# 3次元映像システムの実現に向けた 計算機合成ホログラム高速計算技術

## 2016年7月

## 千葉大学大学院工学研究科

人工システム科学専攻 電気電子系コース

## 西辻 崇

(千葉大学学位申請論文)

# 3次元映像システムの実現に向けた 計算機合成ホログラム高速計算技術

## 2016年7月

### 千葉大学大学院工学研究科

人工システム科学専攻 電気電子系コース

## 西辻 崇

## 概要

電子ホログラフィは、人間が立体を知覚する要件(焦点調節・輻輳・両眼視差)を 全て満たす映像を再生できることから、究極の3次元映像技術とも称される.しか し、システムに必要な計算量の膨大さがネックとなり、現在に至るまで実用化され ていない.

本研究では、同システムにおいて計算量の点で最大のネックとなっている計算機 合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram)作製アルゴリズムを開発 することで、この問題の解決を図った.本研究では以下の2つのアプローチによる アルゴリズムを開発した.

1つ目はLook-Up Table (LUT) 法に基づくアルゴリズムである. LUT 法は高負荷 計算を事前計算し,メモリに保存した計算結果を逐次読みだすことで,計算量を削 減できるアルゴリズムの総称である. CGH 計算では 3 次元像再生に必要な情報の 一部を事前計算することで,計算量を削減する手法が既に報告されている. しかし, LUT には事前計算結果を保存しておくために多くのメモリが必要であり, CGH 計 算においても LUT に必要なメモリ量の大きさが課題となってきた. そこで本研究で は,LUT に記録する情報の幾何的な特性に着目し,コンピュータ・グラフィクスの 技術を応用することで,基本的な計算手法に比べて約 9 倍の高速化を実現しながら, 必要なメモリ量を約 1000 分の 1 に削減した.

2つ目は三角関数の簡易近似手法である.三角関数はCGH計算において最も負荷 の高い計算の1つであり,計算量削減の主たる対象である.既存の三角関数近似手 法は,多項式近似やLUTを用いるものが主であるが,計算量や必要メモリ量の観点 から,実装系によっては必ずしも最適でない.他方,電子ホログラフィの再生画質 はCGHの計算精度やノイズに対してある程度頑健であることが経験的にわかって おり,三角関数計算においても高い計算精度は必ずしも必要でない.そこで本研究 では,剰余 (MOD),絶対値 (ABS),減算 (SUB)のみで三角関数を近似する手法を 開発した.その結果,十分な再生画質が得られることがわかり,基本的な計算手法 に比べて約5倍の高速化を達成した.

#### Fast calculation techniques of computer-generated hologram for next-generation three-dimensional television system

#### Takashi Nishitsuji

**Abstract:** Three-dimensional (3D) display system using electro-holography is referred to as an "ultimate 3D technology" because it can reconstruct the 3D image which fulfills the requirements of human's 3D perception, such as accommodation, congestion, and parallax. However, the enormous computational amount required in the system is an issue for the practical uses.

In this study, I developed the reduction algorithms of the computational amount for computer-generated holograms (CGHs), whose computational amount is the heaviest in the electro-holography system, by following two approaches.

The first algorithm is based on Look-Up Table (LUT) approach. LUT is a method of replacing complex calculations with precalculated data, which is widely used for reducing a computational amount. LUT is also applied to the CGH calculation; however, it requires a large amount of memory space. Thus, I developed the compression and decompression methods of LUT using the geometric symmetry of a precalculated data and computer graphics technique. As a result, I succeeded in calculating a CGH about 9 times faster than the conventional CGH calculation method and reducing the required memory space by approximately one thousandth compared to the conventional LUT method.

The second algorithm is a simple approximation method of the cosine function. The cosine function is one of the heavy computation in the CGH calculation, so that it could be the main target for reducing the computational amount. Existing approximation methods of cosine function such as a polynomial approximation and LUT are not always appropriate for implementing a computer in terms of the required memory size and computational load. On the other hand, the quality of 3D images in electroholography is known for robust for noises and a precision of the calculation. Therefore, I developed the simple approximation method of cosine function using modulo, absolute and subtraction calculations. As a result, I succeeded in calculating a CGH about 5 times faster than the conventional CGH calculation method with keeping sufficient image quality.

**Key words :** electroholography, computer-generated hologram, special-purpose computer, real-time holography

目 次

第1章	はじめに	1									
1.1	緒言	1									
第2章	電子ホログラフィ方式による3次元映像システム	4									
2.1	ホログラフィの原理	4									
	2.1.1 ホログラフィの記録・再生原理	4									
2.2	電子ホログラフィの原理	7									
2.3	計算機合成ホログラム (CGH)										
	2.3.1 3次元像モデル	8									
	2.3.2 点光源モデルにおける CGH 計算	8									
	2.3.3 CGH 計算のシステムモデル	12									
2.4	電子ホログラフィの実現に向けた課題	12									
第3章	計算機合成ホログラムの高速計算手法	16									
3.1	並列計算機を用いた実装	16									
3.2	計算量削減アルゴリズム	17									
	3.2.1 波面記録法	17									
	3.2.2 漸化式法	17									
	3.2.3 LUT 法	19									
第4章	ゾーンプレートの円対称性を利用した LUT 法	<b>21</b>									
4.1	開発手法	21									
	4.1.1 STEP1 LUT の構築	21									
	4.1.2 STEP2 ゾーンプレートの復号	22									
	4.1.3 STEP3 ゾーンプレートの合成	30									
4.2	評価・考察	30									
	4.2.1 画質評価	30									
	4.2.2 計算時間評価	38									
	4.2.3 必要メモリ量	38									
4.3	まとめ	42									

第5章	三角関数の簡易近似アルゴリズムを用いた高速計算手法	<b>43</b>
5.1	開発手法	44
	5.1.1 第1段階	44
	5.1.2 第2段階	44
	5.1.3 第3段階	44
5.2	評価・考察	46
	5.2.1 画質評価	46
	5.2.2 計算時間評価	50
5.3	三角関数近似を実現する回路.....................	50
5.4	まとめ	51
第6章	おわりに	54
	謝辞	61
	業績リスト	62

図目次

1.1	電子ホログラフィの再生光学系模式図 ([5]より引用)	2
2.1	ホログラフィの記録光学系模式図	5
2.2	ホログラフィの再生光学系模式図	5
2.3	ポリゴンモデルの例 [46]	9
2.4	点光源モデルの例.................................	9
2.5	記録物体とホログラム面の位置関係	10
2.6	CGH 計算システムのブロックダイアグラム	12
3.1	波面記録法の概念図	18
3.2	漸化式法	18
3.3	ゾーンプレートの例	20
4.1	CS 法の概要	22
4.2	2つの描画手法によるゾーンプレートの例:(a) 式 (2.22) を直接計算した	
	場合(真値), (b)Bresenham algorithm を用いた場合, (c)Arithmetical	
	circle algorithm を用いた場合	23
4.3	Arithmetical circle algorithm の原理	24
4.4	同心円の半径分布	25
4.5	ランレングスの導出方法 ([33]より引用)	27
4.6	量子化誤差の発生要因	28
4.7	評価に用いた3次元モデル:(a) ティラノサウルス 11,646 点,(b) 地	
	球 30,467 点	31
4.8	ゾーンプレートの集光精度解析方法	32
4.9	CS 法, RLE-Crepe 法におけるゾーンプレート中心軸上の光強度分布	
	(焦点距離 0.3[m])	35
4.10	CS 法, RLE-Crepe 法におけるゾーンプレート中心軸上の光強度分布	
	(焦点距離 1.0[m])	35
4.11	再生シミュレーションの例(再生距離:1.0[m], CGH 解像度:1,920×1,080[p	ixels]):
	(a) 式(2.20)の直接計算,(b)CS法+式(4.29)式(4.30),(c)RLE-Crepe	
	法十式 (4 29) 式 (4 30)	39

- 5.1 三角関数簡易近似手法の手順:(a) 第1段階,(b) 第2段階,(c) 第3段階 45

- 5.4 再生シミュレーションの例(再生距離:1.0[m], CGH 解像度:1,920×1,080[pixels])
   50
- 5.5 再生シミュレーションの例 (再生距離:0.3[m], CGH 解像度:3,840×2,160[pixels]) 51

# 表目次

2.1	CGH 計算システムにおけるブロックの説明	13
4.1	Arithmetical circle algorithm におけるトレース方向の判定基準	24
4.2	CGH 作製環境	30
4.3	ゾーンプレートの集光精度評価 (所望焦点距離 0.3[m])	33
4.4	ゾーンプレートの集光精度評価 (所望焦点距離 1.0[m])	34
4.5	CS 法,RLE-Crepe 法を用いた計算時間と画質評価	37
4.6	必要メモリ量の試算条件	38
5.1	ゾーンプレートの集光精度評価 (所望焦点距離 0.3[m])	47
5.2	ゾーンプレートの集光精度評価 (所望焦点距離 1.0[m])	47
5.3	三角関数の簡易近似手法を用いた CGH 計算時間と画質評価	49

## 第1章 はじめに

#### 1.1 緒言

3次元映像の歴史は1836年にイギリスの物理学者 C. Wheatstone が開発したス テレオスコープ (Stereoscope) に端を発し [1],現在では民生用液晶テレビに3次元 表示機能が搭載されるまでに至っている [2].人間の立体知覚に必要な要件は,焦点 調節,輻輳,両眼視差,運動視差の4つであり,これらを完全に満たすことが,生 理的に自然な3次元映像を作る要件となる.しかし,実用化されている3次元映像 技術は主に目の錯覚を利用した方式であり,人間が立体を知覚する要件の一部を満 たせない.そのため,映像の表現性や臨場感が不足するだけでなく,眼精疲労など 使用者に負担をかけることがある [3].

これら要件を満たせる3次元映像技術として、ボリュームディスプレイや超多視 点映像方式、そして電子ホログラフィ方式が研究されている[3].しかし、ボリュー ムディスプレイは発光素子を空間上に並べる必要があるため、視点から手前の像と 奥の像で見え方が大きく異なってしまい、立体知覚要件の1つである運動視差を完 全に満たせているとは言いにくい.また、超多視点映像方式の解像度は視点数に反 比例し、視点数は立体知覚要件を満たすための必要条件であることに加え、映像の 表現性やリアリティにも影響するため、表現性の高い映像の実現は困難がある.

電子ホログラフィは、これらの課題を解決できる3次元映像方式である [3]. 理 論的に光の波面を完全に再生できる電子ホログラフィは、人間が立体を知覚する要 件を全て満たせるため、人間にとって自然な3次元像を再生できる. そのため、究 極の3次元映像技術とも呼ばれ、立体放送や車載機器などへの適用が期待されてい る [4]. しかし、その実現には (1) 計算量の膨大さ、(2) 空間光変調器(SLM:Spatal Light Modulator)の性能、に代表される技術課題があり、未だ実用化には至ってい ない.

図1.1に電子ホログラフィ方式による3次元映像システムの一般的な構成を示す [5]. 同方式において3次元映像は、レーザー等の光源からの光を、空間光変調器で変調 し、3次元像の反射光を再現することで映像を再生する.この時、3次元像の見える 範囲、すなわち視域角はSLMの変調性能に依存する.一般的に普及している Liquid Crystal on Silicon(LCOS) や Liquid Crystal Display (LCD) 等の SLM では、視域角 はディスプレイ素子の画素ピッチに依存する.例えば、現在市販されている位相変



図 1.1: 電子ホログラフィの再生光学系模式図([5]より引用)

調型 SLM [6] の画素ピッチ 8[µm] での視域角はおよそ 4° となる.また,液晶技術を 用いた SLM の画素ピッチの理論限界は 2~4[µm] とされており [7],その場合の視域 角は最大でおよそ 20° 程度となる.これは,液晶テレビ等,現在の映像表示デバイ スと比較すると極めて狭く,実用上の大きな課題となっている.

視域角拡大のための研究はいくつか取り組まれており,Acousto-Optic Modulator (AOM)を用い方式や [8], Micro Electro Mechanical Systems(MEMS)を用いた方式 等 [7] が提案されている.また,視線追従により擬似的に視域角を拡張する方式 [9] も提案されるなど,課題解決に向けた研究は近年盛んに取り組まれている.

一方,SLMに入力する変調パターンを計算機合成ホログラム(CGH: Computergenerated Hologram)と呼ぶ.CGHはSLMにおける振幅,あるいは位相の変調度合 いを階調として記録しており,コンピュータグラフィクス (CG:Computer Graphics) で作成された3次元像データ,または3次元カメラなどで取得されたデータから計 算機上で合成される.電子ホログラフィシステムにおける映像の滑らかさは,SLM に入力するCGHの切り替えスピードと読み替えられるため,特にユーザー入力を 伴うようなインタラクティブシステムの場合,CGHの出力速度は映像の滑らかさに 直接影響する.しかし,CGH合成にかかる処理量は非常に大きく,例えばカーナビ ゲーションシステムなど,実用的な3次元映像にはゼタ (10<sup>21</sup>) [Flops] スケールのコ ンピュータが必要と考えられる(詳細は2.4節を参照).2015年11月時点でのスー パーコンピュータの最高性能が 33.9 × 10<sup>15</sup>[Flops] [10] であることを考えると,計算 性能の乖離は 6 × 10<sup>4</sup> 倍にも及び,民生用コンピュータの性能がこれより数オーダー 低いことを考えれば,実用化への大きな課題となることがうかがえる.この課題の 解決のため,主に (a) 高性能計算システムの開発,(b) 計算量削減アルゴリズムの開 発,の2つのアプローチで研究が取り組まれている.

(a) によるアプローチでは, Graphic Processing Unit (GPU) などの準汎用並列計算 機を用いた並列計算システム [11–14] や, Field Programmable Gate Array (FPGA) を用いた専用計算機による計算システム [15–17] が開発されており, 簡素な3次元 像であればビデオレートでの再生が可能である.

(b) によるアプローチでは、これまでに様々な手法が提案されているが [18–34], 計算システムへの実装の難しさ等から、実用的な計算性能は実現していない.

本研究では、CGH 計算における計算量の課題解決を目的とした CGH 作製アルゴ リズムを開発した.開発した3つのアルゴリズムは、Look-Up Table (LUT) 法をベー スにした手法 [32,33] と三角関数の近似法 [34] に大別できる.

LUT 法は,高負荷処理を事前計算,保存し,適宜読みだすことで計算量を削減で きる一般的な計算実装手法である.しかし,事前計算結果を保存するメモリ量が実 装上の課題であった.そこで本研究では,保存するデータをゾーンプレートと呼ば れる基礎的なパターンとし,ゾーンプレートの円対称性を利用したデータ圧縮手法, および復号手法を開発することで,必要なメモリ量を約1000分の1に圧縮した上, 基本的な計算手法に比べて最大で約9倍の高速化に成功した.

他方,三角関数はCGH計算において最も負荷の高い計算の1つであり,計算量削 減の主たる対象である.既存の三角関数の近似手法は,多項式近似やテーブル参照 法を用いるものが主であるが,計算コストや必要メモリ量の観点から,実装系によっ ては必ずしも最適でない.また,電子ホログラフィの再生画質はCGHの計算精度 やノイズに対してある程度頑健であることが経験的にわかっており,三角関数計算 においても高い計算精度は必ずしも必要でない.そこで本研究では,剰余(MOD), 絶対値(ABS),減算(SUB)のみで三角関数を近似する手法を開発した.その結果, 十分な再生画質が得られることがわかり,同時に基本的な計算手法に比べて約5倍 の高速化を達成した

本論文は、以下のように構成する.第1章では、研究背景と目的を述べた.第2 章では電子ホログラフィ方式による3次元映像システムについて述べる.第3章で は、計算機合成ホログラムの高速計算技術について、第4章では、テーブル参照法 による処理量・負荷軽減アルゴリズムについて、第5章では、三角関数の近似によ る処理負荷軽減アルゴリズムについて述べ、最後に第6章でまとめる.

# 第2章 電子ホログラフィ方式による3 次元映像システム

#### 2.1 ホログラフィの原理

ホログラフィは、1947年ハンガリーの物理学者 D. Gabor により、電子顕微鏡の分 解能向上を目的として発明された [35]. 発明当初は、原理的な問題や干渉性の良い光 源が存在しなかったため実用化には至らなかったが、レーザー光源の登場や、1963 年に E. N. Leith, J. Upatnieks らによって提案された「オフセット参照光ホログラ フィ方式」[36] によりこれらの問題が解決され、実用化の道が開かれた.また、ほ ぼ同時期に両氏らによって3次元像再生技術としてホログラフィの適用可能性が示 され [37]、今日に至るまで3次元映像技術の最たる例の1つとして取り上げられて いる.

ホログラフィの記録・再生光学系の模式図を図 2.1,図 2.2 に示す.以下,これらの図を用いて記録・再生原理を説明する.なお,以下の説明は文献 [38,39]を一部引用している.

#### 2.1.1 ホログラフィの記録・再生原理

ホログラフィでは、物体からの反射光(物体光) $L_O$ と光源からの光(参照光) $L_R$ との干渉縞を、物体の3次元情報として写真乾板などの記録媒体に記録する [38]. 記 録媒体上の光強度分布Iは、 $L_O, L_R$ の干渉現象を考えると、

$$I = |L_O + L_R|^2 = |L_O|^2 + |L_R|^2 + L_O L_R^* + L_O^* L_R,$$
(2.1)

と表される.式(2.1)の第1項は物体光 *L*<sub>O</sub>の自己相関,第2項は参照光 *L*<sub>R</sub>の自己 相関,第3項は物体光 *L*<sub>O</sub>に比例する項,第4項は物体光の共役像 *L*<sub>O</sub> に比例する項 である.

参照光が平面波であり、ホログラム面上での位相を0とした場合、 $L_R = L_R^*$ であるため、式 (2.1) は、

$$I = |L_O + L_R|^2 = |L_O|^2 + |L_R|^2 + 2L_R \cdot \operatorname{Re}[L_O], \qquad (2.2)$$



図 2.1: ホログラフィの記録光学系模式図



図 2.2: ホログラフィの再生光学系模式図

となる.式 (2.2) には見かけ上複素数が含まれないため,干渉縞の振幅情報からホ ログラムを作成できる.この方式によるホログラムを振幅記録型ホログラムと呼ぶ. 振幅記録型ホログラムは,写真乾板のように光の強度を透過率分布*T<sub>a</sub>*として記録す る感光材料の場合,以下のように記録される [38].

$$T_a = T_0 + t_1 I. (2.3)$$

ここで, T<sub>0</sub>, t<sub>1</sub> は感光材料の種類や記録方法に依存する定数である.

ホログラムから物体光  $L_O$  を含む振幅ホログラムからの再生光  $L_a$  を得るためには, 図 2.2 に示すように,ホログラム作製時と同じ参照光  $L_R$  を照射する.振幅記録型ホ ログラムに対する再生は,式 (2.3) より,

$$L_a = T_a L_R, (2.4)$$

$$= \left(T_0 + t_1 |L_O|^2 + t_1 |L_R|^2\right) L_R + t_1 L_O |L_R|^2 + t_1 L_O^* L_R^2, \qquad (2.5)$$

$$= L_R' + L_D' + L_C', (2.6)$$

と表せる. ここで,

$$L'_{R} = \left(T_{0} + t_{1}|L_{O}|^{2} + t_{1}|L_{R}|^{2}\right)L_{R}, \qquad (2.7)$$

$$L'_D = t_1 L_O |L_R|^2, (2.8)$$

$$L'_{C} = t_1 L^*_{O} L^2_{R}, (2.9)$$

とした.式(2.6)に含まれる $L_D'$ は、物体光 $L_O$ に比例しているため、この光によって3次元像を観察できる. $L_R'$ はホログラムを直進して透過する光、 $L_C'$ は物体光の 複素共役 $L_O^*$ に比例する光であり、これらは記録時の物体光 $L_O$ に寄与しない項で あるため、再生像のノイズとなり、再生画質を劣化させる要因となる.また、振幅 記録型ホログラムは参照光の振幅を変調するため、光の利用効率が悪く、再生像が 暗くなる欠点がある.

一方,光の位相を記録・再生する方式としてキノフォームが知られている [38,40,41]. キノフォームは、参照光 *L*<sub>R</sub> に対して位相変調することで物体光 *L*<sub>O</sub> に比例する波 面を再現する方式である.ホログラムに類似した方式であり、広義にはホログラム の一種と捉えられている.本論文でもキノフォームをホログラムの一種とし、以降、 本論文におけるホログラフィはキノフォームを含む方式を指す.

キノフォームは、物体光  $L_O$  が感光材料上に作る複素振幅分布の位相  $\arg[L_O]$  に対し、感光材料上の透過率  $T_p$  が、

$$T_p = C \arg[L_O], \tag{2.10}$$

となるホログラムを作製する方式である.ここで,*C*は定数であり, arg[·] は複素振幅の位相を表す.波面の位相分布は直接観察できないため,露光後,漂白した感光

材料の濃度と,それを透過した際に起こる位相変化の対応を予め求めておき,計算 機上でシミュレートした物体光の位相分布から,プロッタ等を用いてキノフォーム を作製する [38].

式 (2.6) と同様に、キノフォームに参照光  $L_R$  を照射した時に得られるキノフォームからの再生光  $L_p$  は、式 (2.10) より、

$$L_p = T_p L_R = C L_R \arg[L_O], \qquad (2.11)$$

となる.参照光が振幅一定の平面波であれば,物体光 L<sub>o</sub>の位相成分に比例する再生 光 L<sub>p</sub>が得られ,振幅記録型ホログラムのようにノイズとなる成分は再生されない. キノフォームは原理上,物体光の振幅を再現できないが,記録時の物体光の振幅が 一定であるという制約下では,完全な波面を再現できる [41].また,キノフォーム は参照光の強度が維持されるため,光の利用効率が良く,鮮明な再生像が得られる ことも特徴である.

近年では、位相を電子的に変調できるデバイス(例えば [6])が登場したことにより、理論的に鮮明、かつノイズの少ない再生像を得られるキノフォームを用いた電子 ホログラフィシステムが構築できるようになった.そのため、本研究の対象をキノ フォームとし、以降、本論文におけるホログラムはキノフォームを表すものとする.

#### 2.2 電子ホログラフィの原理

電子ホログラフィは,前節で述べたホログラムの記録・再生原理を電子的に行い, 3次元映像を記録・再生する技術である.電子ホログラフィ方式による3次元動画 方式は,1990年に P. S. Hilaire, S. A. Benton らが発表した,AOMを用いた電子ホ ログラフィシステム [42] を皮切りに研究の機運が高まり,現在に至るまで数多くの 方式が提案されている [43].

図 1.1 に示すように、電子ホログラフィの再生基本原理は写真乾板を用いた図 2.2 と変わらず、同図において写真乾板であった部分が SLM となり、そこに入力する変調パターンとして CGH、および CGH の計算システムが加わっているのみである. SLM は入力された CGH に従って参照光  $L_R$  変調し、前節と同様にして再生光 L を得る.そのため、3 次元映像を再生するためには、SLM に入力する CGH を高速に切り替える必要がある.

#### 2.3 計算機合成ホログラム (CGH)

CGH は 2.1.1 節に示したホログラム記録原理を計算機上で行う手法,およびそれ によって得られる電子的なホログラムを指す.また,本論文ではキノフォームを含 めて CGH と呼ぶ.通常のホログラム記録手法が実物体の反射光を物体光として用 いるのに対し,CGH は物体の3次元情報を電子的に取得,または作製し,そこか らシミュレートした反射光を物体光として用いる.電子的な3次元情報の取得手段 として,インテグラルフォトグラフィなど実物体の3次元情報をカメラなどによっ て取得する方法 [44] や CG で仮想的に3次元像を作成する手法 [45] などが知られて いる.

#### 2.3.1 3次元像モデル

仮想的な3次元像の表現手法は、ポリゴンモデル、点光源モデルに大別される. そ れぞれの例を図 2.3 [46], 図 2.4 に示す.

ポリゴンモデルは、一般的な CG と同様に、曲面を三角形のパッチで近似的に表 現するモデルのことで、表現性の高さに加え、パッチの大きさや分割数によって表 現性を可変にできることが特徴である.ポリゴンはそれぞれがホログラムに対して 傾いた平面であるため、CGH 作製にはポリゴンごとに傾いた平面間の光伝搬計算 が必要である.そのため、ポリゴンの分割数によって計算処理が細分化し、計算コ ストが高くなることが課題である.ポリゴンモデルによる CGH 計算の手法として、 空間周波数領域で光波の回転を行う回折計算手法などが知られている [47].

点光源モデルは,自発光する点光源によって3次元像を表現するモデルで,文字 や矢印等の記号や測距センサ等による3次元計測情報の表示に適しており,情報表 示手段としての実用性が高いモデルである.また,ポリゴンモデルに比べて計算が 単純であり,並列化が用意であることも特徴である.そのため,FPGAやGPUに よる並列計算システムが検討され,3次元像の表現性は限定的であるものの,リア ルタイム再生可能なシステムが実現している [15–17,45].本研究は,点光源モデル による CGH をターゲットとしており,以降の記述は同モデルを前提としたもので ある.

#### 2.3.2 点光源モデルにおける CGH 計算

CGH 計算において、3次元像とホログラムを作る平面(ホログラム面)の位置関 係を図 2.5 のように定義する.図 2.5 に示す通り、3次元像の座標を $(x_j, y_j, z_j)$ 、ホ ログラム面の座標を $(x_{\alpha}, y_{\alpha}, 0)$ とし、参照光  $L_R$ をホログラム面に対して角度 $\theta_R$ で 入射する平面波であるとする.*j*番目の点光源から発せられる物体光  $L_{Oj}$ 、参照光  $L_R$ はそれぞれ、

$$L_{Oj} = \frac{|L_O|}{r_{\alpha j}} \exp i(2\pi \frac{p}{\lambda} r_{\alpha j} + \phi_j), \qquad (2.12)$$

$$L_R = |L_R| \exp i(2\pi \frac{p}{\lambda} x_\alpha \sin \theta_R + \phi_R), \qquad (2.13)$$



図 2.3: ポリゴンモデルの例 [46]



図 2.4: 点光源モデルの例



図 2.5: 記録物体とホログラム面の位置関係

と定義できる [38, 39]. ここで, i は虚数単位,  $\lambda$  は参照光の波長, p は SLM の画素ピッチ,  $\phi_j$  は j 番目の点光源における初期位相,  $\phi_R$  は参照光の初期位相である.また,

$$r_{\alpha j} = \{ (x_{\alpha} - x_j)^2 + (y_{\alpha} - y_j)^2 + z_j^2 \}^{-\frac{1}{2}}, \qquad (2.14)$$

$$= (x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2 + z_j^2)^{-\frac{1}{2}}, \qquad (2.15)$$

である.式(2.12),式(2.13)において、座標系はSLMの画素ピッチpで規格化されているものとする.簡単のため、参照光をホログラム面に対して垂直に入射させる、すなわち $\theta_R = 0$ とし、初期位相 $\phi_R, \phi_i$ をそれぞれ0とすると、式(2.12),式(2.13)は、

$$L_{Oj} = \frac{|L_O|}{r_{\alpha j}} \exp i(2\pi \frac{p}{\lambda} r_{\alpha j}), \qquad (2.16)$$

$$L_R = |L_R|, \qquad (2.17)$$

となる.

CGH は式 (2.11) より、3 次元像を構成する点光源がホログラム面上に作る複素振幅を全て (N 点) の点光源について積算し、積算後に得られるホログラム面上の複素振幅の位相成分を求めることで得られる.  $(x_{\alpha}, y_{\alpha})$  におけるホログラム面の位相成分  $\phi(x_{\alpha}, y_{\alpha})$  は、

$$\phi(x_{\alpha}, y_{\alpha}) = \arg\left[\sum_{j=0}^{N-1} \left(L_{Oj} L_R^*\right)\right], \qquad (2.18)$$

$$= \arg\left[\sum_{j=0}^{N-1} \left\{ \frac{|L_{Oj}||L_R|}{r_{\alpha j}} \exp i(2\pi \frac{pr_{\alpha j}}{\lambda}) \right\} \right], \qquad (2.19)$$

となる. 点光源からホログラム面までの距離が十分に長い場合,  $1/r_{\alpha j} \approx const.$  としても問題ない. また,各点光源の輝度を一定 ( $|L_{Oj}| = 1$ )とし,参照光の輝度  $|L_R|$ は定数のため,CGH の量子化に影響しないパラメタとして取り除くと,式 (2.19)は,

$$\phi(x_{\alpha}, y_{\alpha}) = \arg\left[\sum_{j=0}^{N-1} \left\{ \exp i(2\pi \frac{pr_{\alpha j}}{\lambda}) \right\} \right], \qquad (2.20)$$

$$= \arg\left[\sum_{j=0}^{N-1} U_j(x_{\alpha}, y_{\alpha})\right], \qquad (2.21)$$

となる.ここで,

$$U_j(x_{\alpha}, y_{\alpha}) = \exp i(2\pi \frac{pr_{\alpha j}}{\lambda}), \qquad (2.22)$$

とした.

式 (2.22) において,点光源とホログラム面との距離  $z_j$  が SLM のサイズに対して 十分に大きい場合, $r_{\alpha j}$  についての近軸近似,

$$r_{\alpha j} \approx z_j + \frac{x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2}{2z_j},\tag{2.23}$$

を適用でき,

$$U_j(x_{\alpha}, y_{\alpha}) = \exp i \left\{ 2\pi \frac{p}{\lambda} \left( z_j + \frac{x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2}{2z_j} \right) \right\}, \qquad (2.24)$$

となる.これは一般にフレネル近似と呼ばれ,近似条件が成り立つ場合には計算負 荷を削減できる.

CGH は表示する SLM の表示可能階調によって量子化される. ここでの SLM は 位相変調型を想定しているため,表示可能階調を b[bit] とすると,CGH の画素値  $c(x_{\alpha}, y_{\alpha})$  は,

$$c(x_{\alpha}, y_{\alpha}) = \phi(x_{\alpha}, y_{\alpha}) \cdot \frac{2^{b} - 1}{2\pi}, \qquad (2.25)$$

となる.

#### 2.3.3 CGH 計算のシステムモデル

これまでの議論を総じると、CGH 計算システムは図 2.6 に示すブロックダイアグ ラムで表現できる.システムは、点光源座標を入力とし、量子化した CGH を出力 とする.各ブロックの説明を表 2.1 に示す.



図 2.6: CGH 計算システムのブロックダイアグラム

#### 2.4 電子ホログラフィの実現に向けた課題

これまでに示した方式により,電子ホログラフィによる3次元映像は実現できる. しかし,主に以下の2つの理由により,実用化には至っていない.

表 2.1: CGH 計算システムにおけるブロックの説明

位相計算部	式 (2.20) における exp 関数の内部の計算
三角関数計算部	式 (2.20) における exp 関数を展開して得られる三角関数計算
積算部	式 (2.20) における積和演算
位相計算部	式 (2.20) における複素振幅の偏角計算
量子化部	式 (2.25) に相当

1. SLM の画素ピッチ,および画素数

2. 計算量の膨大さ

SLM の画素ピッチ、画素数は、それぞれ3次元映像の視域角、大きさを決めるパ ラメータの1つである. SLM は回折格子として働くため、入射光の最大回折角 $\theta_{D_{\text{max}}}$ は SLM の画素ピッチ p と参照光の波長  $\lambda$  を用いて、

$$\theta_{D_{\max}} = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{2p} \right), \qquad (2.26)$$

となる. そのため, 3次元像の視域角 Φ は式 (2.26) より,

$$\Phi = 2\theta_{D_{\max}} = 2\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2p}\right),\tag{2.27}$$

となる.また、SLMからdだけ離れた位置に見える3次元像の最大サイズは、SLM サイズを $W \times H$ とすると、

$$(W + 2d\tan(\theta_{D_{\max}})) \times (H + 2d\tan(\theta_{D_{\max}})), \qquad (2.28)$$

となる.これらの指標は3次元像の見やすさを表す指標になり,実用化のためには, 用途に対して十分な視域角,大きさの3次元像を再生する必要がある.

一方,電子ホログラフィ方式による3次元映像は、CGHをSLMに連続入力する ことで実現するため、CGHの計算速度は、特にインタラクティブなシステムにおい て、映像の滑らかさを決める指標になる.計算速度は計算量と実装する計算機の演 算性能によって決まり、計算量は反復計算回数と反復計算内の計算コストで決まる. したがって、なめらかな映像を実現するためには反復計算回数の削減、反復計算内 の計算コスト低減、および計算機の演算性能向上が必要になる.3次元像を構成す る点光源数をN, CGHの解像度を $R_w \times R_h$ とすると、式(2.20)より、点光源モデル の計算量は $O(NR_wR_h)$ となる.また、式(2.20)には負荷の高い三角関数演算や平 方根演算を含むため、CGH計算にかかる総合的な計算コストは非常に大きくなる. CGH上の1点に対して1つの点光源が作る複素振幅を求めるために必要な浮動小数 点演算回数を $O_f$ とすると、フレームレートFR[fps]の3次元映像を実現するために 必要な計算機性能 $PF_{rg}$ [flops] は、

$$PF_{rq} = FR \times O_f \times R_w \times R_h \times N, \qquad (2.29)$$

となる.

以下,例としてカーナビゲーションシステムへの電子ホログラフィの適用を仮定 し,必要スペックと現状との乖離を示す.フロントガラスを透過型 SLM として,緑 色 LED( $\lambda = 520$ [nm])を光源とし,ドライバーのみに 3 次元情報を表示するシステ ムを考える.

まず,SLMの要求スペックを考える.ドライバーの顔とフロントガラスまでの距離を 1.5[m] とし,人間の有効視野(水平:約30°,垂直:約20°)[48]と同等の視野範囲の実現に必要な SLM の画素ピッチ *p*<sub>rq</sub> は,水平方向の有効視野を制約条件に置くと,式(2.27)から,

$$p_{rq} = \frac{520[\text{nm}]}{2\sin(30^{\circ}/2)} \approx 1[\mu\text{m}],$$
 (2.30)

となる. 頭の可動範囲を上下, 左右方向にそれぞれ 30° 程度とすると, 必要な SLM サイズ (W × H) は,

$$W = 1.5 [m] \times tan(15^{\circ}) \times 2 \approx 0.8 [m],$$
 (2.31)

$$H = 1.5[m] \times tan(15^{\circ}) \times 2 \approx 0.8[m],$$
 (2.32)

とできる. なお, SLM の中心はドライバーが正面を向いた時の視線とフロントガ ラスとの交点とする. したがって SLM の必要解像度  $(R_w \times R_h)$ は,式 (2.30),式 (2.31),式 (2.32)より,

$$R_w = W/p_{rq} \approx 800,000 \text{[pixel]}, \qquad (2.33)$$

$$R_h = H/p_{rq} \approx 800,000$$
[pixel], (2.34)

となり,必要画素数は 6,400 億となる.現在市販されている SLM [6] が約 200 万画 素,画素ピッチ 8[μm] であることを考えると,その乖離は大きい.

次に,計算機の要求スペックを考える.式(2.20)より,CGH上の画素1点おいて 1つの点光源が作る複素振幅分布の計算に必要な浮動小数点演算数を,AMD社の 15h世代CPUを計算機として用いる場合を仮定して求めると,算術演算命令ごとの レイテンシ数 [49]から,

$$O_f \approx 205, \tag{2.35}$$

と見積もれる.ここで,式(2.20)に含まれる距離計算 $r_{\alpha j}$ には,式(2.14)より座標 $(x_{\alpha}, y_{\alpha}), (x_{i}, y_{j}, z_{j})$ に関する整数演算が含まれるが,整数加算(ADD)と浮動小数点

加算 (FADD) のレイテンシ数の比 1/6 から,浮動小数点演算に換算して O<sub>f</sub> に組み 入れた.

必要フレームレートを 30[fps],表示コンテンツを 50 万点程度の点光源で表現で きるものと仮定すると,必要演算性能 *PF<sub>rq</sub>* は,式 (2.29),式 (2.33),式 (2.34),式 (2.35) より,

 $PF_{rg} = 30 \times 205 \times 800000 \times 800000 \times 500000 \approx 2 \times 10^{21} [\text{Flops}], \qquad (2.36)$ 

となり、ゼタスケール級の計算機が必要ということがわかる.しかし、現在の CPU が数百 GFlops スケールであること考えると、その乖離は大きい.

以上より,電子ホログラフィの実現にはSLM性能,計算処理性能の両面で大きな 課題がある.また,普及には製造・運用コストや機器の大きさ,撮像方法など表示 コンテンツの作成方法も課題になることが想像される.

本研究では、これら2つの課題のうち、計算量の膨大さにフォーカスを置き、効率的な CGH 作製アルゴリズムを開発した.

## 第3章 計算機合成ホログラムの高速計 算手法

本章では、CGH 高速計算のためのエッセンスと、先行事例について述べる. CGH の高速計算への課題は、前章で述べたとおり、反復計算回数の膨大さ、反復計算内の 計算コストの高さ、に分けられる. これらを解決するため、これまでに提案されてい る高速計算手法は、(1)FPGA や GPU などの高速計算機を用いた実装手法 [11–17]、 (2) 計算量削減アルゴリズム [18–34]、に大別 できる.

以下,それぞれのアプローチについて代表的な手法を述べる.

#### **3.1** 並列計算機を用いた実装

CGH 計算を高速に処理するため, FPGA や GPU 等の並列計算機を用いた実装例 が幾つか報告されている [11–17].

FPGAは、再構成可能な回路を含む演算チップであり、開発や保守のしやすさか ら近年は活用用途が広がっている. CPU等の汎用計算機と異なり、特定用途に特化 した回路設計ができるため、計算機が持つ演算性能を引き出しやすいメリットを持 つ. CGH 専用計算機 HORN<sup>1</sup>は、FPGA チップを複数搭載し、チップ間の分散協調 動作によって高速に CGH を出力する専用計算機である. これまでに、HORN-8<sup>2</sup> ま でが開発され、点光源数に制約はあるものの CGH のリアルタイム出力に成功して いる [15–17].

GPUは、もともと CG の描画用に開発された準汎用並列計算機で、3DCG の計 算処理のため高い並列演算性能を持つ. GPUの演算性能に着目し、物理シミュレー ションなど CG 用途以外へ GPU を活用することを General Purpose computing on Graphic Processing Unit (GPGPU) と呼び、NVIDIA 社が扱う Compute Unified Device Architecture (CUDA) やオープンプラットフォームの Open Computing Language (OpenCL) 等の開発環境が整備されたことも手伝って、近年広く普及してい る [50]. CGH 計算は、式 (2.22) からわかるように、CGH の各画素ごとに独立して計 算できるため、CG の演算処理との類似性が高く GPU への実装に適している.また、

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>HOlographic ReconstructioN の略.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>数字は開発バージョンを表す.

FPGA 等に比べて実装が容易であるため、多くの研究成果が報告されている [11–13]. 他にも Intel Xeon Phi 等の並列計算機を用いた実装が検討されている [14].

#### 3.2 計算量削減アルゴリズム

#### 3.2.1 波面記録法

波面記録法は、点光源とホログラム面との間に波面記録面と呼ばれる仮想平面を 配置し、計算を2段階に分割することで計算量を削減する手法である [18,19,22,23]. 概念図を図 3.1 に示す.

第1段階 (STEP1) では,点光源近傍に設置した波面記録面に点光源から発せられ る球面波が作る複素振幅分布を記録する.これは,波面記録面に記録すべき波面の 面積が点光源と波面記録面の距離に比例するため,点光源の近傍においた平面では, 記録すべき複素振幅分布の面積が小さくなり,計算量を抑えられるためである.点 光源から発せられる球面波が波面記録面上に作る複素振幅分布は,式(2.26) に定義 した最大回折角  $\theta_{D_{max}}$  から,点光源から平面上に下された垂線との交点を中心とし て,以下に定義する半径  $R_w$  の円に含まれる範囲のみを計算すれば十分である.

$$R_w = d_w \cdot \tan \theta_{D_{max}}.\tag{3.1}$$

ここで、 $d_w$ は点光源と波面記録面との距離である. $R_w \propto d_w$ であるため、 $d_w$ を小さくすることで第1段階の計算領域を削減できる.

第2段階では、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)を利用したフ レネル回折計算 [39] などを用いて、波面記録面からホログラム面への光伝搬計算を 行い、ホログラム面上の複素振幅分布を効率的に求める.以上の2段階を踏むこと により、総合的に計算量を削減できる.

#### 3.2.2 漸化式法

漸化式法は、ホログラム面上の隣接する座標間で定義できる漸化式によって複素 振幅を求める手法である [24–26]. 説明のため、点光源とホログラム面上の座標関係 を図 3.2 に示す. なお、同手法はフレネル近似が成立するケースにのみ使用できる.

式 (2.24) において, 基準点  $(x_{\alpha j}, y_{\alpha j})$  から,  $x_{\alpha j}$  方向に n だけ離れた座標  $(x_{\alpha j}+n, y_{\alpha j})$  における位相  $\Theta_n$  を,

$$\Theta_n = \frac{p}{\lambda} \left\{ z_j + \frac{(x_{\alpha j} + n)^2 + y_{\alpha j}^2}{2z_j} \right\},\tag{3.2}$$



図 3.1: 波面記録法の概念図



図 3.2: 漸化式法

とする.新たな2変数,

$$\Delta_0 = \frac{p}{2\lambda z_j} (2x_{\alpha j} + 1), \qquad (3.3)$$

$$\Gamma = \frac{p}{\lambda z_j},\tag{3.4}$$

を導入し,

$$\Delta_{n-1} = \Delta_0 + (n-1)\Gamma, \qquad (3.5)$$

を定義すると、 $\Theta_n$  と $\Delta_n$  に関する漸化式、

$$\Theta_n = \Theta_{n-1} + \Delta_{n-1}, \tag{3.6}$$

$$\Delta_n - \Delta_{n-1} = \Gamma, \qquad (3.7)$$

が得られる.式(3.6),式(3.7)より,隣接する座標間の位相値を初項計算を除き加 算のみで求めることができる.漸化式法は処理の単純さやパイプライン化への適性 から,CGH専用計算機 HORN [15–17] に実装されている.

#### 3.2.3 LUT法

LUT 法は,負荷の高い計算を事前計算,保存し,必要に応じて読み出して使用することで計算量を削減する手法である.事前計算値を格納するメモリ量と読み出し 速度が十分であれば,計算スピードや精度は逐次計算をしのぐため,多くの計算機 で用いられている.

CGH 計算における LUT の適用方法は複数あり,例えば CGH 計算機 HORN では式 (2.22) に含まれる三角関数のテーブルを計算ユニット毎に保持し,三角関数計算にかかる計算負荷のみを低減している.

ー方,より巨視的な使い方として,1つの点光源に対応する複素振幅分布をテー ブルに保持し,点光源の位置に合わせて合成する手法が知られている[28–33].1つ の点光源に対応する複素振幅分布は "Principle Fringe Pattern(PFP)" [29–31],ある いはゾーンプレート<sup>3</sup> [32,33] と呼ばれている.本論文では,ゾーンプレートと呼称 を統一する.ゾーンプレートの一例を図 3.3 に示す.

式 (2.14),式 (2.22) より,ホログラム面に平行な成分  $(x_{\alpha j}, y_{\alpha j})$  は相対値であるため,ゾーンプレートのパターンは  $z_j$ のみに依存する.そのため,テーブルには  $z_j$ の範囲と量子化幅に従ってゾーンプレートを事前計算し,点光源のホログラム面に対する水平位置に従ってゾーンプレートを水平移動し,重畳することで CGH を作製できる.しかし,ゾーンプレートの半径は式 (3.1) より, $z_j$  に比例して大きくなるた

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>正確には複素振幅分布から作製したホログラムをゾーンプレートと呼ぶ.



図 3.3: ゾーンプレートの例

め,ゾーンプレートをベースにした LUT 法は多くのメモリを必要とする.例えば, S. C. Kim らの報告 [29] によれば,256 層のテーブルに 1.8[GB] のメモリ量が必要と されており, FPGA や GPU などの並列計算機への実装は現実的ではない.

そのため、ゾーンプレートを用いた LUT 法では、必要メモリ量の削減が研究課題 の1つとなっており、これまでに幾つかの手法が報告されている [30–33]. S. C. Kim らは式 (2.24) が x, y の各軸方向に独立であることを利用し、ゾーンプレートを各軸 それぞれの1次元情報として圧縮することで、必要メモリ量の削減に成功した [30]. また、同手法をベースに、z 軸方向の焦点距離を可変にする手法を開発し、併せて 映像符号化技術で用いられる動き補償の概念を導入することで、必要なメモリ量を キロバイトオーダーにまで落とすことに成功している [31].本研究の一部もこれら のモチベーションの中で実施され、LUT 法に基づく CGH の高速計算手法開発に寄 与した.

CGHの高速計算には先に述べた計算量の削減手法とともに,これら計算機の性能向上が不可欠である.加えて,計算機の特性を考慮して計算機性能を十分に活かせるアルゴリズム開発が求められる.

# 第4章 ゾーンプレートの円対称性を利用したLUT法

本章では、本研究の成果として、LUT 法で課題となるメモリ量削減を目的に開発 した LUT 法 [32]、およびその計算効率化手法 [33] について述べる. これらはすで に筆者の修士論文 [51] で言及されているものであるため、一部の文章、図を引用し ている.

本研究では、ゾーンプレートが図 3.3 に示すような円対称性を持つことを利用し、 LUT に格納するデータ量の圧縮、および CG 技術を応用した高速復号手法を開発した [32].本手法は、復号過程と CGH 作成時の処理の特徴から、"Crepe and Stamp (CS) 法"と呼んでいる.さらに、復号過程の計算効率の向上を目的に、整数半径を 持つ同心円の動径方向の半径分布を効率的に求める漸化式を導出することで、CS 法 を性能改善できる "Run-Length Encoding based Crepe (RLE-Crepe) 法"を開発した [33].

#### 4.1 開発手法

手法の概要を図 4.1 に示す. CS 法では, 3つのステップで CGH を作製する.

#### 4.1.1 STEP1 LUTの構築

ゾーンプレートの中心から動径方向の複素振幅分布を式 (2.22) に従って事前計算 し、メモリに格納する.格納するデータの長さは SLM の画素ピッチと参照光の波長 で決まり、式 (3.1) に従う.LUT のインデックスは点光源とホログラム面との垂直 距離 *z*<sub>i</sub> になる.

また,LUT に記録するデータを逐次計算することも可能であり,これまでの報告 [32,51] では,漸化式法を STEP1 に適用することで計算の高速化を実現している.



図 4.1: CS 法の概要

#### 4.1.2 STEP2 ゾーンプレートの復号

3次元モデルを構成する点光源の z<sub>j</sub> に従って LUT からデータを読み出し, CG 分野の円描画アルゴリズムである "Arithmetical circle algorithm" [52],および独自 に開発した描画手法である RLE-crape 法 [33] を使って同心円状に展開することで, ゾーンプレートを復号する.加えて,LUT に記録するデータが軸上でサンプリング されていることに起因する量子化誤差の補正手法により,ゾーンプレートの性能を 改善する.本研究では,復号動作がクレープを焼く動作に似ていることから,復号 手法を "Crepe 法" と呼んでいる.以下,円描画アルゴリズムの概要と量子化誤差補 正手法について述べる.

#### 4.1.2.1 Arithmetical circle algorithm

Arithmetical circle algorithm [52] は高速円描画アルゴリズムの1つであり,円描 画アルゴリズムとして有名な"Bresenham algorithm" [53] よりも精確な円が描画で きることが特徴である.図4.2 に真値として式 (2.22) を直接計算して作製したゾー ンプレートと,Bresenham algorithm と Arithmetical circle algorithm でそれぞれ作 製したゾーンプレートの例を示す.図より,円描画手法を用いて作製したゾーンプ レートは,真値と比較して類似した濃淡の周期パターンが得られていることがわか る.また,図4.2(b),図4.2(c)より,Arithmetical circle algorithm で作製したゾーン プレートには,Bresenham algorithmを用いて作製したゾーンプレートに見られる 非描画画素が存在せず,より精確なゾーンプレートを作製できていることがわかる.

Arithmetical circle algorithm の描画原理を図 4.3 に示す. 同アルゴリズムでは, あ



図 4.2: 2 つの描画手法によるゾーンプレートの例:(a) 式 (2.22) を直接計算した場合 (真値),(b)Bresenham algorithm を用いた場合,(c)Arithmetical circle algorithm を用いた場合

る1点を起点として、デジタルなグリッド上に描画した連続系の円(灰色線)をトレースするように、グリッド上の点を選択し、円を描画する.図4.3に示す(X,Y)を起点とすると、(a),(b),(c)へ進む3つの可能性を評価してトレースする方向を決定する.トレース方向の決定に使用する評価関数*F*(*X*,*Y*)は、

$$F(X,Y) = X^{2} + Y^{2} - R^{2} - R, \qquad (4.1)$$

と定義され、表4.1に示す基準に従ってトレース方向を判断する.

また,式(4.1)は, *Y*の増分に対して −2*Y* + 1 増加し, *X*の減分に対して 2*X* + 1 増分するため, (a) に進むとき *F* は −2*Y* + 1 増分し, (c) に進むとき 2*X* + 1 増分し, (b) に進むとき 2(*X* + *Y* + 1) 増分する. この性質を利用することで,高速な円描画 を実現している.



図 4.3: Arithmetical circle algorithm の原理

表 4.1: Arithmetical circle algorithm におけるトレース方向の判定基準

トレース方向	判定基準
(a)	F > 2(Y - R)
(b)	(a),(c) いずれにも該当しない場合
(c)	F < -2X - 1

#### 4.1.2.2 RLE-Crepe 法

Υ

Arithmetical circle algorithm に基づく円描画手法は,LUT に記録している1次元 データを低負荷に同心円状展開できるが,トレース方向の決定に必要な条件分岐と, メモリの整列方向の抗う方向にメモリアクセスが生じるため,計算機実装の観点か らは非効率である.そこで,デジタルに描画された同心円の半径分布に関する特性 を漸化式として導き,先の課題を解決する同心円描画手法である RLE-Crepe 法を開 発した [33].

15	15	15	15	15												
14	14	14	14	14	15	15	15									
13	13	13	13	13	14	14	14	15	15							
12	12	12	12	12	13	13	13	14	14	15						
11	11	11	11	11	12	12	13	13	14	14	15					
10	10	10	10	10	11	11	12	12	13	13	14	15				
9	9	9	9	9	10	10	11	11	12	13	13	14	15			
8	8	8	8	9	9	9	10	11	11	12	13	14	14	15		
7	7	7	7	8	8	9	9	10	11	11	12	13	14	15		
6	6	6	6	7	7	8	8	9	10	11	12	13	13	14	15	
5	5	5	5	6	6	7	8	9	9	10	11	12	13	14	15	
4	4	4	4	5	6	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
3	3	3	4	4	5	6	7	8	9	9	10	11	12	13	14	15
2	2	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
								Х								

図 4.4: 同心円の半径分布

図 4.4 に例として半径 (*R*)15 までの分布を示す. 図中の数字は, グリッド左下(中心)と各点との距離を整数値に丸めたものであり, デジタルな同心円の半径に相当する. Arithmetical circle algorithm を用いた手法では, 例えば (0,14)を起点として, LUT から読み出した値を  $Y \neq 0$  以外の半径が 14 となっている画素を探索しながら 円を描画し,全ての半径について同様に行うことで同心円を描画する. 一方,計算

機のメモリは一般に "row-major" や "column-major" など,いずれかの軸方向に連 続するように配置されており,その方向に従ったメモリアクセスは高効率になるよ うに設計されている.したがって,Arithmetical circle algorithm を用いた手法では メモリの整列方向に抗うメモリアクセスが生じるため,メモリ利用効率が悪くなり, 計算速度が遅くなる.

RLE-Crepe 法では、半径分布を動径方向に見た時の数列にある、以下の特性を活用してメモリアクセスを効率化する.

1. 群数列である.

2. 隣接する群の値は連続する.

3. 第1群の値は Y に一致する.

これらの特性を考えると、第1群の値は自明であるため、各群のランレングスを求めれば群数列を構築できる. RLE-Crepe 法は、各群のランレングスに関する漸化式を用いた手法であり、同心円の半径分布をメモリの整列方向に従って生成することで、ゾーンプレート復号にかかるメモリ利用効率を向上できる.

ランレングスの求め方を図 4.5 を用いて説明する. 第 n 群の半径を  $R_n$ , ランレン グスを  $l_n$  とし, 群の先頭と終端位置をそれぞれ  $a_n, b_n$  とすると,  $l_n$  は,

$$l_n = floor(b_n) - ceil(a_n) + 1, \qquad (4.2)$$

となる.ここで、 $floor(\cdot)$ は切り捨て、 $ceil(\cdot)$ は切り上げを表している. $R_n$ は各画素における連続系の半径  $r_n$ を丸めたものであるため、 $a_n, b_n$ はそれぞれ、

$$a_n = \{Y^2 + (Y + n - 0.5)^2\}^{\frac{1}{2}}, \tag{4.3}$$

$$b_n = \{Y^2 + (Y + n + 0.5)^2\}^{\frac{1}{2}}, \qquad (4.4)$$

とできる.式(4.3),式(4.4)より,

$$b_n^2 = a_n^2 + 2(Y+n), (4.5)$$

$$= a_n^2 + d_n, (4.6)$$

$$b_n = (a_n^2 + d_n)^{\frac{1}{2}}, (4.7)$$

とできる.ここで,

$$d_n = 2(Y+n), (4.8)$$

$$a_0 = 0, \tag{4.9}$$

$$b_0 = (Y + 0.25)^{\frac{1}{2}}, \tag{4.10}$$

である.したがって, $a_n, b_n, d_n$ の関係式は,

$$a_{n+1} = b_n, \tag{4.11}$$

$$d_{n+1} = d_n + 2, (4.12)$$



図 4.5: ランレングスの導出方法 ([33] より引用)

となる.  $b_n, b_n^2$ は, それぞれ  $a_{n+1}, a_{n+1}^2$ と一致するため, これらの値を保持してお けば,式 (4.2),式 (4.6),式 (4.7),式 (4.12)より, $l_n$ は3回の加算,および1回の 平方根演算のみで求められる.

#### 4.1.2.3 量子化誤差補正手法

Crepe 法では,動径上でサンプリングした複素振幅分布を動径以外に展開するため,動径以外の領域について量子化誤差が発生する.以降,図4.6を用いて量子化 誤差の発生要因と,その対策を説明する.

点光源とホログラム面との距離計算に式 (2.23) に示したフレネル近似が成立する 場合,ホログラム面上の複素振幅分布は式 (2.24) で表される.式 (2.24) において, exp 内の第2項の分子  $x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2$  は,ゾーンプレートの中心とホログラム面上の画素 との距離に相当し,

$$x_{\alpha j}^{2} + y_{\alpha j}^{2} = R(x_{\alpha j}, y_{\alpha j})^{2}, \qquad (4.13)$$

と表せる.ここで,  $R(x_{\alpha j}, y_{\alpha j})$  はゾーンプレートの中心とホログラム面上の画素との距離である.

Crepe 法において, LUT に格納する複素振幅分布は動径上でサンプリングされる ため,  $R(x_{\alpha j}, y_{\alpha j})$ は整数になる. ところが, 動径上以外の画素において,  $R(x_{\alpha j}, y_{\alpha j})$ の多くは整数ではないため, 量子化誤差が生じる. ホログラム面上の画素 (X, Y) に  $R(x_{\alpha j}, y_{\alpha j}) = R_0$  で LUT 上に作成された複素振幅をコピーした場合の, ホログラム 面上の距離に関する量子化誤差を  $\varepsilon$  とすると,

$$\varepsilon = X^2 + Y^2 - R_0^2, \tag{4.14}$$


図 4.6: 量子化誤差の発生要因

となる.  $(R_0,0)$ における複素振幅分布の位相部 $\Theta_j(R_0,0)$ は、式(2.24)より、

$$\Theta_j(R_0,0) = 2\pi \frac{p}{\lambda} \left( z_j + \frac{R_0^2}{2z_j} \right), \qquad (4.15)$$

となるため, (X,Y)における位相 $\Theta_j(X,Y)$ は,式 (4.14),式 (4.15) より,

$$\Theta_j(X,Y) = 2\pi \frac{p}{\lambda} \left( z_j + \frac{R_0^2 + \varepsilon}{2z_j} \right), \qquad (4.16)$$

$$= 2\pi \frac{p}{\lambda} \left( z_j + \frac{R_0^2}{2z_j} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\varepsilon}{2z_j} \right), \qquad (4.17)$$

$$= \Theta_{0j} + \Theta_{\varepsilon j}, \tag{4.18}$$

となる.ここで、位相の誤差 $\Theta_{\epsilon j}$ を,

$$\Theta_{\varepsilon j} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\varepsilon}{2z_j}\right),\tag{4.19}$$

とした.したがって,動径方向以外のある(X,Y)における複素振幅は,

$$\operatorname{Re}[U(X,Y)] = \cos(\Theta_{0j} + \Theta_{\varepsilon j}), \qquad (4.20)$$

$$\operatorname{Im}[U(X,Y)] = \sin(\Theta_{0j} + \Theta_{\varepsilon j}), \qquad (4.21)$$

となる.

三角関数の加法定理により、式(4.20)、式(4.21)を展開すると、

$$\operatorname{Re}[U(X,Y)] = \cos \Theta_{0j} \cos \Theta_{\varepsilon j} - \sin \Theta_{0j} \sin \Theta_{\varepsilon j}, \qquad (4.22)$$

$$\operatorname{Im}[U(X,Y)] = \sin \Theta_{0j} \cos \Theta_{\varepsilon j} + \cos \Theta_{0j} \sin \Theta_{\varepsilon j}, \qquad (4.23)$$

となる.  $\varepsilon$ は非常に小さいため、 $\Theta_0 \gg \Theta_{\varepsilon}$ となる. ここで、三角関数の近似、

$$\sin(\delta) \approx \delta,$$
 (4.24)

$$\cos(\delta) \approx 1 - \frac{1}{2}\delta^2,$$
 (4.25)

を適用すると、式(4.22)、式(4.23)は、

$$\operatorname{Re}[U(X,Y)] = \left(1 - \frac{\Theta_{\varepsilon_j}^2}{2}\right) \cos \Theta_{0j} - \Theta_{\varepsilon_j} \sin \Theta_{0j}, \qquad (4.26)$$

$$\operatorname{Im}[U(X,Y)] = \left(1 - \frac{\Theta_{\varepsilon_j}^2}{2}\right) \sin \Theta_{0j} + \Theta_{\varepsilon_j} \cos \Theta_{0j}, \qquad (4.27)$$

となる.以上の計算を各画素に加えることで, 誤差を補正することができる. 誤差 補正に伴う計算は,式 (4.19)で求められる  $\Theta_{\varepsilon_j}$  と,既知の  $\sin \Theta_{0j}$ ,  $\cos \Theta_{0j}$  を用いた 四則演算のみであるため,加わる負荷は小さい.

また,式(4.25)により強い近似,

$$\cos(\delta) \approx 1,$$
 (4.28)

をかければ,式(4.26),式(4.27)は,

$$\operatorname{Re}[U(X,Y)] = \cos \Theta_{0j} - \Theta_{\varepsilon j} \sin \Theta_{0j}, \qquad (4.29)$$

$$\operatorname{Im}[U(X,Y)] = \sin \Theta_{0j} + \Theta_{\varepsilon j} \cos \Theta_{0j}, \qquad (4.30)$$

となり、よりシンプルな形になる.このときに加わる計算は、両式の第2項のみで あり、乗算及び加算が1つずつ含まれるだけである.従って、誤差補正に必要な計 算負荷は非常に小さい.

また,式 (4.14) は Arithmetical circle algorithm における判断基準の式 (4.1) に含 まれているため、効率的に  $\varepsilon$  を更新できる. RLE-Crepe 法には式 (4.14) が含まれて いないが、*X*,*Y* および *R* の増分に対して、

$$\varepsilon|_{(X+1,Y,R)} - \varepsilon|_{(X,Y,R)} = 2X + 1,$$
(4.31)

$$\varepsilon|_{(X,Y+1,R)} - \varepsilon|_{(X,Y,R)} = 2Y + 1,$$
 (4.32)

$$\varepsilon|_{(X,Y,R+1)} - \varepsilon|_{(X,Y,R)} = -(2R+1),$$
 (4.33)

(4.34)

となるため、効率的に誤差補正を実装できる.

#### 4.1.3 STEP3 ゾーンプレートの合成

ゾーンプレートの複素振幅分布は、式 (2.15)、式 (2.20)、または式 (2.23) によって 計算される.このとき、 $x_{\alpha j}, y_{\alpha j}$ は点光源とホログラム面上の画素との相対距離であ り、ゾーンプレートのパターン自体には影響を与えないため、図 4.1 のように、点 光源の水平位置  $(x_j, y_j)$  に従って復号したゾーンプレートを合成する.本研究では、 これらの動作が印鑑を押す動作に似ていることから、Crepe 法と対比させて "Stamp 法" と呼ぶ.

### 4.2 評価·考察

有効性評価のため、本手法を用いて作製した CGH を、再生画質と計算時間、および必要メモリ量の観点から評価した.また、画質評価のため、本手法で作成した ゾーンプレートの集光精度を評価した.CGH 作製には表 4.2 に示す環境を用い、図 4.7 に示す 2 つの 3 次元像を用いて CGH を作製した.

図 4.9, 図 4.10, 表 4.3, 表 4.4 にゾーンプレートの集光精度評価結果を,表 4.5 に CGH の画質評価結果,および計算時間評価結果を示す.また,作製した CGH に対 する再生シミュレーション結果の例を図 4.11,図 4.12 に,光学系での再生像の例を 図 4.13 に示す.

以下,評価方法の詳細と,これら評価結果の考察を述べる.

CPU	Intel Core i7-4970K 4.00GHz (シングルコアのみ)
メモリ	DDR3 PC-12800 8.0GB
OS	Windows 7 Service Pack 1
コンパイラ	Intel C++ Compiler 15.0
コンパイラオプション	/arch:SSE3, /fp:fast=2, /O3, /Ob2
	/Oi, /Ot, /Quse-inteloptimised-headers
浮動小数点精度	真值作製:倍精度 (double)
	開発手法実装:単精度 (float)
CGH の解像度	$1,920 \times 1,080 \text{ or } 3,840 \times 2,160 \text{ [pixels]}$

表 4.2: CGH 作製環境

#### 4.2.1 画質評価

以下の2手法により提案手法を画質観点で評価する.



図 4.7: 評価に用いた 3 次元モデル:(a) ティラノサウルス 11,646 点, (b) 地球 30,467 点

- 1. ゾーンプレートの集光精度評価
- 2. 3次元像の再生画質

#### 4.2.1.1 ゾーンプレートの集光精度評価

ゾーンプレートは点光源数1のCGHに相当するため,その集光特性を評価するこ とで、3次元像再生の画質劣化要因を解析できる.今回は、光学計算ライブラリであ るCWOライブラリ [54]を用い、角スペクトル法によって所望焦点を中心に80[µm] 間隔で前後50スライス、合計100スライスの光伝搬シミュレーションを行い、ゾー ンプレート中心から伸ばした光軸上の光強度分布と焦点位置の光強度分布を解析す ることで、誤差補正手法を含めた本手法の有効性を検証した.図4.8に解析手法の 概念図を示す.

解析結果に対し、以下の4項目について評価した.

- 1. 振幅強度の最大をとる位置 d<sub>f</sub>
- 2. 振幅強度の最大値 A (式 (2.20) の直接計算における最大値を1としたときの相 対値)
- 3. ゾーンプレート中心から伸ばした光軸上奥行き方向における光強度分布の半 値幅 *HW*<sub>d</sub>
- 4. 焦点上の再生面における X 軸, Y 軸方向の半値幅の平均値 HW<sub>XY</sub>

評価するゾーンプレートは,式(2.20)の直接計算,フレネル近似(式(2.24)), CS法, RLE-Crepe法によって作製したゾーンプレートであり,焦点距離は0.3[m], 1.0[m]とした.また,4.1.2.3節で示した量子化補正手法は,複素振幅分布をフレネ ル近似することが前提となっているが,実験的に式(2.20)の直接計算によって求め た複素振幅分布に対して適用した場合も検証した.



図 4.8: ゾーンプレートの集光精度解析方法

表4.3,表4.4より,ゾーンプレートの焦点距離について,複素振幅分布計算にフレ ネル近似を適用した場合,焦点距離が所望焦点に対してわずかにずれてしまうこと が確認された.また,同表より,CS法とRLE-Crepe法について量子化誤差補正前後 の振幅強度の最大値 A,および2つの半値幅 HW<sub>d</sub>,HW<sub>XY</sub>を比べると,複素振幅分 布の計算手法にかかわらず,量子化誤差補正手法によって改善されていることがわか る.改善効果はCS法,RLE-Crepe法いずれの場合においても,式(4.29),式(4.30) 適用時が最も大きく,特に振幅強度の最大値 A については,平均して約50%の改善 効果があった.また,LUT法を用いる場合,LUTは事前計算されるため,LUT構 築に必要な計算時間は考える必要がなく,より高い精度・性能が得られる手法を選 択するべきである.そのため,本研究では以降,複素振幅分布計算には式(2.20)の 直接計算を用いるものとする.

	$d_f[\mathbf{m}]$	<i>A</i> [A.U.]	$HW_d$ [mm]	$HW_{XY}[\mu m]$
式 (2.20)の直接計算	0.30000	1.0000	0.874	8.27
フレネル近似 (式 (2.24))	0.29992	0.9991	0.873	8.27
LUT 作製/	こフレネル	~近似適用		
CS法+補正なし	0.29992	0.6488	0.881	8.44
CS法+式(4.29),式(4.30)	0.29992	0.9613	0.875	8.28
CS法+式(4.26),式(4.27)	0.29992	0.9758	0.874	8.27
CS法+式(4.22),式(4.23)	0.29992	0.9795	0.874	8.27
RLE-Crepe 法+補正なし	0.29992	0.6488	0.881	8.44
RLE-Crepe 法+式 (4.29), 式 (4.30)	0.29992	0.9613	0.875	8.28
RLE-Crepe 法+式 (4.26), 式 (4.27)	0.29992	0.9761	0.874	8.27
RLE-Crepe 法+式 (4.22), 式 (4.23)	0.29992	0.9795	0.874	8.27
LUT 作製に式	(2.20)の直	[接計算を]	適用	
CS 法+補正なし	0.30000	0.6486	0.881	8.44
CS 法+式 (4.29), 式 (4.30)	0.30000	0.9611	0.875	8.28
CS法+式(4.26),式(4.27)	0.30000	0.9751	0.875	8.28
CS法+式(4.22,式(4.23)	0.30000	0.9790	0.874	8.27
RLE-Crepe 法+補正なし	0.30000	0.6486	0.881	8.44
RLE-Crepe 法+式 (4.29), 式 (4.30)	0.30000	0.9611	0.875	8.28
RLE-Crepe 法+式 (4.26), 式 (4.27)	0.30000	0.9754	0.874	8.28
RLE-Crepe 法+式(4.22), 式(4.23)	0.30000	0.9790	0.874	8.27

表 4.3: ゾーンプレートの集光精度評価 (所望焦点距離 0.3[m])

d [m]	A[A II]	HW.[mm]	HW <sub>ww</sub> [µm]
$\frac{u_f[\Pi]}{1.00000}$	1 0000		<u>8.97</u>
1.00000	1.0000	0.873	0.21
0.99976	0.9831	0.877	8.27
こフレネル	近似適用		
0.99976	0.5678	0.883	8.45
0.99976	0.8434	0.878	8.28
0.99976	0.8563	0.877	8.28
0.99976	0.8593	0.877	8.27
0.99976	0.5677	0.883	8.45
0.99976	0.8434	0.878	8.29
0.99976	0.8562	0.877	8.28
0.99976	0.8593	0.877	8.28
(2.20)の直	〔接計算を〕	適用	
1.00000	0.5724	0.881	8.44
1.00000	0.8508	0.876	8.28
1.00000	0.8636	0.875	8.27
1.00000	0.8668	0.874	8.27
1.00000	0.5608	0.881	8.44
1.00000	0.8508	0.876	8.28
1.00000	0.8636	0.875	8.27
1.00000	0.8668	0.874	8.27
	$d_f$ [m] 1.00000 0.99976 2フレネル 0.99976 0.99976 0.99976 0.99976 0.99976 0.99976 0.99976 0.99976 0.99976 2.20)の首 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000	$d_f$ [m] $A$ [A.U.]1.000001.00000.999760.9831 $Z > V > N U U @ B B$ 0.999760.56780.999760.84340.999760.85630.999760.85630.999760.85630.999760.85620.999760.85620.999760.85620.999760.85932.20) の直接計算を決1.000000.85081.000000.86361.000000.86681.000000.86681.000000.86361.000000.86361.000000.86361.000000.86361.000000.86361.000000.86361.000000.86361.000000.86361.000000.8636	$d_f$ [m] $A$ [A.U.] $HW_d$ [mm]1.000001.00000.8730.999760.98310.877 $Z > V > N U U$ (適用0.899760.56780.999760.84340.8780.999760.85630.8770.999760.85630.8770.999760.85630.8770.999760.85620.8770.999760.85620.8770.999760.85620.8770.999760.85630.8772.20)の直接計算を適用1.000000.86361.000000.86680.8741.000000.86680.8741.000000.86680.8751.000000.86360.8751.000000.86360.8751.000000.86360.8751.000000.86360.8751.000000.86360.8751.000000.86360.8751.000000.86680.8751.000000.86680.8751.000000.86680.875

表 4.4: ゾーンプレートの集光精度評価 (所望焦点距離 1.0[m])



図 4.9: CS 法, RLE-Crepe 法におけるゾーンプレート中心軸上の光強度分布 (焦点 距離 0.3[m])



図 4.10: CS 法, RLE-Crepe 法におけるゾーンプレート中心軸上の光強度分布 (焦点 距離 1.0[m])

#### 4.2.1.2 3次元像の再生画質評価

ゾーンプレートの集光精度評価と同様に、3次元像の中心から前後50スライスず つ、合計100スライスの光強度分布を、角スペクトル法による再生シミュレーショ ンによって求め、各スライスに対して真値とのPeak Signal Noise to Ratio (PSNR) の平均値を画質として評価する.なお、前節の結果から、LUT には式 (2.20)の直接 計算によって求めた複素振幅分布を記録した.真値は計算した式 (2.20)の直接計算 によって作製した CGH に対する再生シミュレーション結果である.

符号化圧縮映像等の画質評価指標として, PSNR を用いた Mean Opinion Score (MOS) が一般に使われており, 元映像を真値として最低でも 30[dB] の PSNR を確 保することが, 映像品質を測る基準となっている [55]. 同指標が 3 次元映像に対し て直接適用できるわけではないが, 画質評価の基準の1つであると考え, 本研究に おいても 30[dB] を画質の評価基準とする.表4.5より, 再生距離 0.3[m], かつ CGH 解像度 3,840×2,160 の条件を除いて, PSNR は基準を超えており, 提案手法により 十分な品質を得られていると言える.一方,基準を超えなかったケースでは, 真値に 含まれる式 (3.1) に定義する回折限界半径を超える領域の成分に起因するノイズが強 く影響していると考えられる.回折限界半径に合わせて, 真値とする式 (2.20) の直 接計算を厳密に制御すれば,表4.5に示した評価結果より高い値を得られるが,今回 は並列計算機の実装を想定し,処理効率向上の観点から,真値には回折限界半径に 合わせた厳密な制御はしていないため,一部で基準を下回る画質評価結果となった.

	表 4.5: CS法, R	LE-Crep	e 法を用い	た計算時	<b>時間と画質</b>	評価		1	
点光源数			11,0	346			30,	467	
CGH サイズ [pixels	[5	1,920	$\times 1,080$	3,840	imes 2,160	1,920	imes 1,080	3,840 >	< 2,160
н Т		PSNR	計算	PSNR	計算	PSNR	計算	PSNR.	計算.
		[dB]	Time[s]	[dB]	時間 [s]	[dB]	時間 [s]	[dB]	時間 [s]
式 (2.20) の直接]	計算	ı	308	I	2190	ı	806	I	4970
CS 法+補正な	2	27.5	50.0	22.2	107	30.3	101	23.6	194
CS 法+式(4.29), 式	(4.30)	31.0	50.1	23.2	107	32.5	100	24.7	194
CS 法+式 (4.26), 式	(4.27)	31.3	49.8	23.3	106	32.8	101	24.9	193
CS 法+式(4.22), 式	(4.23)	31.3	50.5	23.2	107	32.6	102	24.9	195
RLE-Crepe 法+補可	こなし	27.5	40.8	22.2	90.0	30.3	90.5	23.6	173
RLE-Crepe 法+式 (4.29),	武 (4.30)	31.0	41.6	23.2	91.0	32.5	90.6	24.7	176
RLE-Crepe 法+式 (4.26),	式 (4.27)	31.3	43.7	23.3	96.0	32.8	93.7	24.9	180
RLE-Crepe 法+式 (4.22),	<del>ड्र</del> ी (4.23)	31.3	53.0	23.2	113.2	32.6	104	24.9	200
式 (2.20) の直接計	渔	I	308	I	1230	I	805	I	3220
CS 法+補正なし		31.8	362	29.6	772	33.6	465	31.4	1073
CS 法+式(4.29), 式(	(4.30)	32.6	367	32.0	776	34.4	467	33.6	1073
CS 法十式 (4.26), 式	(4.27)	32.6	363	32.3	768	34.5	466	34.1	1067
CS 法+式(4.22), 式	(4.23)	32.6	367	32.3	775	34.5	464	34.2	1070
RLE-Crepe 法+補正	きなし	31.8	125	29.6	305	33.6	195	31.4	539
RLE-Crepe 法+式 (4.29),	武 (4.30)	32.6	135	32.0	325	34.4	202	33.6	547
RLE-Crepe 法+式 (4.26)	, 式 (4.27)	32.6	159	32.3	371	34.5	230	34.1	613
RLE-Crepe 法十式 (4.22),	式 (4.23)	32.6	254	32.3	554	34.5	337	34.2	821

-Ē 

#### 4.2.2 計算時間評価

表4.5より,十分な画質が確保されている結果を見ると,CS法は直接計算に比べ て最大で約8倍の高速化を達成し,RLE-Crepe法は最大で約9倍の高速化を達成し た.近距離(0.3[m])の方が高速化効果が高く,長距離(1.0[m])になると低くなってい る.これはLUTからのメモリ読み出し量の差によるものと考えられ,近距離でゾー ンプレートの平均半径が小さい場合ではメモリ読み出し量が相対的に小さく,高速 化効果が高くなったものと考えられる.

#### 4.2.3 必要メモリ量

焦点距離 dを持つゾーンプレートに必要なメモリ容量 V(d) は,式 (3.1) から、複素振幅の記録バイト長を bl とすると、

$$V(d) = bl \times \left[ d \tan\left\{ \sin\left(\frac{\lambda}{2p}\right) \right\}^{-1} \right]^2, \qquad (4.35)$$

となる.ここで、pは CGH を入力する SLM の画素ピッチ、 $\lambda$  は参照光の波長である.本手法は、ゾーンプレートの中心から面内軸上外郭方向の複素振幅分布を記録するため、同じく焦点距離 d のゾーンプレートに対応するデータの必要メモリ容量 $V_{CS}(d)$ は、

$$V_{CS}(d) = bl \times \left[ d \tan\left\{ \sin\left(\frac{\lambda}{2p}\right) \right\}^{-1} \right], \qquad (4.36)$$

 $8[\mu m]$ 

となる.表4.6 に示す条件で,基準焦点距離 *d* を中心に,奥行き方向のステップ幅 *st* 間隔で,レイヤー数 *L* の LUT を作製する場合,式 (4.35) より,ゾーンプレートの全 領域を記録する LUT に必要な容量は約 3.1[GB] となる.一方, CS 法, RLE-Crepe 法では,式 (4.36) より約 2.5[MB] となるため, CS 法によるメモリ容量の削減効果は 約 1000 分の 1 になる.

表 4.6: 必要メモリ量の試算条件基準焦点距離 d0.3[m]レイヤー数 L256奥行き方向のステップ幅 st280[µm]参照光の波長 λ520[nm]複素振幅分布のバイト長 bl8[byte]

SLM の画素ピッチp



図 4.11: 再生シミュレーションの例(再生距離:1.0[m], CGH 解像度: 1,920×1,080[pixels]): (a) 式 (2.20) の直接計算, (b)CS 法+式 (4.29) 式 (4.30), (c)RLE-Crepe 法+式 (4.29) 式 (4.30)



図 4.12: 再生シミュレーションの例(再生距離:0.3[m], CGH 解像度: 3,840×2,160[pixels]): (a) 式 (2.20)の直接計算, (b)CS 法+式 (4.29) 式 (4.30), (c)RLE-Crepe 法+式 (4.29) 式 (4.30)





図 4.13: 光学系再生像の例 (再生距離:1.0[m], CGH 解像度:1,920×1,080[pixels], CGH 作成手法:RLE-Crepe 法+式(4.29) 式(4.30)): (a) ティラノサウルス 11,646 点,(b) 地球 30,467 点

### 4.3 まとめ

本研究では、ゾーンプレートを記録単位とする LUT 法による CGH 計算手法にお いて、必要メモリ量の削減を目的としたゾーンプレートの圧縮・復号手法を開発し た.ゾーンプレートの中心から軸上外郭方向の複素振幅分布を LUT に記録すること で、必要メモリ量をメガバイトオーダーにまで落とすことに成功し、十分な再生画 質と計算処理の高速化を実現した.また、4.1.2.3 節で言及した誤差補正手法につい て、表 4.3、表 4.4、表 4.5 から、適用前に比べて集光精度、画質の両面で改善してお り、その有効性が確かめられた.

本手法は、必要メモリ量をキロバイトオーダーまで落とせる S. C. Kim らの手 法 [31] に比べ、必要メモリ容量の観点からは及ばないが、同様にゾーンプレートの レンズ効果を応用した焦点距離の補正手法を適用すれば、同等のメモリ量削減効果 が見込める.また、フレーム間で大きな動き変化が連続するような映像シーンにお いて、動き補償に基づく計算量削減手法は、フレーム間の類似箇所探索コストが大 きくなる等の理由により、計算量削減効果が薄くなる可能性がある.このような場 合、全フレームについて逐次計算する計算手法が計算コストの観点から優位になる 可能性があり、本手法が有効となるケースが存在すると考えられる.

# 第5章 三角関数の簡易近似アルゴリズ ムを用いた高速計算手法

本章では、CGH 計算における三角関数計算の負荷軽減を目的として開発した、正 弦/余弦関数の簡易近似手法 [34] について述べる.

CGH 計算において,式 (2.20) 中に含まれる三角関数計算,および平方根演算を 含む距離計算の計算負荷の高さが、高速計算の障壁となっている. これら計算負荷 の軽減にあたっては、演算処理そのものの工夫はもとより、FPGA や GPU など実 装するデバイスの制約条件に対する適切性、あるいは実装容易性を考慮に入れたア ルゴリズム開発が必要になる.課題となる2つの計算処理の内,距離計算は漸化式 法 [24-26] によって, 軽量, かつ実装容易な処理に置き換えることができ, 課題は解 決している.一方,三角関数の処理負荷軽減手法には、多項式近似による手法 [56.57] や漸化式による手法 [27],および LUT を用いた手法が存在している.多項式近似は 主にテイラー展開をベースにしているため、高次のべき乗演算と除算が含まれてし まい, 演算負荷は低くなりにくく, 実装も複雑になる. 同様に, 漸化式による手法は 初項計算に三角関数演算が含まれてしまうため、同様に演算負荷を下げにくく、実 装が複雑になる懸念がある.これらの背景から、CGH 専用計算機 HORN では、事 前計算した三角関数の値を記録したテーブルを演算ユニットごとに配置し、三角関 数計算に代替する手法が実装されてきた [15-17]. しかし, FPGA 内のリソースは 限られているため、三角関数テーブルに用いられるメモリ領域が CGH 計算回路の 並列度を制限する可能性もあり、将来的な製品化に必要な組み込み実装を考慮する と、LUT が有効でなくなる可能性がある.また、GPU もチップ内の高速なメモリ 量に制約があるため,三角関数計算手法の適用要件はFPGA と同様である. すなわ ち,三角関数演算にかかる計算負荷軽減と省メモリ,実装容易性をすべて満たす手 法はこれまでに存在しなかった.

そこで本研究では、三角関数演算にかかる計算負荷軽減と実装容易性を両立し、 かつLUTに依らずメモリ量を必要としない三角関数実装手法を開発した.

### 5.1 開発手法

本手法は、図2.6に示した三角関数計算部の代替手法である.三角関数計算部は、 前段の位相計算部出力を入力とし、入力値に合わせた正弦/余弦関数の値を積算部へ 出力する.本研究では、位相計算部出力を簡単な演算で直接加工し、三角関数計算 部出力の近似値を出力する仕組みを開発した.以下、図5.1を用いて手法を説明す る.図5.1は説明のため、x軸方向について抽出した1次元の位相計算部出力から三 角関数部出力を得るまでの近似手順を示したものであるが、y軸方向への拡張も同 様の手順で行える.本手法では3段階の加工により出力を生成する.

#### 5.1.1 第1段階

図 5.1(a) は本手法の第 1 段階の加工を表している.ここでは、図中に黄色破線で示した三角関数計算部の真値と同調する波形を作るため、位相計算部出力の内、 $pr_{\alpha j}/\lambda$ の小数部を抽出し、図 5.1(a) の橙色実線のようなノコギリ波を作る.これは、三角関数計算部に含まれる余弦、正弦関数が 2π の周期関数であり、かつ位相計算部出力が 2π の倍数であるため、被乗数である  $pr_{\alpha j}/\lambda$ の整数部は三角関数計算部の出力波形に 影響せず、同小数部は三角関数部の出力波形に同調することに拠る.以降、 $pr_{\alpha j}/\lambda$ の小数部を $\rho$ とする. $\rho$ の値域は、[0,1]である.

また,正弦関数は余弦関数に対する  $3\pi/2$ の周期ずれを考慮し, $\rho$ に対して 0.75 を 加算したものの小数部をとった上で,以降の段階を踏めばよい.

#### 5.1.2 第2段階

第2段階では、図 5.1(b) に示したように、第1段階で作製したノコギリ波を振幅 の半分 (0.5) で折り返し、三角関数計算部と完全に同調する波形(灰色破線)を作 る.第2段階での出力をσとすると、折り返し処理は、

$$\sigma = |\rho - 0.5|,\tag{5.1}$$

となる.ここで、|・| は絶対値演算を表す. $\sigma$ の値域は $\rho$ の半分となり、[0,0.5] になる.

#### 5.1.3 第3段階

三角関数計算部の真値に波形をフィットさせるためには、 $\sigma$ を正規化し以下に示す2つの処理を行う.



図 5.1: 三角関数簡易近似手法の手順: (a) 第1段階, (b) 第2段階, (c) 第3段階

- 1. σの値域幅の半分である 0.25 だけマイナス方向にシフト
- 2. 値域を三角関数出力と同じ [-1,1] とするため4倍して出力

しかし、これらの処理は必ずしも必要なわけではない. 1.の処理はすべての点光源 について積算したホログラム面上の複素振幅分布から、0.25×点光源数を減算する ことと同義であり、近似波形の生成過程で逐一処理する必要はない. また、2.の処 理は CGH がすべての点光源について積算した複素振幅分布の位相を量子化して出 力することを考えれば、CGH には一切影響を与えないため不要である.

以上のステップにより,図 5.1(c) に灰色実線で示したような,三角関数部出力を 近似した波形を得られる.本手法によって得られる出力は,三角計算部出力の極値 位置を正確に再現できる.

## 5.2 評価·考察

4.2 節と同条件で,三角関数計算部を本近似手法で置き換えた場合の CGH 計算への影響を,画質,計算時間の観点から評価する.なお,位相計算部出力は式 (2.20)の直接計算と同様に,距離に関する近似を適用しない出力とした.

図 5.2, 図 5.3, 表 5.1, 表 5.2 にゾーンプレートの集光精度評価結果を,表 5.3 に CGH の画質評価結果,および計算時間評価結果を示す.また,作製した CGH に対する 再生シミュレーション結果の例を図 5.4, 図 5.5 に,光学系での再生像の例を図 5.6 に 示す.

以下,評価方法の詳細と,これら評価結果の考察を述べる.

#### 5.2.1 画質評価

4.2.1節と同様に,

- 1. ゾーンプレートの集光精度評価
- 3次元像の再生画質

の2項目について評価する.

#### 5.2.1.1 ゾーンプレートの集光精度評価

4.2.1.1 節と同様に評価を行った.表 5.1,表 5.2,図 5.2,図 5.3 より,焦点距離 d は 所望焦点距離と合致しており問題ない.振幅強度の最大値 A は CS 法, RLE-Crepe 法よりも改善しており,真値に対しても 90% 前後の光強度を実現している.半値 幅 HW<sub>d</sub>, HW<sub>XY</sub> は,いずれも真値と同等程度である.以上の結果から,提案手法は CS 法, RLE-Crepe 法と同等以上の性能を持つゾーンプレートを作製できることがわかる.

手法	$d_f[m]$	$A[\mathrm{A.U.}]$	$HW_d[mm]$	$HW_{XY}[\mu m]$
式 (2.20) の直接計算	0.30000	1.0000	0.874	8.27
CS 法+補正なし	0.30000	0.6486	0.881	8.44
CS 法+式 (4.29), 式 (4.30)	0.30000	0.9611	0.875	8.28
CS 法+式 (4.26), 式 (4.27)	0.30000	0.9751	0.875	8.28
CS法+式(4.22,式(4.23)	0.30000	0.9790	0.874	8.27
RLE-Crepe 法+補正なし	0.30000	0.6486	0.881	8.44
RLE-Crepe 法+式 (4.29), 式 (4.30)	0.30000	0.9611	0.875	8.28
RLE-Crepe 法+式 (4.26), 式 (4.27)	0.30000	0.9754	0.874	8.28
RLE-Crepe 法+式 (4.22), 式 (4.23)	0.30000	0.9790	0.874	8.27
本近似手法を適用した場合	0.30000	0.9692	0.873	8.27

表 5.1: ゾーンプレートの集光精度評価 (所望焦点距離 0.3[m])

表 5.2: ゾーンプレートの集光精度評価 (所望焦点距離 1.0[m])

手法	$d_f[m]$	A[A.U.]	$HW_d[mm]$	$HW_{XY}[\mu m]$
式 (2.20) の直接計算	1.00000	1.0000	0.873	8.27
CS 法+補正なし	1.00000	0.5724	0.881	8.44
CS 法+式 (4.29), 式 (4.30)	1.00000	0.8508	0.876	8.28
CS 法+式 (4.26), 式 (4.27)	1.00000	0.8636	0.875	8.27
CS法+式(4.22),式(4.23)	1.00000	0.8668	0.874	8.27
RLE-Crepe 法+補正なし	1.00000	0.5608	0.881	8.44
RLE-Crepe 法+式 (4.29), 式 (4.30)	1.00000	0.8508	0.876	8.28
RLE-Crepe 法+式 (4.26), 式 (4.27)	1.00000	0.8636	0.875	8.27
RLE-Crepe 法+式 (4.22), 式 (4.23)	1.00000	0.8668	0.874	8.27
本近似手法を適用した場合	1.00000	0.8824	0.874	8.27

#### 5.2.1.2 3次元像の再生画質評価

4.2.1.2節と同様に提案手法を評価する.表5.3より,本近似手法を適用して作製 した CGH の再生画質はすべての条件において基準となる 30[dB] を超えており,十 分な品質を確保できていることがわかる.また,CS法,RLE-Crepe 法で画質が劣 化していた条件においても,十分な画質を確保できており,再生画質の観点からは より安定した性能を持つことが示唆される.



図 5.2: 三角関数近似手法におけるゾーンプレート中心軸上の光強度分布 (焦点距離 0.3[m])



図 5.3: 三角関数近似手法におけるゾーンプレート中心軸上の光強度分布 (焦点距離 1.0[m])

	衣 5.3: 二月渕致い間多	<b>ラ</b> [以于{	ちん用くど		早時间と	回道武士			
	点光源数		11,(	346			30,	467	
	CGH サイズ [pixels]	1,920	$\times 1,080$	3,840	$\times 2,160$	1,920	$\times 1,080$	3,840 >	< 2,160
再生	H H	PSNR	計算	PSNR	計算	PSNR	計算	PSNR.	計算.
距离 [m]	<del>با</del>	[dB]	Time[s]	[dB]	時間 [s]	[dB]	時間 [s]	[dB]	時間 [s]
	式 (2.20) の直接計算	1	308	1	2190	I	806	1	4970
	CS 法+補正なし	27.5	50.0	22.2	107	30.3	101	23.6	194
	CS 法+式(4.29),式(4.30)	31.0	50.1	23.2	107	32.5	100	24.7	194
	CS 法+式(4.26), 式(4.27)	31.3	49.8	23.3	106	32.8	101	24.9	193
6 U	CS 法+式(4.22), 式(4.23)	31.3	50.5	23.2	107	32.6	102	24.9	195
0.0	RLE-Crepe 法+補正なし	27.5	40.8	22.2	90.0	30.3	90.5	23.6	173
	│ RLE-Crepe 法+式(4.29), 式(4.30) │	31.0	41.6	23.2	91.0	32.5	90.6	24.7	176
	│ RLE-Crepe 法+式(4.26), 式(4.27) │	31.3	43.7	23.3	96.0	32.8	93.7	24.9	180
	│ RLE-Crepe 法+式(4.22), 式(4.23) │	31.3	53.0	23.2	113.2	32.6	104	24.9	200
	本近似手法を適用した場合	37.1	56.7	32.1	344	38.5	148	33.4	768
	式 (2.20) の直接計算	ı	308	I	1230	I	805	I	3220
	CS 法+補正なし	31.8	362	29.6	772	33.6	465	31.4	1073
	CS 法+式(4.29), 式(4.30)	32.6	367	32.0	776	34.4	467	33.6	1073
	CS 法+式(4.26), 式(4.27)	32.6	363	32.3	768	34.5	466	34.1	1067
0	CS 法+式(4.22), 式(4.23)	32.6	367	32.3	775	34.5	464	34.2	1070
1.0	RLE-Crebe 法+補正なし	31.8	125	29.6	305	33.6	195	31.4	539
	│ RLE-Crepe 法+式 (4.29), 式 (4.30) │	32.6	135	32.0	325	34.4	202	33.6	547
	RLE-Crepe 法+式(4.26), 式(4.27)	32.6	159	32.3	371	34.5	230	34.1	613
	│ RLE-Crepe 法+式(4.22), 式(4.23) │	32.6	254	32.3	554	34.5	337	34.2	821
	本近似手法を適用した場合	31.2	56.7	31.5	227	33.6	148	33.9	594

まょう. 三角関数の館見沿所主法を田いた CCH 計管店開と声層証拠



図 5.4: 再生シミュレーションの例(再生距離:1.0[m], CGH 解像度: 1,920×1,080[pixels])

#### 5.2.2 計算時間評価

表 5.3 より,本近似手法を適用した場合,式 (2.20)の直接計算に比べて最大で約5 倍の高速化を実現している.これは提案手法による三角関数近似が,多項式近似や その他手法により実装されている三角関数よりも低負荷であることを示している.

## 5.3 三角関数近似を実現する回路

図5.7に提案手法を実現する論理回路の一例を示す.提案手法が固定小数点で実装 される場合,第1段階の小数部抽出は,位相計算部出力の小数部のみをビット抽出 すれば実現できるため,実質的な計算回路は,第2段階のσの計算部分になる.図 5.7 点線内左側は,式(5.1)の"-0.5"の演算部分であり,右側は絶対値演算の一例で ある.このように提案手法の実装は極めてシンプルであり,LUT法による実装に比 べ必要回路面積が少なくなることが示唆される.



図 5.5: 再生シミュレーションの例(再生距離:0.3[m], CGH 解像度: 3,840×2,160[pixels])

## 5.4 まとめ

本研究では、三角関数計算の計算負荷軽減を目的として、剰余、減算、絶対値演算のみで構成する三角関数近似手法を開発し、CPU 実装ではあるが十分な再生画 質と高速化効果があることを確認した.提案手法は、高速化性能において CS 法や RLE-Crepe 法に劣るケースがあるが、FPGA や GPU 等のメモリリソースが少ない 環境においては、両手法より実装に適しており、実装系に応じて使い分けることが 適当である.また、三角関数は多くの物理計算に用いられることから、CGH 計算に 限らず提案手法を適用できる可能性があり、今後の調査・研究が必要である.



(a)



図 5.6: 光学系再生像の例 (再生距離:1.0[m], CGH 解像度:1,920×1,080[pixels]): (a) ティラノサウルス 11,646 点,(b) 地球 30,467 点





## 第6章 おわりに

本研究では、CGH 計算の計算負荷低減を目的として、LUT 法をベースにした計 算手法と、三角関数の簡易近似手法を開発した。開発した3つの手法について、作 製した CGH が作る3次元映像の画質と CGH の計算時間から有効性を評価し、少な くとも CPU 実装においては、一部の条件を除き、十分な再生画質を担保しながら計 算時間を短縮できた。これは開発手法によって CGH 計算の計算負荷、あるいは計 算量が低減されたことを示しており、本研究の目的にかなう成果が得られた。

先に述べたとおり, CPU, GPUや FPGA など, 計算機にはそれぞれ特性や用途 に対する適性があり, 計算アルゴリズムも実装系に適したものでなければならない. その観点からすると, CS法, RLE-Crepe 法は LUT 法をベースにしていることから, 演算ユニットに対するメモリ量が十分,かつアクセス速度が十分高速である計算シ ステムに適しており,例えばメニイコアプロセッサの Intel Xeon Phi [58] は適切な実 装対象の1つである.他方,三角関数の簡易近似手法はメモリ量が少なく,小数点の 実現方式を含めた柔軟な実装が可能な FPGA などに適している.そのため, FPGA を用いた CGH 専用計算機 HORN [15–17] は,最も効果的な実装対象であると考え られ,2016 年現在の最新バージョンである HORN-8 への実装に向けた取り組みを進 めている.

他方,電子ホログラフィシステムの実現には,実時間での CGH 出力が不可欠であ り,現状のシステムでは未だ不十分である.実現のためには,一層の計算量・負荷 低減手法,および実装手法が必要であり,継続した研究が為されなければならない.

54

## 参考文献

- [1] 尾上守夫,池内克史,羽倉弘之,"3次元映像ハンドブック,"朝倉書店 (2006).
- [2] 木津直樹,吉井秀樹,松尾洋一,安井裕信,奥田悟崇, "3D 対応液晶ディスプレイ RDT223WX-3D," 三菱電機技報 (2012).
- [3] J. Geng, "Three-dimensional display technologies," Adv. Opt. Photon., 5, 456– 535 (2013).
- [4] 財団法人 機械システム振興協会,光産業技術振興協会,"自然な立体視を可能 とする空間像の形成に関する調査研究報告書"(2008).
- [5] 西辻崇,下馬場朋禄,角江崇,伊藤智義,"電子ホログラフィにおける計算負荷 低減技術," 第16回情報フォトニクス研究グループ研究会 講演予稿集,I-04 (2015).
- [6] HOLOEYE PLUTO Phase Only Spatial Light Modulator (Reflective) product guide, http://www.holoeye.com/spatial\_light\_modulators\_pluto.html
- [7] R. Stahl and M. Jayapala, "Holographic displays and smart lenses," Opt. Photonik, 6, 39–42 (2011).
- [8] D. E. Smalley, Q. Y. J. Smithwick, V. M. Bove Jr., J. Barabas, and S. Jolly, "Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays," Nature, 498, 313–317 (2013).
- [9] S. Reichelt, R. Hussler, N. Leister, G. Ftterer, H. Stolle, and A. Schwerdtner, "Holographic 3-D displays?electro-holography within the grasp of commercialization," in Advances in Lasers and Electro Optics, N. Costa and A. Cartaxo, eds., Chap. 29. (INTECH, 2012).
- [10] TOP 500 Supercomputer sites, http://www.top500.org/
- [11] N. Takada, T. Shimobaba, H. Nakayama, A. Shiraki, N. Okada, M. Oikawa, N. Masuda, and T. Ito, "Fast high-resolution computer-generated hologram"

computation using multiple graphics processing unit cluster system," Appl. Opt., **51**, 7303–7307 (2012).

- [12] H. Niwase, N. Takada, H. Araki, H. Nakayama, A. Sugiyama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Real-time spatiotemporal division multiplexing electroholography with a single graphics processing unit utilizing movie features," Opt. Express, 22, 28052–28057 (2014).
- [13] T. Shimobaba, T. Ito, N. Masuda, Y. Ichihashi, and N. Takada, "Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL," Opt. Express, 18,9955–9960 (2010).
- [14] K. Murano, T. Shimobaba, A. Sugiyama, N. Takada, T. Kakue, M. Oikawa, and T. Ito, "Fast computation of computer-generated hologram using Xeon Phi coprocessor," Comp.Phys. Commun., 185, 2742–2757 (2014).
- [15] T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba, and T. Sugie, "Special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography," Opt. Express,13, 1923–1932 (2005).
- [16] Y. Ichihashi, H. Nakayama, T. Ito, N. Masuda, T. Shimobaba, A. Shiraki, and T. Sugie, "HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography," Opt. Express, 17, 13895–13903 (2009).
- [17] Y. Kimura, R. Kawaguchi, T. Sugie, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Circuit Design of Special-Purpose Computer for Holography HORN-8 Using Eight Virtex-5 FPGAs," in Proceedings of 3D Systems and Applicatons (3DSA) 2015, S3–2, Nangang, Taiwan (2015).
- [18] P. Tsang, W.-K. Cheung, T.-C. Poon, and C. Zhou, "Holographic video at 40 frames per second for 4-million object points," Opt. Express, 19, 15205–15211 (2011).
- [19] P. Tsang, W. -K. Cheung, and T.-C Poon, "Real-time relighting of digital holograms based on wavefront recording plane method," Opt. Express, 20, 5962–5967 (2012).
- [20] T. Sugawara, Y. Ogihara, and Y. Sakamoto, "Fast point-based method of a computer-generated hologram for a triangle-patch model by using a graphics processing unit," Appl. Opt, 55, A160–A166 (2016).

- [21] X. Dong, S.-C. Kim, and E.-S. Kim, "Three-directional motion compensationbased novel-look-up-table for video hologram generation of three-dimensional objects freely maneuvering in space," Opt. Express, 22, 16925–16944 (2014).
- [22] T. Shimobaba, N. Masuda, and T. Ito, "Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane," Opt. Lett., 34, 3133–3135 (2009).
- [23] T. Shimobaba, H. Nakayama, N. Masuda, and T. Ito, "Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display," Opt. Express, 18, 19504–19509 (2010).
- [24] K. Matsushima and M. Takai, "Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms," Appl. Opt., 39, 6587–6594 (2000).
- [25] H. Yoshikawa, "Fast Computation of Fresnel Holograms Employing Difference," Opt. Rev., 8, 331–335 (2001).
- [26] T. Shimobaba and T. Ito, "An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition," Comput. Phys. Commun., 138, 44–52 (2001).
- [27] J. Weng, T. Shimobaba, M. Oikawa, N. Masuda, and T. Ito, "Fast recurrence relation for computer-generated-hologram," Comput. Phys. Commun., 183, 46–59 (2012).
- [28] M. Lucente, "Interactive computation of holograms using a look-up table," J. Electron. Imaging, 2, 28–34 (1993).
- [29] S. Kim and E. Kim, "Effective generation of digital holograms of threedimensional objects using a novel look-up table method," Appl. Opt., 47, D55– D62 (2008).
- [30] S. Kim, J. Kim, and E. 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).
- [31] S. Kim and E. Kim, "Fast one-step calculation of holographic videos of threedimensional scenes by combined use of baseline and depth-compensating principal fringe patterns," Opt. Express, 22, 22513–22527 (2014).

- [32] T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram using the circular symmetry of zone plates," Opt. Express, 20, 27496–27502 (2012).
- [33] T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram using run-length encoding based recurrence relation," Opt. Express, 23, 9852–9857 (2015).
- [34] T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, D. Arai, and T. Ito, "Simple and fast cosine approximation method for computer-generated hologram calculation," Opt. Express, 23, 32465–32470 (2015).
- [35] D. Gabor, "A new microscope principle," Nature, **161**, 777–778 (1948).
- [36] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront Reconstruction with Continuous-Tone Objects," J. Opt. Soc. Am., 53, 1377–1381 (1963).
- [37] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects," J. Opt. Soc. Am., 54, 1295–1301 (1964).
- [38] 辻内順平, "ホログラフィー," 裳華房 (1997).
- [39] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics Roberts & Company (2004).
- [40] L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan, Jr., "The kinoform, a new wavefront reconstruction device," IBM J. Res. Dev., 13, 150–155 (1969).
- [41] 一岡芳樹, "キノフォームとその応用,"光学, 2, 133-152 (1973).
- [42] P. St-Hilaire, S. A. Benton, M. E. Lucente, M. Lou Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa, and J. S. Underkoffler, "Electronic display system for computational holography," in Climate Change 2013 The Physical Science Basis, 1, 174–182 (1990).
- [43] 日本のホログラフィーの歴史編集委員会編,"日本のホログラフィーの発展-究 極の立体像を目指して-,"アドコム・メディア (2010).
- [44] Y. Ichihashi, R. Oi, T. Senoh, K. Yamamoto, and T. Kurita, "Real-time capture and reconstruction system with multiple GPUs for a 3D live scene by a generation from 4K IP images to 8K holograms," Opt. Express, 20, 21645–21655 (2012).

- [45] T. Shimobaba, T. Ito, N. Masuda, Y. Ichihashi, and N. Takada, "Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL," Opt. Express, 18, 9955-9960 (2010).
- [46] Stanford Computer Graphics Laboratory http://graphics.stanford.edu/ data/3Dscanrep/
- [47] K. Matsushima and S. Nakahara, "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method," Appl. Opt., 48, H54–H63 (2009).
- [48] 畑田豊彦ほか, "眼・色・光 より優れた色再現を求めて,"社団法人日本印刷 技術協会 (2007).
- [49] Advanced Micro Devices, "Software Optimization Guide for AMD Family 15h Processors Revision 3.08" (2014).
- [50] 伊藤智義編, "GPU プログラミング入門," 講談社 (2013).
- [51] 西辻崇,"ゾーンプレートの円対称性を利用した計算機合成ホログラムの高速 計算アルゴリズムの開発と応用,"平成24年度千葉大学修士論文 (2013).
- [52] E. Andres, "Discrete circles, rings and spheres," Comput. Graphics, 18, 695– 706 (1994).
- [53] J. Bresenham, "A linear algorithm for incremental digital display of circular arcs," Commun. ACM, 20, 100–106 (1977).
- [54] T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, and T. Ito, "Computational wave optics library for C++: CWO++ library," Comput. Phys. Commun., 183, 1124–1138 (2012).
- [55] R. Gomes, W. Junior, E. Cerqueira, and A. Abelem, "A QoE Fuzzy Routing Protocol for Wireless Mesh Networks," in Proceedings of the international workshop, FMN 2010, S. Zeadally, E. Cerqueira, M. Curado and M. Leszczuk, eds. (Springer, 2010).
- [56] E. Seevinc, "Simple, wide-range approximations to trigonometric and inverse trigonometric functions useful in real-time signal processing," in IEE Proceedings G (Electronic Circuits and Systems) (IEE), **128**, 1, 41–45 (1981).

- [57] J. A. McIntosh, E. E. Swartzlander, Jr., "High-Speed Cosine Generator," in Proceedings of 1994 28th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (IEEE), 1, 273–277 (1994).
- [58] インテル Xeon Phi シリーズ製品ファミリー, http://www.intel.co.jp/ content/www/jp/ja/processors/xeon/xeon-phi-detail.html

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり,素晴らしい研究環境,公私に渡る助言・指導を賜り,今 後の研究者人生の礎を築く貴重な時間を与えてくださった,千葉大学 工学研究科 伊藤智義 教授に深く感謝申し上げます.

また,技術,論文について深く、丁寧な指導を頂き,研究業績の全てについて多 大なご支援を頂いた,千葉大学 工学研究科 下馬場朋禄 准教授に深く感謝申し上 げます.

また,身近な存在として,公私両面で様々なご指導をいただき,社会人でありな がら研究室に馴染めるきっかけを作っていただいた,千葉大学 工学研究科 角江 崇 助教に深く感謝申し上げます.

また,基本的な技術から研究室での生活に至るまで,たくさんの指導,支援をいただき,楽しく活発な研究環境を作っていただいた,東京理科大学 基礎工学部 電子応用工学科 増田信之 准教授に深く感謝申し上げます.

また,全ての研究成果発表で使用する3Dデータを提供いただいた,国立天文台 中山弘敬 研究員に深く感謝申し上げます.

また,入社2年目,かつ業務外テーマにもかかわらず,博士後期課程への進学を 承認いただき,様々な支援を頂きました,三菱電機株式会社 松下雅仁様,西川博 文様を始め,情報技術総合研究所 総務部 人事課,監視メディアシステム技術部 各位に深く感謝申し上げます.

また, Research Assistant 事業や海外渡航支援事業において,多大な支援を賜りました,千葉大学関係各位に深く感謝申し上げます.

また,伊藤・下馬場・角江研究室で出会い,楽しい時も苦しい時も共に過ごし,研 鑽を深め合えた,先輩,同輩,後輩,全ての方に心より感謝申し上げます.

最後に,総じて8年間に渡る大学生活を支え,応援してくれた両親,家族に心よ り感謝いたします.

## 業績リスト

## 査読付論文(筆頭)

- T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, D. Arai, and T. Ito, "Simple and fast cosine approximation method for computer-generated hologram calculation," Opt. Express, 23, 32465–32470 (2015).
- T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram using run-length encoding based recurrence relation," Opt. Express, 23, 9852–9857 (2015).
- T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram using circular symmetry of zone plate," Opt. Express, 20, 27496–27502 (2012).

## 査読付論文(共著)

- T. Kakue, T. Nishitsuji, T. Kawashima, K. Suzuki, T. Shimobaba, and T. Ito, "Aerial projection of three-dimensional motion pictures by electro-holography and parabolic mirrors," Sci. Rep., 5, 11750 (2015).
- T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, N. Masuda, and T. Ito, "Computational wave optics library for C++: CWO++ library," Comput. Phys. Commun., 183, 1124–1138 (2012).

## 国際会議(筆頭)

- 招待講演 T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "Fast Calculation Techniques for Computer-Generated Holograms," IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN2016), PD-004529, Poitiers, France (2016).
- T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "Computer-generated hologram calculation without the trigonometric functions," Digital Holography & 3-D Imaging (DH) (DH2015), Shanghai, China (2015).

- T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "Conflict-free FFT Circuit Using Loop Architecture by 5-bank Memory System," IEEE Asia Pacific Conference on Circuits And Systems (APCCAS2014), Okinawa, Japan (2014).
- T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, N. Masuda, and Tomoyoshi Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram using the circular symmetry of zone plates," Korea-Japan Workshop for Information Photonics (DHIP2012), Tokushima, Japan (2012).
- T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Sakurai, N. Takada, N. Masuda, and T. Ito, "Fast calculation of Fresnel diffraction calculation using AMD GPU and OpenCL," Korea-Japan Workshop for Information Photonics (DHIP2011), Seoul, Korea (2011).
- T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Sakurai, N. Takada, N. Masuda, and T. Ito, "Fast calculation of Fresnel diffraction calculation using AMD GPU and OpenCL," Digital Holography and Three-Dimensional Imaging(DH) (DH2011), DWC20, Tokyo, Japan (2011).

## 国際会議(共著)

- T. Kakue, T. Nishitsuji, T. Kawashima, T. Shimobaba, and T. Ito, "Real-Time Reconstruction of Floating 3D Motion Picture by Electro-Holographic Display with a Pair of Parabolic Mirrors," ACM SIGGRAPH Asia 2015, 29, Kobe, Japan (2015).
- T. Kakue, T. Nishitsuji, T. Kawashima, T. Shimobaba, and T. Ito, "Real-Time Reconstruction of Floating 3D Motion Picture by Electro-Holographic Display with a Pair of Parabolic Mirrors," The 14th ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry (VRCAI 2015), 10, Kobe, Japan (2015).
- T. Kakue, T. Nishitsuji, T. Kawashima, T. Shimobaba, and T. Ito, "Aerial Projection of Three-dimensional Images Reconstructed from Computer-generated image hologram," 14th Workshop on Information Optics (WIO 2015), W1-1, Kyoto, Japan (2015).
- 4. T. Kakue, A. Yoshida, T. Nishitsuji, T. Kawashima, K. Suzuki, T. Shimobaba, and T. Ito, "Real-time calculation and reconstruction of computer-generated holograms for aerial projection system based on parabolic mirrors and electroholography," Digital Holography & 3-D Imaging (DH) (DH2015), Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, DW5A.4, Shanghai, China (2015).
- 5. T. Kakue, T. Nishitsuji, N. Okada, T. Shimobaba, N. Masuda, and T. Ito, "Fast-computational method and system for computer holography," The collaborative conference on 3D Research (CC3DR) 2013, Jeju Seoul, Korea (2013).
- T. Shimobaba, T. Nishitsuji, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, "Computer generated hologram from arbitrary shape object," Korea-Japan Workshop for Information Photonics (DHIP2012), Tokushima, Japan (2012).
- T. Shimobaba, T. Sakurai, T. Nishitsuji, A. Gotchev, V. Uzunov, J. Jokelainen, N. Masuda, and T. Ito, "Investigation on numerical simulation of volume digital holographic microscopy," The 17th Microoptics Conference (MOC'11), H-56, Sendai, Japan (2011).

## 国内会議(筆頭)

- 1. 西辻崇, 草野勝大, 西川博文, "動画像動きベクトルを用いた群衆の滞留検知," 電子情報通信学会 全国大会, D-12-43, 福岡県福岡市 (2016).
- 西辻崇,下馬場朋禄,角江崇,荒井大輔,伊藤智義,"計算機合成ホログラム専用計算機におけるコサインテーブルの代替手法," Optics and Photonics Japan (OPJ2015), 29pE2, 東京都文京区 (2015).
- 3. 招待講演 西辻崇,下馬場朋禄,角江崇,伊藤智義,"電子ホログラフィシステムにおける計算負荷低減技術,"第16回 日本光学会情報フォトニクス研究グループ研究会,千葉県御宿町 (2015).
- 西辻崇,下馬場朋禄,角江崇, 増田信之, 伊藤智義, "ゾーンプレートの円対称 性を利用した計算機合成ホログラムの高速計算," Optics and Photonics Japan 2012 (OPJ2012), 23pD6, 東京都江戸川区 (2012).
- 5. 西辻崇, 下馬場朋禄, 角江崇, 増田信之, 伊藤智義, "AMD GPUと OpenCL を用いた計算機合成ホログラムの高速計算,"第1回計算機オプティクス研究 会, 東京都中央区 (2012).
- 6. 西辻崇,紀井建彦,矢澤和将(チームとしての共同発表),"5 バンクメモリ構造によるコンフリクトフリーなループ型 FFT 回路の設計及び実装,"第15回 LSI デザインコンテスト最終発表会,沖縄県西原町 (2012).
- 7. 西辻崇,下馬場朋禄,増田信之,高田直樹,伊藤智義,"AMD GPUと OpenCL を用いたフレネル回折計算の高速計算,"2011 年電子情報通信学会総合大会, D-11-63, 東京都世田谷区 (2011).

## 国内会議(共著)

- 下馬場朋禄,西辻崇,角江崇,岡田直久,老川稔,増田信之,伊藤智義,"任意形 状面からの計算機合成ホログラムの生成," Optics and Photonics Japan 2012 (OPJ2012), 24pP15,東京都江戸川区 (2012).
- 松戸悠亮, 下馬場朋禄, 西辻崇, 岡田直久, 翁剣同, 角江崇, 増田信之, 伊藤智義, "波面記録法を用いた CGH 計算の改善と GPU への実装,"第11回情報科学技 術フォーラム (FIT2012), I-057, 東京都小金井市 (2012).
- 3. 白木厚司,岡田直久,西辻 崇,中山弘敬,下馬場朋禄,増田信之,伊藤智義, "GPUを用いた CGH 計算の高速化,"高専技科大連携シンポジウム 2012,新 潟県長岡市 (2012).
- 4. 下馬場朋禄,西辻崇, 増田 信之, 伊藤智義, "ハードウェアアクセラレータに よるホログラフィ計算," ホログラフィックディスプレイ研究会(HODIC), 栃 木県宇都宮市 (2011).
- 5. 岡田直久,西辻崇,老川稔,杉山充,下馬場朋禄,増田信之,伊藤智義, "GPU を用いた波面記録法による計算機合成ホログラムの作成,"第10回情報科学技 術フォーラム (FIT2011), B-036,北海道函館市 (2011).
- 6. 増田信之,中村哲平,老川稔,西辻崇,紀井建彦,下馬場朋禄,伊藤 智義,市橋 保之,"DVI 出力を持つ電子ホログラフィ専用計算機の開発,"第10回情報 科学技術フォーラム(FIT2011), C-020,北海道函館市(2011).

## 著作(分担)

 西辻崇, "第9章 OpenCL による GPU プログラミング," GPU プログラミング 入門-CUDA5 による実装-(伊藤智義編), 講談社 (2013).

## 受賞·他

- 1. 西辻崇, 平成 24 年度 千葉大学 学長賞 (学業成績優秀)(2013).
- 2. 西辻崇, 平成 24 年度 千葉大学 工学研究科長賞 (学業成績優秀)(2013).
- 3. チーム西千葉組 (西辻崇,紀井建彦,矢澤和将),平成24年度 千葉大学 課外 活動等に関する学長表彰 (2013).
- 4. 千葉大学 工学研究科 人工システム科学専攻 伊藤・下馬場研究室チーム西千葉 組 (西辻崇,紀井建彦,矢澤和将),第30回千葉市教育・文化・スポーツ等功 労者表彰 (2013).

- 5. チーム西千葉組 (西辻崇, 紀井建彦, 矢澤和将), 電子情報通信学会 SIS 賞 (2012).
- 6. チーム西千葉組 (西辻崇,紀井建彦,矢澤和将),第15回 LSI デザインコンテ スト 優勝 (2012).