



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                     |                                                                                                 |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | 計算機合成ホログラムにおける光線追跡法を用いたレンダリング手法に関する研究                                                           |
| Author(s)           | 市川, 翼                                                                                           |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                           |
| Degree Name         | 博士(情報科学)                                                                                        |
| Dissertation Number | 甲第11304号                                                                                        |
| Issue Date          | 2014-03-25                                                                                      |
| DOI                 | <a href="https://doi.org/10.14943/doctoral.k11304">https://doi.org/10.14943/doctoral.k11304</a> |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/55566">https://hdl.handle.net/2115/55566</a>               |
| Type                | doctoral thesis                                                                                 |
| File Information    | Tsubasa_Ichikawa.pdf                                                                            |



# 博士論文

## 計算機合成ホログラムにおける 光線追跡法を用いたレンダリング手法に関する研究

北海道大学大学院情報科学研究科

市川 翼



# 目次

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論                         | 1  |
| 1.1   | はじめに . . . . .             | 1  |
| 1.2   | 3 次元知覚 . . . . .           | 2  |
| 1.3   | 3 次元像表示技術 . . . . .        | 5  |
| 1.4   | 研究背景と目的 . . . . .          | 6  |
| 1.5   | 論文構成 . . . . .             | 7  |
| 第 2 章 | ホログラフィ                     | 8  |
| 2.1   | ホログラフィの原理 . . . . .        | 9  |
| 2.1.1 | ホログラフィの記録 . . . . .        | 9  |
| 2.1.2 | ホログラフィの再生 . . . . .        | 11 |
| 2.2   | 計算機合成ホログラム . . . . .       | 12 |
| 2.2.1 | 物体光伝搬計算 . . . . .          | 12 |
| 2.2.2 | 点充填法 . . . . .             | 14 |
| 2.2.3 | フレネル近似を用いた高速計算手法 . . . . . | 14 |
| 2.2.4 | 周波数制限 . . . . .            | 16 |
| 第 3 章 | CGH における FDTD 法による反射特性付与   | 18 |
| 3.1   | 概要 . . . . .               | 18 |
| 3.2   | 提案手法の処理手順 . . . . .        | 19 |
| 3.3   | AFM による表面形状測定 . . . . .    | 21 |
| 3.4   | FDTD 解析 . . . . .          | 23 |
| 3.5   | 実験 . . . . .               | 25 |
| 3.5.1 | 実験 1 計算機シミュレーション . . . . . | 25 |
| 3.5.2 | 実験 2 光学再生 . . . . .        | 29 |

|       |                                |    |
|-------|--------------------------------|----|
| 第 4 章 | 写实的表現法                         | 32 |
| 4.1   | 隠面消去 . . . . .                 | 32 |
| 4.2   | シェーディング . . . . .              | 33 |
| 4.3   | 反射・屈折表現 . . . . .              | 35 |
| 第 5 章 | CGH におけるレンダリング表現技法             | 37 |
| 5.1   | 手法の概要 . . . . .                | 37 |
| 5.2   | 光線追跡法 . . . . .                | 39 |
| 5.2.1 | 光線追跡法のアルゴリズム . . . . .         | 39 |
| 5.3   | CGH における隠面処理表現 . . . . .       | 41 |
| 5.3.1 | 光線追跡法を用いた CGH 隠面処理 . . . . .   | 41 |
| 5.4   | シェーディング . . . . .              | 46 |
| 5.4.1 | 反射特性 . . . . .                 | 46 |
| 5.4.2 | 点光源への反射特性付与 . . . . .          | 49 |
| 5.5   | 影付け . . . . .                  | 51 |
| 5.6   | CGH における反射表現 . . . . .         | 53 |
| 5.7   | CGH における屈折表現 . . . . .         | 55 |
| 第 6 章 | フルカラーホログラフィックディスプレイ            | 57 |
| 6.1   | ホログラフィにおける視域・視野 . . . . .      | 57 |
| 6.2   | フーリエ変換ホログラム . . . . .          | 58 |
| 6.3   | 表示空間の拡大 . . . . .              | 60 |
| 6.3.1 | 直接像と共役像の関係 . . . . .           | 60 |
| 6.3.2 | 共役像の除去 . . . . .               | 62 |
| 6.4   | 仮想物体の計算方法 . . . . .            | 65 |
| 6.5   | 視野の理論値 . . . . .               | 68 |
| 6.5.1 | フレネルホログラムの視野角 . . . . .        | 68 |
| 6.5.2 | フーリエ変換光学系の視野角 . . . . .        | 70 |
| 6.6   | 両眼視表示システム . . . . .            | 72 |
| 6.6.1 | 両眼視ホログラフィックディスプレイの概要 . . . . . | 72 |
| 6.6.2 | 視差補正計算 . . . . .               | 73 |
| 6.6.3 | 再生像のフルカラー化 . . . . .           | 77 |
| 第 7 章 | GPU を用いた高速計算手法                 | 78 |

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 7.1   | Graphic processing unit . . . . . | 78  |
| 7.2   | GPU アーキテクチャ . . . . .             | 79  |
| 7.2.1 | Kepler アーキテクチャ . . . . .          | 79  |
| 7.3   | OptiX . . . . .                   | 82  |
| 7.3.1 | OptiX パイプライン . . . . .            | 82  |
| 7.4   | GPU による CGH 計算プロセス . . . . .      | 85  |
| 7.5   | 計算時間 . . . . .                    | 88  |
| 7.5.1 | CPU による計算時間 . . . . .             | 88  |
| 7.5.2 | GPU による計算時間 . . . . .             | 91  |
| 第 8 章 | 実験                                | 93  |
| 8.1   | 両眼ホログラフィックディスプレイ . . . . .        | 93  |
| 8.1.1 | 再生像の大きさの測定 . . . . .              | 95  |
| 8.2   | 光学再生実験 . . . . .                  | 97  |
| 8.2.1 | 隠面処理 . . . . .                    | 97  |
| 8.2.2 | シェーディング . . . . .                 | 99  |
| 8.2.3 | 反射表現 . . . . .                    | 102 |
| 8.2.4 | 屈折表現 . . . . .                    | 104 |
| 8.3   | 光学再生実験 - 応用 - . . . . .           | 106 |
| 8.3.1 | 複雑なシーンの表現 . . . . .               | 106 |
| 8.3.2 | 両眼視差の実装 . . . . .                 | 108 |
| 8.3.3 | CGH 動画の生成 . . . . .               | 110 |
| 第 9 章 | 結論                                | 114 |
| 9.1   | まとめ . . . . .                     | 114 |
| 9.2   | 今後の展望 . . . . .                   | 116 |
|       | 謝辞                                | 118 |
|       | 参考文献                              | 119 |
|       | 研究業績                              | 126 |

# 目次

|      |                                                                        |    |
|------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | 焦点調節 . . . . .                                                         | 3  |
| 1.2  | 輻輳 . . . . .                                                           | 3  |
| 1.3  | 両眼視差 . . . . .                                                         | 3  |
| 2.1  | ホログラムの撮影 . . . . .                                                     | 10 |
| 2.2  | ホログラムの再生 . . . . .                                                     | 10 |
| 2.3  | 周波数制限 . . . . .                                                        | 17 |
| 3.1  | Process of CGH calculation for adding reflectance distributions. . . . | 20 |
| 3.2  | Samples. . . . .                                                       | 22 |
| 3.3  | 3D images of surface roughness. . . . .                                | 22 |
| 3.4  | Calculation of reflection from the minute surface. . . . .             | 24 |
| 3.5  | Experiment geometry. . . . .                                           | 26 |
| 3.6  | Copper. . . . .                                                        | 27 |
| 3.7  | Aluminum. . . . .                                                      | 28 |
| 3.8  | Iron. . . . .                                                          | 28 |
| 3.9  | Random phase. . . . .                                                  | 30 |
| 3.10 | $d = 1.1468\mu m$ . . . . .                                            | 31 |
| 3.11 | $d = 0.5358\mu m$ . . . . .                                            | 31 |
| 4.1  | 隠面消去による画像効果 . . . . .                                                  | 34 |
| 4.2  | シェーディングと影付け . . . . .                                                  | 34 |
| 4.3  | 完全鏡面反射と透過・屈折表現 . . . . .                                               | 36 |
| 5.1  | 提案手法による計算の流れ . . . . .                                                 | 38 |
| 5.2  | 光線追跡法 . . . . .                                                        | 40 |

|      |                                    |    |
|------|------------------------------------|----|
| 5.3  | 要素ホログラムごとの光線追跡 . . . . .           | 42 |
| 5.4  | 交差判定 . . . . .                     | 42 |
| 5.5  | 識別可能間隔と視角 . . . . .                | 44 |
| 5.6  | 点光源群からの光波伝搬 . . . . .              | 44 |
| 5.7  | 提案手法によって作成されたホログラムの観察 . . . . .    | 45 |
| 5.8  | 拡散反射と鏡面反射 . . . . .                | 47 |
| 5.9  | 平行光線による拡散反射計算 . . . . .            | 47 |
| 5.10 | Phong の反射モデル . . . . .             | 50 |
| 5.11 | Cook-Torrance の反射モデル . . . . .     | 50 |
| 5.12 | 光線追跡法による影付け . . . . .              | 52 |
| 5.13 | 光線追跡法を用いた CGH における反射表現 . . . . .   | 54 |
| 5.14 | 光線追跡法を用いた CGH における屈折表現 . . . . .   | 56 |
| 5.15 | 光の減衰 . . . . .                     | 56 |
| 6.1  | フーリエ変換ホログラムの記録 . . . . .           | 59 |
| 6.2  | フーリエ変換ホログラムの再生 . . . . .           | 59 |
| 6.3  | 反射型 SLM を用いたフーリエ変換光学系 . . . . .    | 61 |
| 6.4  | 点光源の再生位置 . . . . .                 | 61 |
| 6.5  | 直接像と共役像の重なり . . . . .              | 63 |
| 6.6  | 視点とホログラム上の領域の関係 . . . . .          | 64 |
| 6.7  | 拡大されたホログラムとレンズとホログラム間の距離 . . . . . | 67 |
| 6.8  | フレネルホログラムの視野・視域 . . . . .          | 69 |
| 6.9  | フーリエ変換光学系の視野・視域 . . . . .          | 71 |
| 6.10 | 両眼視ホログラフィックディスプレイの概要 . . . . .     | 74 |
| 6.11 | 開発した両眼視ホログラフィックディスプレイ . . . . .    | 74 |
| 6.12 | 両眼視ホログラフィックディスプレイの視差設定 . . . . .   | 75 |
| 6.13 | 座標変換 . . . . .                     | 75 |
| 7.1  | Kepler のメモリ階層 . . . . .            | 81 |
| 7.2  | OptiX のパイプライン . . . . .            | 84 |
| 7.3  | 右目光学系用 CGH 計算のブロックダイアグラム . . . . . | 87 |
| 7.4  | ポリゴンによって構成された球 . . . . .           | 90 |
| 7.5  | 一枚の要素ホログラムに係る計算時間 . . . . .        | 90 |

|      |                                 |     |
|------|---------------------------------|-----|
| 8.1  | 定規の仮想物体 . . . . .               | 96  |
| 8.2  | 視野角の測定 . . . . .                | 96  |
| 8.3  | 隠面処理実験の仮想物体配置 . . . . .         | 98  |
| 8.4  | 隠面処理の確認 . . . . .               | 98  |
| 8.5  | シェーディング再生実験における仮想物体配置 . . . . . | 100 |
| 8.6  | シェーディング . . . . .               | 100 |
| 8.7  | 色調再現 . . . . .                  | 101 |
| 8.8  | 完全鏡面物体の仮想物体配置 . . . . .         | 103 |
| 8.9  | 完全鏡面物体の再生像 . . . . .            | 103 |
| 8.10 | 透過物体の仮想物体配置 . . . . .           | 105 |
| 8.11 | 屈折率の異なる透過物体の再生像 . . . . .       | 105 |
| 8.12 | 透過物体の仮想物体配置 . . . . .           | 107 |
| 8.13 | 屈折率の異なる透過物体の再生像 . . . . .       | 107 |
| 8.14 | 両眼の光学系と仮想物体配置 . . . . .         | 109 |
| 8.15 | 左右の光学再生像 . . . . .              | 109 |
| 8.16 | CGH 動画の仮想物体配置 . . . . .         | 111 |
| 8.17 | プラスチック球の光学再生像 . . . . .         | 112 |
| 8.18 | ガラス球の光学再生像 . . . . .            | 112 |
| 8.19 | 金属球の光学再生像 . . . . .             | 112 |
| 8.20 | 再生像における奥行きによる焦点ボケ . . . . .     | 113 |

# 表目次

|     |                                                                        |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1 | Setup parameters for computer simulation. . . . .                      | 26  |
| 3.2 | Setup parameters for FDTD analysis. . . . .                            | 26  |
| 3.3 | Permittivity and specular reflectance. . . . .                         | 27  |
| 3.4 | Setup parameters for optical reconstructions. . . . .                  | 30  |
| 7.1 | Parameters of comparative experiments. . . . .                         | 89  |
| 7.2 | Specifications of the CPU. . . . .                                     | 89  |
| 7.3 | Calculation time by CPU. . . . .                                       | 89  |
| 7.4 | Specifications of the GPU. . . . .                                     | 92  |
| 7.5 | Calculation time by GPU. . . . .                                       | 92  |
| 7.6 | Calculation time of a sphere by mathematical presentation. . . . .     | 92  |
| 8.1 | Setup parameters for experiment. . . . .                               | 94  |
| 8.2 | Theoretical value of viewing angles and distance of viewpoint. . . . . | 94  |
| 8.3 | Calculation time of CGH movie. . . . .                                 | 111 |

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 はじめに

1980 年代以降，コンピュータグラフィックス技術 (CG : Computer graphics) が映画やゲームに用いられるようになり始め，現在では映画にかぎらず，テレビコマーシャル映像やイラストレーション，漫画などあらゆる画像・映像制作において非現実的な映像の作成手法として定着している．この CG 技術で作成された映像は非常に写實的に出来ており現実の写真であるかのように見せるものも多数存在する．ディスプレイの面でも 4K デジタルシネマやスーパーハイビジョンのような超高精細大画面映像システムが開発され，眼前に広がる大画面できめ細かい映像を提示することで高い臨場感を与えることが出来る．しかしそれらは奥行きのない 2 次元の映像であり，視聴者があたかもその場にいるような現実感を得ることは難しい．そこで 3 次元映像表示へと近年は注目が集まり，立体サラウンドシステムと合わせた超臨場感システムに関する研究が多く進められている．市場においてもすでに多くの 3 次元映像による映画がハリウッドで制作されており，それらを上映可能なスクリーンの数も順調に伸ばしている．

超臨場感システムを実現するには多様な技術課題があり多くの異分野の協調が不可欠である．現在，日本は 3 次元映像技術について産学官連携体制で研究開発を進めており，2007 年には超臨場感コミュニケーション産学官フォーラム (URCF) が設立されている [1]．また 2005 年に総務省が発表した「ユニバーサル・コミュニケーション技術に関する調査研究会報告書」においても人の感性に訴えるリアリティに飛んだ表現・意思伝達を可能とするコミュニケーション社会の実現が重要であるとされている．こうした 3 次元映像技術に関するフォーラムや国の方針の中で，立体映像だからこそ可能な新サービスが社会に与えるインパクトは非常に大きく，立体音響技術などと組み合わせにより応用展開の幅

がさらに広がっていくと期待されている．例えば，立体放送はもちろん，外科医療における患部の立体視であったり職場と自宅とをつなぐコミュニケーションであるテレワーク，文化資産などの鑑賞体験など多くのサービスが巨大な規模での創造が予測される．

このように超臨場感システムへ託された期待は非常に大きく，すでに産学官一体となって長期的なビジョンに基づき研究開発が進められている．その中でも 3 次元映像技術の占める役割は大きく，表示技術だけでなくコンテンツの作成や人体への影響の解明とこれに基づく 3 次元映像の利用ガイドラインの策定なども早急に求められている．

## 1.2 3 次元知覚

まず人が 3 次元物体を見て，それを立体だと知覚する仕組みについて述べる．人間が現実にある 3 次元物体を見た時，その物体を立体であると知覚するには多くの要因によって決定される．まず奥行きを知覚するための身体的，生理的要因として主に以下の 3 つが挙げられる [2]．

調節：accommodation

対象物を網膜面に正しく結像させるためのピント合わせ機能．水晶体の厚さを変化させて調整を行う．眼球の状態を脳が知ることにより，人は距離を知覚する (図 1.1)．約 2m 以内の奥行きに用いられる．

輻輳：convergence

注視している対象物が遠くから近く，近くから遠くへ移動した際に生じる眼球運動．両眼同時の内側への水平運動を内転，両眼の外向きの水平運動を開散という．図 1.2 中の  $\alpha_1$ ， $\alpha_2$  のことを輻輳角という．約 6m 以内の奥行きに用いられる．

両眼視差：disparity

異なる視点からの方向の差異により生じる両眼網膜上の差異のこと (図 1.3)．奥行き距離差による水平視差と左右の目までの距離差による垂直視差，奥行きの異なる連続した刺激による両眼視差がある．水平視差と方向視差により奥行き知覚が生じる．

これらの生理的要因が満たされるときに，観察者は 3 次元物体を身体的に違和感や疲労感を得ることなく知覚することができる．

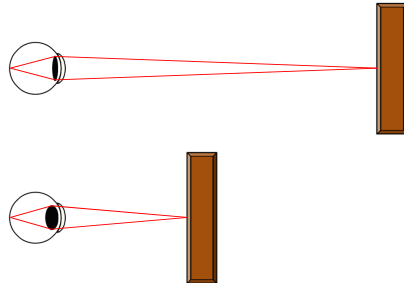


図 1.1: 焦点調節  
Accommodation.

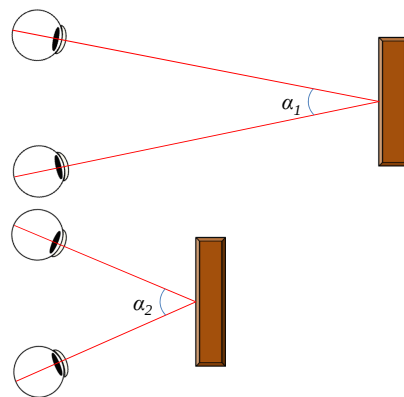


図 1.2: 輻輳  
Convergence.

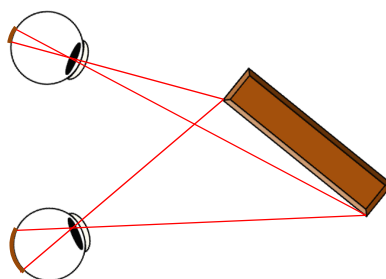


図 1.3: 両眼視差  
Disparity.

また経験的要因として以下の要因も挙げられる．これらの要因による情報が付与されることでより自然に 3 次元物体を知覚することが可能である．

#### 大小遠近法

大きさを変えただけでも奥行き感が生じる．

#### 線遠近法 (一点透視)

遠くに一点の消失点を仮定し，その点に向かって伸びている図形に対し奥行き感が生じる．

#### 大気遠近法

手前の物ははっきりと，遠くの物はぼやけて見えることによって奥行き感が生じる．

#### 重なり合い

物体同士の重なりによって奥行き感が生じる．

#### 陰影

下に影があると凸に見え，上に影があると凹に見える．

#### きめの勾配

きめを構成する要素の密度が徐々に変化した時，その面は傾斜面として見え，細かいきめの部分ほど遠くに知覚される．面の構成要素の密度の変化を勾配と呼び，勾配が急激な面ほど大きく傾斜して知覚される．

### 1.3 3 次元像表示技術

さて、立体映像表示技術は大きく 2 つに分けられる．ひとつは光線を基とした複数視差方式であり、もうひとつは光波を基としたホログラフィ方式である．複数の視差を視聴者に対して提供する方式については更に大きく 2 つに分類している．1 つ目は専用の眼鏡が必要であったり (眼鏡式 [3, 4])、水平方向の視差の数を限定することで 3 次元映像を見せる方式 (レンチキュラ方式 [5, 6, 7]、パララックスバリア方式 [8, 9, 10]) である．これらの方式については技術的に比較的容易に実装することが可能であるため、映画や雑誌などですでに広く用いられており、こらからの市場の拡大も見込まれている．しかし視聴者の視点が固定もしくは水平方向のみに限られてしまうことや、また 3 次元映像を知覚するための生理的要因のうち両眼視差しか満たされないという問題点がある．そのため輻輳と焦点調節の不一致が生じ、人間にとって不自然な 3 次元像を知覚することになり、長時間の視聴の際には疲労感を覚えることがある．

一方で複数の視差を持つ方式でも裸眼で立体像の観察が可能であり、かつ視差が上下に広がったものが存在する．本方式として代表的なものは東京大学や NHK 放送技術研究所などで研究されているインテグラルフォトグラフィ (IP : Integral Photography) 方式 [11, 12] や東京農工大学などで研究されている超多眼方式 [13] が挙げられる．IP はマイクロレンズアレイなどを用いて光線の方法を制御し、実際に物体が存在する場合と同じ光線の状態を記録し再生する方式である．その原理は、カメラのフィルムの前にマイクロレンズアレイを配置し点光源を撮影すると、多くの点像が各レンズに対応してフィルムに投影される．撮影後、今度はフィルムの後ろから光を当て、マイクロレンズアレイを通して見ると、あたかも点光源があるように立体的に見えるというものである．利点として視域内では連続的な 3 次元像の視聴が可能であるが、超高解像度のディスプレイが必要なことや、視差数が少ないと奥行きが狭いという欠点がある．超多眼方式 (super multi-view display) は、多眼式における視点間隔を目の瞳孔径以下にすることで、空間の一点を通る光線が 2 本以上同時に眼に入るため目のピント合わせが可能になるという考え方に基づいたものである．しかしそれほど多くの視点を用意するには高密度に非常に多くの表示画像を用意する必要がある．

ここまで紹介した光線再生型 3 次元表示技術では光を光線として扱っている．これに対して、光を波として扱うのが波面再生型の立体表示でありホログラフィ [14, 15] である．ホログラフィは物体から発せられる光の波面を再生するため、理想的な立体表示方式であると言われる．光を波として正確に物理的に扱うため、3 次元像知覚に必要な生理的

要因をすべて満たす．ホログラフィは光の干渉，回折を利用して 3 次元像を記録，再生する技術である．その情報を記録する媒体をホログラムといい，様々な方式，媒体を用いることで多様なホログラムの形態がある [16]．現在多くのホログラムが美術品として展示されているが，その多くが静止画となっている．そこで動く 3 次元像を表示するために，電子的にホログラムを作成し，液晶ディスプレイ (LCD : Liquid Crystal Display) などの空間位相変調器 (SLM : Spatial light modulator) に表示する電子ホログラフィがある [17, 18, 19]．またこの SLM に表示するホログラムを計算機を用いたシミュレーションで求めることが出来，そうして作成されたホログラムを計算機合成ホログラム (CGH : Computer-generated hologram) という．だが CGH の持つ情報量は非常に膨大であり，計算を行うソフトの面，表示を行うハードの部分で未だ数多くの課題が存在する．しかしながらすでにいくつかの研究開発においてホログラフィを基とした 3 次元表示装置が試作されており，CGH の持つ究極の 3 次元映像表示装置への可能性を高めている．

## 1.4 研究背景と目的

理想的な 3 次元表示技術として期待されているホログラフィ，その中でも動画で 3 次元映像を表示することが可能な電子ホログラフィであるが，前述したように未だ多くの研究課題が残されている．まず計算によって求められる CGH であるが，ひとつの大きな特徴としてホログラムの記録の際には実物体に限らず，計算機内に作成された仮想物体からの光波を計算することで作成が可能という点があげられる．よって物体の形状や位置は自由に設定することが出来るという大きな利点が存在する．しかしながら CG の分野のような写実的な像を表示するためのレンダリング技術が CGH においては未だ不十分である．従来までにある CGH へと各種レンダリング技術を実装する手法とその問題点を以下に幾つか挙げ，本論文の研究目的を述べる．

通常 3 次元像を表示する際には，前面の物体により隠れるような隠面処理が求められる．加えて CGH では運動視差が必要となるため，視点の移動にも対応する必要がある．CGH における隠面処理の手法がいくつかこれまでに提案されており，それらは主にシルエット近似法を用いた波動光学的手法，また CG における Z バッファ法を拡張して CGH へと応用した幾何光学近似的手法に分けられる．波動光学的手法では物体を平面，いわゆるポリゴンの集合であると考え，後ろのポリゴンから伝搬される光波を前面のポリゴンのシルエットでカットすることで表現される．しかしポリゴン数が多いと計算時間が長くなることやセルフオクルージョンへの対応が難しいなどの問題点が存在する [20, 21, 22]．一方，幾何光学的な手法では Z バッファ法と呼ばれる隠面処理法を用い

ているため、反射や屈折、影の処理が難しく、リアルな画像を作成するのには不向きである [23, 24]。他にも隠面処理を実装するためにホログラフィックステレオグラムと呼ばれる手法がある [25, 26]。ホログラフィックステレオグラムで作成されたホログラムは多くの視点から撮影された輝度画像を用いて作成されるが、奥行きを持った像を再生することが出来ない。加えて CGH による写実的な再生像を表現するために各種レンダリング技術が提案されている。例えば、シャドーイング（影付け）および反射特性の表現手法 [27, 28, 29, 31, 31, 32, 33]、屈折表現 [34, 35]、そして反射表現手法 [36] などが存在する。しかしながらそれぞれの手法は特定のレンダリング表現にのみ特化されており、組み合わせて同時に用いることは考慮されていない。

そこで本論文では隠面処理及び各種レンダリング表現を行う CGH 計算法を提案する。本研究では光線追跡法を用いることで従来では不可能であった多くのレンダリング表現技法を同時に CGH へと実装することを目的としている。CG の分野において光線追跡法は隠面処理を目的として用いられているが、他にも多重反射や屈折表現といった写実的表現に重要な要素を実装することにも用いられる。光線追跡法は計算コストの高さから非常に高い解像度を必要とする CGH では避けられてきたが、本研究では光線追跡プロセスを GPU を用いて高速化を施すことで CGH への適用を可能とした。本論文ではこの光線追跡法を自由視点を持つ CGH へと適用する手法を述べる。さらに光線追跡法の利点を活かし、CGH において各種レンダリング表現を実装する手法についても記載する。

また本研究では電子ホログラフィの課題である視野の狭さを解決するために、ホログラフィ表示としてフーリエ変換光学系を基とした表示システムを用いている。本光学系へ表示する干渉縞の計算を行う際には仮想物体の再生位置などを補正する計算が必要になるため、その補正計算式についても本論文では述べる。

## 1.5 論文構成

本論文は 8 つの章から構成される。第 1 章では研究背景と目的について述べた。第 2 章ではホログラフィの原理と計算機合成ホログラムについて、第 3 章において FDTD 法を用いた CGH への反射特性付与手法を解説する。第 4 章では写実的な像を再生するために必要な要素を述べ、第 5 章では光線追跡法を用いた CGH 計算法について述べる。第 6 章ではフーリエ変換光学系を用いたホログラフィックディスプレイの原理とその補正計算法について、第 7 章では GPU を用いた計算システムとアルゴリズムの実装方法について述べる。第 8 章において光学再生実験を行った結果を提示する。第 9 章では全体のまとめと今後の展望について記載する。

## 第 2 章

# ホログラフィ

ホログラフィは 1948 年にハンガリーの物理学者 Dennis Gabor によって発明された [14] . Gabor は当時イギリスの Thomson Houston 社において電子顕微鏡の改良を行う研究をしており、電子顕微鏡のレンズによる球面収差を補正する手法としてホログラフィを発明した。Gabor は電子顕微鏡の像を記録する際に、その位相分布も同時に記録しておくことで、後に像を観察するとき、その収差と逆の収差を持つレンズを用いることで収差が補正され、分解能の高い鮮明な像が観察できると考えた。そこで Gabor は光の干渉を利用して位相を干渉縞として記録する手法を提案した。その干渉縞が記録されたものがホログラムである。しかしレーザーが 1960 年に発明されるまでは研究があまり進むことはなかった。

ホログラフィの特徴を挙げると、以下のようになる。

1. 完全な 3 次元像の再生が可能である。
2. 高い冗長性を持つ。
3. 多重記録が可能である。
4. 波面の変換ができる。
5. 干渉性の良い光源が必要である。
6. 高解像力の記録材料が必要である。

上記 1. については物体の波面が再生されるため、と前述したがその原理について以下に式を交えて詳細に述べる。

## 2.1 ホログラフィの原理

ホログラフィにはいくつかの種類が存在し、Gabor が 1948 年に提案した方式と、レーザーが登場した後にアメリカのミシガン大学 Leith らによって提案された 2 光束法を用いた方式 [37] などが存在する。ここでは現在最もよく使用されている後者を選びその原理を説明する。

### 2.1.1 ホログラフィの記録

図 2.1 に示すようにビームスプリッタ BS によって分けられた平行光  $A_0$  を物体に入射させ、物体から  $z$  離れた位置にあるホログラムが反射光を受光する。ホログラム面には物体のフレネル回折光  $\Sigma_O$  が到達し、ホログラム面上の振幅分布は次式で表される。

$$\Sigma_O = A(x, y) \cdot \exp[j\alpha(x, y)] . \quad (2.1)$$

ここで  $A(x, y)$  は振幅分布、 $\alpha(x, y)$  は位相分布である。この光  $\Sigma_O$  は物体光と呼ばれる。

次に入射光  $A_0$  の一部を角度  $\theta$  でホログラムに入射させるとその振幅分布は  $R_0$  を定数として

$$\Sigma_R = R_0 \cdot \exp(j\kappa x \sin \theta) , \quad (2.2)$$

となる。この光を参照光という。

物体光と参照光はホログラム面上で干渉し干渉縞を形成する。その強度分布は

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |\Sigma_O + \Sigma_R|^2 = |\Sigma_O|^2 + |\Sigma_R|^2 + \Sigma_O \Sigma_R^* + \Sigma_O^* \Sigma_R \\ &= A(x, y)^2 + B_0^2 + A(x, y) B_0 \exp i[ \alpha(x, y) - \kappa x \sin \theta] \\ &\quad + A(x, y) B_0 \exp i[-\alpha(x, y) + \kappa x \sin \theta] \end{aligned} \quad (2.3)$$

となる。写真乾板のような強度分布が透過率分布として保存される媒体に記録すると、その振幅透過率分布は以下のように成る。

$$T_a = T_0 + t_1 I(x, y) . \quad (2.4)$$

$T_0$  ,  $t_1$  は感光材料や記録方法によって決定される定数である。

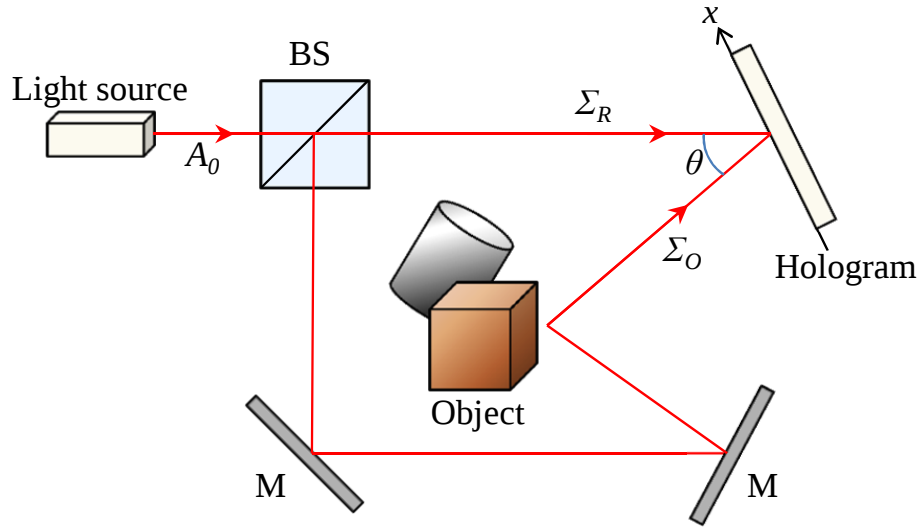


図 2.1: ホログラムの撮影

Record of a hologram.

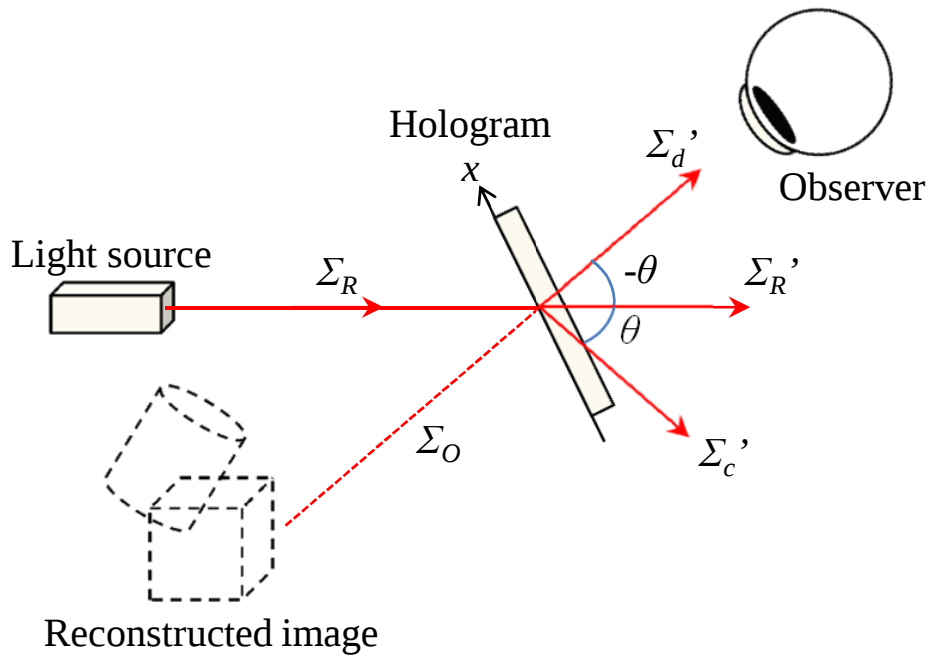


図 2.2: ホログラムの再生

Reconstruction of a hologram.

## 2.1.2 ホログラフィの再生

ホログラムに記録されているのはただの干渉縞であり、それを見ただけでは何が表示されるのか全くわからない。そこでホログラム再生プロセスで生じる現象について説明する。図 2.2 に示すように、ホログラムを平行光  $\Sigma_R$  で照射すると、ホログラムを通過した直後の振幅分布  $\Sigma$  は式 (2.3), (2.4) から

$$\begin{aligned}
 \Sigma &= \Sigma_R T_a = \Sigma_R [T_0 + t_1 I(x, y)] \\
 &= \Sigma_R T_0 + \Sigma_R t_1 [A(x, y)^2 + B_0^2] \\
 &\quad + \Sigma_R t_1 B_0 A(x, y) \exp[j\alpha(x, y)] \exp(-i\kappa x \sin \theta) \\
 &\quad + \Sigma_R t_1 B_0 A(x, y) \exp[-j\alpha(x, y)] \exp(i\kappa x \sin \theta) \\
 &= \Sigma'_R + \Sigma'_d + \Sigma'_c
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

となる。上式の第 2 行目はホログラムを直進して透過する光  $\Sigma_R$  であり、第 3 行目はホログラムから  $-\theta$  方向に向かう光  $\Sigma'_d$ 、第 4 行目はホログラムから  $\theta$  方向に向かう光  $\Sigma'_c$  を表す。 $\Sigma'_d$  は物体光  $\Sigma_O$  に比例する形であるため、この再生プロセスにより物体光と全く同じ波面が再現されることになる。したがって、この再生光  $\Sigma'_d$  を見るとホログラム後方  $-z$  の位置に物体の像が再現されたように見え、物体の虚像が再生される。この像は物体光と同型であるため直接像と呼ばれる。

一方  $\Sigma'_c$  は物体光と位相成分の符号が逆転しており、複素共役の状態にあることが分かる。よってこの光は再生照明光  $\Sigma_R$  に対して物体光と対称の方向に進み、ホログラムの前方  $z$  の位置に実像を生成する。これを共役像と呼ぶ。

以上のようにホログラムに再生照明光として平行光を当てると物体光と同じ波面を持つ光が再生される。波面を表すには振幅と位相情報が必要であり、ホログラムはこの両者を記録し、再生することが可能である。記録した物体が 3 次元構造を持っていれば、波面にも当然 3 次元情報が存在することになり、その結果立体的な再生像が観察できる。

## 2.2 計算機合成ホログラム

ホログラフィの原理については 2.1 節で示したとおりである．その際ホログラム上の光波強度分布は式 (2.3) のように表せる．式 (2.3) 中の物体光や参照光にフレネルキルヒホッフの式から得られる式を代入することで計算によってホログラム上の干渉縞を求めることが出来る．これを計算機合成ホログラムという．

CGH 作成の際に用いられる仮想物体については主に 2 種類の手法で作成される．ひとつは点充填法と呼ばれ対象となる物体を 3 次元座標を持つ点光源によって表面を覆い，その点光源の集合からホログラム面までの光波の伝搬を計算する．そのため，どのような物体の形状にも応用可能であるという利点があるが膨大な計算時間を必要とする点や，物体表面における反射の扱いなどが困難であることが問題点としてあげられる．

これに対し，物体をパッチと呼ばれる 3 角形や四角形などのポリゴンを用いて表現するパッチモデルがある．パッチモデルは CG の分野において広く用いられている手法であり，物体表面を任意の形状をした面の集まりとして表現する [38]．パッチモデルで仮想物体を作成することで点充填法に比べて物体のデータが大きくなり計算時間が短いという利点があげられる．さらに物体表面を面として扱うので反射特性を考慮することが容易である．

次節より両者の方法で作成された仮想物体から CGH を作成する計算方法を紹介する．

### 2.2.1 物体光伝搬計算

CGH では，物体光は光源からの光が物体面上で反射しホログラム面まで伝搬する光として定義される．ホログラム面上における物体光波分布は式 (2.1) で示した．この仮想物体から伝搬される光波分布を求める主な手法として以下に挙げられるものがよく知られている．

- 点充填法における Fresnel-Kirchhoff の回折積分
- 2 平面間の伝搬計算を高速フーリエ変換 (FFT : Fast Fourier Transform) を用いて高速に行う Fresnel 変換式および Fraunhofer 変換式
- 光波の角スペクトルを用いた伝搬計算 (AS 法 : Angular Spectrum method)

点充填法は物体を多数の点光源の集合として各点光源からのホログラム面までの光波の伝搬計算を逐一行う．この手法は物体形状による制限がなく，自由に仮想物体をモデリング

することに適しているが物体を構成する点光源数に比例して計算時間が必要になってしまう問題点がある [39] .

FFT を用いた Fresnel 変換式および Fraunhofer 変換式は高速な伝搬計算が可能であるが, 平行平面間の伝搬式として定義されているために, 原則として傾斜平面間の伝搬計算を行うことが出来ない. しかし近年の研究で, ホログラム面に対して傾いた物体からの光波伝搬計算法が計算され, 立体的な像を表示する CGH を作成することが可能になった [40, 41]. しかしこれらの方式では傾斜平面間の計算に近似を用いているため, 厳密な計算ではなかった.

また光波のスペクトルを用いた AS 法による伝搬計算も原則的には平行平面間の伝搬計算式として与えられている [42]. しかし, 傾斜平面間の伝搬に対応するための計算法がすでに提案されており, Fresnel 変換式や Fraunhofer 変換式の持つ距離に関する制限への対応策も提案されている [43, 44].

上記に上げた 2 つの平行平面間での伝搬法は平面同士のサンプリングピッチが一致しており, かつ平面の原点が光軸上に存在する on-axis な条件下でなければ光波伝搬を行うことが出来ない. 近年, 光軸上から外れた off-axis であり, さらにサンプリングピッチが異なっている光波伝搬が可能な手法が提案されている [55].

さて本研究では CGH 計算には点充填法を用いる. 仮想物体を点の集合として扱う点充填法では物体表面における反射の使いなどが困難であると前述したが, 物体形状モデリングを自由に行うことが出来るという点は非常に大きな利点である. パッチモデルではなめらかな曲線を CGH において実装しようとする膨大な枚数のパッチが必要になり, 結局計算時間が増加してしまう. 点充填法でも面を表現するためには間を埋める点の数が多く必要となるが, 近年では GPU を用いた高速並列計算が可能になった. 以下より, 点充填法の計算手法と, またこれまでに提案されている高速化手法についても述べる.

## 2.2.2 点充填法

ホログラム上の光強度  $I(x, y)$  を求める式 (2.3) 中の物体光成分  $\Sigma_O$  について考える．参照光  $\Sigma_R$  については式 (2.2) と同様である． $\Sigma_O$  を点光源の集まりと考えると，その中の任意の物体点  $(x_i, y_i, z_i)$  を点光源とした時の球面波  $E_i$  は次式で示される．

$$E_i(x, y, z = 0) = \frac{A_i}{r_i} \exp(j\kappa r_i) . \quad (2.6)$$

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2} \quad (2.7)$$

$r_i$  は物体点  $(x_i, y_i, z_i)$  からホログラム面上の画素  $(x, y)$  への距離を示し， $\kappa$  は波数である．式 (2.3) における  $\Sigma_O(x, y)$  は式 (2.6) を点光源の数だけ足しあわせたものである．そこで式 (2.3) よりひとつの点光源からの  $I_i(x, y)$  は以下の式と成る．

$$\begin{aligned} I_i(x, y) &= |E_i(x, y, 0) + \Sigma_R(x, y)|^2 \\ &= |E_i(x, y, 0)|^2 + |\Sigma_R(x, y)|^2 + E_i(x, y, 0)\Sigma_R^*(x, y) + E_i^*(x, y, 0)\Sigma_R(x, y) \\ &= \left(\frac{E_i}{r_i}\right)^2 + R_0^2 + \frac{E_i R_0}{r_i} \exp[j\kappa(r_i - x \sin \theta)] + \frac{E_i^* R_0}{r_i} \exp[-j\kappa(r_i - x \sin \theta)] . \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.1.2 節でも述べたように，式 (2.8) の第 1 項と第 2 項はホログラフィの再生に関係なく，第 3 項は虚像，第 4 項は実像を表している．式 (2.3) の第 1, 2 項を無視して整理すると次式となる．

$$I_i(x, y) = \frac{2E_i R_0}{r_i} \cos[\kappa(r_i - x \sin \theta)] . \quad (2.9)$$

したがって  $N$  点で構成される物体像から作成されるホログラム上の光強度は次式のようになる．

$$I(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{2E_i R_0}{r_i} \cos[\kappa(r_i - x \sin \theta)] . \quad (2.10)$$

式 (2.10) の計算には 3 角関数や平方根計算が含まれ，これらの処理が計算時間の増大につながる．

## 2.2.3 フレネル近似を用いた高速計算手法

前節でも述べたように，CGH の計算量は非常に膨大になる．CGH の計算量は点充填法では点光源の数  $N$  と，CGH の画素数  $M$  に比例している．例えば物体点数が 1 万点，

画素数が Full-HD の液晶の  $1920 \times 1080$  とすると、約 200 億回もの 3 角関数や平方根計算をする必要が出てくる．そこでこの計算量を削減するために多くの高速計算法が提案されてきているが、その中でも一般的なフレネル近似を用いた手法を本節で紹介する．

式 (2.11) において、参照光を垂直に入射する、すなわち角度  $\theta = 0$  とする．また物体点がホログラムより十分に離れていれば式 (2.10) の  $r_i$  はホログラム面上の画素ごとにおける変化は乏しくなり、 $\cos$  関数前の係数を 1 とみなすことが出来る．よって式 (2.10) は以下のように表せる．

$$I(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \cos(\kappa r_i) . \quad (2.11)$$

ここで式 (2.11) 中の  $r_i$  は式 (2.7) で示すように開閉計算により求められるため、計算負荷が高い．そこで、物体点がホログラム面より十分に離れている、つまりフレネル領域に置くことでフレネル近似を用いて以下の形にすることが出来る．

$$\begin{aligned} r_i &= \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2} \\ &\simeq z_i + \frac{(x - x_i)^2}{2z_i} + \frac{(y - y_i)^2}{2z_i} . \end{aligned} \quad (2.12)$$

これにより式 (2.11) は物体点一つにつき一回の余弦関数を計算するだけでよくなり大幅な計算量の削減となる．

フレネル近似を用いた手法以外にも、点光源から発せられる光波伝搬の高速計算手法はいくつか提案されている．代表的なものとしては、点光源から伝搬される光強度を保存し予めすべての座標分の光波をテーブル化する手法がある [46, 47]．テーブル化する対象は光波強度そのものから、点光源から画素までの距離、各種関数の計算結果など様々である．それらをメモリなどに格納し、物体点分アドレスを参照して足し合わせるだけで計算結果が求まる手法である．よって計算負荷自体は非常に小さくなるが、膨大なメモリ容量が必要となってしまう．そこで必要メモリ量を削減する手法も幾つか提案されている [48, 49, 50]．しかしながら、やはりメモリに入りきるほどのテーブルにしてもメモリアクセスのほう単純計算よりも時間がかかってしまうという問題が GPU を用いた場合に生じてしまう．

また隣の画素との差分をとる漸化式の形に式を変形して高速に計算する手法が提案されている [51, 52]．差分法では主にホログラム上の任意の画素から点光源までの距離を差分法によって求める手法が用いられている．近年用いられるようになった並列計算ユニットである GPU ではメモリアクセスよりも単純計算を数多く行うことのほうが得意であるため、こちらの差分法が GPU 計算には向いているといえる．

## 2.2.4 周波数制限

電子ホログラフィにおける再生像の大きさの限界は、干渉縞を表示する SLM の空間周波数、すなわち画素間のピッチによって決定される。一方、ホログラム上に表示される干渉縞の間隔は参照光と物体光とのなす角度に反比例する。通常、ホログラムにおいて広い視野を得ようとするとき  $1[\mu\text{m}]$  以下の細かい画素ピッチが必要になるが、現状の SLM までにはそこまでの細かさを持たない。そこで干渉縞のエイリアシングを防ぐために、表示可能な角度を考慮する必要がある。以下に干渉縞の縞間隔と表示角度について述べる。

図 2.3 は異なる角度から平行波を入射されたホログラム面付近の波面を示す。図中の  $A_1, A_2$  は光波の進む向きであり、実線は波面を、破線群は 2 つの光が干渉して強め合っているところをそれぞれ表す。破線がホログラム面と交わった位置で干渉縞を形成する。よって縞間隔は図 2.3 の  $d$  となり、 $A_1, A_2$  の波長を  $\lambda$  とした時  $d$  は

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}, \quad (2.13)$$

と表せる。ここで 2.2.3 節と同じように参照光をホログラム面に垂直に入射するとすると、 $\theta_1 = \theta_r = 0$  となる。物体光の角度を  $\theta_o$  として、 $\theta_o \cong \sin \theta_o$  を満たす範囲の値とすると、干渉縞の空間周波数  $f_h$  は

$$f_h = \frac{1}{d} = \frac{\sin \theta_o}{\lambda} \cong \frac{\theta_o}{\lambda}, \quad (2.14)$$

となる。干渉縞を電子ホログラフィとして表示する際には、干渉縞は画素ピッチで標本化されることになる。SLM の画素ピッチを  $p$  とすると標本化周波数  $f_c$  は  $f_c = \frac{1}{p}$  であるので、標本化定理より干渉縞の空間周波数は

$$f_h \leq \frac{1}{2} f_c, \quad (2.15)$$

を満たす必要がある。これらの式より物体光と参照光の角度差の上限は

$$\phi_m \leq \frac{\lambda}{2p}, \quad (2.16)$$

となる。

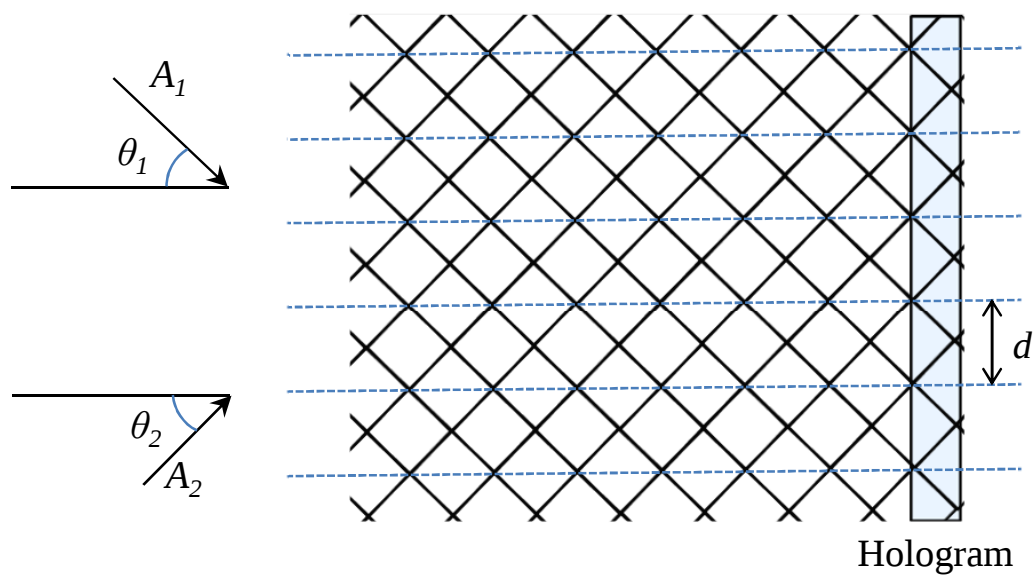


図 2.3: 周波数制限

Frequency limit.

## 第 3 章

# CGH における FDTD 法による反射特性付与

### 3.1 概要

2.2.2 節では点の集合からなる物体からの光波伝搬計算を行う手法について説明した．点光源は点ごとにその振幅と位相を持ち，それが物体の明るさを表現する．平面物体を用いて CGH を計算する場合には，まず入力した平面物体における光波の振幅・位相情報を初期化する．物体面における入射光の複素振幅分布を

$$g(\xi, \eta) = A(\xi, \eta) \exp[-j\phi_0(\xi, \eta)], \quad (3.1)$$

と定義する．ここで  $A(\xi, \eta)$  は物体表面のある平面  $(\xi, \eta)$  における入射光の振幅分布であり， $\phi_0(\xi, \eta)$  は位相分布である．簡単化のために，入射光を物体面に垂直に入射する平行光とすると，位相分布  $\phi_0$  は 0 となる．与えられた入射光を用いて物体面からの反射光を考える．反射光の物体表面における複素振幅分布  $g'(\xi, \eta)$  は

$$g'(\xi, \eta) = g(\xi, \eta) \exp[-j\phi(\xi, \eta)], \quad (3.2)$$

で与えられる．ここで  $\phi(\xi, \eta)$  は位相差であり，この位相差により反射光の進む向きが決定される．つまり，CGH における物体の見え方がこの位相差によって決定される．

従来では白色生雑音を位相差として付与する手法が主に用いられている．この手法では  $0 \sim 2\pi$  までの範囲内でランダムな位相分布を生成し，コレを位相差として入射光の位相に付与していた．そのため，反射光は様々な方向へと一様に広がる光波が得られ，完全拡散反射の反射特性となる．よって物体表面の質感が石膏のように感じられてしまう．ま

た CG の分野では各種反射の様子を擬似的に定式化された反射モデルがあり，これらを CGH へと応用する手法も提案されている [53, 36]．しかしこれまでに提案されている手法では複雑な形状を持つ物体表面上での多重反射や，シャドーイング，マスキングなどの複雑な反射による現象を表現することが難しく，また金属や，プラスチック，木材やガラスなどの材質の違いを表現することもできていない．

そこで本研究では Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法を用いて CGH に反射特性を付与する計算法を提案した．光の反射を厳密に計算するためには，複雑な表面形状からの光の反射を考える必要がある．電磁解析手法として知られる FDTD 法は材質の違いや複雑な表面構造での光の反射を厳密に計算することが可能である [54]．本稿ではコンピュータシミュレーションおよび光学再生実験を行い，材質の違い，表面構造の粗さの違いにより反射率および再生像に対してどのような違いが反射特性として現れるかを確認した．

### 3.2 提案手法の処理手順

提案手法による CGH の作成は図 3.1 のような流れで作成される．

1. 物体表面の構造をコンピュータ内で作成する．
2. FDTD 法により，解析領域内の電磁場を決定する．電磁波が定常状態になるまで電磁界計算を繰り返し，物体表面からの反射光の複素振幅分布を得る．
3. FDTD 解析により得られた反射光分布を物体光として呼び出し，ホログラム面まで shifted-Fresnel 法 [55] を用いて伝搬計算を行う．
4. ホログラム面での物体光に参照光を入射する計算を行うことで干渉縞データを作成する．

以下の節ではホログラム生成の各項目について細かく説明する．

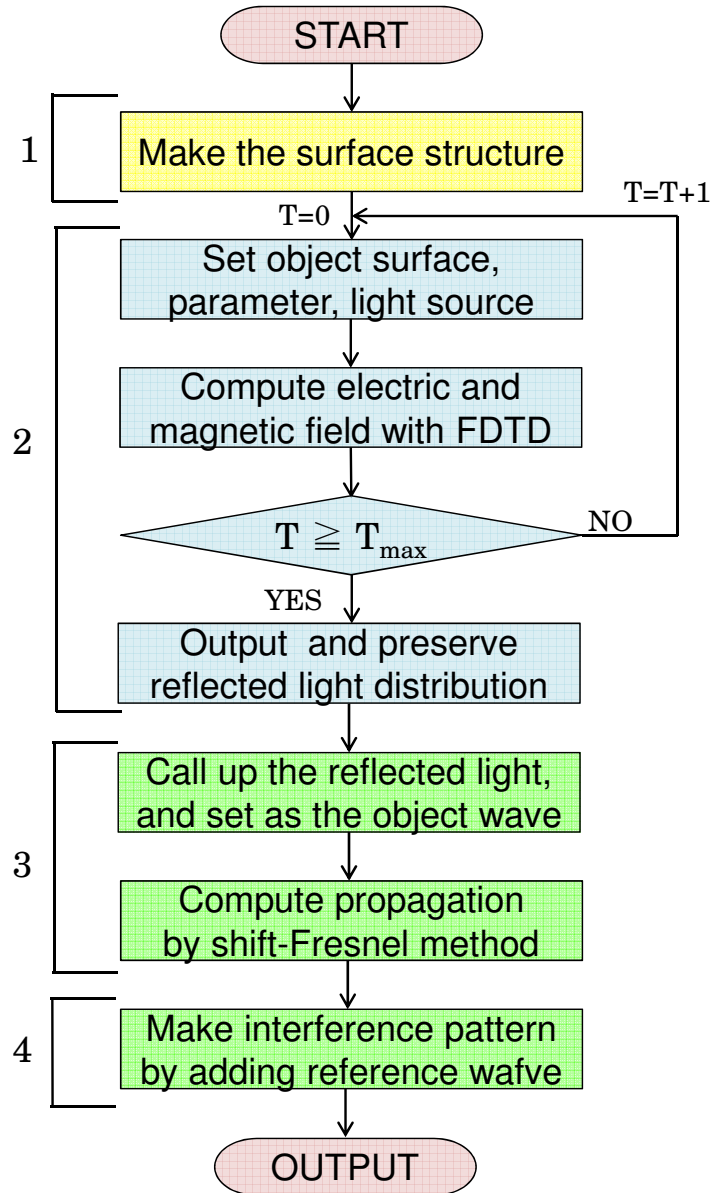


図 3.1: Process of CGH calculation for adding reflectance distributions.

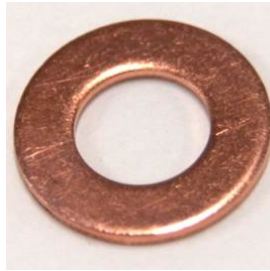
### 3.3 AFM による表面形状測定

FDTD 解析において解析領域内に配置する物体表面の細かな凹凸構造を計算機内に作成する必要がある．本研究では表面凹凸が実物体と同様の粗さを持つように実際に実物体の表面構造を測定したデータを用いてコンピュータ内でモデリングする方法を用いる．実物体の表面構造の測定は原子間力顕微鏡 (AFM : Atomic Force Microscope) を用いて行われた．AFM は走査型プローブ顕微鏡 (SPM : Scanning Probe Microscope) の一種であり，試料と探針の原子間に働く力を検出することで画像を得る．AFM の空間分解能はナノオーダーで計測できるため，物体表面の非常に細かい構造も計測することが可能である．本研究では，試料として図 3.2 に示す 3 種類を用意した．材質はそれぞれ鉄，銅，アルミニウムである．これらの試料は様々な表面粗さを持たせるために，あらかじめやすりをを用いて磨いてある．

図 3.3 に AFM により測定された表面構造の 3D 画像を示す．AFM は測定する表面の表面粗さも同時に計測可能であるため，ここでは図のキャプションに算術平均粗さ  $Ra$  を示した．算術平均粗さとは JIS によって規格化されている表面粗さの指標である．図 3.3 より物体表面は反射に影響を及ぼす複雑な構造を持っていることが確認できる．



(a) Iron.

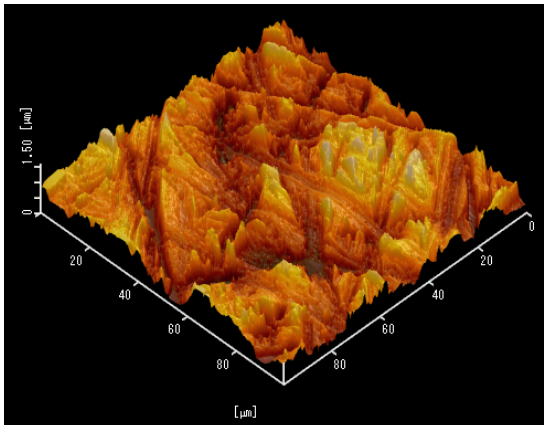


(b) Copper.

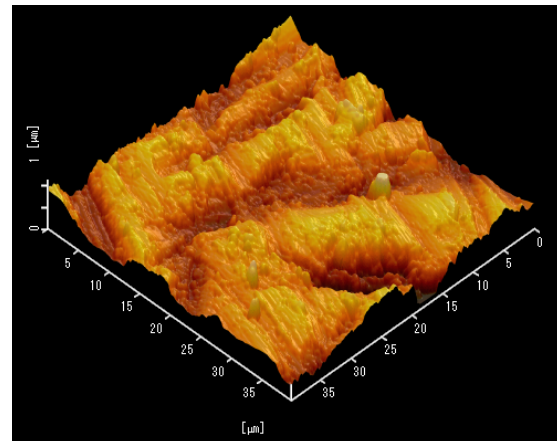


(c) Aluminum.

図 3.2: Samples.



(a)  $Ra = 0.2468\mu m$ .



(b)  $Ra = 0.1358\mu m$ .

図 3.3: 3D images of surface roughness.

### 3.4 FDTD 解析

FDTD法をCGHへと応用する方法について述べる．理想としては，物体全体からホログラム面までの伝搬計算を全てFDTD法で計算すれば，非常に精度の高い干渉縞を得ることができる．しかし解析領域を大きくして計算すると非常に多くの計算時間とメモリが必要となり現実的ではない．そこで解析領域の取り方を考える必要がある．

FDTD法は微小構造から散乱問題を得意とし，光が物体を離れた後，遠方に配置されたホログラム面までの自由空間における光波伝搬において計算コストにおいて他手法に比べ利点がない．そこで本研究では物体表面近傍のみを解析領域としてとり，これにより得られる反射光分布を shifted-Fresnel 法を用いてホログラム面まで伝搬させる．

しかし，奥行き方向を短くしても大きな反射面全体の反射光解析をFDTD法を用いて行うと必要なメモリと計算時間が膨大になってしまう．そこで，図 3.4 に示すように，物体表面構造の一部をとり，この表面に対し平面波を垂直に入射して反射光分布を得るFDTD解析を行う．得られた反射光分布は一度データベースに保存される．大きな物体のホログラムを作成する際には，FDTD法によって得られた反射光分布をパッチとして扱い，それぞれのパッチからホログラム面までの伝搬計算を行うことにより目的とする物体からの光波を得る．FDTD法による解析から，shifted-Fresnel法を用いた光波伝搬までの処理を連続して行うのではなく，あらかじめさまざまな材質，構造を持った微小反射面からの反射光分布を保存しておくことで，このパッチを利用して様々な材質の物体をCGHによって表現することができる．

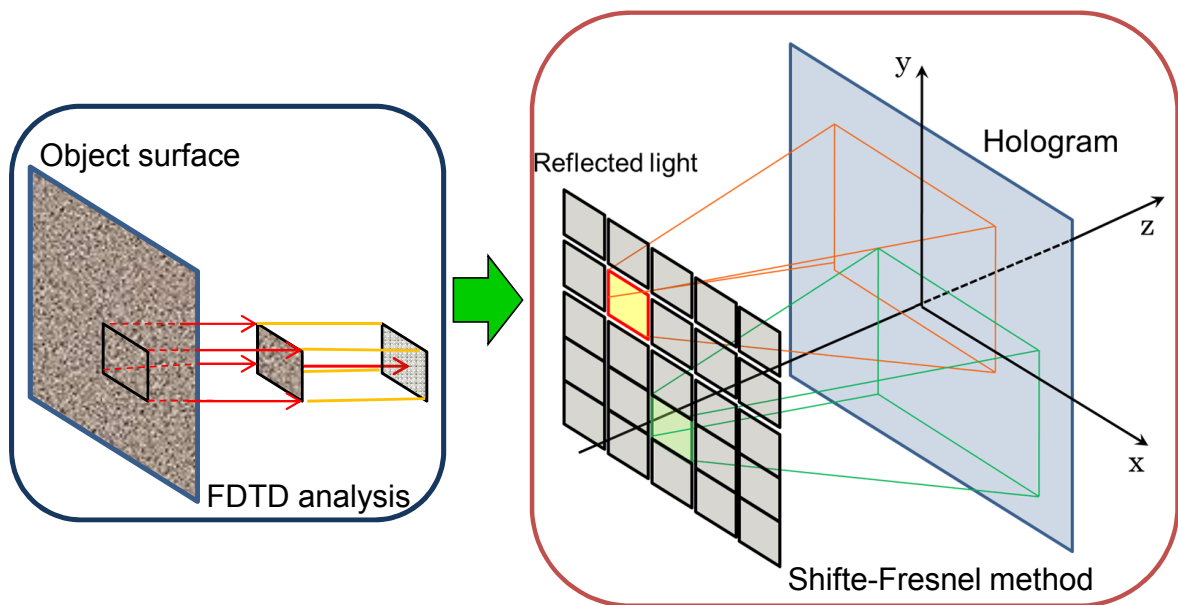


図 3.4: Calculation of reflection from the minute surface.

## 3.5 実験

### 3.5.1 実験 1 計算機シミュレーション

本手法の有効性を確認するために、計算機シミュレーションを用いて光波の散乱度合いを調べた。本実験では図 3.5 のように物体面に配置した微小反射光分布を離れたホログラム面まで伝搬させ、正反射方向へどの程度の光が伝搬するかを計算により求める。散乱度合いの指標として用いる反射率  $R[A.U.]$  は以下の式により求められる。

$$R = \sum^X \sum^Y \frac{|u'(x', y')|^2}{I_0(x, y)} \quad (3.3)$$

ここで式 (3.3) 中の  $I_0(x, y)$  は F D T D 法による反射解析において入射された平行光の強度を示す。詳細な実験における各パラメータを表 3.1 に示す。また反射光分布を得るために行った F D T D 解析での各パラメータおよび一つの表面にかかった計算時間を表 3.2 に示す。

図 3.6 , 3.7 , 3.8 に A F M によって測定された表面構造を用いて反射光を得る方法での正反射率と表面粗さとの関係のグラフを示す。こちらのグラフは正反射率が表面粗さが大きくなるにつれ減少していることを示している。なぜならば表面粗さが大きいと反射光は広い散乱角を持つ為正反射方向へと光が多く届かないからである。図 3.7 にあるアルミニウムの正反射率の挙動は、実物体のアルミの表面粗さと分光反射率と非常によく似た結果を表している [57]。

表 3.3 には本実験で使用した材質の使用波長帯域における誘電率と、そこから導き出した垂直入射の完全鏡面における反射率を示す。また各グラフには指数関数による近似曲線を加えてある。よって近似曲線の  $y$  切片は完全鏡面での反射率を示すことになる。この  $y$  切片での値が表 3.3 にある理論値とほぼ同程度であることが確認できる。このことから材質の違いによる反射率の変化が提案手法により正確に表現されていることがわかる。

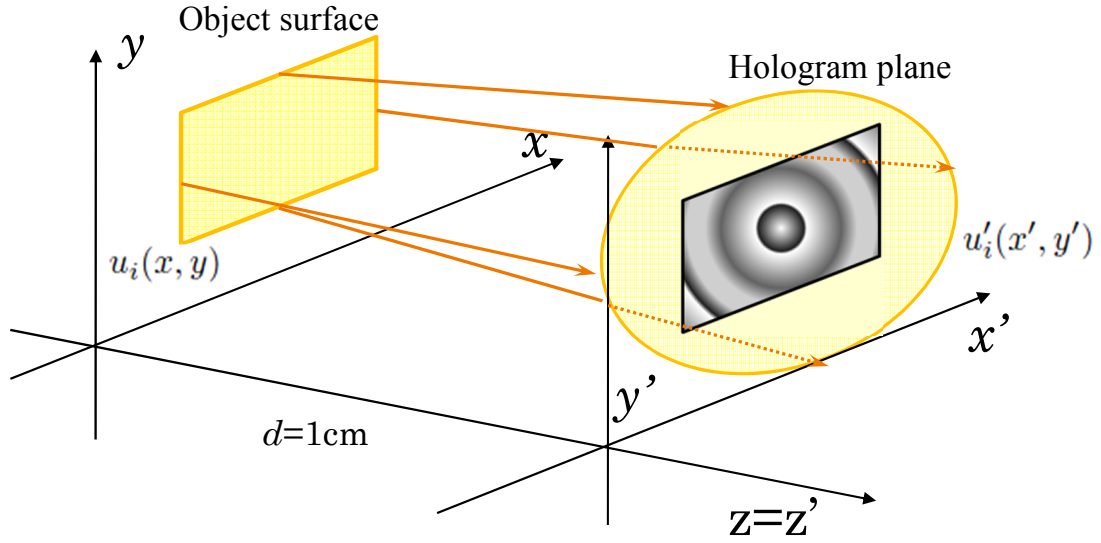


図 3.5: Experiment geometry.

表 3.1: Setup parameters for computer simulation.

|                       |                                   |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Object Size           | $0.2048 \times 0.2048[\text{mm}]$ |
| Number of pixels      | $4096 \times 4096[\text{pixels}]$ |
| Input sampling pitch  | $0.05 \times 0.05[\mu\text{m}]$   |
| Output sampling pitch | $0.05 \times 0.05[\mu\text{m}]$   |
| Wavelength            | $632[\text{nm}]$                  |
| Propagation distance  | $0.01[\text{m}]$                  |

表 3.2: Setup parameters for FDTD analysis.

|                             |                                           |
|-----------------------------|-------------------------------------------|
| Number of cells $(x, y, z)$ | $800 \times 800 \times 200[\text{cells}]$ |
| Cell size                   | $0.05[\mu\text{m}]$                       |
| Real size of analysis area  | $40 \times 40 \times 10[\mu\text{m}]$     |
| Calculation time            | $9[\text{hours}]$                         |

表 3.3: Permittivity and specular reflectance.

|                                           | Copper  | Aluminum | Iron    |
|-------------------------------------------|---------|----------|---------|
| Real part of permittivity                 | -13.428 | -58.954  | -3.0048 |
| Imaginary part of permittivity            | 1.571   | 23.275   | 19.479  |
| Theoretical value of specular reflectance | 97.5%   | 91.2%    | 56.3%   |

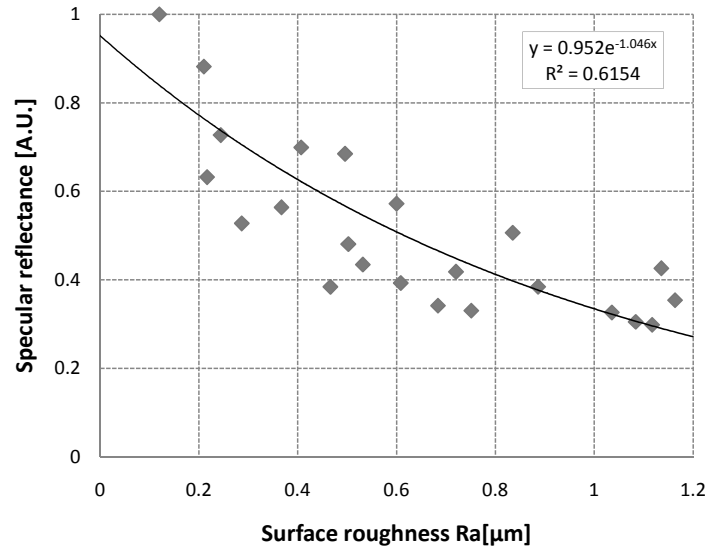


図 3.6: Copper.

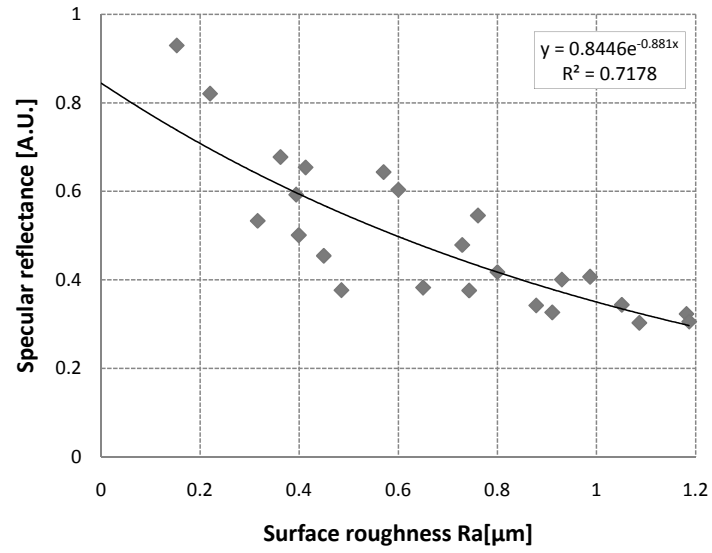


図 3.7: Aluminum.

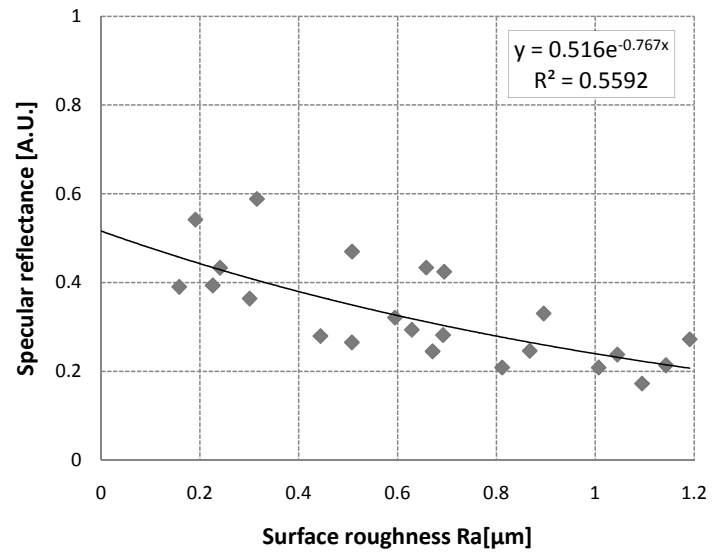


図 3.8: Iron.

### 3.5.2 実験 2 光学再生

光学再生実験により FDTD 解析によって得られた物体表面上の光波分布を用いることで表面粗さの違いにより実際に光学再生像に変化が現れるかを確認した。本実験では三角形の平面モデルに対して、提案手法による反射光分布を与えホログラム面まで伝搬させ干渉縞を計算した。干渉縞はフィルムに印刷され、再生照明光を当てることによって再生される 3 次元像をデジタルカメラで撮影した。本実験における詳細な実験パラメータは表 3.4 に示す通りであり、表面構造は A F M で測定したものを材料を銅とした。

図 3.9, 3.10, 3.11 に光学再生実験によって得られた再生像を示す。それぞれ上の写真はホログラム正面から撮影したものであり、下の写真はカメラを右に傾けて撮影したものである。再生像 3.9 は従来法である白色雑音を用いて反射特性を付与したものであり、完全散乱反射の特性を持つ。そのため角度をつけて観察しても、再生像の全体を同一の輝度で観察することができる。これに対し、図 3.10, 3.11 では提案手法によって得られた反射光分布を用いて反射特性を付与した 3 次元像である。従来手法である図 3.9 に比べて、左下の部分が欠けていることが確認できる。これは従来手法に比べて、得られた反射光分布の散乱角度が広くないため、角度のつけられた視点には光が届かないことにある。また実験結果 3.5.1 で示したように、表面粗さが大きくなるにつれ、すなわち物体表面構造が粗くなるにつれ光の散乱度合いが増すので、図 3.11 に比べて図 3.10 の方が再生像の多くの部分を観察することができる。これらの結果から表面粗さの違いによる反射特性の違いが CGH において表現されたことが確認された。

このように CGH において反射特性を表現するには表面の輝度値情報だけでなく位相情報を含めたこうは分布が必要となる。本手法ではポリゴンで構成される仮想物体の表面上の光波分布として FDTD 法により厳密に解析された反射光を用いることで実物と同様の反射特性を CGH において表現することが可能である。本論文では CGH による再生像のリアリティの向上を目的としており、反射特性の他にも多くの写実的表現が必要となる。次章では再生像のリアリティの向上に必要な要素について述べ、それらを CGH において実装する光線追跡法を用いた計算手法を 5 章より解説する。

表 3.4: Setup parameters for optical reconstructions.

|                       |                                   |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Object Size           | $10 \times 20[mm]$                |
| Number of pixels      | $2048 \times 2048[\text{pixels}]$ |
| Input sampling pitch  | $0.05 \times 0.05[\mu m]$         |
| Output sampling pitch | $6.35 \times 6.35[\mu m]$         |
| Wavelength            | $632[nm]$                         |
| Propagation distance  | $0.15[m]$                         |

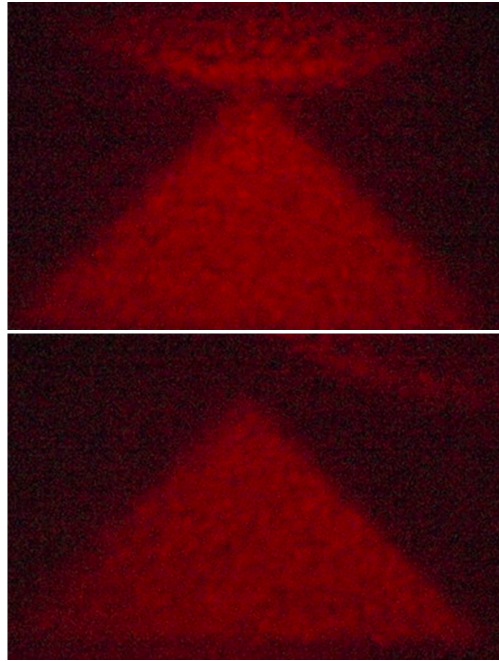
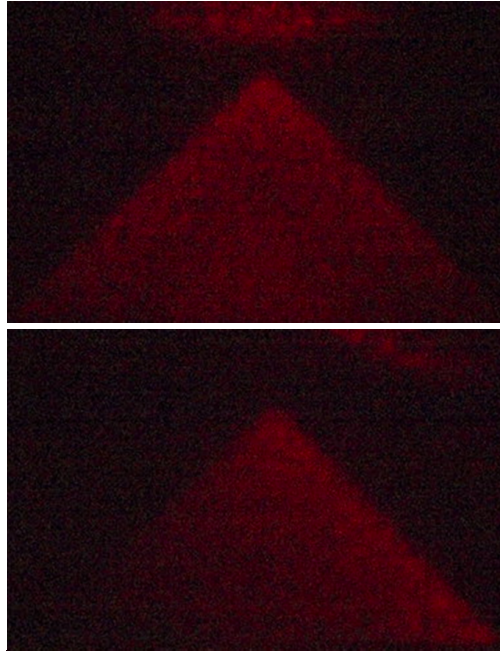
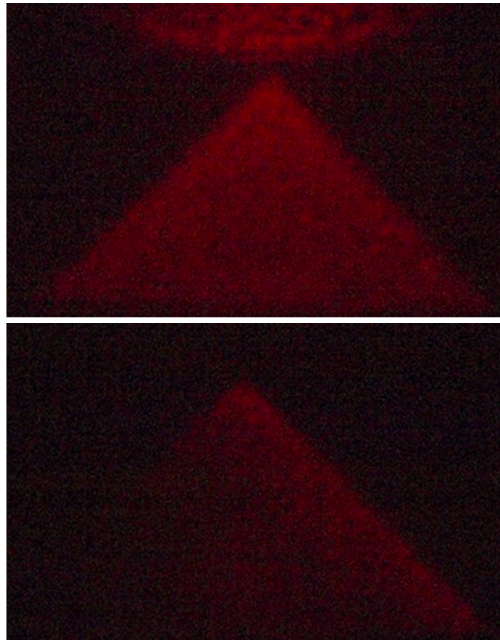


図 3.9: Random phase.

図 3.10:  $d = 1.1468\mu m$ .図 3.11:  $d = 0.5358\mu m$ .

## 第 4 章

# 写実的表現法

本論文では CGH によって再生される 3 次元像にリアリティを与えることを目的としている．CG はモデリングによって定義された 3 次元物体に対し，カメラや光源の位置や方向を指定して，光の物理的な性質に基づいて描画を行うことで作成される．この描画処理をレンダリングと呼ぶ．そして写実的な画像をレンダリングするためには，物体表面での光の反射特性を考慮した表現が必要となる．さらに，鏡のように反射による映り込みやガラスなどのように光が透過・屈折を起こす物質の表現方法も必要になる．このようにコンピュータ内に作成された仮想物体データより，カメラで実物体を撮影したかのような写実的な画像を作成するための手法が多く開発されてきており，これらを総称してフォトリアリスティックレンダリング (photorealistic rendering) と呼ぶ．そこで本章において，リアリティの向上につながる主要要素を紹介し，またそれらの効果について述べる．

### 4.1 隠面消去

隠面消去 (hidden surface removal) とはレンダリングの基本処理の一つであり，手前に存在する面によって隠される見えない面，あるいは面の一部の領域を消去する手法である．図 4.1 に隠面消去を施していない場合 (a) と隠面消去をした際 (b) の画像を示す．隠面消去を施さないと図 4.1(a) のように物体同士の前後関係が把握できなくなり，立体感まで失われてしまう．つまり隠面消去は物体の遠近感にも大きく付与する．CG で隠面消去を実装する際には最終的に 2 次元の画像を作成すればよいため，物体が投影されるスクリーン上の走査線や画素単位で隠面消去を行う画像空間アルゴリズムが存在する．主なものとして，スキャンライン法 [58]，Z バッファ法 [59]，光線追跡法 [60, 61] があげられる．しかし CGH では 3 次元空間上で如何に光波を遮って隠面消去を行うかを考慮する必要が

あるため，新たなアルゴリズムを考える必要がある．本研究では隠面消去アルゴリズムの中でも，光線追跡法を応用した手法により CGH に隠面消去を実装した．光線追跡法および CGH のための隠面消去法については 5 章にて述べる．

## 4.2 シェーディング

物体表面の明るさや影の表示は，リアリティ向上に最も大きく関与する要素の一つである．リアルリティのある画像生成には，物体の材質，表面の滑らかさ，色（反射率）などの属性を考慮して，光の物理的な性質により反射光を決定する必要がある．物体属性としてまず必要になるのは，物体表面の反射率である．RGB の各色各成分ごとに反射率を与えることにより，物体の色が表現される．また物体と光源との位置関係も非常に重要である．全くその位置関係を気にせず，ただ物体の色を塗ると図 4.2(a) のようになってしまう．これでは球全体が一様に明るくなっており，球の外形は視認できるが，3 次元情報が失われ立体として認識することが困難になっている．対して光源によって照らされた物体を観察すると，図 4.2(b) のように場所によりその明るさが異なっている．すなわち，光の照射方向と面の向きにより明るさが変化している．また表面がなめらかな物体には非常に明るいハイライトと呼ばれる領域が発生する場合がある．このような光のあたり具合によって濃淡が変化する部分の明るさを計算して表示することをシェーディング (shading) と呼ぶ．シェーディングにおける光の反射率計算は，物体の材質などによってモデル化されており，それらを基にして計算される．代表的な例として，光沢のあるプラスチック表現に適した経験的観測モデルである Phong の反射モデル [62]，より物理的に精密な反射モデルである Blinn の反射モデル [63]，さらに金属光沢などの表現に適した Cook-Torrance の反射モデル [64] などが挙げられる．これらの反射モデルを材質などによって使い分けることによって，よりリアリスティックな物体表現を行うことが可能である．

また図 4.2(c) のように他の物体によって照明からの光が遮られた領域には影が生ずる．この影の領域を表示するために行われる処理を影付け (shadowing) という．シェーディングと影付けの両者の処理を施すことにより，写実的な画像が生成される．

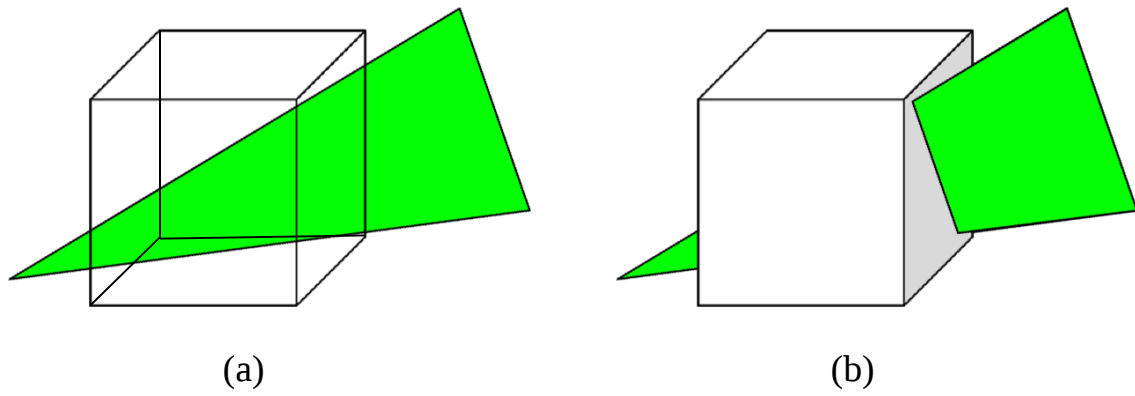


図 4.1: 隠面消去による画像効果  
Effect by the hidden surface removal.

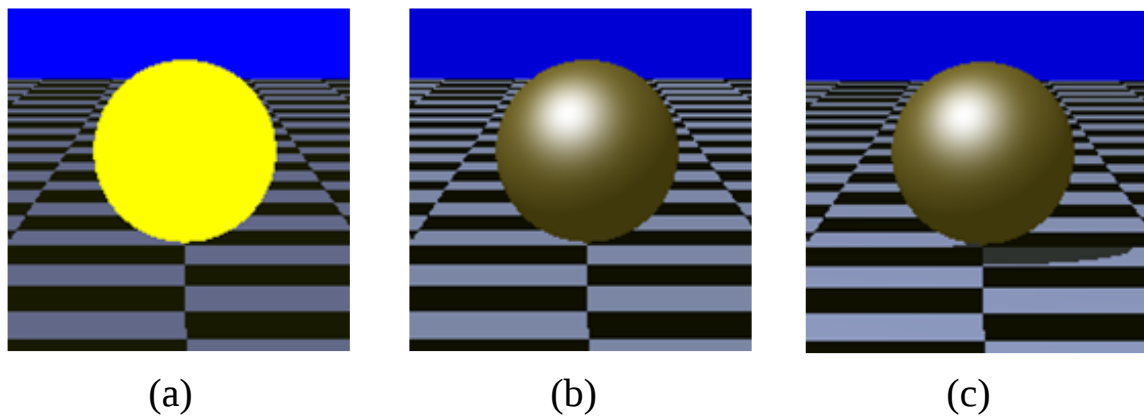


図 4.2: シェーディングと影付け  
Shading and shadowing.

### 4.3 反射・屈折表現

シェーディングによる物体表面上の光，すなわち光源からの直接光だけではなく，他の面からの反射光や，透明物体を透過した光などによる間接光を考慮することにより，さらにリアルな画像を生成することが出来る．鏡やよく磨いた金属などの表面のような完全鏡面反射特性を持つ物体には，正反射方向に存在する物体がその表面に映り込む．対して透明な物体では光が物体を透過して，さらに屈折した画像が映り込む．これらの物体を表現するには光線追跡法が用いられる．視点から物体への光線と，その正反射方向，または屈折方向への光線を逆追跡することで，視点に届く光を計算する．図 4.3 に CG で作成した完全鏡面反射表面を持つ物体と透明な物体の画像を示す．奥にある鏡面物体の下部には反射によって写り込んだチェッカーボードを観察することが出来る．また照明光源によるハイライトも表面上に存在する．一方，手前にある透明物体でできている球では，球を透過して下の屈折したチェッカーボードを観察することができる．さらに球の表面では反射も同時に起きるため，うっすらと反射像も見える．

CG では 2 次元の画像を生成すれば良いので反射像の輝度値のみを取得し，画素の色として表示している．しかしながら現実では反射像は反射した先に焦点が合うべきであり，球の表面上に焦点を合わせた際には反射像は多少ぼやけてなければならない．また透明物体でも，媒質の違いにより光路長が変化したり，また像を手前に形成することもある．よって CGH ではそのような細かい反射像や透過してきた光などのボケをうまく表現するための新しいアルゴリズムを作成する必要がある．

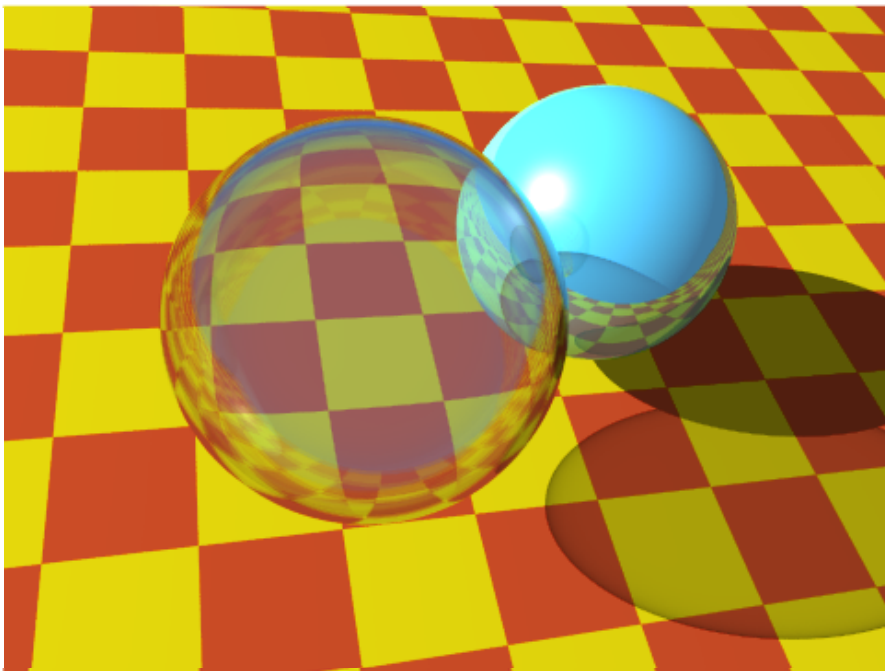


図 4.3: 完全鏡面反射と透過・屈折表現

Specular reflection and refraction.

## 第 5 章

# CGH におけるレンダリング表現技法

### 5.1 手法の概要

本章では光線追跡法を用いて CGH へと隠面処理などの各種レンダリング技法を適用する方法について述べる。本節でおおまかな本手法の概要について述べ、更に各節にて各種レンダリング技術について詳細に記載する。図 5.1 に提案手法による計算のおおまかな流れを示す。本手法では光線追跡法を用いて上下左右の視差のある、いわゆるフルパララックスな CGH を作成する。CG の分野においての光線追跡法は、固定された視点より画面上の各画素へと光線を飛ばすことにより仮想物体を構成する交点を計算し、視点より可視な部分を判定する。しかし CGH では運動視差が必要となるため、ひとつの視点による光線追跡法では視点の移動に伴い物体が他の物体に隠されたり、逆に現れたりする場合には像が欠けたり重なったりする現象が生ずる。そこで光線追跡法を CGH へと適用するために、ホログラム面を要素ホログラムと呼ばれる小さなホログラムへと分割して多くの視点を用意し、そこから可視な点群を求める。よって要素ホログラムによって異なる点光源群を保持することになる。これらの点光源群からの光波伝搬を計算して足し合わせることで、多くの視点を提供する CGH を作成が可能となる。また点光源群を求める光線追跡プロセスを行う際に、点光源の輝度計算などを行うことで、シェーディングや反射など物体表現に関わる技法も同時に実装することが可能である。

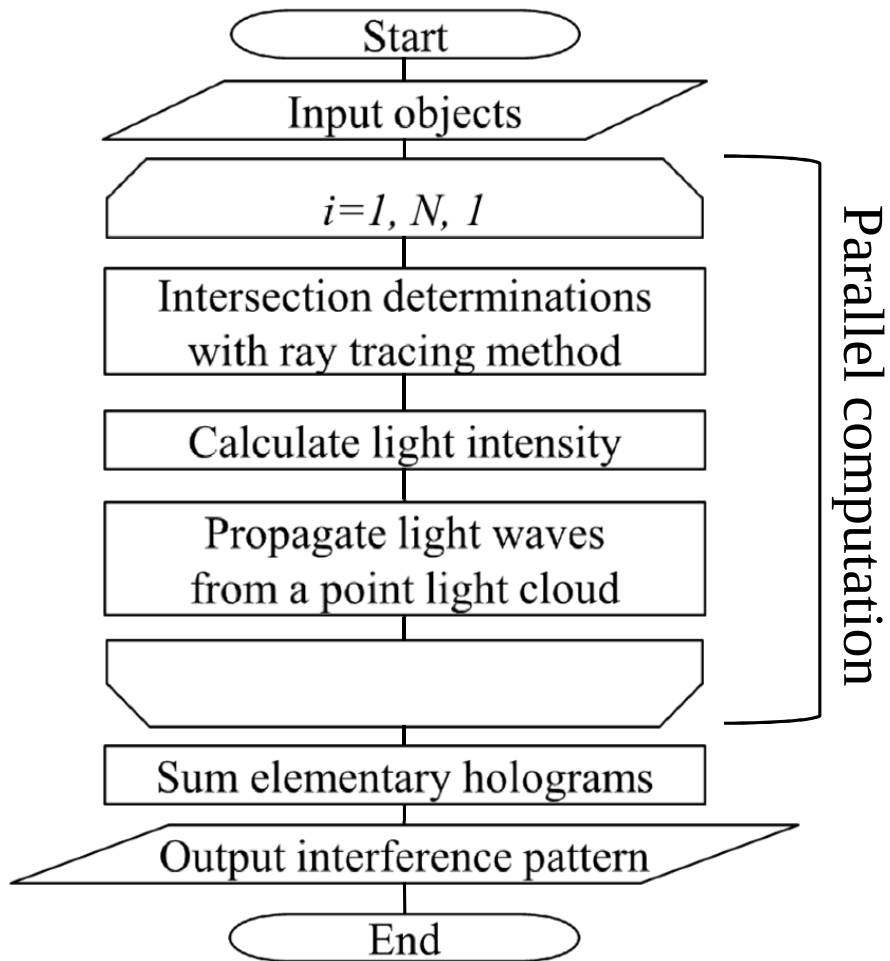


図 5.1: 提案手法による計算の流れ

Flow chart of the proposed method.

## 5.2 光線追跡法

光線追跡法 (Ray tracing algorithm) は主に 3 次元空間内を伝わる波の伝播経路を追跡することで様々な物理現象をシミュレートする計算する手法である。光線追跡法が扱う対象には光波，電波，地震波，音波などと多岐にわたる。この手法の特徴として，反射や屈折については忠実にシミュレートすることができるが，回折は近似などを必要とする。

CG の分野における光線追跡法は光線を用いた描画方法の一つであり，光線という 1 次元線分上での交点の前後判定により隠面消去を行う [60, 61]。光線追跡法は一つ一つの画素に対し光線を飛ばし，その光線を追跡して画素の光・色を決定する。画素の一つ一つの効果を細かく描画するため，非常に美しくレンダリングをすることが可能である。また，光の透過・屈折・反射も追跡するため，物体の透過などの効果も得ることが出来る。光線追跡法のアルゴリズムは非常に単純であり，実装は難しくない。以下にそのアルゴリズムを簡潔に述べる。

### 5.2.1 光線追跡法のアルゴリズム

図 5.2 に示すような座標系において，視点からスクリーンの画素に向かう光線とポリゴンとの交点を計算する。この光線は本来は画素方向から視点に向かう光を逆方向にたどるものである。そして視点に最も近い交点，すなわち光線と最初に交差するポリゴンを求め，そのポリゴンの色で画素を塗る。この処理をスクリーン全体の画素に対して行うことにより，隠面消去を施した画像を作成することが出来る。また光線と最初に交差した物体が反射や透過特性を保つ場合にも，反射方向や屈折方向の光線に分けて処理を再帰的に繰り返すことにより，それらの表現が可能となる。

図 5.2 にはポリゴンとして光線追跡の対象を示したが，その対象は多岐にわたる。CG の分野においては仮想物体は多くがポリゴンによって構成されているためであるが，他にも球であったり，または物体を表現する数式でも構わない。

光線追跡法は他の隠面消去法に比べ非常に多くの計算時間を必要とする。さらに反射や透過，屈折などの光学現象を表現するための再帰的な処理を含めると光線の数が増加し，計算時間も大幅に増大する。しかし，光線追跡法は各画素に対する処理が独立しているので並列化に向けたアルゴリズムである。そのため多くの計算コアを持つ GPU が光線追跡法の処理に向いており，本論文においても GPU による高速化を施している。高速化についての詳細は 7 章において述べる。

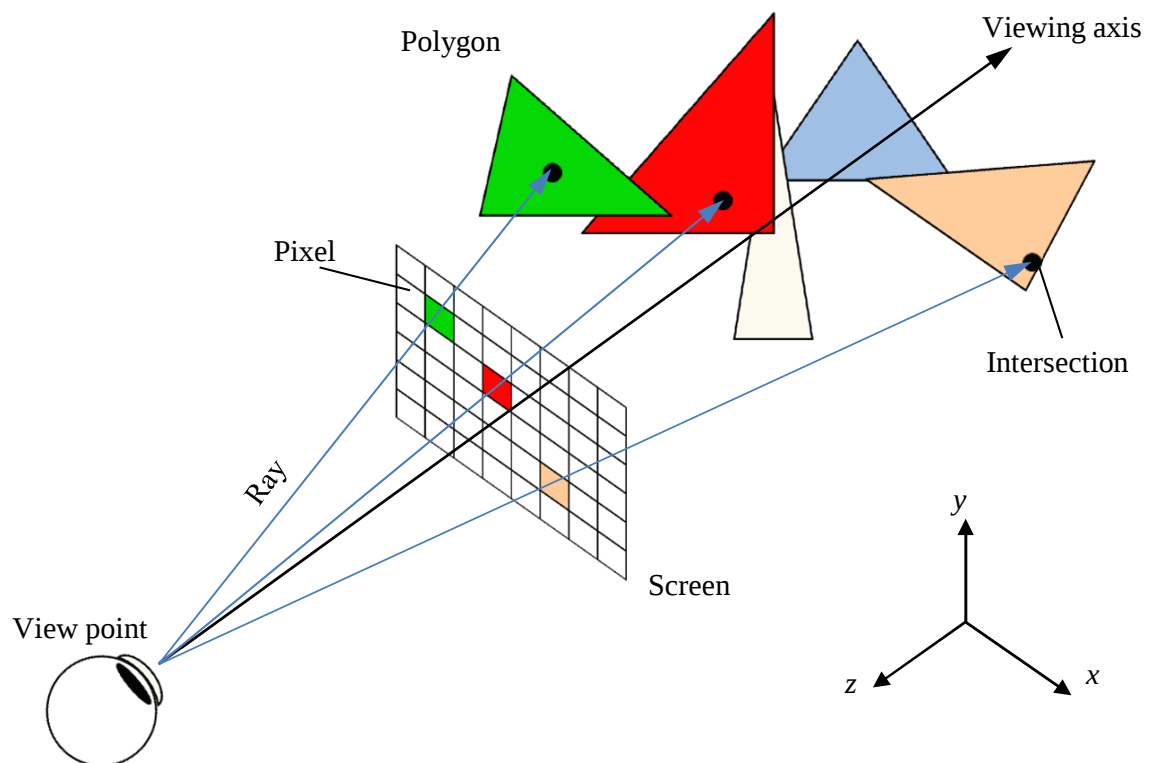


図 5.2: 光線追跡法  
Ray tracing algorithm.

## 5.3 CGH における隠面処理表現

### 5.3.1 光線追跡法を用いた CGH 隠面処理

本節では 5.2 節で紹介した光線追跡法を CGH へと適用して隠面処理を施す手法について述べる．まず図 5.3 のように光線追跡法の視点を決定するためにホログラム面を要素ホログラムと呼ばれる小さなホログラム単位に分割する．各要素ホログラムの中心が光線追跡法によって放たれる光線の始点となる．次に各要素ホログラムの中心を始点として光線追跡法を行い光線と仮想物体との交点を求める．これにより要素ホログラムごとに異なる視点位置からの点光源の集合を持つことになり，上下左右の視差を持つ CGH を作成することが可能となる．この考え方はホログラフィックステレオグラム [25, 26] と似ているが，各要素ホログラムがそれぞれ奥行きを持つ点光源の集合を保持していることから正しく奥行きを表現できることが大きな特長としてあげられる．

ここで要素ホログラムのサイズと，光線追跡法において飛ばされる光線間の間隔について述べる (図 5.4)．要素ホログラムのサイズ  $M$  は視差の連続性に関係し，大きくなればなるほど運動視差の連続性が荒くなる．本研究においては要素ホログラムのサイズ  $M$  を  $1.228[\text{mm}]$  としている． $9.6[\mu\text{m}]$  の画素として  $128[\text{pixel}]$  分となっている．これは多視点画像を用いた CGH 作成法に関する文献 [65] において同じ SLM を用いており，要素ホログラムサイズが  $128[\text{pixel}]$  程度であれば視差の連続性に違和感を感じなくなるという客観評価を得ているためである．次に光線が放射される要素ホログラムからの角度  $\theta$  は，使用する表示デバイスのサンプリングピッチにより決定され，周波数制限となる視野角度と同一である．また光線間の角度  $\Delta\theta$  は人間の目の解像度によって決定される．人間の目で物を鑑賞する際には，よく一分 ( $1/60$  度) という視角が引き合いに出される [66]．この視角は視力 1.0 の人間が物を見るとき，離れた 2 点として識別できる最小の視角である (図 5.5)．観察物体の上でこの視角と交差する 2 点間の間隔が，人間の目で識別可能な間隔を表す．この識別可能間隔は目と物体との間の距離で変化する．これらのことから，光線間の角度  $\Delta\theta$  を  $1/60$  度と設定した．これにより光線間の隙間は人間の目では判別が難しくなり，交点を点光源として計算しても再生像はなめらかな面として認識される．本条件下において光線追跡が各要素ホログラムごとに実行され，その中心から可視の仮想物体の点光源群を得る．光線と仮想物体との交差判定については文献 [60, 61] に詳細に記されている．

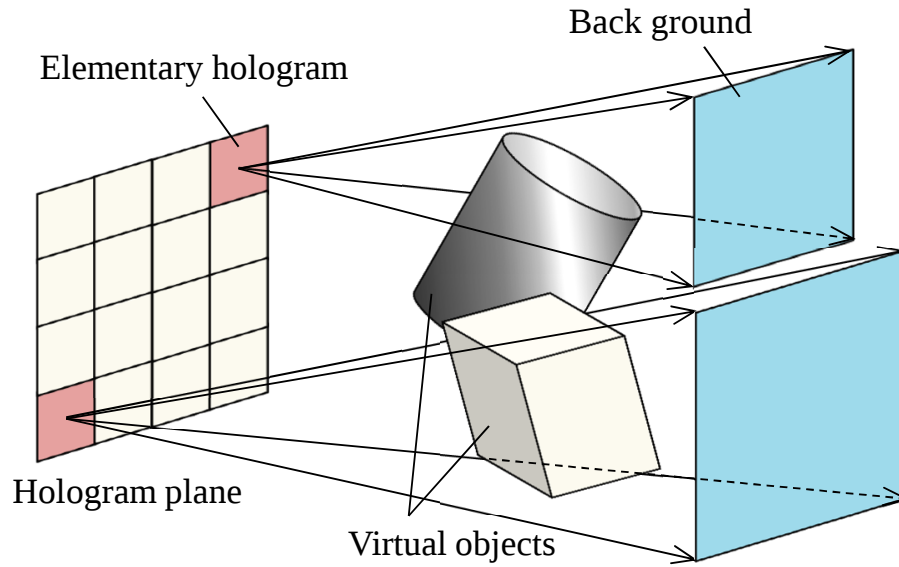


図 5.3: 要素ホログラムごとの光線追跡  
Ray tracing from elementary holograms.

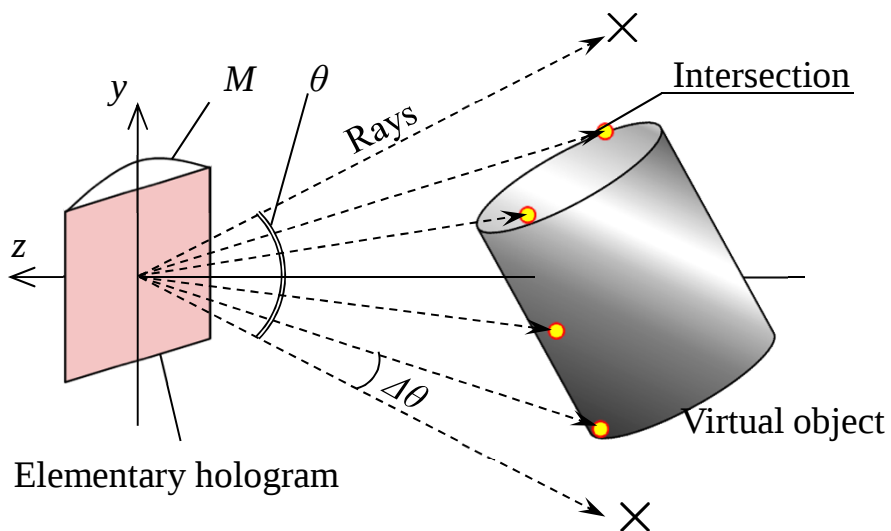


図 5.4: 交差判定  
Intersection determinations.

光線追跡法による光線と仮想物体との交差判定により図 5.6 のように，要素ホログラムごとに点光源群が得られる．点光源として必要な情報は，座標およびその輝度値である．座標は交点の座標と同一であるのでそれを用いるが，輝度値に関しては物体の材質や仮想物体を照らす光源の位置などによって大きく変化する．この輝度値の値を変化させることでシェーディングを実装するが，詳細は 5.4.1 節にて述べる．この点光源群からの光波伝搬には 2 章で述べた式 (2.6) を用いて計算される．よって要素ホログラム上の複素振幅分布  $h_m(x, y)$  は以下の式により求められる．

$$h_m(x, y) = \sum_{i=1}^{Nm} \frac{A_i}{r_i(x, y)} \cdot \exp \left( j \frac{2\pi}{\lambda} r_i(x, y) + j\phi_i \right), \quad (5.1)$$

$$r_i(x, y) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + z_i^2}. \quad (5.2)$$

ここでインデックス  $m$  は各要素ホログラムを示し， $i$  は各点光源を示す．また  $\phi_i$  は各点光源の初期位相である． $A_i$  が各点光源の強度の振幅となっており，この値を変化させることで物体の反射特性を表現する．こうして各要素ホログラムの光波分布を求めた後に，すべてを並べることでホログラム全体の光波分布を得る．また参照光は全ての要素ホログラムで共通であり，式 (2.2) のような平行光を入射することで干渉縞を得る．

本手法により作成された干渉縞を観察すると，図 5.7 のような視線で再生像を見ることになる．つまり異なる視点から仮想物体の同じ位置を観察しようとするとき，異なる要素ホログラムを通して見ることになる．要素ホログラムごとにその位置から可視な点光源群とその輝度値を保存しているため，同じ点を観察しても違うようにみえる．また図 5.7 のように前の物体が他の仮想物体を遮っている場合，視点をずらして異なる要素ホログラムを通して観察することで，隠面の観察が可能になる．よって本手法により，運動視差に対応したフルパララックスな CGH の作成ができる．

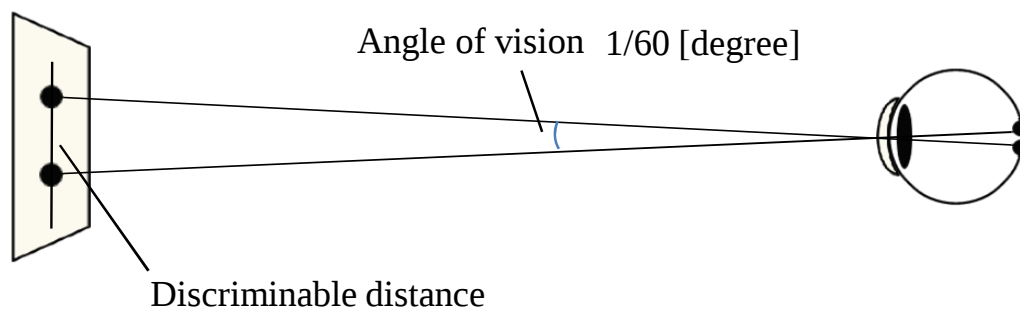


図 5.5: 識別可能間隔と視角

Discriminable distance and angle of vision.

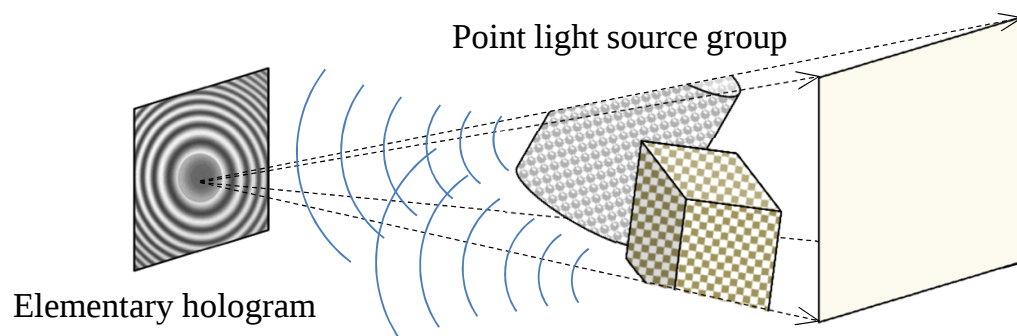


図 5.6: 点光源群からの光波伝搬

Light propagation from a point light cloud.

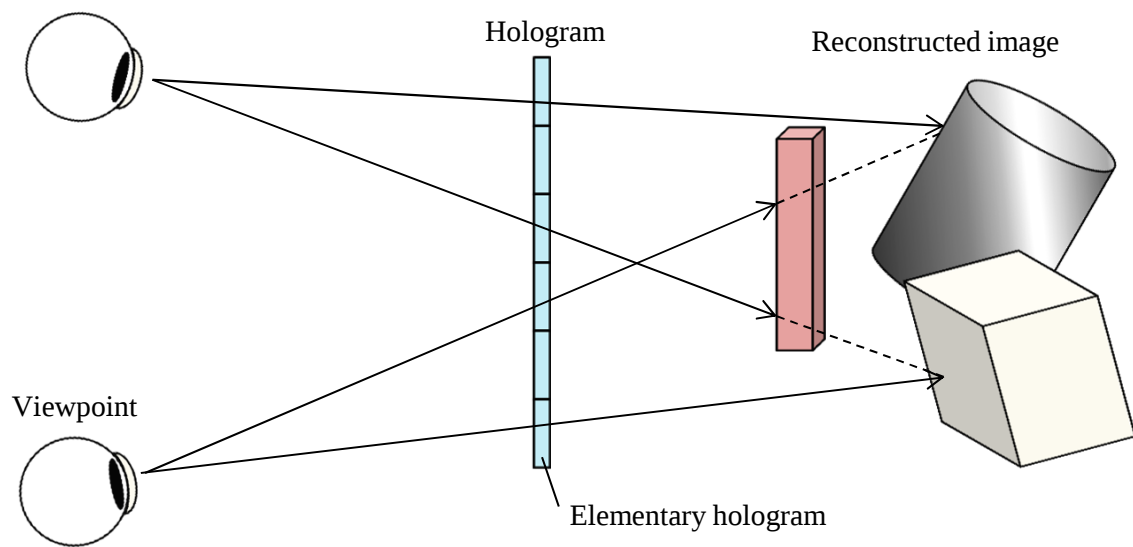


図 5.7: 提案手法によって作成されたホログラムの観察

Observation of CGH by the proposed method.

## 5.4 シェーディング

### 5.4.1 反射特性

本節では本研究による CGH への反射特性の実装について述べる．反射特性とは光源から発せられた光線が物体表面にあたった際に，どのような強度で反射するのかを表す性質のことであり，材質や質感によって異なる性質を示す．反射特性は物体によって複雑なものとなり，その性質は主に環境光，散乱反射そして鏡面反射とに分けられる．これらの光の割合を変化させることで物体の材質を表現することが出来る．

照明光源から出た光は多くの物体面で反射を繰り返し，その光がまた物体面を照らす．そのため，光源から直接光が当たらない面でも物体を視認することが出来る．この光を近似したものが環境光 (ambient light) であり，周囲からくる一様な光としてモデル化される．環境光によってたらされた物体面の反射光の強度  $I$  は以下の式によって求められる．

$$I = k_a I_a . \quad (5.3)$$

ここで  $k_a$  は環境光に対する反射率， $I_a$  は環境光の強度である．この環境光を与えることで，陰や影の領域にもある程度の明るさを与え視認を可能とする．

拡散反射 (diffuse light) の特性を図 5.8(a) に示す．拡散反射は石膏などの細かい凹凸を持った物体表面で生じ，どの方向から見ても表面輝度値が一定となる反射である．拡散反射の輝度値は光源の種類・位置・方向と面の向き，そして面の反射率に依存する．ここで照明光源が平行光線である場合を考える．平行光が反射面に対し入射角  $\alpha$  で照射する際，拡散反射光の強度  $I$  は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} I &= k_d I_d \cos \alpha , \\ &= k_d I_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) . \end{aligned} \quad (5.4)$$

$k_d$  は拡散反射率， $I_d$  は入射光の強度である．また  $\alpha$  は光の入射方向と面の法線のなす角であり，入射角の余弦は面の法線ベクトル  $\mathbf{N}$  と光線の方を示すベクトル  $\mathbf{L}$  との内積により求められる (図 5.9) ．

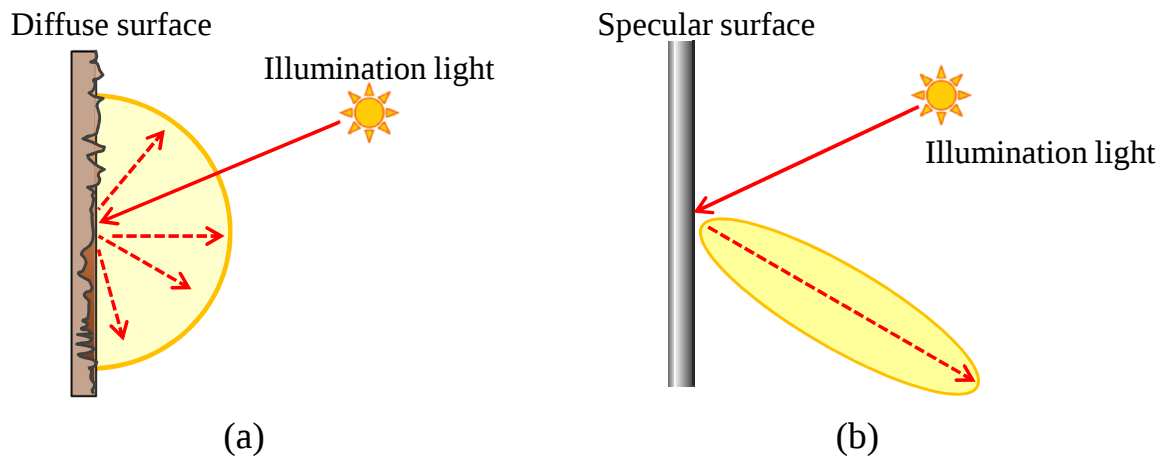


図 5.8: 拡散反射と鏡面反射

Diffuse reflection and specular reflection.

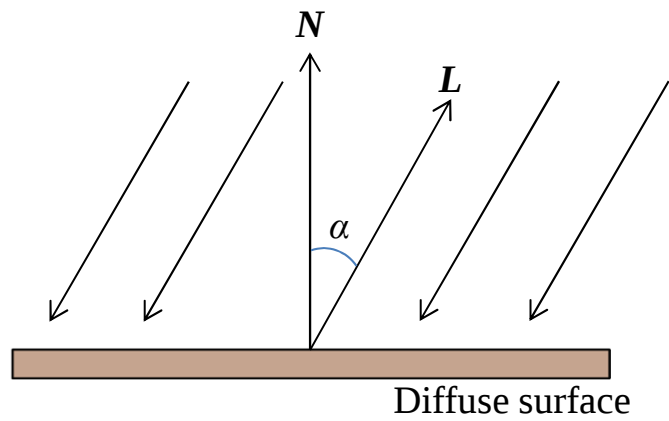


図 5.9: 平行光線による拡散反射計算

Diffuse reflection by the parallel light.

拡散反射に対して、鏡面反射は図 5.8(b) のように反射光がどの位置で反射しても物体表面が鏡面であるために一定の方向へと進む．よって反射特性が正反射方向へと高い強度を持つ傾向がある．この鏡面反射により、光沢のあるプラスチックの表面や金属表面ではハイライトを生じる．鏡面反射は視点方向に依存して反射光の強度が変化するため、ハイライトの発生する位置や強度が視点方向により変化する．ハイライトの大きさや明るさなどにより曲面の滑らかさや材質を表現する．鏡面反射光の強さは

$$I = k_s \rho_s I_s, \quad (5.5)$$

で示される．ここで、 $k_s$  は鏡面反射率であり、厳密には入射角  $\alpha$  の関数として表されるが、一定値が用いられることが多い． $I_s$  は鏡面反射の強度であり、この鏡面反射成分を視点位置などに依存して  $\rho_s$  係数で減少させる． $\rho_s$  を求めるために多くの反射モデルが存在しているが、本研究ではプラスチック等の鏡面反射成分の計算には Phong の反射モデル [62] を、金属の表現には Cook-Torrance の反射モデル [64] を用いている．

Phong の反射モデルは鏡面反射成分を以下の式によって求める．

$$\rho_s = (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^\beta. \quad (5.6)$$

ここで  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{V}$  はそれぞれ入射光の正反射方向ベクトルと、入射点から視点へのベクトルである (図 5.10)．また  $\beta$  はハイライトの特性を制御するパラメータであり、 $\beta$  を大きくしていくと鈍い反射から次第に鋭い反射を示すハイライトを表現する．

金属表面を表現する Cook-Torrance の反射モデルでは鏡面反射成分を計算するためにより多くの条件に依存する (図 5.11)．Cook-Torrance の反射モデルは正確な物理モデルに基づいている．この反射モデルは物体表面が小さな平面の集合であると仮定し、その微小面の方向が面の法線方向を中心に分布しているものとしている．Cook-Torrance の反射モデルは反射特性が波長と入射角に依存することを考慮してフレネルの反射率を用いて鏡面反射率を計算する．Cook-Torrance の反射モデルによる鏡面反射率成分  $\rho_s$  は以下の式により与えられる．

$$\rho_s = \frac{F}{\pi} \frac{D G}{(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})}. \quad (5.7)$$

ここで  $G$  は微小面の幾何学的形状により光が遮蔽されることによって反射光が減衰する割合を示す幾何学的減衰係数である．フレネル反射率  $F$  はそれぞれの微小面からどのように反射するかを示す係数であり以下の式で求められる．

$$F = \frac{1}{2} \left[ \frac{g - c}{g + c} \right]^2 \left\{ 1 + \left[ \frac{c(g + c) - 1}{c(g - c) + 1} \right]^2 \right\}, \quad (5.8)$$

上式において  $c = \sin \alpha$  であり,  $g^2 = n^2 + c^2 - 1$  となる.  $\alpha$  は物体表面に対する照明光の入射角度である.  $n$  は物体表面の比屈折率である. 式 (5.7) において  $D$  は微小面の分布関数であり, 次式に示すベックマン分布関数を用いる.

$$D = \frac{1}{4m^2 \cos^4 \xi} \exp\left(\frac{\tan \xi}{m}\right)^2. \quad (5.9)$$

ここで  $m$  は面の粗さを調整する係数であり,  $m$  が小さいほど面は滑らかとなり鏡面状態に近づく. 角度  $\xi$  は図 5.11 に示すように法線と, 入射点から照明光源へのベクトルとなす角度である. これらの式によって Cook-Torrance の反射モデルによる鏡面反射率は求められる.

#### 5.4.2 点光源への反射特性付与

5.3 節の方法によって得られた点光源群に反射特性を与えるには, 光線追跡法における交差判定においてその光線ベクトルや物体表面のベクトルなどを用いて点光源の強度  $I_r$  を求めることで実装する. 5.4.1 節で述べた反射成分を総合して, 反射光の強度は以下の式により計算される.

$$I_r = I_a k_a + I_d k_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + I_s k_s \rho_s. \quad (5.10)$$

この強度は点光源からの光波伝搬を求める際の強度となる. すなわち式 (5.1) における  $A_i$  と  $I_r$  は各点光源ごと次の関係をもつ.

$$I_{r_i} = |A_i|^2. \quad (5.11)$$

こうして点光源はそれぞれ異なる光強度を持ち, そこからの光波伝搬が計算され, 要素ホログラム上の干渉縞が得られる. 再生像の同じ位置であっても, 視点を変えれば要素ホログラムごとに異なる視点から得られた点光源であるので異なる光強度を持っており, ハイライトの移動などが生じる. よって視点の移動に伴う光沢の移動といった反射特性の表現が本手法によってなされる.

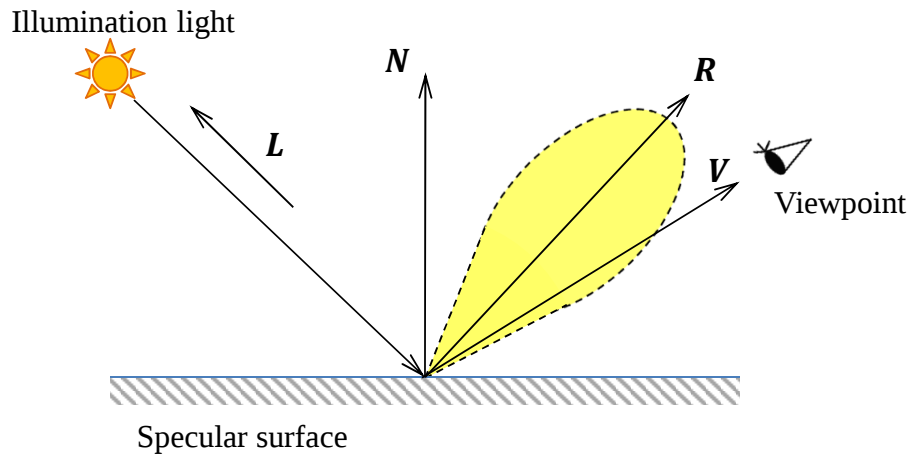


図 5.10: Phong の反射モデル

Phong reflection model.

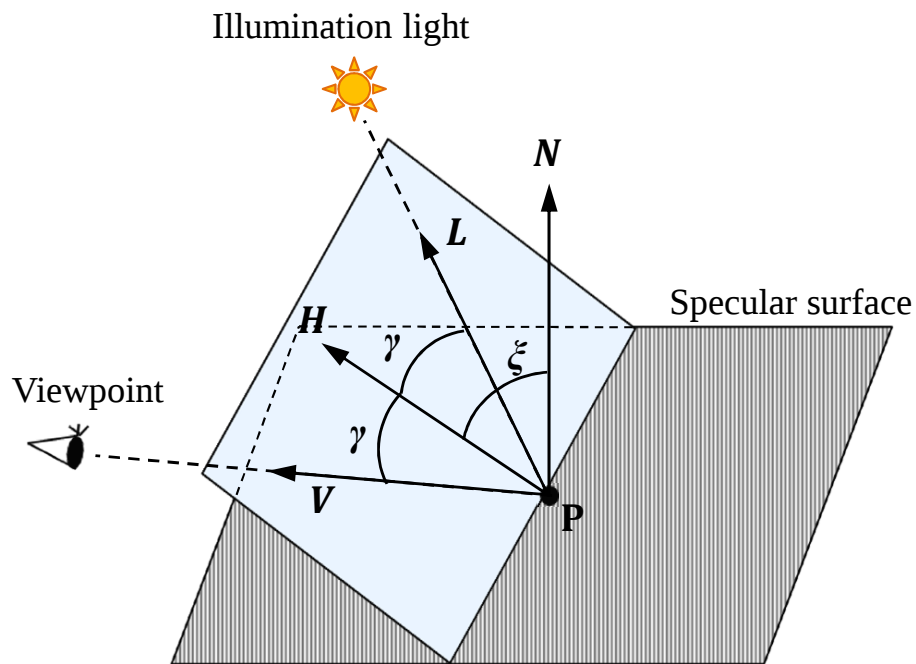


図 5.11: Cook-Torrance の反射モデル

Cook-Torrance reflection model.

## 5.5 影付け

本節では CGH における影付けの手法について説明する．点光源によって照明された物体を考えた時，光源から発せられた光が物体に当たると，その物体の背後には影が生じる．このような影の領域を求める処理を影付けといい，シェーディングとは異なる処理が必要となる．本研究における影付けの際にも光線追跡アルゴリズムを用いるが，1次元の光線であるため影の境界がぼやけている半影の表現はできない．

図 5.12 に影付けの概要図を示す．本手法は光源からの光を遮る物体が存在するかどうかを調べる手法である．まず図 5.12 のように要素ホログラムの中心から可視の点を光線追跡法によって求める．これらの点  $P_1$ ,  $P_2$  と照明光源の間に遮蔽物が存在するかどうかを確かめるために，照明光源方向へと光線を飛ばす．この時，点  $P_1$  の間には物体が存在しないので光線追跡による交差判定は行われず，よって点  $P_1$  の光強度はすべての光の成分，すなわち式 (5.10) を用いて計算される．対して，点  $P_2$  では間に遮蔽物が存在し，照明光が遮られてしまう．よって影が生じるということは，環境光以外の光が点  $P_2$  へと届かないということになる．なので  $P_2$  の光強度は環境光成分のみの以下の式で得られる．

$$I_{P_2} = I_a k_a . \quad (5.12)$$

今回は照明光源が点光源であると仮定して説明したが，照明光源は蛍光灯のような 2 次元であったり，または面積を持った面であることもある．しかし光線追跡法でそれらの光源に対応しようとするとき，広く影の光線を飛ばさなければならないため非常に計算時間がかかってしまう．そこで半影を表現するためにはフォトンマップ法 [67] などの大域照明モデルを用いる必要がある．

また遮蔽物が透明物体であった際には，照明光が透明物体を通して光が減衰しながら透過し物体へと当たる．透明物体への対処法については 5.7 節にて詳細に述べる．

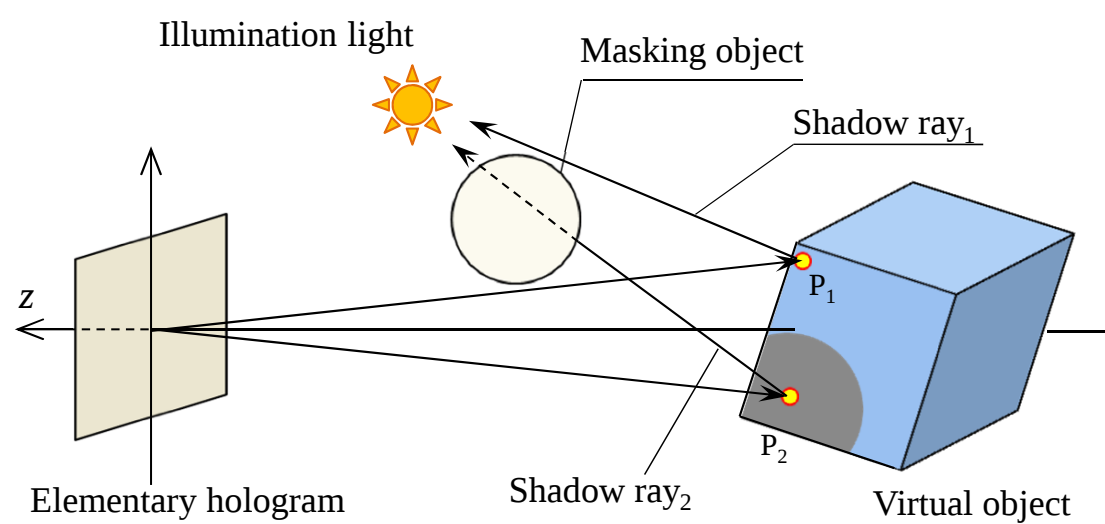


図 5.12: 光線追跡法による影付け

Shadowing by the ray tracing method.

## 5.6 CGH における反射表現

鏡のように完全鏡面反射特性を持つ物体には，正反射方向の物体がその表面に映り込む．CGH における反射表現を施した手法も幾つかあったが，多くは物体表面に反射像の輝度値をテクスチャとしてマッピングしているだけであった．しかし，CG での輝度値のみの表現法とは違い，物体表面と反射像との奥行きの違いも表現しなければならない．この反射表現も光線追跡法を用い，さらに光路長を考慮することで CGH で実装が可能になる．

本手法の簡単な図解を図 5.13 に示す．まずはじめに要素ホログラムからの交差判定のために， $\text{Ray}_1$  の光線が飛ばされ交点  $P_1$  が求められる．この時，交点  $P_1$  の輝度値計算され，またそこまでの光路長  $r_1$  が  $r_1 = t_1$  として点光源群バッファに保存される．ここで，光線は空気中を伝搬しているとして屈折率  $n$  は 1 として省略している．さて，この交点  $P_1$  が存在する面が完全鏡面反射特性を保つ場合には正反射方向へとさらに光線  $\text{Ray}_2$  を飛ばして交点  $P_2$  を求める．この処理を光線が散乱物体へと到達するまで繰り返す．よって反射を  $I - 1$  回繰り返して得られた交点  $P_I$  までの光路長は以下の式により求められる．

$$r_I = \sum_{i=1}^I t_i . \quad (5.13)$$

図 5.13 において反射像を表現するためには点  $P_2$  からの球面波を計算しても表面への映り込みには見えない．そこで点  $P_2$  を最初に要素ホログラムから放たれた光線の方角へと移動させる．つまり光線  $\text{Ray}_1$  ベクトルの方角へ光路長  $r_2$  の距離のところ新たに  $P'_2$  を配置する．また点  $P'_2$  の輝度値は点  $P_2$  で得られる輝度値に点  $P_1$  の表面の反射率をかけたものとなる．こうして得られた点  $P_1$  と点  $P'_2$  からの球面波を計算することで，鏡面反射物体のハイライトとさらに反射像が表現される CGH を求めることが出来る．またこの反射像は光路長を考慮しているので，鏡などに写った反射像が，鏡表面と反射像とで焦点位置が異なる奥行きの表現が正しく行われる．

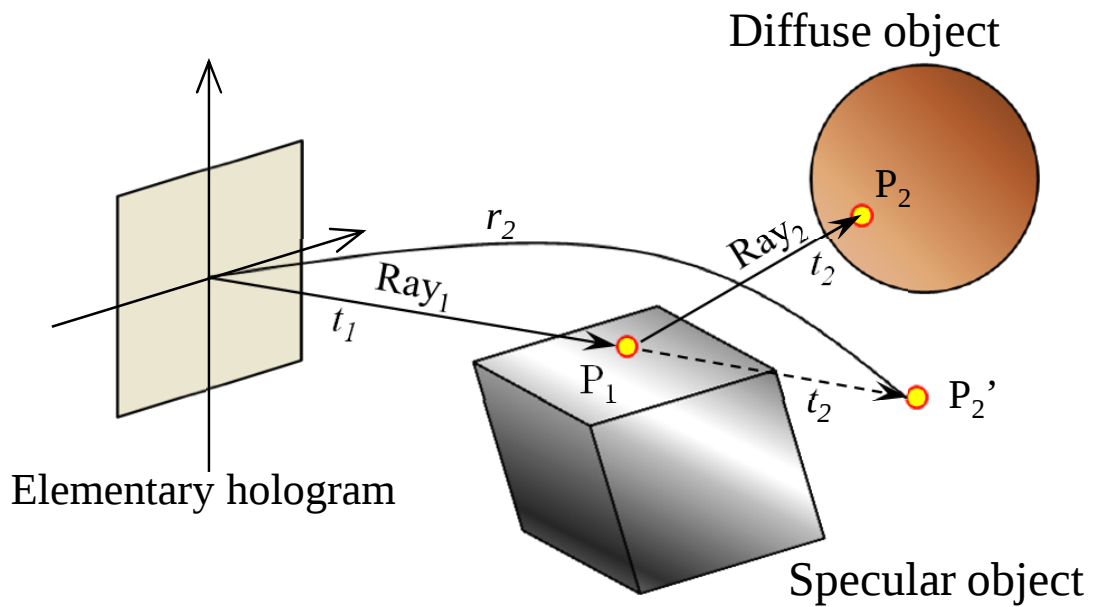


図 5.13: 光線追跡法を用いた CGH における反射表現

Reflection in CGH with the ray tracing method.

## 5.7 CGH における屈折表現

本節では CGH における透過物体による屈折の表現手法について述べる．屈折表現についても，最初の交点より追加の光線を飛ばすという点で，5.6 節で述べた反射表現と同じような手法を用いる．手法の概要図を図 5.14 に示す．はじめに要素ホログラムより投げられた光線が透過物体と交差した際に，追加の光線を透過物体の内部へと更に投げる．その際の光線の方法はスネルの法則により，以下の条件で決定される．

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} . \quad (5.14)$$

ここで  $\theta_1$  は媒質への入射角度， $\theta_2$  は屈折角度を示す．また  $n_1, n_2$  はそれぞれ入射側の媒質の絶対屈折率，屈折光側の媒質の絶対屈折率である．

反射表現の時と同様に，光線が散乱物体へと到達するまで屈折および反射を繰り返し行い，交点を求める．ここでは簡単化のために図 5.14 の場合を考える．ここでも最終的な得られた交点までの光路長  $r_t$  を以下の式に従い計算する．

$$r_t = n_1 \cdot t_1 + n_2 \cdot t_2 + n_3 \cdot t_3 . \quad (5.15)$$

そして最初に投げられた光線の方法，距離  $r_t$  の位置へと点光源  $P'_t$  があるとして点光源群バッファに保存する．この点  $P'_t$  からの光波を計算することで透明物体を通して屈折した像を観察することが出来るようになる．

さらに点  $P'_t$  の輝度値について媒質中を光が通過する際に生じる減衰を考えなければならない．減衰については媒質による光の吸収を定式化した Beer-Lambert の法則を用いて計算される．Beer-Lambert の法則による光の減衰の図式を図 5.15 に示す．図 5.15 において  $I_0$  は媒質への入射光の強度であり， $I_1$  は媒質から出て行く光の強度を示す．また  $L$  は媒質中を通過する光の距離を示す．この条件下で Beer-Lambert の法則は  $I_0$  と  $I_1$  の関係を以下の式のように示す．

$$\log_{10} \left( \frac{I_1}{I_0} \right) = \alpha L . \quad (5.16)$$

ここで  $\alpha$  は吸光係数である．式 (5.16) において  $L$  は図 5.14 の  $t_2$  に相当する．要素ホログラム上の  $P'_t$  からの光波を計算する際には，点光源の強度は事前に減衰させておく．よって光波伝搬計算の際の点光源の強度は以下の式によって求められる．

$$I_t = I_r \cdot 10^{-\alpha \cdot t_2} . \quad (5.17)$$

ここで  $I_r$  は図 5.14 における不透明物体の輝度値である．

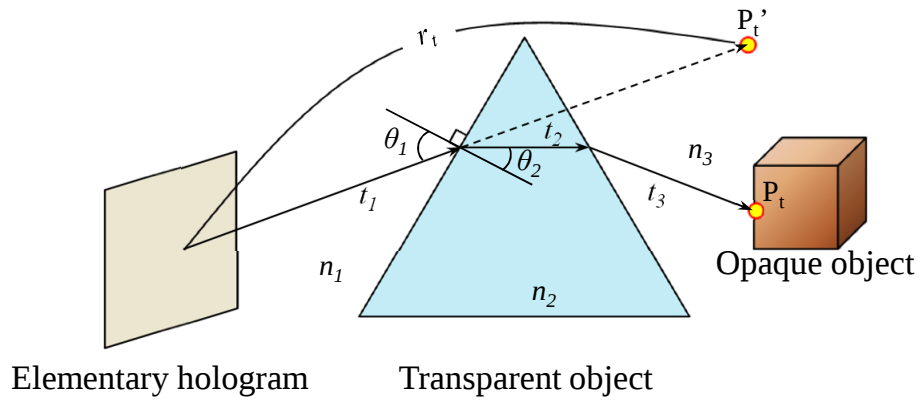


図 5.14: 光線追跡法を用いた CGH における屈折表現

Refraction in CGH with the ray tracing method.

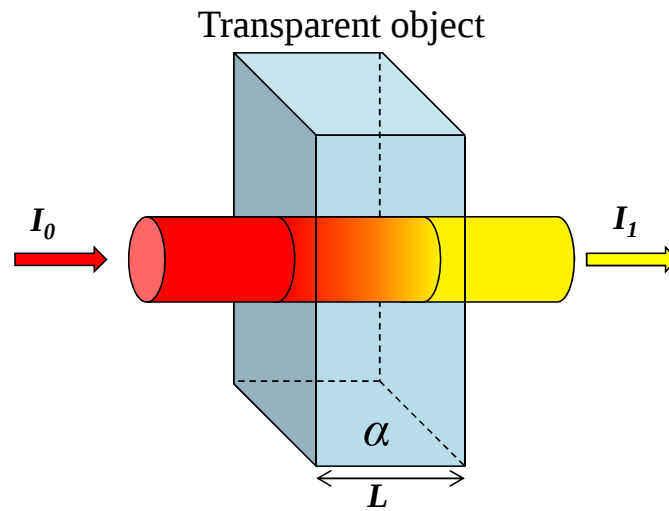


図 5.15: 光の減衰

Attenuation of the light.

## 第 6 章

# フルカラーホログラフィックディスプレイ

### 6.1 ホログラフィにおける視域・視野

5 章にてリアリスティックな 3 次元像を表示するための CGH における各種レンダリング手法について述べた。しかしこの手法で作成された干渉縞を電子ホログラフィとして観察しようとする、物体光が物体のフレネル回折光となるようなフレネルホログラムでは非常に視野が狭くなってしまふ。よってせっきくのリアリスティックな像を表示するための効果も薄くなってしまふ。また単純に一つの波長で再生すると、もちろん単色の再生像が表示されるため更にリアリティを感じられなくなる。結果として再生される立体像は非常に小さく、観察できる範囲は狭く、さらに再生像と同時に発生する共役像や 0 次光が観察の邪魔になる。そこで SLM の性能の向上に頼らずに視野を拡大するような光学系を開発する必要がある。

ここでホログラフィにおいて再生された像の重要な特徴量である視域 (Viewing zone) と視野 (Visual field) について述べる。ホログラムの視野とは、視点から観察できる再生像の大きさのことである。ホログラムの視域とは、ホログラムの再生像がどの視点位置からどの視点位置まで像を観察可能であることを示す範囲である。特に本論文においては SLM の全領域を視野とすることの出来る範囲を視域と呼ぶ。これまでもホログラフィの視域、視野の拡大を目指した研究は多くなされてきている [68]。Haussler らはアイトラッキング技術を用いて手法を提案しており、観察者の視点位置の情報から CGH の計算領域を変化させることで視域の拡大と計算量の低減を図っている [69]。また複数のホログラムを円筒形に配置した円筒形ホログラフィという光学系が提案されている [70]。円筒状

にホログラムが配置されていることで、再生像が中心に集まり、視域が拡大される。妹尾らは時分割で SLM に表示するホログラムを変えることで視野または視域を連続的に変化させる手法を提案した [71]。しかしこれらの手法による光学系は複雑・大規模になる傾向がある。そこでフーリエ変換光学系を用いた視野拡大法が提案されている [72, 73]。通常のフーリエ変換ホログラムでは再生像の位置はホログラム前面に制限され、深い奥行きを表現することは出来ない。そこで佐藤らがフーリエ変換ホログラムにおいて任意の奥行きに再生像を表示させる計算を提案した [74]。本章では 5 章にて述べた CGH のレンダリング手法をフーリエ変換光学系およびその計算手法に応用する方法について述べる。

## 6.2 フーリエ変換ホログラム

視野を拡大する手法として、フーリエ変換光学系 (Fourier transform optical system) を本研究では採用した。フーリエ変換ホログラムは記録の際に記録物体とホログラム面の間にレンズを配置したものであり、その光学系を図 6.1 に示す。図 6.1 に示すようにレンズの物体焦点面に物体を置き、像焦点面に置いたホログラムに参照光  $\Sigma_R$  を重ねてホログラムを撮影する。このとき、平行な参照光を得るため用いるレンズをフーリエ変換用のレンズと共有している。参照光は小さなレンズ  $L_R$  を用いて、物体面上に点光源  $S_R$  を作り、ここから出て大きなレンズを通過した光が平行な参照光となる。図 6.2 はフーリエ変換ホログラムの再生を示した図である。参照光  $\Sigma_R$  を記録と同じように当てて照明するだけでは再生像は無限遠に生じるため、ホログラム前面に記録のサイト同様のレンズを配置することでその焦点面に直接像が生じる。

フーリエ変換ホログラムは図 6.1 においてレンズを取り外した状態でも撮影することが出来る。このように撮影されたホログラムをレンズレスフーリエ変換と呼ぶ。レンズレスフーリエ変換 [75] は、ホログラム面から同じ距離にある、記録物体と同一平面内に球面波参照光を配置することで近似的にフーリエ変換を行うものである。CGH における記録計算もレンズレスフーリエ変換ホログラムを基に行う。

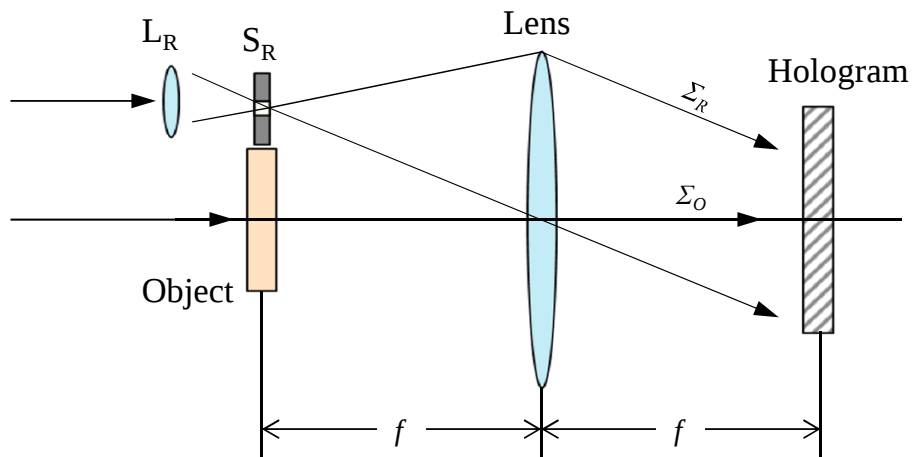


図 6.1: フーリエ変換ホログラムの記録

Record of the Fourier transform hologram.

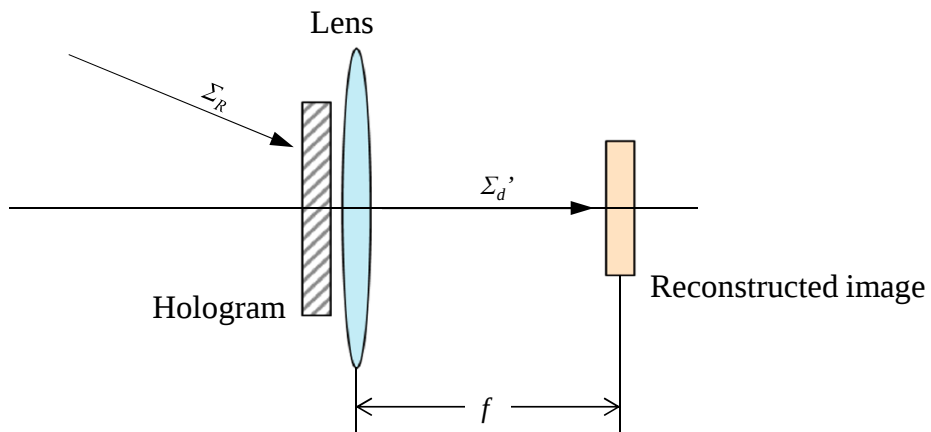


図 6.2: フーリエ変換ホログラムの再生

Reconstruction of the Fourier transform hologram.

### 6.3 表示空間の拡大

6.2 節で説明したフーリエ変換ホログラム (図 6.2) は再生の際に表示装置として反射型の SLM を用い、さらに参照光として点光源をレンズの焦点位置に配置することで同様の結果を得ることが出来る (図 6.3) . この時、図 6.3 のように点光源を対象に直接像と共役像が同時に再生される . そこでレンズの焦点位置に点光源と共役像を隠すようにバリアを配置することで実像のみの観察が可能になる . しかし通常の計算では実像が焦点近辺に限られてしまうため、表示空間の拡大を考える必要がある .

従来のレンズレスフーリエ変換の計算では、仮想物体は参照光と同じ奥行きにある平面上に配置される . 本論文では再生像の表示空間をホログラム後面へと拡大するために、仮想物体としての点光源を焦点面よりもホログラム側に近づけて計算する . この手法により、共役像の再生位置が変化し、これを直接像として観察することで表示空間を拡大する . 以下のその仕組みについて詳細に説明する .

#### 6.3.1 直接像と共役像の関係

説明の簡単化のために図 6.4 のように  $y$ - $z$  平面で考える . CGH の計算時において、点光源  $O(y_o, z_o)$  を参照光源である点光源  $R(0, -f)$  よりもホログラムに配置する . このホログラムに対して、図 6.4 のフーリエ変換光学系で点光源を  $(0, f)$  に配置して再生する . この時、直接像  $P(y_1, z_1)$  と共役像  $Q(y_2, z_2)$  が再生される . これら 2 つの再生された点の位置はホログラムの結像理論 [76] およびガウスの結像公式より以下の式によって与えられる .

$$z_1 = \frac{z_o f}{2z_o + f}, \quad (6.1)$$

$$y_1 = \frac{y_o}{z_o} z_1', \quad (6.2)$$

$$z_2 = -z_o, \quad (6.3)$$

$$y_2 = y_o. \quad (6.4)$$

$x$  座標についても  $y$  座標とに以下の式によって計算される .

$$x_1 = \frac{x_o}{z_o} z_1', \quad (6.5)$$

$$x_2 = x_o. \quad (6.6)$$

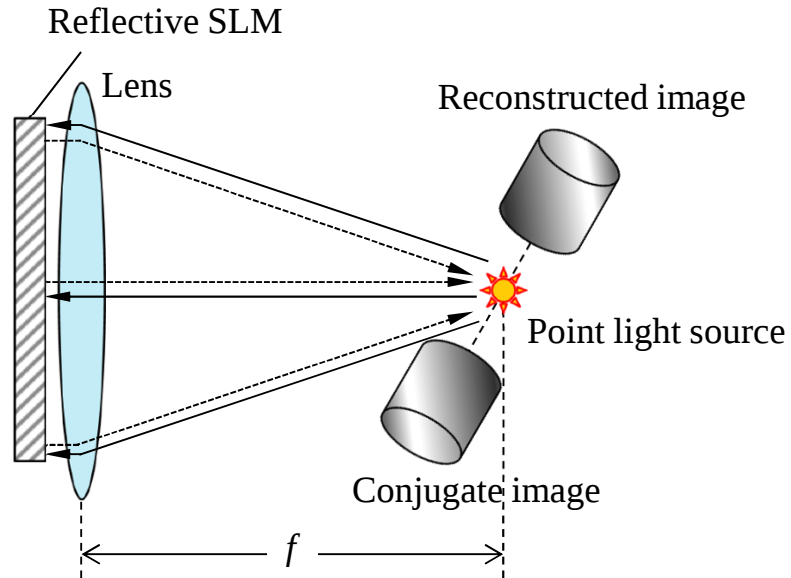


図 6.3: 反射型 SLM を用いたフーリエ変換光学系  
Fourier transform optical system with a reflective SLM.

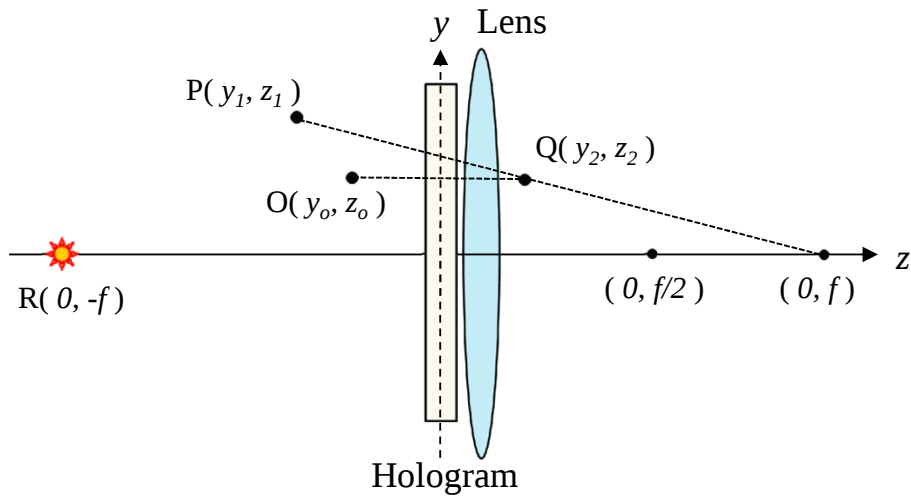


図 6.4: 点光源の再生位置  
Position of a reconstructed point.

これらの式より，物体光としての点光源の座標より共役像および直接像の座標が簡単に求められる．式 (6.1) より点光源  $O$  の  $z$  座標が  $z_o = -f/2$  よりも大きい，すなわちレンズ焦点距離の半分よりもホログラム側に近くに配置されると直接像  $P$  の  $z$  座標  $z_1$  の符号が逆転し，負の値となることが分かる．よって直接像  $P(y_1, z_1)$  は計算の際に点光源を  $-f/2$  よりもホログラム側に置くことで，ホログラム後方に再生される．計算の際の点光源位置による直接像と共役像の位置関係を図 6.5 に示す．図 6.5(a) のように  $z_o < -f/2$  であるときには直接像  $P$ ，共役像  $Q$  が共にホログラム前方に像が再生される．対して，図 6.5(b) のように  $z_o > -f/2$  であるとき，視点からは直接像  $P$  と共役像  $Q$  が同時に視界に入るように再生されてしまう．よって像が重なってしまい直接像に焦点を合わせても鮮明な像を得ることは出来ない．そこで共役像の除去法が必要になる．

### 6.3.2 共役像の除去

6.3.1 節では点光源位置により直接像がホログラム後方へと再生され，表示空間が拡大されることを述べた．しかし直接像と共役像の再生位置が視線方向に重なるために，直接像のみの視聴を可能にするための共役像の除去が必要となる．本論文においては共役像の除去には空間周波数フィルタリング法 [77] を基にした手法を用いる．本手法では視点位置と再生される直接像，共役像に起因するホログラム領域を考える．図 6.6 のように視点領域を直接像  $P(y_1, z_1)$  と共役像  $Q(y_2, z_2)$  を結ぶ直線  $PQ$  の上下に分け，それぞれを上側を  $V_1$ ，下側を  $V_2$  をする．またこの直線  $PQ$  とホログラム面との交点を  $y_{th}$  とする．この交点  $y_{th}$  の上下の領域で再生される点が異なる．ここで視点が図 6.6 のように領域  $V_1$  にあるときを考える．この時，直接像  $P$  は交点  $y_{th}$  の上の領域で再生され，共役像  $Q$  は交点  $y_{th}$  よりも下の領域で再生される．このことから点光源  $O(y_o, z_o)$  から発せられる球面波を交点  $y_{th}$  よりも上の領域分のみ計算することで，領域  $V_1$  にある視点には直接像  $P$  のみの再生光が届く．逆にこの時領域  $V_2$  に視点をおいた時には，共役像  $Q$  のみの再生光が観察できる．

$y_{th}$  の位置は式直線  $PQ$  上に存在し，かつ  $z = 0$  となる位置に存在する．また式 (6.1) ~ (6.4) より，直線  $PQ$  がレンズの焦点を通る直線であることが分かる．よって直線  $PQ$  のホログラム上の切片  $y_{th}$  は以下の式で求まる．

$$y_{th} = \frac{f y_o}{f + z_o} . \quad (6.7)$$

以上のことから領域  $V_1$  に視点を置く際には，切片  $y_{th}$  よりも上のホログラム領域のみを計算することで，直接像のみを再生する CGH を作成することが出来る．

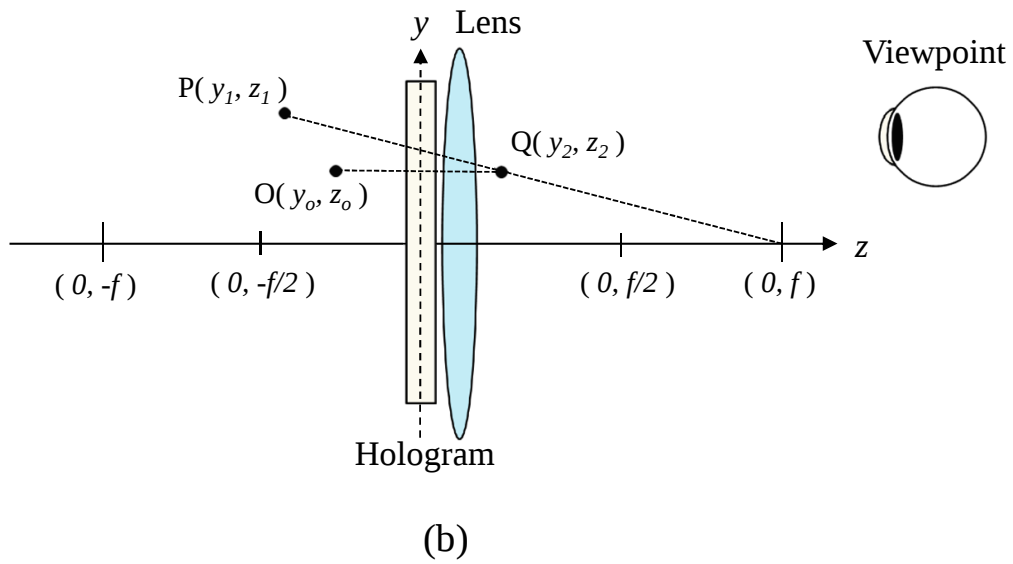
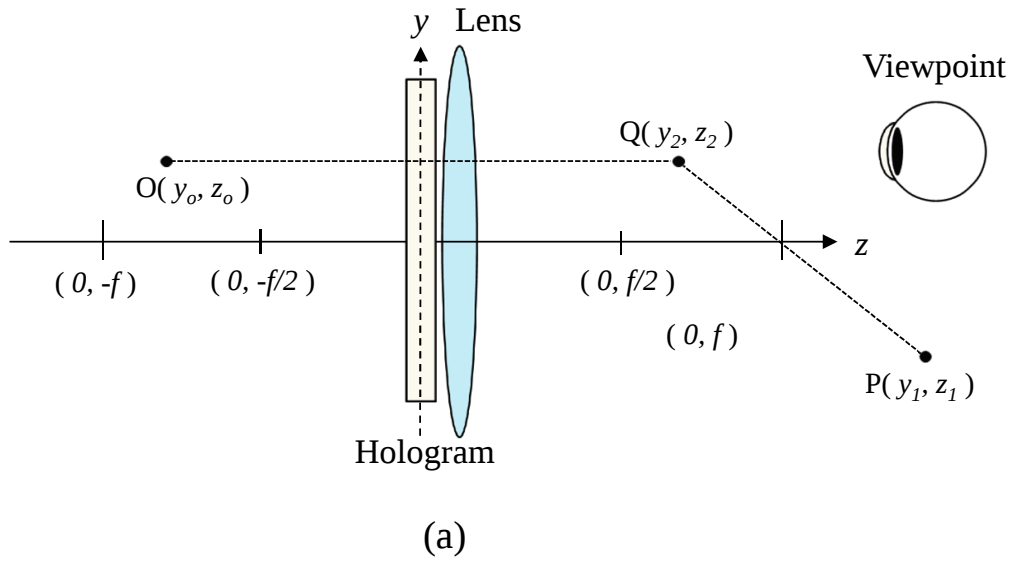


図 6.5: 直接像と共役像の重なり

Overlapping with reconstructed image and conjugate image.

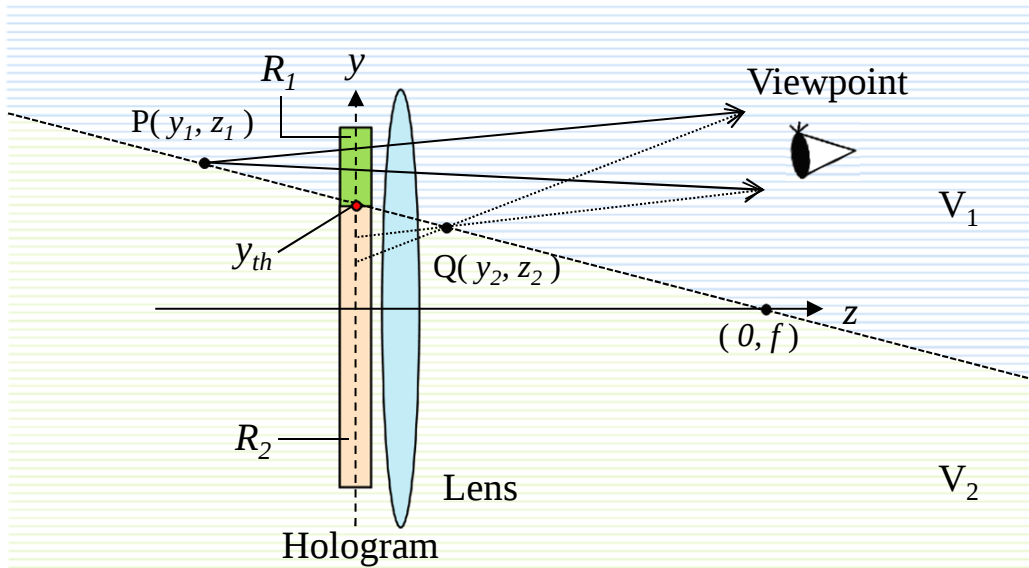


図 6.6: 視点とホログラム上の領域の関係

Relationship between the viewpoint and region of a hologram.

## 6.4 仮想物体の計算方法

6.3 節にてフーリエ変換光学系において再生像の表示空間の拡大について述べ、また共役像を除去する手法についても解説した。しかしながら、式 (6.1) ~ (6.6) から分かるように、元の点光源位置とは異なる位置に直接像が再生される。つまり、5 章にて述べた光線追跡法を用いて可視の部分の点光源群を求めても、奥行きによって像が拡大されたりまたは縮小されたりしてしまうため、目的の仮想物体が表現されず歪んで見えてしまう。そこで光線追跡によって求めた理想の点光源群のように再生されるような手法が必要になる。式 (6.1) ~ (6.6) より物体光となる点光源の位置と、直接像の再生位置の関係はわかっているので、逆に観察したい仮想物体を再生するための点光源位置を計算によって求めることが可能である。つまり光線追跡法で求めた仮想物体の位置に直接像を再生するために、CGH の光波伝搬計算に用いる点光源群の位置の補正を行う。

式 (6.1) ~ (6.6) を  $x_o, y_o, z_o$  について解くと以下の式が得られる。

$$z_o = \frac{f z_1}{f - z_1}, \quad (6.8)$$

$$x_o = \frac{x_1 z_1}{z_o}, \quad (6.9)$$

$$y_o = \frac{y_1 z_1}{z_o}. \quad (6.10)$$

よってフーリエ変換光学系を用いてホログラム後方に像を表示する際には、再生像を表示したい位置の座標を  $(x_1, y_1, z_1)$  として式 (6.8) ~ (6.10) の式により点光源位置を求める。そして点光源  $(x_o, y_o, z_o)$  からの光波をホログラム面上の  $y_{th}$  より上の領域で計算することで、 $(x_1, y_1, z_1)$  に再生する CGH を作成することができる。

上式はホログラムとレンズの間に隙間が存在しないもの、つまりレンズ位置が  $z = 0$  として計算している。しかし現実には光学系を組む際にはレンズには厚みがあり、また距離を 0 にすることは不可能であるため想定される再生位置と実際の再生位置にはずれが生じる。そこでこのレンズとホログラム間の距離  $D$  を考慮して、(6.8) ~ (6.10) を考えなおす必要がある。

レンズとホログラムの隙間  $D$  が存在する光学系における直接像  $P(y_i, z_i)$  と点光源  $O(y_o, z_o)$  の関係を図 6.7 に示す。レンズとホログラムの間に  $D$  だけ距離があると、レンズの効果によりホログラムは拡大されて見え、奥行き  $Z_h$  の位置に結像する。ホログラム

の結像位置  $Z_h$  は以下の式により求められる．

$$Z_h = - \left( \frac{fD}{f-D} - D \right) . \quad (6.11)$$

ホログラムは後方に拡大されるため，観察したい仮想物体の位置も  $z_1 < Z_h$  とする必要がある．ホログラムとレンズの間の距離  $D$  を考慮して式 (6.8) ~ (6.10) を求めると，次式が得られる．

$$z_o = - \frac{fA}{f-A} , \quad (6.12)$$

$$x_o = x_i z_o B , \quad (6.13)$$

$$y_o = y_i z_o B . \quad (6.14)$$

ここで  $A$  および  $B$  は次式で示される．

$$A = \frac{z_i(f-D) + D^2}{z_i - D - f} , \quad (6.15)$$

$$B = \frac{A + D - f}{Af} . \quad (6.16)$$

よってまとめると，光線追跡法によって再生したい位置  $(x_1, y_1, z_1)$  を求めた後に，式 (6.12) ~ (6.14) によって計算の際に必要な点光源位置  $(x_o, y_o, z_o)$  を求める．そしてこの点光源  $(x_o, y_o, z_o)$  よりホログラム面上へと伝搬される光波を計算するが，共役像の除去に関しては同様の手法を用いるため， $y_{th}$  も点光源毎に計算しその上の領域のみの光波を計算する (図 6.7)．上記の点光源の位置補正計算を行うことで仮想物体  $P(x_i, y_i, z_i)$  が再生される CGH の作成が可能となる．

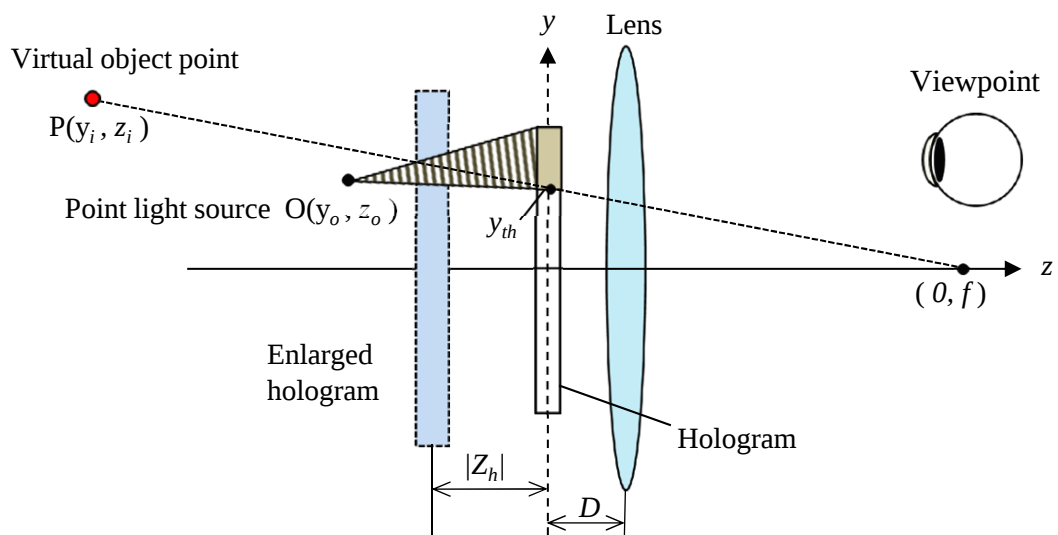


図 6.7: 拡大されたホログラムとレンズとホログラム間の距離

Enlarged hologram and a gap between a hologram and a lens.

## 6.5 視野の理論値

本章ではここまでフーリエ変換光学系における表示空間の拡大計算手法について述べた．ここで実際にフレネルホログラムに比べて本手法におけるフーリエ変換光学系の視野角が拡大されているかを確認する．

### 6.5.1 フレネルホログラムの視野角

フレネルホログラムでは参照光として平行光を入射することで再生を行う．そして 3 次元像はホログラム後方へと再生される．図 6.8 にフレネルホログラムの視野・視域を示す．再生された物体光波ホログラムのピクセルピッチ  $p$  によって決定される回折角度  $\theta$  で広がる．よってフレネルホログラムの視域はホログラム全体からの光が届く  $z_v$  だけ離れた領域となる．視野角  $\phi$  は視点位置によって変化し，視点位置が  $z_v$  に置かれた時その最大の視野角  $\phi_{max}$  が得られる．最大視野角  $\phi_{max}$  と，再生像の最大の大きさ  $S_{o\_limit}$  は次式によって求められる．

$$\phi_{max} = \theta = 2 \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{2p} \right) , \quad (6.17)$$

$$S_{o\_limit} = 2 \tan \theta \cdot z_o + L . \quad (6.18)$$

ここで  $L$  はホログラムの実寸であり， $z_o$  は仮想物体の奥行きである．式 (6.17) よりフレネルホログラムの視野角は表示デバイスのピクセルピッチのみに依存することが分かる．また最大視野角を得られる視点位置  $z_v$  は以下の式によって求められる．

$$z_v = \frac{L}{2 \tan \theta} . \quad (6.19)$$

式 (6.19) よりホログラムが大きくなると最大視野角を得られる視点が遠くなってしまうことが分かる．よってホログラムを大きくして視野を広げても遠くから観察しなければならない．フレネルホログラムでは大きな物体を近くで観察することが出来ないという問題がある．

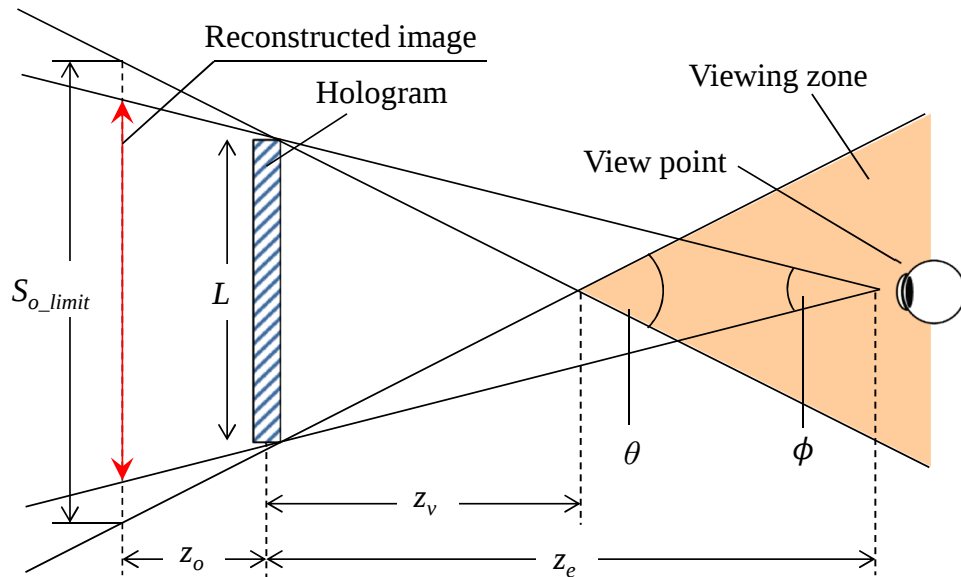


図 6.8: フレネルホログラムの視野・視域

Visual field and viewing zone of Fresnel hologram.

### 6.5.2 フーリエ変換光学系の視野角

6.3 節で説明した計算法によりフーリエ変換光学系の表示空間は拡大され，図 6.9 に示す領域において像の再生が可能である．フーリエ変換光学系によって再生された光はレンズによって収束し，図 6.9 に示すような幅  $w$  を持ったウィンドウを通る．この  $w$  は次式によって表される．

$$w = \frac{\lambda f}{p} . \quad (6.20)$$

さて視野角についてはフレネルホログラムと同様に視点位置により変化し，光が収束するウィンドウの先端  $z_{e\_min}$  にて最大視野角  $\phi_F$  が得られ，その値は次式によって求められる．

$$\phi_F = 2 \tan^{-1} \left( \frac{w + L}{2f} \right) , \quad (6.21)$$

$$z_{e\_min} = \frac{Lf}{L + w} . \quad (6.22)$$

式 (6.21) より視野角  $\phi_F$  は表示デバイスのピクセルピッチに加えてホログラムサイズとレンズの焦点距離に依存することが分かる．よって同じ SLM を用いる場合には焦点距離の短いレンズを用いることでフレネルホログラムよりも広い視野角を得ることが出来る．また視点位置をフレネルホログラムに比べて非常に近くにできるので，3 次元像を近くで観察することが出来，焦点調節による 3 次元像の知覚が容易い．

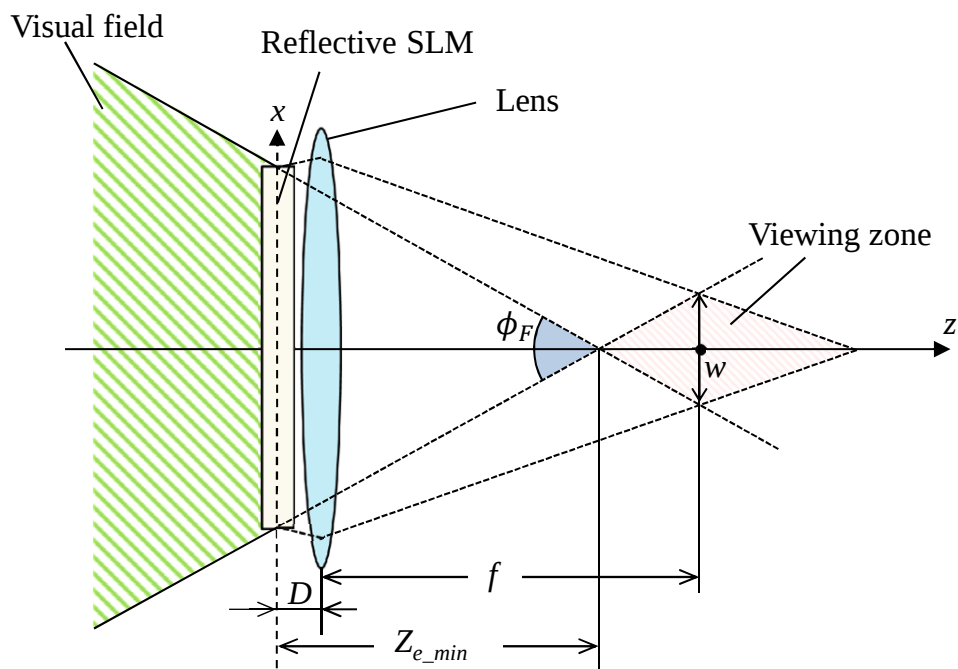


図 6.9: フーリエ変換光学系の視野・視域

Visual field and viewing zone of Fourier transform optical system.

## 6.6 両眼視表示システム

6.5.2 節で述べたようにフーリエ変換光学系は視野を拡大することができるが、光が収束するウィンドウが狭いため、視域が非常に狭くなってしまう。よって両眼を視域内に収めることが不可能である。そこで本論文ではフーリエ変換光学系を 2 体用意し、両眼視可能なホログラフィックディスプレイを用いる。この両眼視ホログラフィックディスプレイは文献 [78] にて開発されたものを用いる。本節ではこの両眼視ホログラフィックディスプレイについて解説する。また本システムはフルカラーでの 3 次元像再生を可能としているので、その手法についても述べる。

### 6.6.1 両眼視ホログラフィックディスプレイの概要

図 6.10 にフーリエ変換光学系を 2 体用いたホログラフィックディスプレイの概要図を載せる。本システムは反射型の SLM、SLM を PC より制御するコントロールボックス、白色 LED、白色 LED と SLM を同期する回路、およびビームスプリッタとしての役割を持つハーフミラーが含まれる。白色 LED とその同期回路は再生像のフルカラー化のための機構であり、詳細は 6.6.3 にて述べる。LED はレンズの焦点距離に配置されており、LED から発せられた球面波はハーフミラーによって反射しレンズへと到達する。レンズの効果により平行光となった光が反射型 SLM へと参照光として入射し、物体光を再生する。物体光はハーフミラーを通過して、各眼球へと到達し 3 次元像の視聴を可能にする。図 6.11 に本システムの写真を載せる。SLM と白色 LED は上下に配置されており、再生像がハーフミラーに反射されて視点へと届くようになっている。よってハーフミラーを通して周囲の現実の風景を同時に観察できるため、拡張現実 (AR: Augmented Reality) などに将来用いられることを期待している。写真 6.11(b) には視聴者とハーフミラーとの間にバリアーがあることが分かる。これは直接像以外の邪魔な光を除去するためにある。参照光としての点光源の光は SLM で反射して、また焦点距離の位置で元の光に収束する。よって焦点距離の位置にバリアーを配置することで 0 次項を除去し、直接像のみを観察することが出来る。

また 2 体のフーリエ変換光学系には視差をつけるために、すこし傾けて設置されている。そして左右それぞれに異なる視点からの CGH を用意することで、それぞれ左右の眼球に正しく視差のついた再生像が得られる。本システムは接眼型ディスプレイとなっており、ヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head-mounted display) のような使用法を

想定している．本システムにおける両眼視差の詳細な実装方法については次節にて説明する．

### 6.6.2 視差補正計算

本研究で使用するホログラフィックディスプレイには 2 体のフーリエ変換光学系が用いられる．本節ではその詳細な配置について述べる．図 6.12 に本システムの配置設定を示す．2 体のフーリエ変換光学系の光軸が角度で  $\alpha$  交わるように傾けて配置されている．2 体のフーリエ変換光学系の視点は瞳孔間距離 PD(pupillary distance) だけ離れるようになっている．本研究において瞳孔間距離 PD は男性の平均的な幅である 65[mm] と設定した．よって 2 体のフーリエ変換光学系の光軸がなす角  $\alpha$  が大きくなれば，両光学系の持つ視野が重なる点  $z_b$  が視点側へと近くなる．左右の視野領域が重なる  $z_b$  からの領域を両眼視野という．この両眼視野は奥行き  $z_C$  において広がり角が狭まる．ここで注意してもらいたいのは，図 6.12 からは分かりづらいが，光軸が交わる点と両眼視野の広がり方が狭まる奥行き  $z_C$  は角度  $\alpha$  によって異なるという点である．両眼視野の広がる奥行き  $z_b$  は以下の式により求まる．

$$z_b = \frac{PD}{2 \tan\left(\frac{\phi_m + \alpha}{2}\right)} . \quad (6.23)$$

ここで  $\phi_m$  は視点からの単眼での視野角である．両眼視野角度  $\theta_b$  は再生領域の奥行き  $z$  によって異なり，次式によって求められる．

$$\theta_b = \begin{cases} \phi_m + \alpha, & \text{when } z_C \leq z \leq z_b \\ \phi_m - 2\alpha, & \text{when } z < z_C . \end{cases} \quad (6.24)$$

図 6.12 を見て分かるように，両眼視野は  $z_b$  から角度  $\theta_b$  をもって広がり，奥行き  $z_C$  以下では緩やかではあるが，式 (6.24) に従い視野を広げる．もちろん単眼で見える領域は  $\phi_m$  に従い広がっていく．本研究において，左右の光軸間の角度  $\alpha$  を 4.65[degree] とし，左右の光学系のレンズから視点までの距離を 100[mm] に設定した．この時，視点から光軸が交わる点までは奥行きにして 800[mm] 離れることになる．

左右のフーリエ変換光学系は視差を与えるために傾いて配置されているので，それぞれの視点位置から観察できる異なる CGH を用意する必要がある．そこで左右それぞれの光学系を中心として，右目座標系  $(x_R, y_R, z_R)$  と左目座標系  $(x_L, y_L, z_L)$  を用意する．仮想物体は両目に共通なので，はじめに仮想物体を設定する際には図 6.13 に示すようなワールド座標系  $(x_w, y_w, z_w)$  にて物体を配置する．このワールド座標系で定義された仮想物体

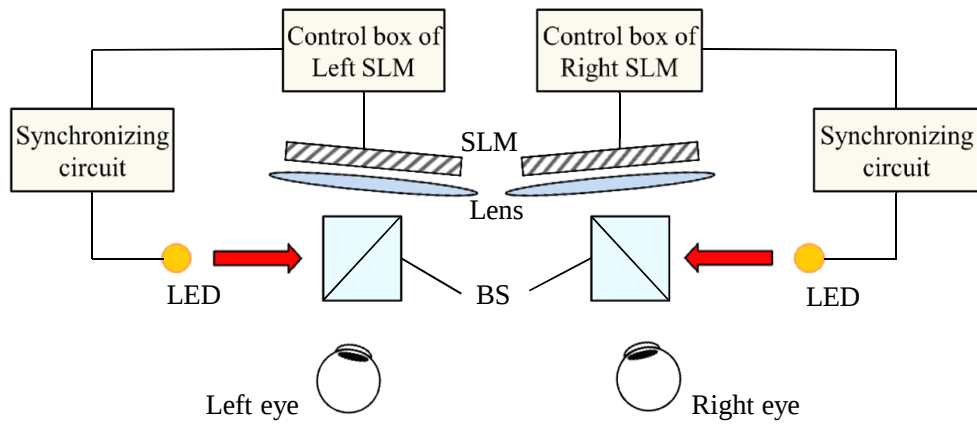


図 6.10: 両眼視ホログラフィックディスプレイの概要  
Outline of the holographic display.

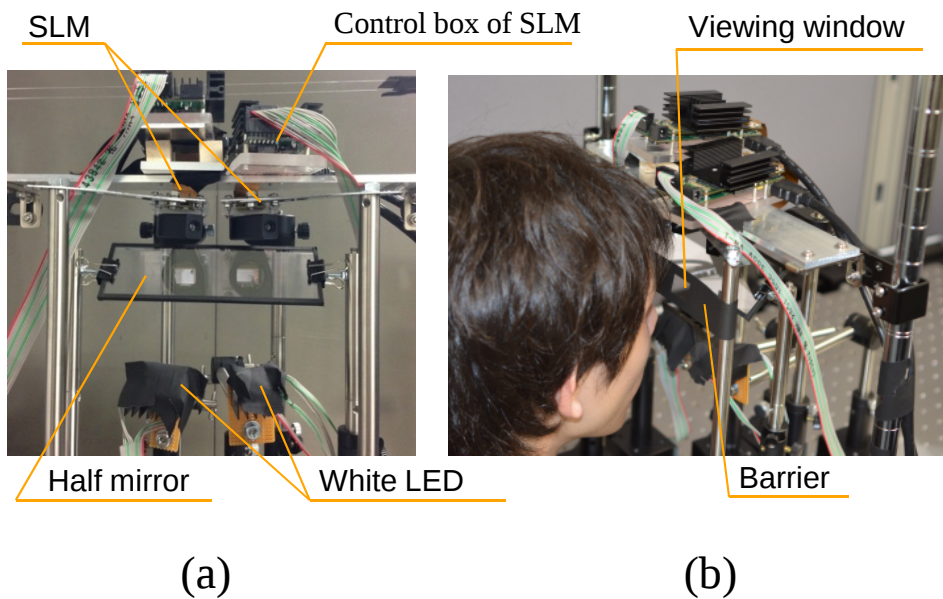


図 6.11: 開発した両眼視ホログラフィックディスプレイ  
Pictures of holographic display.

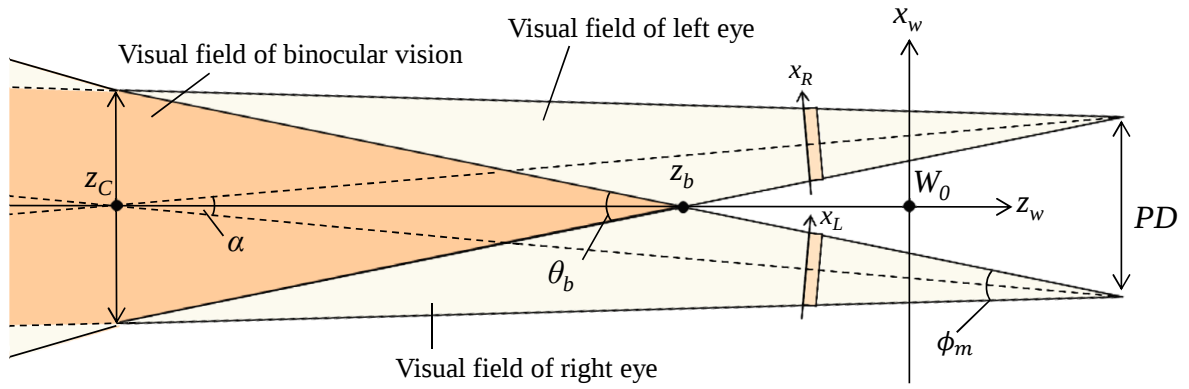


図 6.12: 両眼視ホログラフィックディスプレイの視差設定

Pallax settings of the binocular holographic display.

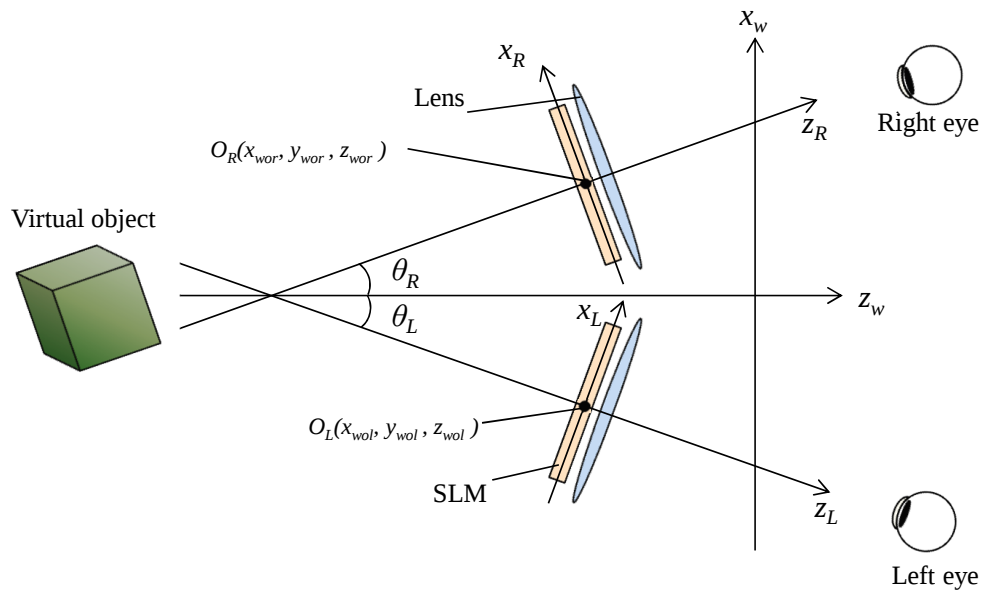


図 6.13: 座標変換

Coordinate transformation.

の座標を左右それぞれの座標系に変換する必要がある．例として右目座標系  $(x_R, y_R, z_R)$  の原点  $O_R$  のワールド座標系での座標を  $(x_{wor}, y_{wor}, z_{wor})$  とする．この時ワールド座標系で与えられた座標  $(x_w, y_w, z_w)$  は以下の行列式により右目座標系の座標  $(x_R, y_R, z_R)$  に変換される．

$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_R & 0 & \sin \theta_R & -x_{wor} \cos \theta_R - z_{wor} \sin \theta_R \\ 0 & 1 & 0 & -y_{wor} \\ -\sin \theta_R & 0 & \cos \theta_R & x_{wor} \sin \theta_R - z_{wor} \cos \theta_R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.25)$$

ここで  $\theta_R$  は図 6.13 に示されるように，右目光学系の光軸のワールド座標系の  $z$  軸に対する角度である．左目座標系の座標も式 (6.25) と同様に以下の式により求まる．

$$\begin{pmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_L & 0 & -\sin \theta_L & -x_{wol} \cos \theta_L + z_{wol} \sin \theta_L \\ 0 & 1 & 0 & -y_{wol} \\ \sin \theta_L & 0 & \cos \theta_L & -x_{wol} \sin \theta_L - z_{wol} \cos \theta_L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.26)$$

以上の座標変換行列式によってワールド座標系で与えられた点光源群データが左右それぞれの光学系を元とした座標系データに変換される．それぞれの点光源群より光波伝搬計算を行うことで左右それぞれの視点から観察できる CGH を作成することが出来る．単眼での視聴でも奥行きが正しく表現されるため 3 次元知覚が可能だが，視域の狭いフーリエ変換光学系では両眼での視差や輻輳がなく自然な視聴が難しかった．そこで本システムにより 2 体のフーリエ変換光学系を用意することで視差のある両眼視を可能にし，さらに傾きをつけることで輻輳運動も感じられるようになるためより自然な 3 次元像視聴が可能となる．

### 6.6.3 再生像のフルカラー化

本研究で用いたホログラフィックディスプレイでは白色 LED を用いることで再生像のフルカラー化を実現している．本節では CGH のカラー化手法について述べる．電子ホログラフィにおいて多くの CGH は単色で再生されており，それを解決すべく多くのカラー化手法 [79, 80, 81] が提案されてきている．代表的な手法は空間多重方式 [82] と時分割多重方式 [83] である．空間多重方式は各色のレーザーと一枚ずつの SLM を用いてビームスプリッタなどで物体光を空間上で重ねあわせる方式であり，RGB3 色を用いても単純に 3 倍の光学系が必要になる．時分割多重方式は各色レーザーと SLM の各波長用の干渉縞の表示タイミングを同期させて，高速に各色の物体光を観察者へと届ける．高速に各色の物体光が切り替わるので，人間の目には再生像がフルカラーで観察できる．各色レーザーの切り替えにはシャッターなどを用いて，SLM へと届く光を切り替えるが，光路を複数用意する必要があるやはり光学系が大きくなる．

これらに対して，本研究で用いたホログラフィックディスプレイでは白色 LED による時分割多重方式を用いてカラー化を実現した．図 6.10 に示すように片眼に対して一つの白色 LED のみを用いるため非常にコンパクトな光学系となっている．白色 LED はもと RGB の各色の発光素子を持っており，各色を別々に発光することが可能である．よって SLM の制御ユニットより出される同期信号により同期回路が白色 LED から各色を順に発光させる．時分割表示方式を用いたカラー化には切り替えのちらつきを視聴者に感じさせないように 180 [Hz] 以上の高いフレームレートを必要とする．そこで本研究では 180 [Hz] のフレームレートを持つ SLM を用いて，一秒間に各色 60 枚の干渉縞を表示することで観察者に自然なフルカラー再生像を視聴させる．LED を用いることでコヒーレンスが悪く多少の像のボケが生じるが気になるほどではない．逆にスペックルの発生が抑えられレーザー光を用いた場合よりもきれいに像が観察できることがある．

RGB 各色の CGH を作成する際には単色の CGH に比べてあまり大きな変更点は少ない．まず本研究において光線追跡法を用いて要素ホログラムごとの点光源群を得る際に RGB 各色ごとの物体反射率からその点光源の輝度値を保存する．その点光源群からの光波伝搬計算において，式 (5.1) において各色毎の輝度値  $A_i$  と周波数  $\lambda$  を用いて計算すればよい．よって本研究においてはひとつのシーンのフルカラー 3 次元像を再生するには，RGB 各色 3 枚，左右 2 枚の合計 6 枚の CGH が必要になる．通常の単色 CGH とくらべて単純に 6 倍の計算時間がかかってしまうが，次章で述べる GPU を用いた高速計算により計算時間を短縮することに成功した．

## 第 7 章

# GPU を用いた高速計算手法

本章では Graphic processing unit (GPU) を用いた本手法の高速計算手法について説明する．CGH 計算は膨大な解像度に対して光波計算する必要がある，その計算量の大きさが問題であった．また本研究に用いる光線追跡法も単純なアルゴリズムではありながら計算量の問題から CGH での適用は難しかった．しかし点光源からの球面波計算，および光線追跡法は共に各計算が独立していることから並列性に優れており，GPU を用いた高速並列計算に向いている．そこで本研究では CGH 計算の殆どを GPU による計算により高速化を図っており，短時間でリアリスティックな 3 次元像を表示する CGH 作成に成功した．

### 7.1 Graphic processing unit

従来コンピュータで演算処理を行うのは CPU (Central Processing Unit) であった．ところが近年のゲームや映像の高画質化が進むにつれてグラフィックス処理が膨大になってきている．そこで近年では 3D の描画などのグラフィックス処理を CPU から切り離して，ビデオカードと呼ばれる周辺機器に行わせるようになった．その処理の中心となるものが，ビデオカード上に搭載されている GPU である．その性能は，最近の CPU である Intel 社製の Haswell アーキテクチャである「Core i7」(4 コア) が 224 GLOPS であるのに対し，NVIDIA 社製の Kepler アーキテクチャの中の「GeForce GTX TITAN」は 4.7 TFLOPS もの性能を持つ．しかも「GeForce GTX TITAN」は演算を行うコアを 2688 個も持っている．この GPU の高い演算能力を科学計算などの汎用的な計算に用いようという試み，GPGPU (General-purpose computing on graphics processing units) が始まった．本研究は NVIDIA 社が開発した CUDA (Compute Unified Device Architecture) と

呼ばれる GPGPU 用の統合開発環境を使用した [84] .

## 7.2 GPU アーキテクチャ

CUDA は NVIDIA 社の並列計算アーキテクチャである．CUDA において GPU は多数の計算コアと階層化されたメモリによって構成されている．GPU のアーキテクチャは数年ごとに見直され，その都度内部構造が更新されている．本節では 2012 年に発表された最新の Kepler アーキテクチャの特徴を紹介する．

### 7.2.1 Kepler アーキテクチャ

GPGPU の回路規模やコア数の並列化が大きく進化し，それに従い消費する電力も増大を続けた．よってコンピュータが消費する電力効率が無視できない問題となってきた．最新の Kepler アーキテクチャは一代前の Fermi アーキテクチャを一新して消費電力を抑え，かつ高速化を目指したものである．Kepler アーキテクチャの演算能力は 1W 当たり Fermi アーキテクチャの 3 倍となる．

#### 計算コアの階層化：SMX の導入

計算を行う単位であるコアは CUDA においてストリーミングプロセッサ (SP : Streaming Processor) と呼ばれる．Kepler アーキテクチャでは並列計算を効率的に行う目的でコアをまとめてユニット化した階層構造が採用された．GeForce GTX TITAN では単精度 SP が 192 個まとめたユニットを SMX と呼び，GPU 内に 14 個の SMX が搭載されている．よって実装される SP の総数は 2688 個となる．また SMX には倍精度ユニットが 64 個，超越関数命令 (3 角関数，対数関数等) を高速で近似計算できる特殊関数ユニット (SFU) が 32 個搭載されている．

#### メモリ階層

Kepler アーキテクチャでは各 SMX マルチプロセッサごとの L1 キャッシュによって，ロードとストアの両方をカバーする形でメモリーリクエストの統合パスを実装している (図 7.1)．シェアドメモリ・L1 キャッシュは，64KB のオンチップメモリが各 SMX に搭載されている．L1 キャッシュ以外にも関数処理する間読

み込みのみだとわかっているデータに用いる 48KB のデータキャッシュが用意されている。このリードオンリーのデータキャッシュはタグの帯域幅が広く、アラインメントされていないメモリアクセスがフルスピードで行えるメリットが有る。L2 キャッシュは以前の Fermi アーキテクチャの倍に当たる 1536KB となった。L2 キャッシュは SMX 間でのデータを統合する役割を持つようになり、データ共有を高速かつ効率的に実現する。

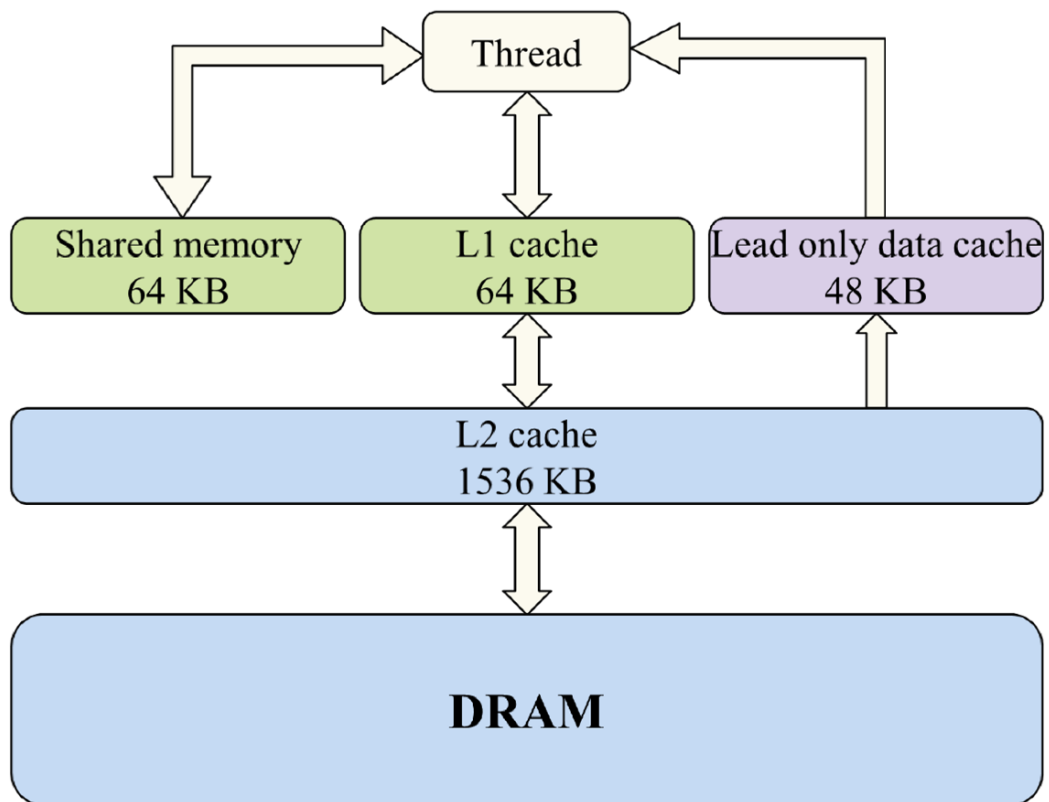


図 7.1: Kepler のメモリ階層

Memory hierarchy of Kepler architecture.

## 7.3 OptiX

点光源群からの光波伝搬計算を行い CGH を作成する計算は CUDA を用いた並列計算によって高速化を図る。一方、要素ホログラムから可視な点光源群を求める、またリアリスティックな像を表示するために必要な各種レンダリング技術を行う光線追跡プロセスについては NVIDIA 社のレイトレーシングエンジン「OptiX」を用いる [85]。OptiX は C 言語ベースのホスト API で構成されており、データ構造はオブジェクトグラフに対応している。OptiX は 3D グラフィックス用途のレンダリングにも使用できるが、大局照明に対応したライトマップの生成など多目的に利用できる。また 3D グラフィックス用途に限定されず、物理シミュレーションの衝突判定、人工知能用途の探索処理などと、その光線追跡のアルゴリズムを汎用目的にも利用が可能である。OptiX は光線をプログラマブルに増殖させたり、バッファの生成にもかなりの自由をきかせている。このことが CGH 作成に非常に有効であり、光波計算において用いられる点光源用に最適なバッファを作成することが出来る。さらに光線の交差判定もプログラマブルに設定することが可能であり、光線の交差判定対象がポリゴンモデルだけではなく、自分で様々な物体との交差判定をプログラムすることができる。例えば、NURBS などの高次曲面表現された物体との交差判定をプログラムすることで、非常になめらかな球などの物体との交差判定を行うことが出来る。ポリゴンモデルでは球を滑らかに表現しようとする、非常に膨大な数のポリゴンが必要となり、交差判定するポリゴンの算出に多くの計算時間を必要とする。

### 7.3.1 OptiX パイプライン

OptiX の最大の特徴は前述したように独自概念のレイトレーシング用のプログラマブル・シェーダ・システムを持つ点にある。これは光線追跡の各種処理を自由にプログラムできることを意味し、GPU 上に搭載されているプログラマブルシェーダ・ユニットを活用するわけではない。シェーダプログラムは CUDA C の文法で記述され、OptiX のシェーダプログラムは GPU 上において CUDA プログラムとして実行される。図 7.2 に OptiX のパイプライン構造であり、灰色のマスがプログラマブルシェーダを示している。

[Host] はバッファ、テクスチャ、変数などを管理するブロックであり、“Entry Points”で実際の光線を投げる (cast) する処理を開始する。“Ray Generation Program”が光線の投げ方を定義するプログラマブルシェーダとなる。5.3 節で述べた条件に合うように光線の投げ方をこの“Ray Generation Program”において定義する。

[r t Trace] が実際の光線追跡を実行するブロックである。

[Traversal] は飛ばされた光線と光線と物体との交差判定を管理するブロックである。この中に "Intersection Program" があり、光線と物体との衝突を判定するプログラマブルシェーダである。"Any Hit Program" は光線が衝突した後の光線の取り扱いについて定義するプログラマブルシェーダである。5.6 節にて述べたような反射表現をするためには正反射方向へ光線を飛ばす必要があるし、透明物体であれば 5.7 節のように光線を屈折方向へとすすめる処理を行わなければならない。その様な処理の定義 "Any Hit Program" にてなされる。

[Ray Processing] は投げた光線について [Traversal] が返した結果に対して処理を行うブロックである。"Closest Hit Program" は "Intersection Program" で交差判定された後の最初の処理を定義するプログラマブルシェーダである。物体上の光線が交差した点の輝度値を材質やライティングを考慮して計算することで反射特性を表現する。また影付けの表現もここで行われる。"Miss Program" は光線が物体と衝突しなかった場合の処理を定義する。本研究においては物体無しとして点光源計算をしない場合と、100m 程奥に背景を用意し、そこからの点光源計算を行うことで近似的な無限遠にある風景などを表現する。

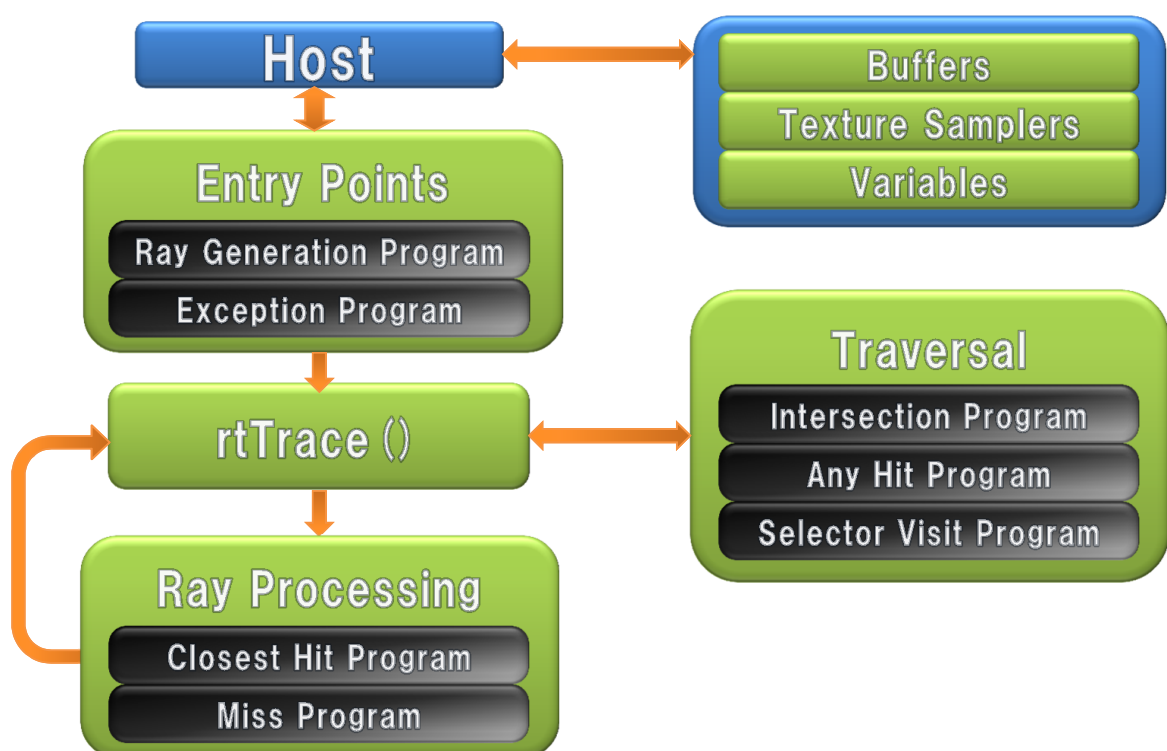


図 7.2: OptiX のパイプライン

Pipeline of OptiX.

## 7.4 GPU による CGH 計算プロセス

GPU を用いた写実的表現を施したフルパツラックス CGH の計算手順を図 7.3 に示す．図 7.3 は右目光学系の CGH を作成する場合の計算プロセスである．計算は主に光線追跡を行う Ray tracing kernel と光波伝搬計算を行う CGH Kernel に分かれている．以下にその詳細な手順について述べる．

最初に光線追跡の準備のためにホストである CPU 側より OptiX の初期化関数を呼び出す．GPU 内では仮想物体データがグローバルメモリにロードされる．さらに照明光や光線の投げ方，範囲や数，そして物体の材質などを定義するコンテキストが作成される．

GPU 側で光線追跡の初期設定を行う間に，CPU 側では各要素ホログラムの点光源群が持つ座標や輝度値情報を格納する点光源バッファを用意する．

ホストである CPU 側より光線追跡を行う Ray tracing kernel が要素ホログラムごとに呼び出され，GPU 側で実行される．この Ray tracing Kernel は要素ホログラムの数だけ呼び出される．内部では光線追跡の処理が行われ，OptiX を用いて光線と仮想物体との交差判定が行われる．実行される処理手順を以下に示す．

1. 初期設定された光線の方向に従い，要素ホログラムの中心から光線を投げる．この時各光線は独立しており，多数のコアを用いて並列実行される．
2. "Closest Hit Program" シェーダが実行され，光線と仮想物体との交差判定が順次行われる．
3. 交差判定で求められた交点の輝度値を光線の方向や物体表面の向き，材質などを用いて計算する．
4. 物体が鏡面であったり透過物体の際にはさらなる光線を飛ばす処理を行い，その都度輝度値や光路長を保存する．
5. 全ての光線が持つ座標や輝度値情報を出力バッファへと保存し，ホスト側へと返す．

Ray tracing Kernel より返されたバッファデータを光波伝搬計算をする際の点光源の座標，光の強度情報として点光源バッファへと保存する．要素ホログラムごとに異なる点光源バッファを保持している．次に要素ホログラム上の光波分布を計算する CGH Kernel を呼び出し，点光源データを GPU へと渡す．CGH Kernel 内では以下の処理が行われる．

1. ホログラム面上の光波分布データ  $h_m(x, y)$  を格納する為のメモリ領域を GPU 上

で確保する．

2. Ray tracing Kernel で得られた点光源座標はワールド座標系  $(x_w, y_w, z_w)$  で与えられているため，左右の光学系を中心とした座標系，ここでは右目座標系である  $(x_R, y_R, z_R)$  へと式 (6.25) を用いて変換する．
3. フーリエ変換が光学系による像の再生位置の補正をするために，点光源データを式 (6.12) ~ (6.16) を用いて変換する．
4. 6.4 で説明した共役像除去に必要なホログラム上の点  $y_{th}$  を求める．
5. 点光源毎にホログラム面上の  $y_{th}$  よりも上の領域の光波分布を求める．この時，ホログラム面の画素毎に独立して計算され，各コアがひとつの画素の担当する．
6. 要素ホログラムを並びあわせることでホログラム面全体の光波分布を得る．

CGH Kernel より返されたホログラム面上の光波分布データをホスト側は受取り，ホログラム面全体に入射する参照光を計算する．参照光は要素ホログラム全てで共通である．最後に光波分布データより干渉縞となる強度分布を出力し計算を終了する．

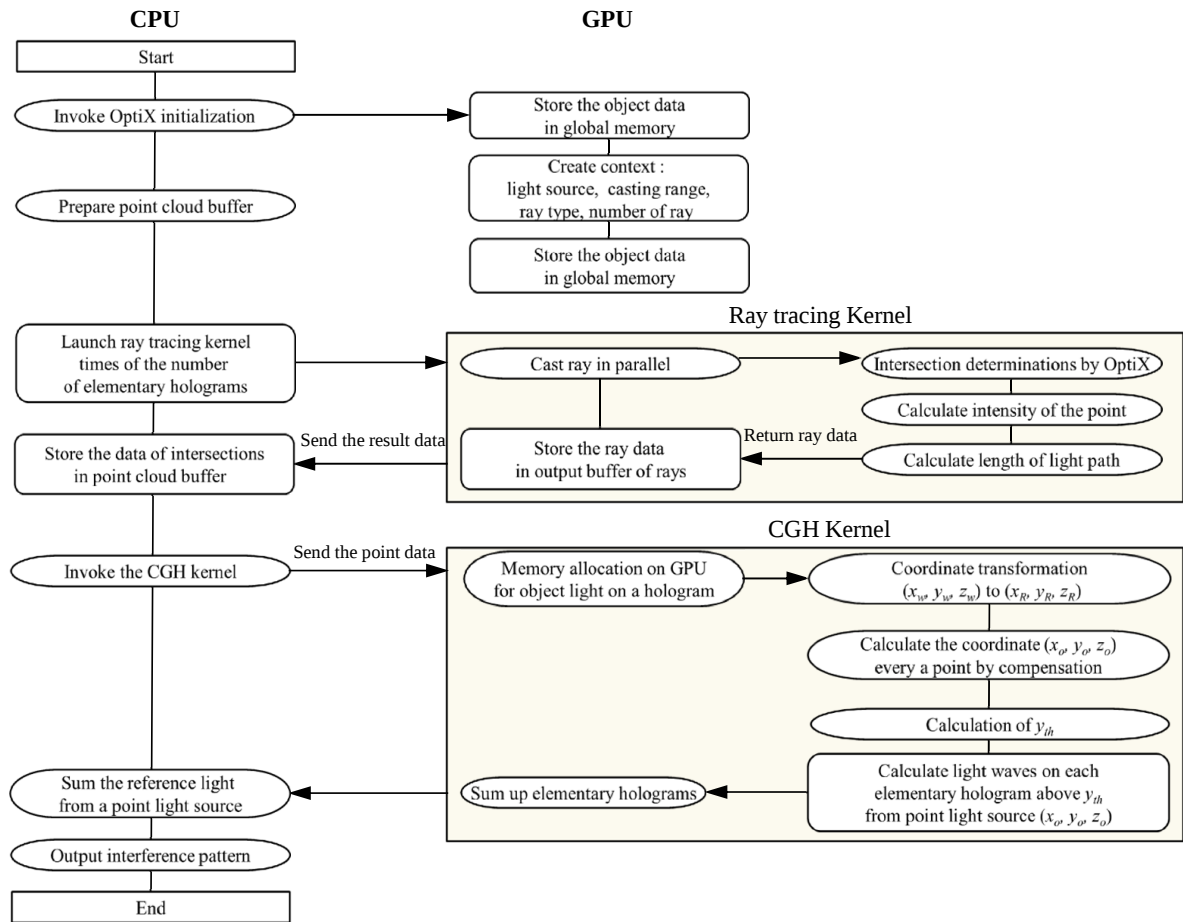


図 7.3: 右目光学系用 CGH 計算のブロックダイアグラム.

Block diagram of CGH calculation for the right optical system..

## 7.5 計算時間

ここで GPU を用いたことで計算時間が実際にどの程度短縮されたのかを考察する．注意として GPU では光線追跡法の計算に適した OptiX を用いているのに対し，CPU では自ら構築したポリゴンモデルに対する光線追跡法のプログラムであるので単純には比較できない．仮想物体として球を対象とし，ホログラムの解像度などの設定値は表 7.1 に示すとおりである．本節ではフーリエ変換光学系に表示するために必要な点光源位置の補正計算や視差に伴う回転変換などを考慮せず，単色において光線追跡法と光波伝搬計算にかかる時間について検討する．

### 7.5.1 CPU による計算時間

計算時間の比較に用いた CPU の仕様を表 7.2 に載せる．CPU を用いた計算時間の測定では物体サイズを一定としたポリゴンで構成された球に対する光線追跡プロセス，光波伝搬計算，そしてその合計計算時間を測定した．また球を構成するポリゴン数を増加させ，ポリゴン数と計算時間との関係を調べた．図 7.4 に異なるポリゴン数で構成された球の例を示す．図 7.4(a) は 112 枚のポリゴンで構成されており，図 7.4(b) は 1984 枚のポリゴンが使われている．図 7.4 よりポリゴンで構成される曲面はポリゴン数が少ないとポリゴンの境目がはっきりしてしまいでこぼこしているように見える．図 7.4(b) のように 1984 枚と多くしてもポリゴン毎に明るさが一定であるため，境界線が見えてしまう．なので曲面を用意しようとするとき非常に多くのポリゴンが必要になる．表 7.3 にホログラム全体を計算するのに要した計算時間を載せる．表 7.3 より光線追跡プロセス計算はポリゴンの数が増えると計算時間も大きく増加しているのに対し，光波伝搬計算時間は殆ど変わらないことが分かる．図 7.5 に一枚の要素ホログラムを計算するのにかかった計算時間のポリゴン数との関係をグラフとして載せる．図 7.5 より光波伝搬にかかる計算時間はポリゴン数に依存しないことが分かる．これは要素ホログラムの中心から放射される光線が数が一定であるため，計算の際に用いる点光源となる交点の数も変化しないためである．一方，光線追跡法による交差判定ではポリゴン枚数に比例して計算時間が増加している．なぜならば 1 本の光線がどのポリゴンと交差するのか一枚一枚判定する必要があるため，ポリゴン数が増えれば交差判定回数も増加するためである．

表 7.1: Parameters of comparative experiments.

|                                                        |                                         |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Pixel pitch                                            | $9.6 \times 9.6 \text{ } [\mu\text{m}]$ |
| Number of pixelss                                      | $1280 \times 768 \text{ [pixels]}$      |
| Wavelength                                             | $625 \text{ [nm]}$                      |
| Number of elementary holograms                         | $10 \text{ (H)} \times 6 \text{ (V)}$   |
| Number of the emitted rays from an elementary hologram | $161 \times 161$                        |

表 7.2: Specifications of the CPU.

|                      |                                      |
|----------------------|--------------------------------------|
| CPU                  | Core i7 2600k                        |
| Number of cores      | 4                                    |
| Number of threads    | 8                                    |
| Processor clock      | $3.4 \text{ (3.8)} \text{ [GHz]}$    |
| Max Memory Bandwidth | $21 \text{ [GB/s]}$                  |
| Memory               | $8 \text{ [GB]} \text{ (DDR3-1066)}$ |

表 7.3: Calculation time by CPU.

| Number of polygon | Ray tracing process | Light propagation   | Total                |
|-------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 112               | $33.6 \text{ [s]}$  | $847.1 \text{ [s]}$ | $886.2 \text{ [s]}$  |
| 1984              | $562.8 \text{ [s]}$ | $846.2 \text{ [s]}$ | $1414.6 \text{ [s]}$ |

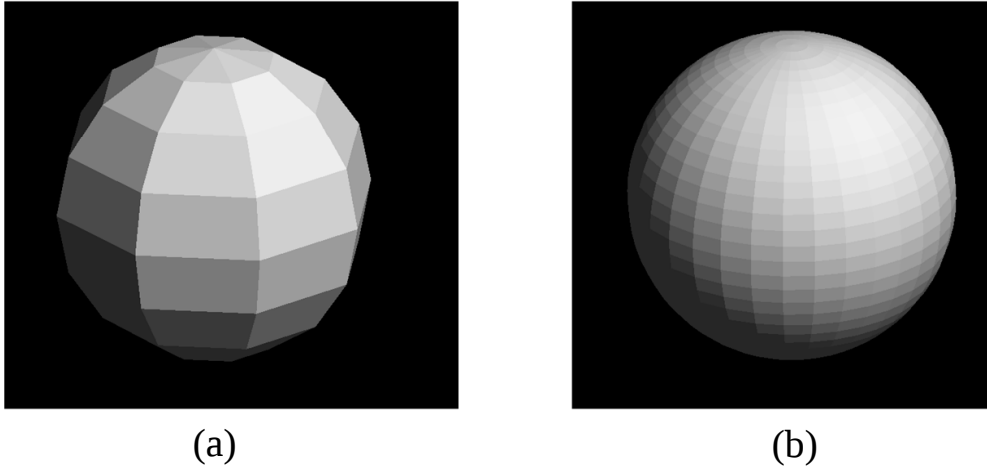


図 7.4: ポリゴンによって構成された球  
The sphere composed of polygons.

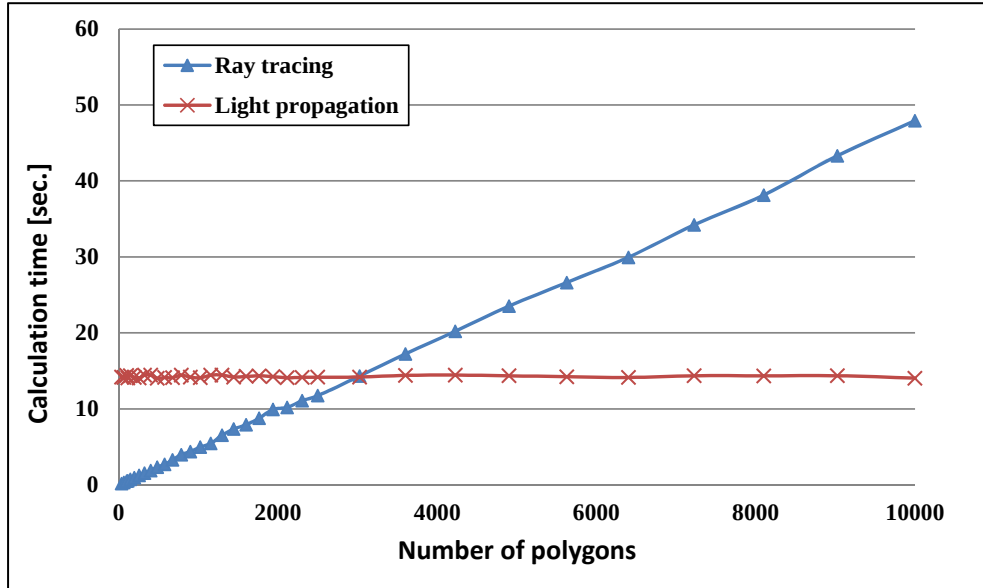


図 7.5: 一枚の要素ホログラムに係る計算時間  
Calculation time of an elementary hologram.

### 7.5.2 GPU による計算時間

次に GPU で CUDA と OptiX を用いて CPU と同じような条件で計算した場合にかかる時間を測定した．表 7.4 に使用した NVIDIA 社製 GeForce GTX TITAN の仕様を載せる．

表 7.5 がポリゴンで構成された球に対する CGH を計算した際にかかった計算時間であり，CPU での計算時間に比べてどれほど高速化されたかをポリゴンの数毎に右側に載せた．表 7.5 より GPU による計算の際にもポリゴン数が増える毎に光線追跡プロセスの計算時間が増えていることが分かる．しかし CPU に比べて比例的に増えるわけではない．これは OptiX が光線追跡法に最適化されており，交差判定に関与しないであろうポリゴンを予め処理対象から省くなどの高速化が図られているためである．一方，光波伝搬計算にかかった計算時間はポリゴン数に依存しない．これは前節でも述べたように，光線の数が一定であるため，光波伝搬計算回数も同じであることによる．光波伝搬計算は GPU を用いたことによりおよそ 250 倍の高速化が実現されている．合計時間で比べてみると，112 枚のポリゴンで構成された球の CGH を作成するのに CPU ではおよそ一時間半かかっていたが，GPU を用いることにより約 4 秒まで高速化された．

次に OptiX の特徴としてプログラマブルな点があり，交差判定対象をポリゴンだけに限らないことにある．そこでなめらかな曲面を表現するのに，仮想物体として数式表現された球を交差判定の対象として計算を行った．その計算時間の結果を表 7.6 に示す．光線追跡プロセスの計算時間は多少早くなっている程度であるが，数式表現された球なので非常になめらかな曲面を再生することが可能である．実際の光学再生の結果については次章に載せる．

従来 CGH において複雑な仮想物体を表現するために文献 [21] など，多くがポリゴンモデルを用いて物体を表現し，様々な手法で光波伝搬計算が行われていた．しかし，より滑らかな複雑な仮想物体作成するためには膨大な数のポリゴンが必要になり，計算過程が複雑になり，かつ膨大な計算時間が必要となっていた．これに対し本研究では滑らかな物体を表現するためには NURBS などの高次曲面表現を利用することで曲面を単一の物体として扱うことが出来る．また点光源群からの光波伝搬計算が物体やポリゴンの数に依存せず一定であるという大きな利点がある．

表 7.4: Specifications of the GPU.

| GPU                    | GeForce GTX TITAN |
|------------------------|-------------------|
| CUDA cores             | 2688              |
| Processor clock        | 837 [MHz]         |
| Video memory interface | 384-bit GDDR5     |
| Max Memory Bandwidth   | 288.4 [GB/s]      |
| Memory                 | 6 [GB]            |

表 7.5: Calculation time by GPU.

|                     | 112 [polygons]   |         | 1984 [polygons]  |         |
|---------------------|------------------|---------|------------------|---------|
|                     | Calculation time | CPU/GPU | Calculation time | CPU/GPU |
| Ray tracing process | 172 [ms]         | 195.4   | 193 [ms]         | 2916.0  |
| Light propagation   | 3368 [ms]        | 251.5   | 3370 [ms]        | 253.6   |
| Total               | 4172 [ms]        | 212.4   | 4349 [ms]        | 329.7   |

表 7.6: Calculation time of a sphere by mathematical presentation.

|                     | Calculation time |
|---------------------|------------------|
| Ray tracing process | 167 [ms]         |
| Light propagation   | 3349 [ms]        |
| Total               | 4142 [ms]        |

## 第 8 章

# 実験

### 8.1 両眼ホログラフィックディスプレイ

本章では本研究の有効性を示すために光学再生実験を行うが、その際に用いる光学系について本節で述べる。本実験において光学系は 6 での説明したフーリエ変換光学系を元にした両眼視が可能なフルカラーホログラフィックディスプレイを用いる。光学系の詳細なパラメータは表 8.1 に示すとおりである。光源として白色 LED を用いており、RGB 各色それぞれを切り替えて発光しているため 3 種類の波長毎に干渉縞を計算する必要がある。波長によって光学系の視野角が変化し、波長が短いほど視野角が狭くなってしまう。表 8.1 には単眼光学系での青色の波長帯における水平方向視野角の理論値を載せた。また各波長毎の最大視野角および最大視野角が得られる視点位置とホ로그램までの距離を表 8.2 に示す。フーリエ変換光学系の視野角の理論値は式 (6.21) より求まり  $9.79$  [degree] となっている。これに対し、同じ SLM を使用した際のフレネルホ로그램の視野角は式 (6.17) より求まり、 $2.78$  [degree] となる。よってフーリエ変換光学系を用いることにより、単眼での視野角が約 3.5 倍拡大される。さらに視点位置に注目してみるとフーリエ変換光学系の方がホ로그램により近い位置で観察することが可能である。

表 8.1: Setup parameters for experiment.

| Spatial light modulator                               |                                   |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Pixel pitch                                           | $9.6 \times 9.6 [\mu\text{m}]$    |
| Number of pixels                                      | $1280 \times 768 [\text{pixels}]$ |
| Refresh rate                                          | 180 [Hz]                          |
| Wave length of LED                                    |                                   |
| Red, Green, Blue                                      | 625, 525, 465 [nm]                |
| Fourier transform optical system                      |                                   |
| Focal length of a lens                                | 100 [mm]                          |
| Ideal viewing angle of monocular optical system       | 9.79 [degree]                     |
| CGH calculation parameters                            |                                   |
| Number of elementary holograms                        | 10 (H) $\times$ 6 (V)             |
| Number of the emitted rays from a elementary hologram | $161 \times 161$                  |

表 8.2: Theoretical value of viewing angles and distance of viewpoint.

|                        | Fresnel hologram | FTOS           |
|------------------------|------------------|----------------|
| Viewing angle of red   | 3.73 [degree]    | 10.74 [degree] |
| Viewing angle of green | 3.13 [degree]    | 10.11 [degree] |
| Viewing angle of blue  | 2.78 [degree]    | 9.79 [degree]  |
| Viewpoint              | 12.7 [cm]        | 7.2 [cm]       |

### 8.1.1 再生像の大きさの測定

まずはじめに，フーリエ変換光学系を用いた再生実験において，仮想物体が想定した正しい大きさで再生されるのかを確認する測定実験を行った．本研究では光線追跡法によって得られた仮想物体の位置に再生するには，6.4 節で述べたフーリエ変換光学系のための補正計算式が必要となる．この補正計算式により，目的の奥行き，大きさに再生するための点光源位置が求まる．式 (6.12) ~ (6.16) の変換式で得られた点光源  $(x_o, y_o, z_o)$  より光波伝搬計算を行い，干渉縞を作成する．式中のレンズと SLM の隙間を示す  $D$  は本研究では 8mm に設定した．

本測定では仮想物体として図 8.1 に示すような定規の役割を持つ物体を作成した．上の細い線は 5mm の幅を持ち，下の太い線は 1cm の幅を持つように設定した．この仮想物体を本手法によりホログラム面より 50cm 奥に表示するような CGH を作成し，ひとつのフーリエ変換光学系にて再生した．撮影にはデジタルカメラを用い，ホログラム後方 50cm の位置に実物の定規を配置して，そちらにカメラの焦点を合わせた．撮影した写真を図 8.2 に示す．まず図 8.2 より再生像に観察したい直接像のみが表示されていることから，6 章で述べた共役像の除去や 0 次光の除去が正しく行われていることが分かる．また図 8.2(a) より，実物の定規と再生像である定規両方に焦点があっていることが確認できる．よってフーリエ変換光学系のための補正計算により仮想物体が想定した正しい位置に再生可能であることがわかる．さらに図 8.2(b) に図 8.2(a) の一部の拡大画像を示す．図 8.2(b) より再生像の定規のメモリの大きさが実物体の定規のメモリとほぼ一致していることが分かる．よってこの測定結果より仮想物体の大きさについても補正計算により正しい再生像が得られていることが分かる．

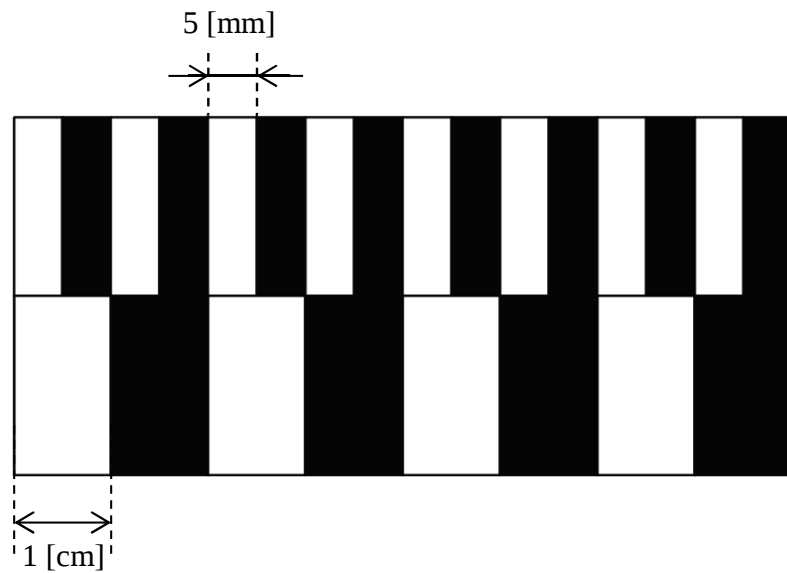


図 8.1: 定規の仮想物体  
Virtual object of a scale.

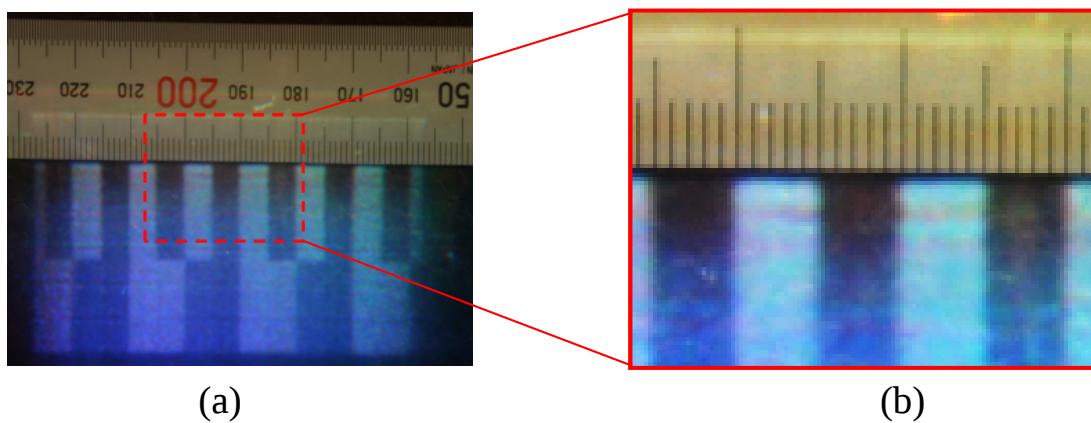


図 8.2: 視野角の測定  
Measurement of the size of reconstructed images at -50 [cm].

## 8.2 光学再生実験

本節より光学再生実験の結果を示す．5 章で示した各種レンダリング手法について各々実装が正しく行われているか検証を行う．

### 8.2.1 隠面処理

まず上下左右視差に対応した隠面処理が正しく行われているかどうかを確認する光学再生実験を行った．図 8.3 に本実験における仮想物体の配置図を示す．ホログラムの後方 400 mm に立方体を配し，さらにその奥 800 mm の位置にチェッカーボードを置いた．このチェッカーボードと立方体は完全散乱表面で構成されており，ある一点の点光源を照明光として用いている．

一つのフーリエ変換光学系において左，真中，右の 3 視点より撮影した写真を図 8.4 に載せる．本実験で用いた表示システムでは視域が非常に狭いため，視点は少ししか動かすことが出来ず前方の立方体には何の変化もないように感じられる．しかし，背景のチェッカーボードと立方体との関係を観察すると，そのチェッカー模様の位置がずれていることが分かる．また正しく隠面処理が行われているため，立方体を透けて後ろのチェッカーボードが見えたりすることなく観察できる．よって左から撮影された図 8.4(a) では立方体を回りこんで，その後ろの部分を観察できている．これらの結果から本手法により運動視差に対応したフルパララックス CGH が正しく作成されたことが分かる．

また前方の立方体はその面によって色の濃さが異なることが分かる．これは照明光源に対して面の向きが異なるため，光が強く当たる面と弱く当たる面が正しく表現されているためである．しかしこれだけではシェーディングの効果が分かりづらいので，シェーディングについての光学再生実験を行った結果を次節にて示す．

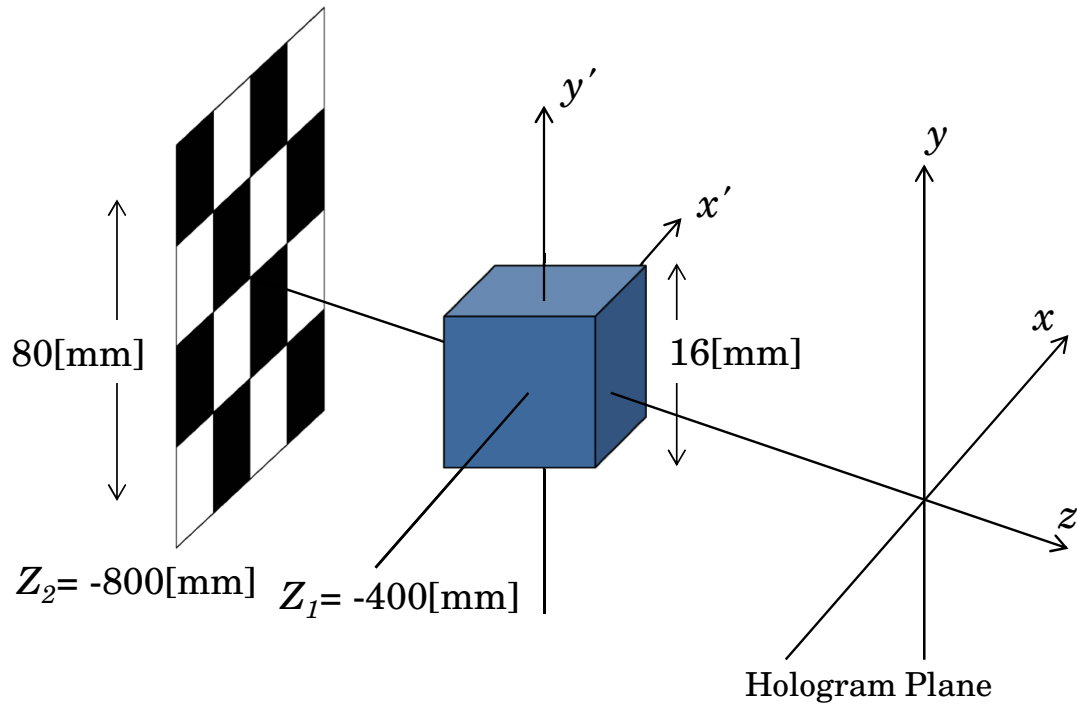


図 8.3: 隠面処理実験の仮想物体配置

Geometry of virtual object in the hidden surface removal experiment.

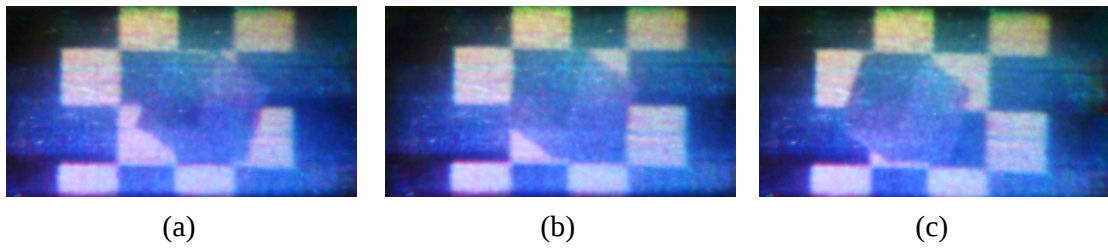


図 8.4: 隠面処理の確認

Confirmation of the hidden surface removal.

### 8.2.2 シェーディング

次にシェーディング処理により再生像に物体の材質などによる変化が現れるかどうかを確認する光学再生実験を行った．まず仮想物体の配置として図 8.5 のように，チェッカーボードをホログラムの奥 310 mm の位置に置いた．そして直径 20 mm の球をチェッカーボードに接するように奥行き 300mm の位置に配置した．この球に様々な反射特性を付与することで，再生像にどのような変化が現れるかを観察した．これらの仮想物体は点光源  $I_0(-0.2, 0.4, 0)[m]$  より照明されているように設定した．

図 8.6 が様々な反射特性を持つ球の再生像である．図 8.6(a) の球は環境光反射率のみを持っているため，球全体が同一の輝度値で観察できる．そのため球の奥行き感が感じられず，ただチェッカーボード上に円状の模様が書かれているだけにも見えてしまう．対して図 8.6(b) では図 8.6(a) に球によって照明光源からの光が遮られてできる影を追加した．この処理により，球とチェッカーボードの位置関係がわかりやすくなっている．

図 8.6(c) では卓球のピンポン球のようなプラスチック製の球を想定して仮想物体を作成した．よって反射特性を与える際に Phong の反射モデルを用いている．これによりプラスチック特有の鈍いハイライトが球の左上にできていることが確認できる．また面の向きと照明光源位置によって決定される拡散反射率も付与されているため，照明の当たらない右下側が暗くなっていることが確認できる．図 8.6(c) の球は黒真珠のような滑らかな球である．Cook-Torrance の反射モデルによって鏡面反射率を求めているので，金属のような強く鋭いハイライトが球の左上に現れていることが確認できる．これらの結果から提案手法により正しく反射特性が与えられシェーディング表現が CGH に実装されていることが確認できた．

物体の材質の表現には”色”という要素は非常に重要である．そこで，本表示システムによる色の再現性について検証した．仮想物体として図 8.7(a),(b) のような標準 16 色と 12 色のカラーチャートを作成した．図 8.7(c)(d) がそのカラーチャートを CGH として作成し再生した画像である．それぞれ仮想物体に近い色を出せているように感じる．しかし全体的に緑の光が強く，そのため薄水色などが緑に近いような色となっている．この原因として白色 LED の RGB 各色の強度バランスが一定ではなく緑が強くなっていることが挙げられる．また CGH 計算の際の各色の波長が正しくない可能性がある．これらの色の再現についてはさらに調節が必要である．

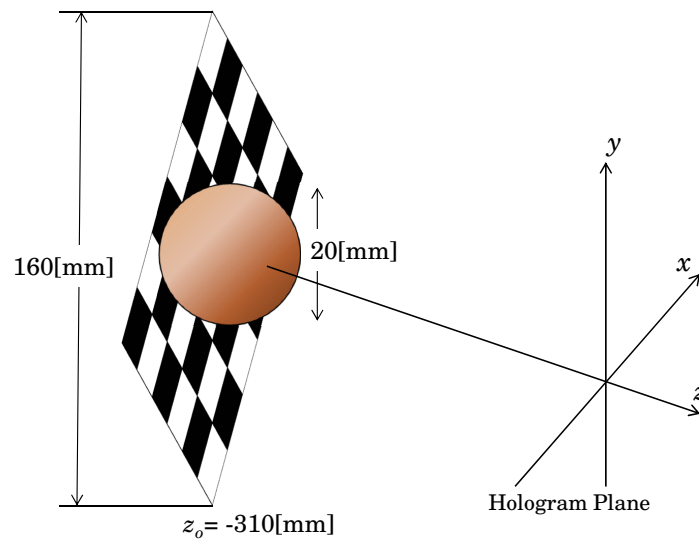
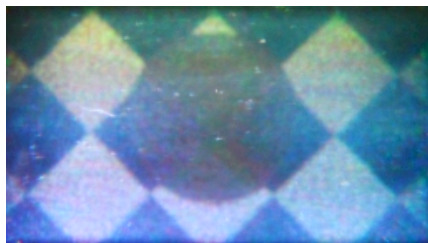
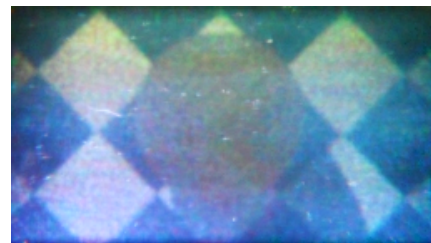


図 8.5: シェーディング再生実験における仮想物体配置

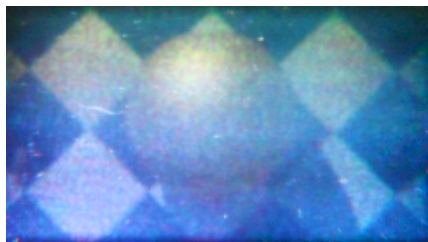
Geometry of optical reconstruction for shading.



(a)



(b)



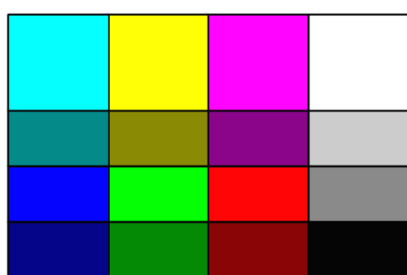
(c)



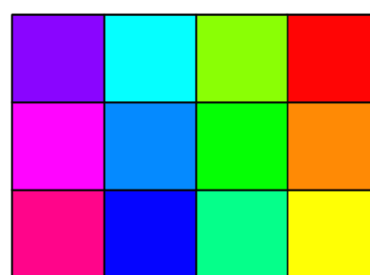
(d)

図 8.6: シェーディング

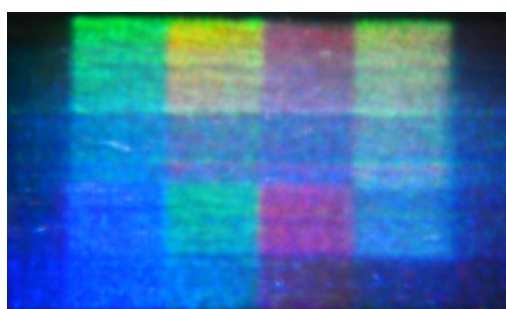
Shading.



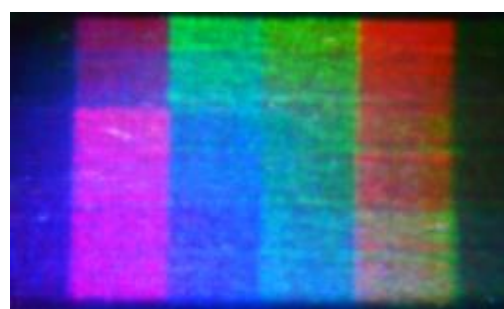
(a)



(b)



(c)



(d)

図 8.7: 色調再現  
Reproduction of the color chart.

### 8.2.3 反射表現

次に 5.6 節で説明した CGH のための反射表現を実装して CGH を作成し、その光学再生実験を行った。CGH において反射像を表現する手法はいくつか提案されていたが、多くは反射像の輝度値のみを再現したものであった。対して本手法では反射像の奥行きについても考慮した手法である。図 8.8 に仮想物体の配置図を示す。まず白黒のチェッカーボードがホログラム奥 2000 mm の位置に配置されている。その前方ホログラムから 25 cm の位置に幅 2 mm のフレームを持った鏡が配置されている。図 8.8 からは分かりづらいが、この鏡は  $y$  軸を起点にホログラム面に対し 45 度回転し、 $-x$  方向を向いている。そして  $z$  軸上にある視点から鏡の正反射方向  $x = -750$  mm の位置に紫と黄色のチェッカーボードを配置した。鏡が完全鏡面反射であり、反射表現が正しく実装されていれば、本来視界にはいない紫と黄色のチェッカーボードを鏡を通して観察することが出来る。

図 8.9 に作成した CGH をカメラの焦点距離を変えて撮影したものを載せる。図 8.9(a) はホログラム奥  $z = -250$  mm に焦点を合わせて撮影したものである。鏡が配置されている位置であるため、鏡の周囲にある青いフレームははっきりと写っている。対して、鏡に写り込んだ像や、後ろのチェッカーボードはぼやけて見える。

図 8.9(b) がカメラの焦点を  $z = -1000$  mm に合わせて撮影した写真である。図 8.9(b) では鏡に写り込んだ紫と黄色のチェッカーボードがはっきりと観察できる。このことから本手法では反射物体の表現において従来あったような反射物体の表面に反射した先の輝度値をはりつける手法とは異なり、反射像の奥行きも正しく再現されていることが分かる。

図 8.9(c) はさらに奥の  $z = -2000$  mm にあるチェッカーボードに焦点を合わせて撮影した。用いたカメラのレンズの特性上、図 8.9(b) との違いが分かりづらいが白黒のチェッカーボードの境界線がはっきりと出ていることが分かる。よってホログラフィの特徴である奥行きが反射表現においても正しく表現されていることが確認できた。

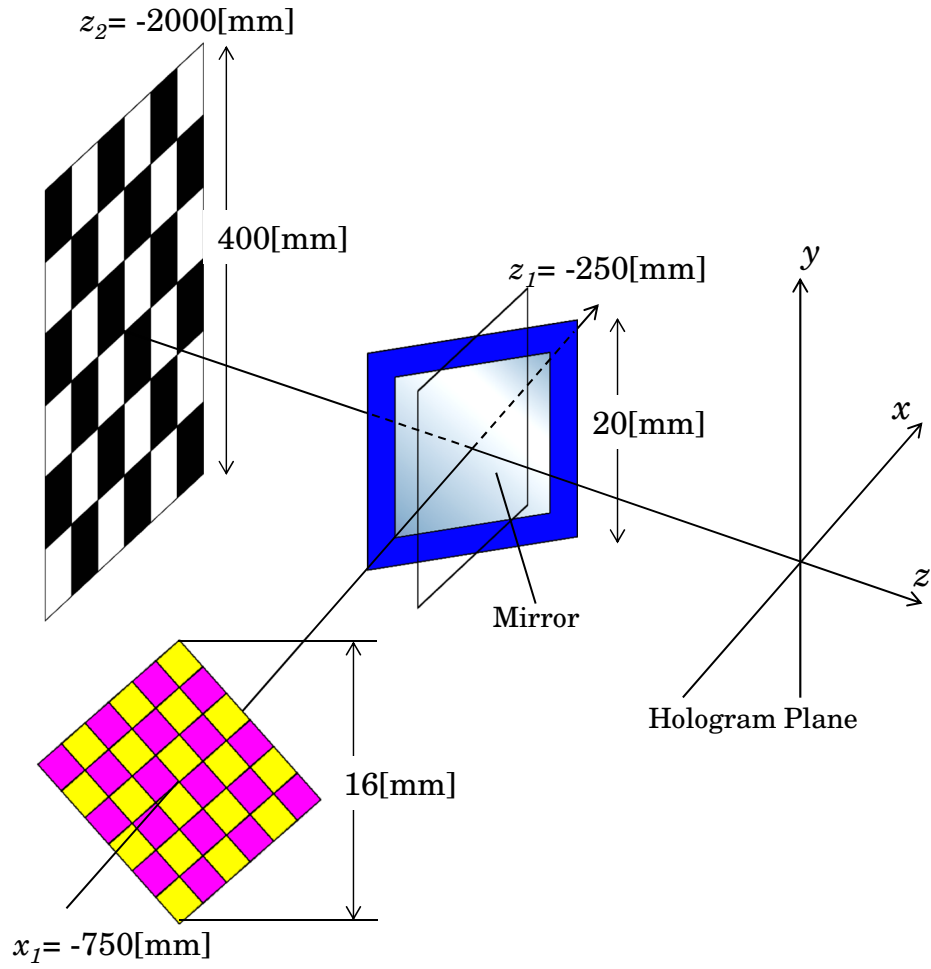


図 8.8: 完全鏡面物体の仮想物体配置  
Geometry of the perfect specular object.

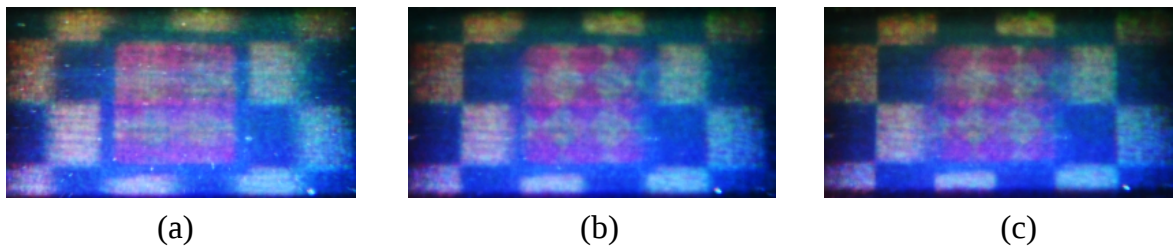


図 8.9: 完全鏡面物体の再生像  
Reconstructed images of each distance.

### 8.2.4 屈折表現

本節では屈折表現が必要な透過物体の CGH を作成し，その光学再生実験について述べる．図 8.10 に本実験における仮想物体配置を載せる．透過物体として球を用意し，球の屈折率を変化させることで後ろに配置されたチェッカーボードの見え方がどのように変わるかを観察した．5.7 節で述べたように本手法ではスネルの法則を用いて光線を曲げているので，屈折率によって像が拡大されたり，歪んで縮小されて見えたりするはずである．透過物体として，空気（屈折率 1.000292），水（屈折率 1.33），ガラス（屈折率 1.43）を選んだ．また水，ガラスについては光の減衰係数についても考慮した．

図 8.11 が光学再生実験によって得られた再生像の写真である．図 8.11(a) は球を空気とした際の再生像の様子である．屈折率は極めて 1 に近いので，光線が曲がることはほとんどなく後ろのチェッカー模様がそのままの形で観察できる．また光の減衰も存在しないので，明るさについてもそのまま観察することが出来る．

図 8.11(b) は水で出来た球の再生像である．屈折率が大きいため，後ろのチェッカーへの光線が球の表面で大きく屈折し，拡大した像を表示する．また水中を光が通過すると減衰するので，少し拡大された像が暗くなっていることが確認できる．さらに照明光源からチェッカーへと届く光は球を通すことで減衰し，薄い影となって現れている．

図 8.11(c) ~ (e) はガラスで出来た球をそれぞれ左，中央，右に移動させて撮影した画像である．ガラスの屈折率は水よりもさらに大きいため，ガラス表面で大きく屈折している．ガラスほど大きな屈折率を持つ透過物体では，透過像は拡大を通り越し反転して縮小されて見える．図 8.11(c) ~ (e) を見て分かるように球が移動することで，異なる位置のチェッカー模様が透過されて見えていることがわかる．また本実験で用いたガラスには青の色を減衰するように減衰係数を設定した．そのため，照明光源の赤と青は減衰せずに透過するため，ガラス球が黄色く見える．さらにチェッカーボードへの照明光もガラス球を通るため，黄色い影ができています．これらの結果より提案手法により正しく透過物体による屈折表現が実装されていることが示された．

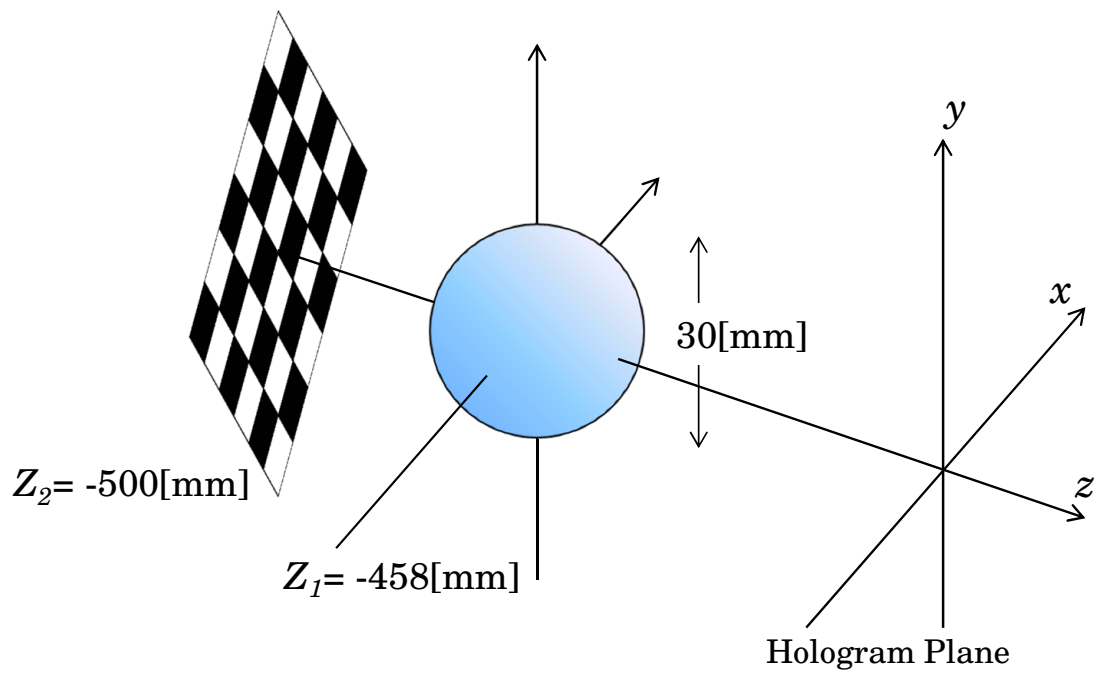


図 8.10: 透過物体の仮想物体配置  
Geometry of the transparent object.

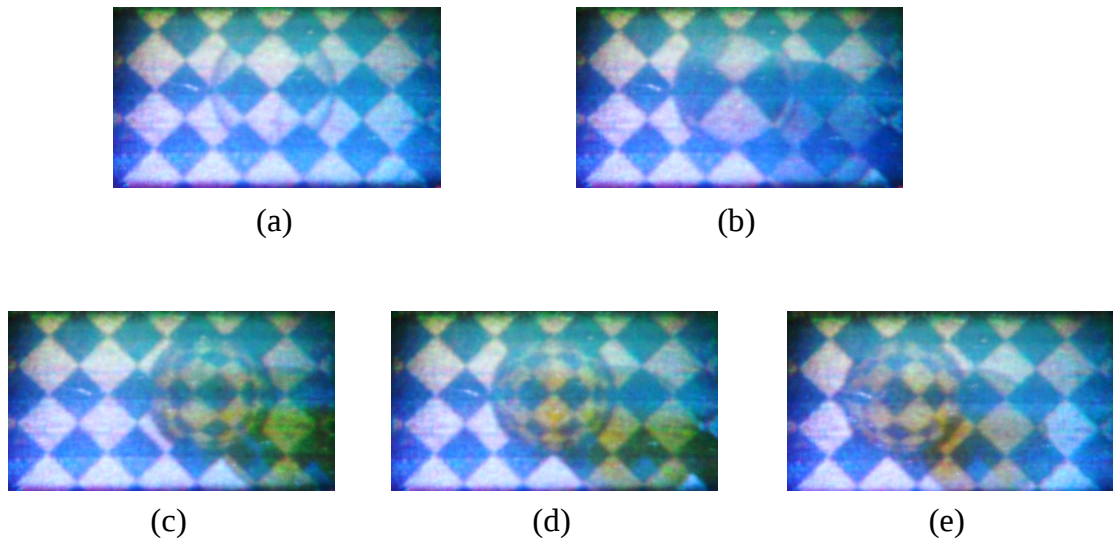


図 8.11: 屈折率の異なる透過物体の再生像  
Reconstructed images of each refractive index.

### 8.3 光学再生実験 - 応用 -

8.2 節の光学再生実験によって本研究によってリアリスティックな再生像を表現するための各種レンダリング技法が正しく実装されていることが示された．本節における光学再生実験ではそれらレンダリング技法を組み合わせることで複雑なシーンの CGH 作成を行った．従来提案されてきた CGH のためのレンダリング手法はそれぞれの透過，屈折といった表現にのみ特化しており，組み合わせる使用は困難であった．これに対し，本手法では多くの表現を同時に実装することが可能であることが大きな特長となっている．

#### 8.3.1 複雑なシーンの表現

複雑なシーンの CGH の光学再生実験として図 8.12 のような仮想物体を作成した．図 8.12 ではチェッカーボードの上に 2 つの球があり，左の球は完全鏡面であるため金属のように周囲の像を反射する．一方右にある球はガラス球を想定しているため，周囲の像が球を透過，屈折して観察できる．またこれら仮想物体の照明光源として緑と赤の点光源を用いた．このシーンを表現するには，隠面処理，シェーディング，反射，屈折，影付けといった多くのレンダリング技法を同時に実装する必要がある．

このシーンの CGH を本手法を用いて作成し，光学再生実験を行った．図 8.13 にその再生像の写真を載せる．図 8.13 より，図 8.12 に示した CG による仮想物体と同じような結果が得られていることが分かる．CG とは異なりホログラフィであるため，視聴者が焦点位置を変化させることで像にピントが合ったり，ぼけたりする．それぞれの物体に注目してみると，左の球はしっかりと球の下半分側にチェッカーボードの模様が反射像として観察できる．その反射像は球の丸みに応じてゆがんでいることが確認できる．また球上部には緑と赤の照明光源それぞれのハイライトが生じている．この 2 つの効果により，球が金属のような鏡面を持つということが感じられる．対して右の球は透過物体であり，光線が屈折するため像が反転して観察できる．チェッカーボード上には 2 つの球によって作成された，緑と赤のうっすらとした影が確認できる．

このように光線追跡法を用いた本研究による手法では一度の光線追跡アルゴリズムで多くのレンダリング表現を実装することが可能であり，再生像のリアリティの向上を図ることができる．

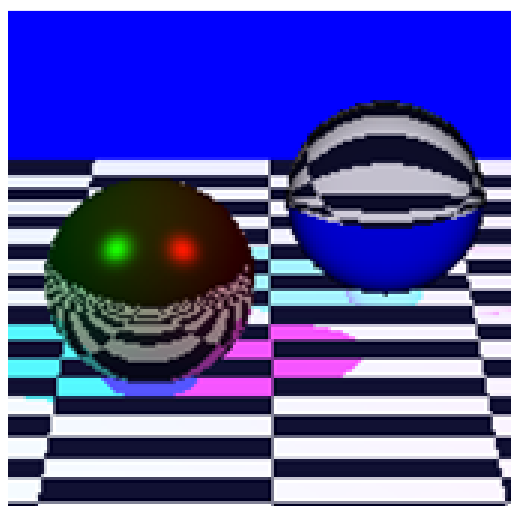


図 8.12: 透過物体の仮想物体配置  
Geometry of the transparent object.

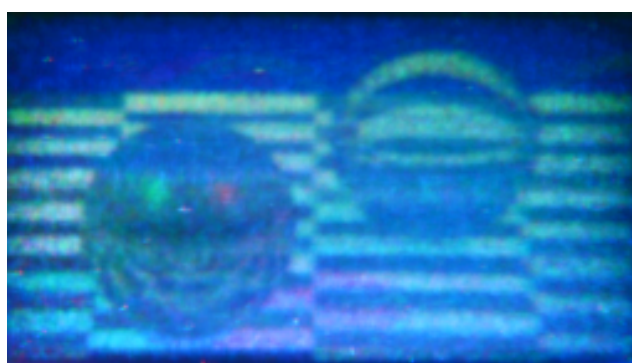


図 8.13: 屈折率の異なる透過物体の再生像  
Reconstructed images of each refractive index.

### 8.3.2 両眼視差の実装

これまでの光学再生実験の再生像は片眼のフーリエ変換光学系で表示した CGH を撮影したものである．しかし本実験において用いた表示システムは 6.6 節で述べたように両眼視に対応している．また両眼視用に 2 対ある左右のフーリエ変換光学系は傾けて配置されており，そのため左右それぞれの視点一から観察できる視差を持った CGH を作成する必要がある．左右の光学系に共通な仮想物体を用意し，6.6.2 節にある座標変換行列により左右それぞれの光学系座標で示された点光源を得て，CGH を作成した．この視差補正計算によって得られた CGH により視差のある再生像が得られることを光学再生実験により示す．

図 8.14 に両眼の光学系配置と，両眼に共通な仮想物体の位置を示す．左右の光学系の光軸はワールド座標系  $(x_w, y_w, z_w)$  の原点より， $z_w = -800$  mm の位置で交わる．その交点位置に完全鏡面を持つ金属球を配置した．また  $z_w$  軸上， $z_w = -400$  mm の位置にガラス球を配置し，これらの像を左右の光学系より観察した際にどのような像が再生されるかを確認する．

図 8.15(a) が左眼の光学系より撮影した写真であり，図 8.15(b) が右目光学系より撮影した写真である．2 つの球はワールド座標系の  $z_w$  軸上に配置されているため，左右の光学系から観察した球の位置関係は対照的なものとなる．後ろに配置された金属球は 2 つの光学系の光軸が交わる位置にあるので，左右どちらの光学系においても中心に再生される．対して前方のガラス球は図 8.14 のように光軸とはずれた位置に配置されているので，図 8.15(a) のように左眼で観察した際には中心よりも右に，図 8.15(b) のように右目で観察した際には中心よりも左に見える．またチェッカーボードにも注目してみると，チェッカー模様の境界線の方が逆になっていることが分かる．これらの結果より，6.6.2 節で示した手法により左右の光学系に正しく視差が付与されたことが確認された．こうして視差の付与された CGH を両眼で視聴することにより，単眼に比べてより自然な 3 次元知覚が可能となる．

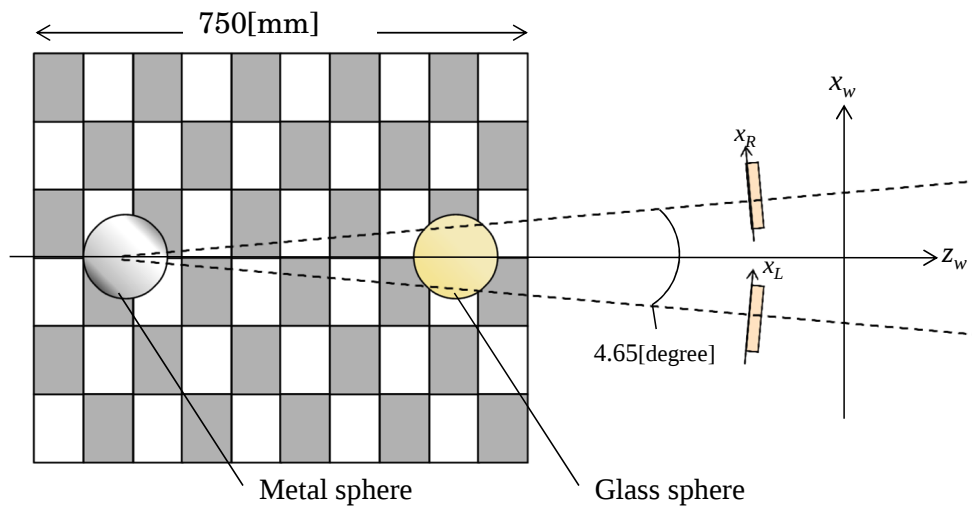
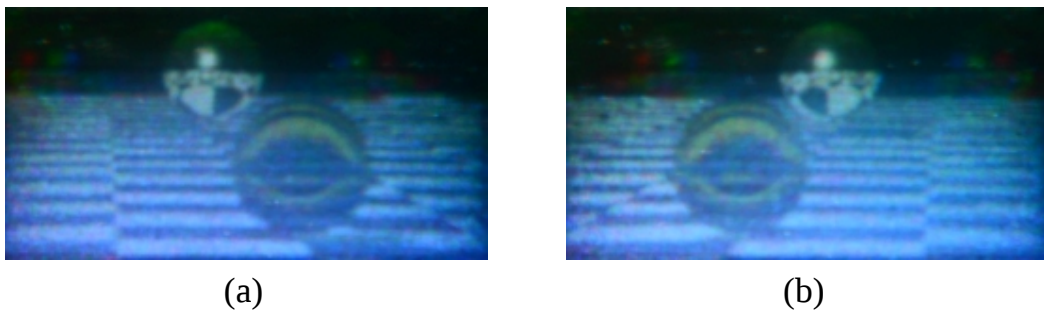


図 8.14: 両眼の光学系と仮想物体配置

Geometry of binocular optical systems and virtual objects.



(a)

(b)

図 8.15: 左右の光学再生像

Right and left reconstructed images.

### 8.3.3 CGH 動画の生成

提案手法によって CGH による動画の生成を行った．図 8.16 にあるように，チェッカーボード上に 3 個の球を配置し，八の字に球が動く動画である．球はそれぞれピンポン球のようなプラスチック，金属球，緑色のガラス球として設定した．動画は 360 枚のフレームで構成されており，球の八の字の動きを 360 分割してそれぞれの位置で CGH を作成した．動画は 30 fps で再生したため，12 秒の動画となっている．また本実験では一つのフーリエ変換光学系において動画を再生し，光学再生像を撮影した．

図 8.17～8.19 に動画を撮影した写真を載せる．全ての写真は視点に近い前方を通る球に焦点を合わせて撮影した．ここで図 8.19 に注目する．図 8.19 は完全鏡面である表面を持つ金属球が前方を通過した際に撮影した光学再生像である．完全鏡面を持つため球の下半分はチェッカーボードを映し込んでいる．図 8.17(a)～(c) を見ると，その反射像の映り込み方がそれぞれ異なっていることが分かる．これは金属球の位置が異なるため，光線追跡法により球の表面における光線の反射方向が変化し，異なる部分の輝度値を得ているためである．また図 8.18(a)～8.18(c) では分かりづらいが，透過物体であるガラス球を通して見える像も球の位置によって変化する．また図 8.20 にカメラの焦点距離を変えて撮影した写真を載せた．図 8.20(a), (c) は前を通る球に焦点を合わせ、図 8.20(b), (d) は後ろにある球に焦点を合わせてある．図 8.20 中の金属球の反射像や球の輪郭がそれぞればやけていることから、観察者は焦点調節により奥行きを感じることが可能である。

本実験において CGH を計算するのに要した時間について述べる．表 8.3 に 1 フレームごとの計算時間と，動画全体に要した計算時間を示す．GPU は 7.5.2 節のものと同じものを使用した．現状，RGB3 色の干渉縞を一から求めるのにかった計算時間は平均して約 10 秒程度である．360 フレームの動画 12 秒を作成するのに約 1 時間を要した．Setting として書かれている部分の処理内容は 7.4 節で説明した仮想物体配置や CPU・GPU 内のメモリ確保などの初期設定を行っている．表 8.3 より光線追跡の処理に比べて，その後の光波伝搬計算にかかる時間が大きいことが分かる．光線追跡プロセスでは RGB3 色の処理を同時に行えるのに対して，光波伝搬計算は波長ごとに計算する必要があるため単色に比べ 3 倍近い計算時間がかかってしまう．本実験においては片眼のみの動画生成時間を示しているが，両眼視用の動画を生成する場合にはこの約 2 倍の計算時間が必要となる．将来的にリアルタイムでの CGH 動画を作成するには光波伝搬計算部分を特に高速化させる必要がある．そこで 2.2.3 節で紹介したような Look-up テーブルを使用する手法 [46, 47] や，GPU 計算に向けた差分法 [51, 52] を用いて高速化を検討している．

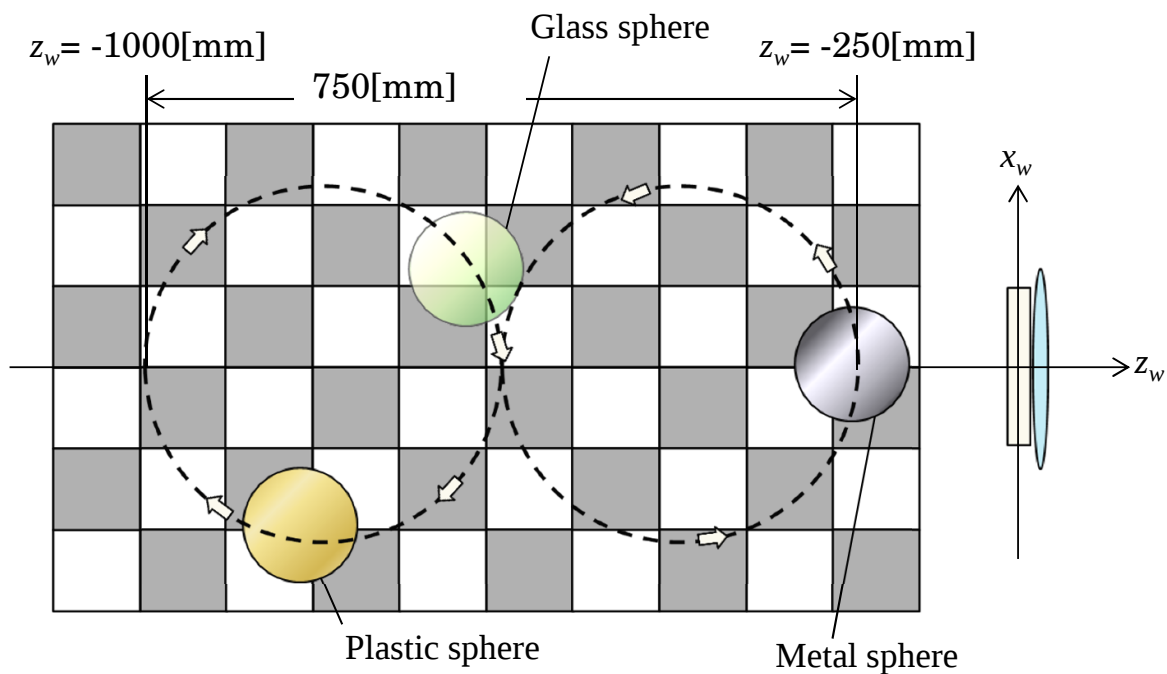


図 8.16: CGH 動画の仮想物体配置

Geometry of the CGH movie.

表 8.3: Calculation time of CGH movie.

|                     | 1 [frame]  | 360 [frame]           |
|---------------------|------------|-----------------------|
| Setting             | 1169 [ms]  | 420 [s]               |
| Ray tracing process | 185 [ms]   | 66.6 [s]              |
| Light propagation   | 8491 [ms]  | 3056 [s]              |
| Total               | 10459 [ms] | 3542.6[s] = 59 [min.] |

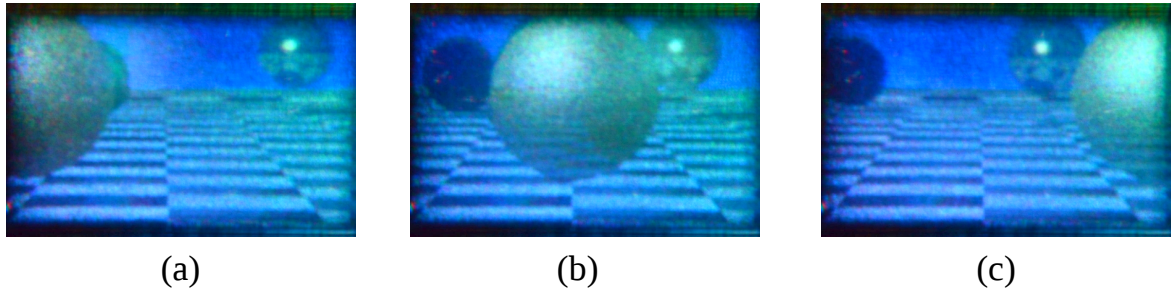


図 8.17: プラスチック球の光学再生像  
Reconstructed images of a plastic sphere.

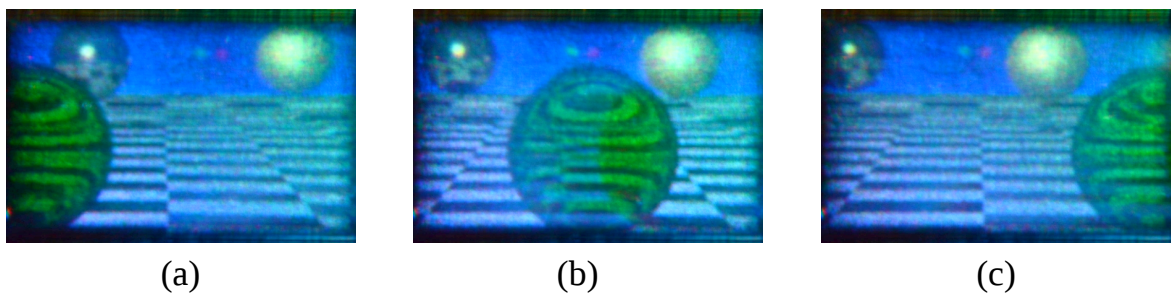


図 8.18: ガラス球の光学再生像  
Reconstructed images of a glass sphere.

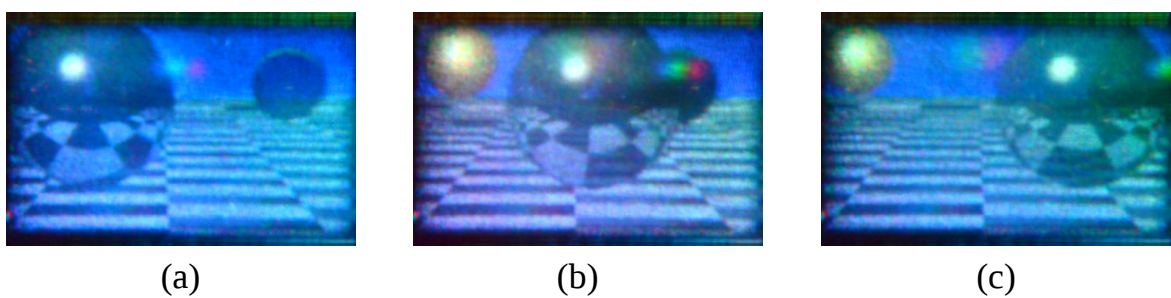
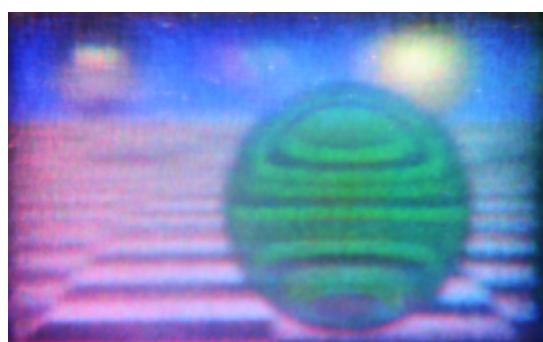
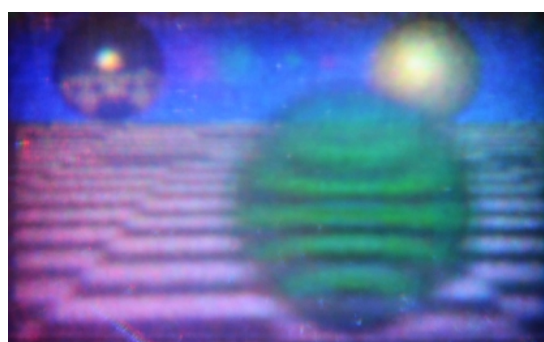


図 8.19: 金属球の光学再生像  
Reconstructed images of a metal sphere.



(a)



(b)



(c)



(d)

図 8.20: 再生像における奥行きによる焦点ボケ

Blurring of reconstructed images by the difference of the depth.

## 第 9 章

# 結論

### 9.1 まとめ

本論文では CGH においてリアリティの高い再生像を表示することを目的とした研究について述べた．まず CGH に対して材質および表面粗さの違いによる多様な反射特性を与えることを目的として，FDTD 方を用いた CGH 作成法を提案した．本手法では FDTD 法を用いているため，様々な材質及び表面構造からの反射光分布を得ることが出来る．FDTD 解析において用いた表面構造は実物体の表面を AFM を用いて測定することで作成された．計算機シミュレーションの結果，各材質における表面粗さと正反射率の関係を求め，各材質毎にその違いが本手法によって現れていることを確認した．また光学再生実験により，表面粗さが異なることで再生された三次元像の反射特性にも影響が現れることが確認された．これらのことから提案手法により，表面粗さおよび材質の違いによる反射特性の変化を本手法によって表現することに成功した．

本研究ではリアリティのある物体表現のための隠面処理および各種レンダリング表現を行う CGH 計算法を提案した．本研究では光線追跡法を用いることで多くのレンダリング表現技法を同時に CGH へと実装することが可能である．CGH において隠面処理を実装するために，ホログラム面を要素ホログラムに分割し，各要素ホログラムから光線追跡法により可視な仮想物体の点光源群をそれぞれ用意することで上下左右の視差に対応した CGH を作成した．また物体の材質表現に重要なシェーディング，影付けといった表現は光線追跡プロセスの中で，光線の角度や視点位置，表面の角度，照明光源の位置などを利用して点光源の光強度を変化させることで反射特性を与えて表現した．完全鏡面をもつ鏡や金属の表面上で発生する反射や，透過物体において生じる屈折は飛ばした光線を反射方向や屈折方向へとさらに飛ばして，合計の光路長を考慮することで表現した．提案手法に

よって表現された反射や屈折では従来物体表面に見える反射像などの輝度値のみを再現していた手法とは異なり，光路長を考慮したことで反射像などの奥行きも正確に再現することに成功している．これらのレンダリング表現を同一の手法によって同時に実装する CGH 計算はこれまでになく，透過物体や反射物体が存在する複雑なシーンを表現することは難しかった．これに対し本研究による計算手法は多くの現象を表現することの出来る汎用的な手法であり，CGH 計算の主流となることが期待される．

表示デバイスとして SLM を用いる電子ホログラフィではその画素サイズの大きさから回折角が狭く視野が狭くなってしまう．また単色でのホログラフィ再生ではせっかくの高いリアリティの CGH 作成を行っても，その効果を感じるのが難しい．そこで本研究では表示デバイスとしてフーリエ変換光学系を元にした両眼視フルカラーホログラフィックディスプレイを用いた．フーリエ変換光学系では通常の点光源計算では，元の仮想物体を構成する点光源のあった位置と再生される像の位置が異なり，歪んだ像が再生されてしまう．そこで光線追跡法で求めた仮想物体の位置に直接像を再生するために，CGH の光波伝搬に用いる点光源群の座標位置の補正計算式を導出した．フーリエ変換光学系を用いることでフレネルホログラムに比べて単眼での視野角が約 3.5 倍を得ることが出来る．また共役像や 0 次光を除去することにより再生像のみを観察することが可能である．フーリエ変換光学系では視野が広がるが視域が狭いため両眼による観察ができない．本研究で用いた表示デバイスではフーリエ変換光学系を両眼用に 2 体用意してある．2 体のフーリエ変換光学系は視差がつくように傾けて配置されているため，そこに表示する CGH にもそれぞれ左右からの視差を付ける必要があった．そこで左右の光学系に共通した仮想物体をそれぞれの光学系を中心とした座標系へと変換して計算することで，異なる視点からの CGH 作成を可能にした．また CGH の再生像をフルカラー化するために白色 LED を用いており，白色 LED の RGB 各色の発光タイミングと，各波長で計算された CGH の表示タイミングを同期し高速に切り替える時分割表示方式を用いた．

提案手法により CGH に各種レンダリング表現が正しく実装されているか，またフーリエ変換光学系のための補正計算式により正しい奥行き・大きさに表示するかを確認するために光学再生実験を行った．まず仮想物体として定規の役割を持つ CGH を作成し，実物の定規と比較を行った．その結果，再生像の大きさ・奥行き共に実物の定規とほぼ一致していることが確認され，フーリエ変換光学系のための補正計算式が正しいことが示された．

次に各種レンダリング表現が行われているか検証を行う光学再生実験を行い，隠面処理，影付け，シェーディング，反射，屈折といった現象が正しく実装されていることを確認した．特に反射・屈折表現については従来でもこれといった計算法が確立されておらず，

本手法が反射像や透過物体を通して屈折した像の輝度値だけでなく奥行き表現についても成功している．以上のレンダリング表現技法を組み合わせることで複雑なシーンによる CGH 動画を作成を行った．CGH 計算には GPU による並列計算を用いた高速化がなされており，1 フレームを作成するのに約 10 秒ほどかかる．現状，CGH における他の透過物体の表現手法では計算に数十時間かかることや，適用できない問題があることを踏まえると，本研究による CGH 計算法は汎用的でかつ高速であるという優れたものとなっている．

## 9.2 今後の展望

本研究では，光線追跡法を用いることで上下左右の視差を持ち，反射や屈折，物体の陰影処理も同時に実装できる CGH 計算法を開発した．本研究による CGH の再生像は CGH 研究分野のレンダリング技術において高いクオリティを示しているが，実物体と見間違ふほどの高いリアリティを持つ CGH 作成に向けての課題はいくつかあげられる．

まずひとつはさらなる計算の高速化である．最終的な目標である CGH のリアルタイム計算には秒間 60 フレーム程度が必要となる．単眼に絞っても，現在 1 フレームに 10 秒計算を要しているため 600 倍の高速化が求められる．よって将来の GPU の発展に頼るだけでなく，計算アルゴリズムに手を加えて工夫することが求められる．現在の計算コードは単純な並列化を施しているだけであり，さらなる最適化による高速化が見込まれる．また点光源群からの光波計算の高速計算アルゴリズムは数多く提案されているため，それらの適用の検討が必要となる．

また再生像のリアリティの向上のために必要な表現はまだ数多く存在する．代表的なものとしてまず大きさを持った照明光源によってできるぼやけた半影表現がある．また物体は照明光源のみだけでなく，周囲の物体から反射した光によっても照らされる．このような表現は光線追跡法では不可能であり，大域照明モデルが必要となる．そこでフォトンマップ法などと組み合わせることでよりフォトリアリスティックな再生像を表示する CGH の作成法を検討する．

リアリティの高い 3 次元像を実現するにあたって，再生像の評価法は重要な課題となる．評価項目として，奥行きの知覚や，材質の質感，人間の疲労試験など様々なものがあげられるが本研究において特に重要なのは画質の鮮明さである．本研究はホログラフィックステレオグラムと同様に，ホログラムを要素ホログラム単位に分割して視点ごとに干渉縞を計算している．このような手法では要素ホログラムのサイズ，解像度によって再生像の解像度に影響が出る可能性がある．よって再生像の解像度を評価する手法を確立し，提案手法における要素ホログラムサイズなどを最適化していく必要がある．

本研究によって作成された CGH は高いリアリティを持つ再生像を表示することが出来るようになり、ホログラフィックディスプレイの実用化への目処がみえるような段階に入った。また本表示システムはハーフミラーを通して実世界の物体と CGH によって再生された 3 次元像を同時に試聴することが可能である。よって AR (Argumented reality : 拡張現実) など多岐にわたる応用可能性が考えられる。また提案した光線追跡法を用いた CGH 計算手法はフーリエ変換光学系だけではなく、様々な光学システムへと応用可能な柔軟性を持つため、他の視域・視野拡大手法や 360 度観察可能な円筒状のホログラムなどにも応用可能である。よって本研究が将来の CGH 計算の主流となることを期待している。

## 謝辞

本論文をまとめるに当たり，本学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻情報メディア学講座メディア創生学研究室坂本雄児准教授には，本研究の機会を与えてくださり，学士から長年ご指導していただきました．ここに深く感謝の意を表します．本学情報科学研究科メディアネットワーク専攻言語メディア学研究室荒木健治教授，情報メディア環境学研究室山本強教授，メディアダイナミクス研究室長谷山美紀教授には副指導教員を務めて頂きました．深く感謝致します．本学情報科学研究科メディアネットワーク専攻の先生方には，学士および修士の講義にて大変お世話になりました．深く感謝致します．学生生活においてあらゆる面でご指導くださいました，本研究室姜錫助教に深く感謝致します．

また，本学情報科学研究科情報エレクトロニクス専攻先端エレクトロニクス講座ナノエレクトロニクス研究室末岡和久教授には AFM の貸出や使用法などについて多大な御助力を頂きました．心より感謝致します．

そして，研究室配属後から多数のご指導くださいました先輩方，ともに助言し合い学んできた同輩・後輩の皆さんに深く感謝致します．

## 参考文献

- [1] 臨場感コミュニケーション産学官フォーラム, <http://www.urcf.jp/>
- [2] 尾上, 池内, 羽倉 (編), “3次元映像ハンドブック”, 朝倉書店 (2006).
- [3] T. Motoki, I. Yuyama, H. Isono and S. Komiyama, “Research on 3-D Television System at NHK”, ABU Tecyh. Rev., 150, pp. 14-18 (1991).
- [4] H. Isono and M. Yasuda, “Flicker-Free Field Sequential Stereo-scopic TV system and Measurement of Human Depth Perception”, SMPTE J., Vol. 99-2, pp. 138-141 (1990).
- [5] D. J. Sadin, *et al.*, “Computer-generated barrier-strip autostereography”, Proc. SPIE, Vol. **1083**, Three-Dimensional Visualization and Display Technologies, Scott S. Fisher; Woodrow E. Robbins; Eds., pp. 65-75 (1989).
- [6] J. B. Eichenlaub, “An autostereoscopic display for use with a personal computer”, Proc. SPIE, Vol. **1256**, pp. 156-163 (1990).
- [7] H. Isono, M. Yasuda and H. Sagawa, “Autostereoscopic 3D LCD Display using LCD-generated Parallax Barrier”, 12th Int. Display Research Conf., Japan, Display’92, pp. 303-306 (1992).
- [8] S. Ichinose, *et al.*, “Full-color stereoscopic video pickup and display technique without special glasses”, Proc. SIC. Vol. **30-4**, pp. 319-323 (1989).
- [9] H. Isono, M. Yasuda, D. Takemori, H. Kanayama, C. Yamada and K. Chiba, “50-inch Autostereoscopic Full-color-3-D TV display System”, Proc. SPIE, Vol. **1669**, pp. 176-185 (1992).
- [10] 磯野春雄, 安田稔, 竹森大祐, 金山秀行, 山田千彦, 千葉和夫, “8眼式メガネなし3次元テレビジョン”, テレビジョン学会誌, Vol. **48-10**, pp. 1267-1275 (1994).
- [11] H. Liao, M. Iwahara, Y. Katayama, NH. Hata and T. Dohi, “Three-dimensional display with a long viewing distance by use of Integral Photography”, Optics

- Letter, Vol. **30** No. 6, pp. 613-315 (2005).
- [12] F. Okano, J. Arai, H. Hoshino and I. Yuyama, “Real-time three-dimensional pickup and display system based on integral photography”, *Appl. Opt.*, Vol. **30**, Issue 7, pp. 1598-1603 (1997).
- [13] H. Nishio and Y. Takaki, “Development of super-multiview head-up display and evaluation of motion parallax smoothness”, *Proc. SPIE*, vol. **8648**, 86481S (2013).
- [14] D. Gabor, “A new microscopic principle”, *Nature*, Vol. **161**, pp. 777-778 (1948).
- [15] 辻内淳平, “ホログラフィ”, 裳華房 (1997).
- [16] P. Hariharan, “Basics of Holography”, Cambridge University Press (2002).
- [17] P. S. hiraire, S. A. Benton, M. Lucente, M.L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa and J. Underkoffler, “Electronic display system for computational holography”, *Proc. SPIE*, Vol. **1212**, pp. 174-182 (1990).
- [18] N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura, “Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM”, *Proc. SPIE*, Vol. **1461**, pp. 291-302 (1992).
- [19] K. Sato, K. Higuchi and H. Katsuma, “Holographic television by liquid crystal devices”, *Proc. SPIE*, Vol. **1667**, pp. 19-31 (1992).
- [20] Y. Sakamoto, “An algorithm of hidden surface removal using shadow-propagation method for computer-generated hologram,” *IEICE Trans. Inf. Syst.* **J85-D-II**, 1832-1839 (2002).
- [21] K. Matsushima, and S. Nakahara, “Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method,” *Appl. Opt.* **48**, 54-64 (2009).
- [22] 坂本, “影伝搬法を用いた計算機合成ホログラムの隠面消去法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J85-D-II**, 12, pp. 1832–1839 (2002).
- [23] T. Yamaguchi, T. Fujii, and H. Yoshikawa, “Fast calculation method for computer-generated cylindrical holograms,” *Appl. Opt.* **47**, 63-70 (2008).
- [24] R. H.-Y. Chen, and T. D. Wilkinson, “Computer generated hologram with geometric occlusion using gpu-accelerated depth buffer rasterization for three-dimensional display,” *Appl. Opt.* **48**, 4246-4255 (2009).
- [25] H. Kang, T. Yamaguchi, and H. Yoshikawa, “Accurate phase-added stereogram to improve the coherent stereogram,” *Appl. Opt.* **47**, D44-D54 (2008).
- [26] K. Wakunami, and M. Yamaguchi, “Calculation for computer generated holo-

- p>gram using ray-sampling plane,”
- Opt. Express*
- 19**
- , 9086-9101 (2011).
- [27] K. Matsushima, “Computer-Generated Holograms for Three-Dimensional Surface Objects with Shade and Texture”, *Appl. Opt.*, vol. **44**, 4607-4614 (2005).
  - [28] H. Kim, J. Hahn, and B. Lee, “Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography”, *Appl. Opt.*, vol. **47**, D117-127 (2008).
  - [29] 坂本, 山下, 長尾, “計算機合成ホログラムにおける表面反射特性を考慮した物体光計算法”, *映像情報メディア学会誌*, **56**, 4, pp. 611–616 (2002).
  - [30] 坂本, 鶴野: “計算機合成ホログラムにおける物体光沢の表現法”, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, **J88-D-II**, 10, pp. 2046–2053 (2005).
  - [31] K. Wakunami and M. Yamaguchi, “Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane”, *Opt. Express* **19**, pp. 9086–9101 (2011).
  - [32] K. Yamamoto, T. Senoh, R. Oi and T. Kurita, “8K4K-size computer generated hologram for 3-D visual system using rendering technology”, *Universal Communication Symposium (IUCS)*, 2010 4th International, pp. 193–196 (2010).
  - [33] K. Yamaguchi, T. Ichikawa, and Y. Sakamoto, “Calculation method for CGH considering smooth shading with polygon models”, *Proceedings of SPIE*, vol. **7957**, 795706(2011).
  - [34] 金澤, 坂本, 青木, “屈折現象を考慮した計算機合成ホログラムの計算法”, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, **J88-D-II**, 1, pp. 88–94 (2005).
  - [35] 西, 松島, 中原, “ポリゴン法 CGH における透明物体のレンダリングの基礎研究”, *映像情報メディア学会技術報告*, **35**, 42, pp. 27–30 (2011).
  - [36] K. Yamaguchi, and Y. Sakamoto, “Computer generated hologram with characteristics of reflection: Reflectance distributions and reflected images,” *Appl. Opt.* **48**, No. 34, p. H203-211 (2009).
  - [37] E. N. Leith and J. Upatnieks, “Reconstructed wavefronts and communication theory”, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. **52**, pp. 1123-1130 (1962).
  - [38] 藤代一成, “コンピュータグラフィックス”, *CG-ARTS 協会* (2006).
  - [39] J. P. Waters, “Holographic image synthesis utilizing theoretical”, *Appl. Phys. Lett.* **9**, 405-407 (1966).
  - [40] T. Tommasi and B. Bianco, “Frequency analysis of light diffraction between rotated planes”, *Opt. Lett.* **17**, pp. 556-558 (1992).
  - [41] T. Tommasi and B. Bianco, “Computer-generated holograms of tilted planes by

- a spatial frequency approach”, J. Opt. Soc. Am. A **10**, pp. 299-305 (1993).
- [42] J. W. Goodman: “Introduction to Fourier Optics”, McGraw-Hill, 2nd edition (1996).
- [43] K. Matsushima: “Formulation of the rotational transformation of wave fields and their application to digital holography”, Appl. Opt. **47**, pp. D110–D116 (2008).
- [44] K. Matsushima and T. Shimobaba: “Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields”, Opt. Express **17**, pp. 19662–19673 (2009).
- [45] R. P. Muffoletto, J. M. Tyler and J. E. Tohline: “Shifted Fresnel diffraction for computational holography”, Opt. Express **15**, pp. 5631–5640 (2007).
- [46] Mark E. Lucente, “Interactive computation of holograms using a look-up table”, *J. Electron. Imaging.* **2**(1), 28-34 (Jan 01, 1993).
- [47] H. Yoshikawa, T. Yamaguchi, and R. Kitayama, “Real-Time Generation of Full Color Image Hologram with Compact Distance Look-up Table”, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2009, DWC4.
- [48] S.-C. Kim and E.-S. Kim, “Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method”, Appl. Opt. **47**, D55-D62 (2008).
- [49] S.-C. Kim, J.-H. Kim, and E.-S. Kim, “Effective reduction of the novel look-up table memory size based on a relationship between the pixel pitch and reconstruction distance of a computer-generated hologram”, Appl. Opt. **50**, 3375-3382 (2011).
- [50] S.-C. Kim, J.-M. Kim, and E.-S. Kim, “Effective memory reduction of the novel look-up table with one-dimensional sub-principle fringe patterns in computer-generated holograms”, Opt. Express **20**, 12021-12034 (2012).
- [51] H. Yoshikawa, S. Iwase and T. Oneda, “Fast computation of Fresnel holograms employing difference”, Proc. SPIE **3956**, pp. 48-55 (2000).
- [52] K. Matsushima and M. Takai, “Recurrence Formulas for Fast Creation of Synthetic Three-Dimensional Holograms”, Appl. Opt. **39**, pp. 6587-6594 (2000).
- [53] Y. Sakamoto and A. Tsuruno, “A representation method for object surface glossiness in computer-generated hologram”, *IEICE Trans. Information Syst.* 2, Vol. **J88-D-2**, pp.2046-2053 (2005).
- [54] K. S. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving

- Maxwel's equation in isotroic media," *IEEE trans.*, Vol. **AP-14**, No. 3, p. H302-307 (1966).
- [55] R. P. Muffoletto, J. M. Tyler, and Joel E. Tohline, "Shifted Fresnel diffraction for computational holography", *Opt. Express* **15**, 5631-5640 (2007).
- [56] JIS B 0601, "製品の幾何特性仕様 (GPS)-表面形状", 輪郭曲線式-用語, 定義及び表面形状パラメータ (2001).
- [57] T. Naruse, N. Chang, Y. Itou, K. Nakamura, and T. Hongo "The measurement of spectrum reflectivity to the aluminum with different surface roughness", *AIJ J. Technol. Des.*, Vol. **13**, pp. 113-118 (2001).
- [58] W. J. Bouknight, "A procedure for generation of three-dimensional half-toned computer graphics presentations", *Comm. ACM.* **13**, No. 9, pp. 527-536 (1970).
- [59] E. Catmull, "A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces", Ph. D. Thesis, Report UTEC-CSc-74-133, Computer Science Department, University of Utah (1974).
- [60] A. Appel, "Some techniques for machiine rendering of solids," AFIPS Joint Computer Conference 37-45 (1968).
- [61] T. Whitted, "An improved illumination model for shaded display," *Comm. ACM.* **23**, 343-349 (1980).
- [62] B. T. Phong, "Illumination for Computer Generated Pictures", *Communications of the ACM*, vol. **18**, No. 6, pp.311-317 (2011).
- [63] J. F. Blinn: "Models of light reflection for computer synthesized pictures", *SIGGRAPH Comput. Graph.*, **11**, 2, pp. 192-198 (1977).
- [64] R. Cook, and K. Torrance, "A Reflectance Model for Computer Graphics", *ACM Transactions on Graphics*, vol. **1**, No. 1, pp.7-24 (2011).
- [65] N. Hayashi, Y. Sakamoto, and Y. Honda "Improvement of camera arrangement in computer-generated holograms synthesized from multi-view images", *Proc. of SPIE*, vol. **7957**, 795711 (2011).
- [66] 松田隆夫, "視知覚", 培風館 (1995).
- [67] H. W. Jensen, N. J. Christensen, "Photon maps in bidirectional Monte Carlo ray tracing of complex objects", *Proceedings of SIGGRAPH* **95**, pp. 215-224 (1995).
- [68] T. Yamaguchi, T. Ito, and H. Yoshikawa, "Floating image display with high-resolution computer-generated hologram", *Proc. SPIE* **7619**, 76190P (2010).
- [69] R. Haussler, S. Reichelt, N. Leister, E. Zchau, R. Missbach, and A. Schwerdtner,

- “Eye-tracking solutions for real-time holographic 3-D displays: from prototypes to a consumer product”, Proc. SPIE **7237**, 72370S (2009).
- [70] J. Hahn and H. Kim and Y. Lim and G. Park and B. Lee, “Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators”, Opt. Express **16**, pp. 12372-12386 (2008).
- [71] T. Senoh and T. Mishina and K. Yamamoto and R. Oi and T. Kurita, “Viewing-Zone-Angle-Expanded Color Electronic Holography System Using Ultra-High-Definition Liquid Crystal Displays With Undesirable Light Elimination”, Journal of display technology **7**, pp. 382 - 390 (2011).
- [72] Yuji Sakamoto, “Portable three-dimensional display system for CGHs”, Proc. SPIE **7233**, 723302 (2009).
- [73] Atsushi Kato, and Yuji Sakamoto, “An electro holography using reflective LCD for enlarging visual field and viewing zone with the Fourier transform optical system in CGH”, Proc. SPIE **7619**, 761910 (2010).
- [74] Y. Sato, and Y. Sakamoto, “Calculation method for reconstruction at arbitrary depth in CGH with Fourier transform optical system”, Proc. SPIE **8281**, 82810W (2012).
- [75] G. W. Stroke, “Lensless Fourier-transform method for optical holography”, Appl. Phys. Lett. **6**, pp.201-203 (1965).
- [76] 大越孝敬, “ホログラフィ”, コロナ社, pp.26-34 (1977).
- [77] 坂本雄児, “空間周波数フィルタリング法による計算機合成ホログラムの共役像除去”, 映像情報メディア学会誌, Vol. **59**, No. 4, pp. 588-591 (2005).
- [78] T. Yoneyama, C. Yang, Y. Sakamoto, and F. Okuyama, “Eyepiece-type Full-color Electro-holographic Binocular Display with See-through Vision,” in Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper DW2A.11.
- [79] 佐藤 甲癸, “液晶表示デバイスを用いたキノフォームによるカラー立体動画像表示”, テレビジョン学会誌 **48**(10), pp. 1261-1266 (1994).
- [80] Huadong Zheng, Tao Wang, Linmao Dai, and Yingjie Yu, “Holographic imaging of full-color real-existing three-dimensional objects with computer-generated sequential kinoforms”, Chin. Opt. Lett. **9**, 040901- (2011).
- [81] Michal Makowski, Maciej Sypek, Izabela Ducin, Agnieszka Fajst, Andrzej Siemion, Jaroslaw Suszek, and Andrzej Kolodziejczyk, “Experimental evaluation

- of a full-color compact lensless holographic display”, Opt. Express **17**, 20840-20846 (2009).
- [82] T. Ito, and K. Okano, “Color electroholography by three colored reference lights simultaneously incident upon one hologram panel”, Opt. Express **12**, No.18, pp.4320-4325 (2004) .
- [83] T. Senoh, T. Mishima, K. Yamamoto, R. Oi, and T. Kurita, “Viewing-Zone-Angle-Expanded Color Electronic Holography System Using Ultra-High-Definition Liquid Crystal Displays With Undesirable Light Elimination,” *Display Technology, Journal of*, vol.7, no.7, pp.382–390 (2011).
- [84] 青木尊之, 額田彰, “はじめての CUDA プログラミング”, 工学社, 2009.
- [85] “NVIDIAR OPTIX RAY TRACING ENGINE”, NVIDIA DEVELOPER ZONE, <https://developer.nvidia.com/optix>,

## 研究業績

### 論文

- T. Ichikawa, Y. Sakamoto, A. Subagyo, K. Sueoka, “Calculation method of reflectance distributions for computer-generated holograms using the finite-difference time-domain method,” Appl. Opt. **50**, pp. H211–H219 (2011).
- K. Yamaguchi, T. Ichikawa, Y. Sakamoto, “Calculation method for computer-generated holograms considering various reflectance distributions based on microfacets with various surface roughnesses,” Appl. Opt. **50**, pp. H195–H202 (2011).
- K. Hosoyachi, K. Yamaguchi, T. Ichikawa, Y. Sakamoto, “Precalculation method using spherical basic object light for computer-generated hologram,” Appl. Opt. **52**, pp. A33–A44 (2013).
- T. Ichikawa, K. Yamaguchi, Y. Sakamoto, “Realistic expression for full-parallax computer-generated holograms with the ray-tracing method,” Appl. Opt. **52**, pp. A201–A209 (2013).
- T. Ichikawa, T. Yoneyama, Y. Sakamoto, “CGH calculation with the ray tracing method for the Fourier transform optical system,” Opt. Express **21**, 32019–32031 (2013) .

### 国際学会

- T. Ichikawa ,Y. Sakamoto , “A Method of Calculating Reflectance Distributions with FDTD for Computer Generated Hologram ” , International Workshop on Holographic Memories and Display 2009, IWHM& D 2009 Digests, 3P-5, pp.

- 3–4 (2009.12).
- T. Ichikawa , Y. Sakamoto , “Calculation Method for Reflectance Distribution of Various Material in Computer Generated Hologram with FDTD method ” , International Workshop on Holography and Holographic Memories and Display 2010, IWHM& D 2010 Digests, 15P-7, pp. 39–40 (2010.12).
  - T. Ichikawa, Y. Sakamoto, A. Subagyo, and K. Sueoka, “A method of calculating refl ectance distributions for CGH with FDTD using the structure of actual surfaces ”, SPIE Practical Holography XXIII: Materials and Applications ,Proc. SPIE, 7957 , 795707 (2011.1).
  - K. Yamaguchi, T. Ichikawa, and Y. Sakamoto, “Computer Generated Holograms Considering Various Reflectance Distributions with Polygon Objects,” International Workshop on Holography and Related Technologies 2011, IWH2011 Digests, A2, pp. 3–4 (2011.11).
  - T. Ichikawa, and Y. Sakamoto, “Full parallax computer generated hologram using GPU-accelerated ray tracing method ”, SPIE Practical Holography XXVI: Materials and Applications , Proc. SPIE, 8281 , 82810E (2012.2).
  - T. Ichikawa, and Y. Sakamoto, “Expression of Refractive Objects for Computer-Generated Hologram Using Ray Tracing Method, ” in Biomedical Optics and 3-D Imaging, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2012), paper DTu4C.4. (2012. 5).
  - T. Ichikawa, and Y. Sakamoto, “A rendering method of background reflections on a specular surface for CGH, ” International Symposium in Display Holography (ISDH2012), J. Phys.: Conf. Ser. **415**, 012044 (2012. 6).
  - T. Ichikawa, K. Yamaguchi, and Y. Sakamoto, “Realistic 3D image reconstruction in CGH with Fourier transform optical system ”, SPIE Practical Holography XXVII: Materials and Applications , Proc. SPIE, 8644 , 86440D (2013.2).
  - T. Ichikawa, T. Yoneyama, and Y. Sakamoto, “Full Color Realistic 3D Image Reconstruction in CGH with Binocular Vision ”, 3D Systems and Applications 2013, S6-3 (2013.6).
  - T. Yoneyama, T. Ichikawa, and Y. Sakamoto, “Semi-portable Full-color Electro-holographic Display with See-through Vision ” , the 20th International Display Workshops, 3Dp-17L (2013.12).

## その他学会

- 市川翼，坂本雄児，“CGHにおける表面粗さを考慮した FDTD 法を用いた反射特性付与法”，3次元画像コンファレンス 2010, 2-3, pp. 21–24 (2010. 7).
- 市川翼，坂本雄児，“ホログラム面からの逆追跡による CGH 計算法,” FIT2011, I-004, pp. 285–286 (2011.9).
- 山口一弘，市川翼，坂本雄児，“計算機合成ホログラムにおけるポリゴンモデルを用いた反射特性付与法,” FIT2011, I-002, pp. 281–282 (2011.9).
- 山口一弘，市川翼，坂本雄児，“微小面を用いた計算機合成ホログラムにおける反射特性付与法の GPU による高速化,” OPJ2011, 30pD4 (2011.11).
- 田井啓悟，大澤祐介，市川翼，坂本雄児，“複数のレンジセンサーを用いた実物体の計算機合成ホログラム”，3次元画像コンファレンス 2013, 4-2, pp. 21–24 (2013. 7).
- 荻原佑基，市川翼，坂本雄児，“GPUにおける CGH 高速計算アルゴリズムの比較および検討”，3次元画像コンファレンス 2013, P-7, pp. 21–24 (2013. 7).
- 市川翼，米山拓応，坂本雄児，“光線追跡法を用いた CGH 計算法による写実的表現手法の開発”，ホログラフィック・ディスプレイ研究会，HODIC Circular, Vol.33, No.4, pp.12–17, (2013.10).