウム, IN3-08, 2008.
- [27] 太田昌宏, 小池崇文, 高橋桂太, 苗村健. 3 次元ディスプレイの見え方に関する光線情報記述法の基礎検討. 映像情報メディア学会 立体映像技術研究委員会, pp. 31-34, mar 2008.
- [28] 上田健介, 小池崇文, 高橋桂太, 苗村健. Adaptive IP Imaging の理論的検討. 映像情報メディア学会 立体映像技術研究委員会, oct 2007.
- [29] 小池崇文, 苗村健. Integral Photography を用いた 3D/BRDF/HDR 表現の基礎検討. 映像メディア処理シンポジウム (IMPS2007), No. I2-19, nov 2007.
- [30] 上田健介, 小池崇文, 高橋桂太, 苗村健. Adaptive IP Imaging における自由視点画像合成の検討. 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, No. 1C1-6, sep 2007.

- [31] 太田昌宏, 小池崇文, 苗村健. 3次元ディスプレイとアフォーカル系を併用した空中像提示手法の基礎検討. 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会, No. 2C2-1, sep 2007.
- [32] 小池崇文, 苗村健. BRDF ディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会, No. 1C1-4, sep 2007.
- [33] 上田健介, 小池崇文, 高橋桂太, 苗村健. Adaptive IP Imaging の基礎検討. 映メ年次大会, No. 2-7, aug 2007.
- [34] 小池崇文, 高橋桂太, 苗村健. 点像分布関数を用いた光線情報記述法の提案-3次元ディスプレイの体系的記述に向けて-. 3次元画像コンファレンス 2007, No. 6-2, pp. 89-92, jul 2007.
- [35] 小池崇文, 及川道雄, 宇都木契, 山崎真見. カラーフィルタ配置を変更したインテグラルフォトグラフィディスプレイ. 映像メディア処理シンポジウム (IMPS2006), No. I6-03, pp. 109-110, 2006.

## 書籍・解説記事

- [36] 小池崇文. FPD ガイドブック 2009, 3.8 立体ディスプレイの人間工学と国際標準. 社団法人電子情報技術産業協会 (JEITA), 2009. (発行予定).
- [37] 小池崇文. 泡コントロールと消泡・脱泡事例集, 第6章14節 レンズアレイ製造, pp. 227-231. 技術情報協会, 2007.
- [38] 小池崇文, 及川道雄, 小林美保, 宇都木契. 高解像度液晶パネルを用いたインテグラルビデオグラフィ立体ディスプレイ. 画像ラボ, Vol. 20, No. 2, pp. 25-30, 2009.
- [39] 小池崇文, 及川道雄, 宇都木契. モアレを低減したインテグラルビデオグラフィディスプレイ. 画像ラボ, Vol. 18, No. 11, pp. 67-71, 2007.

# 謝辞

---

本論文の研究を進めるにあたり、3年間にわたって、親身に指導してくださった苗村 健 准教授に、この場を借りて深く感謝の意を表させていただきます。社会人博士課程でありながら、指導に十分な時間を割いていただき、熱心に議論してくださりました。原島 博 教授には、研究の過程で多くのご助言をいただきました。感謝いたします。

安田 浩 教授 (現、東京電気大学)、池内 克史 教授、佐藤 洋一 准教授、杉本 雅則 准教授、山崎 俊彦 講師、CG ジャーナリストの倉地 紀子 氏からは、研究の方向性含めて、様々な場でアドバイスを頂きました。また、立体ディスプレイに関する ISO 標準化活動において、ISO/TC159 国内対策委員会の面々、特に久武 雄三 主査 (東芝松下ディスプレイテクノロジー (株))、氏家 弘裕 委員 ((独) 産業技術総合研究所)、平和樹 委員 ((株) 東芝)、上原 伸一 委員 (NEC 液晶テクノロジー (株))、濱岸 五郎 委員 (セイコーエプソン (株)) に貴重なアドバイスを頂きました。

原島・苗村研究室では、田中 崇 助手、事務補佐員の方々には、研究生活においてお世話になりました。高橋 桂太 助教からは、光線空間理論のエキスパートとして、様々なアドバイスを頂きました。寛 康明 氏 (現、慶應大学) からは、卓越したセンスの元での研究アドバイスをいただきました。田口 裕一 氏は、研究室の先輩として、同じ学年の同輩として、熱心な議論をさせて頂きました。チェン ドミニク 氏は、新しいアプリケーションに関する熱心な議論をさせて頂き、さらに英語に関して熱心に指導いただきました。上田 健介 氏 (現、(株) エヌ・ティ・ティ・ドコモ)、太田 昌宏 氏、李 同夏 氏、和田 拓朗 氏、山本 和明 氏は、筆者の研究自体をお手伝い頂いたり、筆者のアイデアを基に共同で研究をさせて頂くなど多くの協力を頂きました。

著者も所属する、株式会社 日立製作所の研究者の面々、特に、山崎 眞見 氏、及川 道雄 氏、宇都木 契 氏、小林 美保 氏、坂井 秀行 氏には、研究の面だけでなく、会社での業務をサポートして頂きました。パネル開発に関しては、株式会社 日立ディスプレイズの大倉 理 氏、宮沢 敏夫 氏、佐藤 秀夫 氏、大和久 芳治 氏に多大な協力を頂きました。

社会人博士課程への入学を後押ししてくれ、筆者の家庭への貢献が疎かになりつつも、惜しみない協力をしてくれた、妻 幾子に感謝します。そして、平日はもちろんのこと、休日也十分にコミュニケーションが取れなかったにも関わらず、常に満面の笑みで、筆者の心を癒してくれた娘の智子に感謝します。彼女が大人になったときに、本研究成果が役に立ち、光線再生方式ディスプレイが日常のものとなり、より豊かで平和な世界が実現していることを願ってやみません。

全ての方のお名前をあげることはできませんでしたが、両親をはじめ、筆者を支えてくださった多くの方々に、この場を借りてお礼を申し上げ、本論文の締めくくりとさせていただきます。

2008 年 12 月 17 日

小池 崇文