

RGB-D 画像を用いた
計算機合成プログラム作成の
高速化の研究

2015 年 1 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
岡田 直久

(千葉大学審査学位論文)

RGB-D 画像を用いた
計算機合成ホログラム作成の
高速化の研究

2015 年 1 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
岡田 直久

概要

3次元映像技術の一つであるホログラフィは、目に負担をかけることなく自然な立体映像を実現することが可能な技術である。コンピュータ上で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)と呼び、CGHを電子デバイスに表示し、光学系において再生する手法を電子ホログラフィという。

電子ホログラフィの問題点の一つに、CGHの計算時間が膨大であることが挙げられる。CGHの計算には3次元モデルに応じていくつかの方法に大別できるが、本研究ではデプス情報を用いる手法を使用した。従来のアルゴリズムでは、記録面の1つの画素に対して物体点の情報を1点ずつ記録していた。本研究で使用するアルゴリズムでは、物体点の奥行き方向を平面で分割し、その平面群(2次元断面画像)からの光伝搬を計算することでCGHを生成する。CGH作成の高速化を行うため本研究では以下の2つの手法を用いた。一つ目は帯域制限ダブルステップフレネル回折(BL-DSF: Band Limited-Double-Step Fresnel diffraction)である。BL-DSFはダブルステップフレネル回折(DSF: Double-Step Fresnel diffraction)に帯域制限を導入した方法である。DSFは2回のシングルステップフレネル回折(SSF: Single-Step Fresnel diffraction)を基に行われ SSFは1度の高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)によって計算をすることができる。この手法は角スペクトル法のような畳み込みに基づいた回折計算と比較し、要求されるメモリおよび演算時間が少ないといった利点がある。DSFに含まれるチャープ関数がエイリアシング発生原因になるため、窓関数を用いることで帯域制限を行いエイリアシングの発生を抑制したものがBL-DSFである。二つ目は波面記録法である。この手法は物体の近傍に仮想面として波面記録面(WRP: Wavefront recording plane)を配置し物体光の当たる範囲を微小とすることで計算量の削減を行う。作成されたWRPとCGH間で回折計算を行うことでCGH上の複素振幅を計算する。WRPには物体光の振幅情報と位相情報が記録されているため、回折計算は物体からCGH上の複素振幅を計算する場合と等しくなる。これら、二つの手法を組み合わせることでCGH計算の高速化に成功した。

また、波面記録法におけるWRP面の数の検討および使用したRGB画像とデプス画像を間引いてCGHの作成を行うことで更なる計算時間の高速化を図った。

Abstract

Holography which is one of three-dimensional (3D) image technologies is possible to reconstruct natural 3D images without burden in human eyes. The technique that computer-generated holograms (CGHs) that are created on a computer is displayed on an electronic device is referred to as electronic holography.

One problem of electron holography is that the CGH calculation time is enormous when dealing with complex 3D objects. The calculation methods of CGH are categorized into a several of ways depending on 3D models. This study uses a CGH calculation method using depth information. In conventional algorithm which expresses the 3D object as the aggregation of point light sources, the information of each object point is recorded on the CGH. The algorithm used in this study first divides a 3D scene into planes (two-dimensional cross-sectional images), and then the CGH is calculated by the light propagation from each planes. This study investigates the speed-up of such CGH calculation by using the following two approaches.

The first one is band-limited double-step Fresnel diffraction (BL-DSF). BL-DSF is a method that is introduced the band-limited function to original double-step Fresnel diffraction (DSF). DSF is performed based on a single step Fresnel diffraction (SSF) which can be calculated by once Fast Fourier transform (FFT). Comparing between DSF and convolution-based diffraction such as the angular spectrum method, there is advantages in terms of memory and computational time. However, the chirp function in the DSF will cause aliasing noise. Whereas, BL-DSF improves this problem of original DSF by the band-limited function.

The second approach is the wavefront recording plane (WRP) method. This technique reduces the calculation amount of CGH by limiting the area striking the object light to the WRP when placing object points in the vicinity of the WRP. The calculate of the complex amplitude on the CGH is performed by diffraction calculation between the WRP and CGH. Since the WRP is recorded the amplitude and phase information of the object light, the diffraction calculation is equal to the case of directly calculating the complex amplitude of the CGH from the object points. I succeeded in accelerating the calculation time of CGH by the combination of the two methods.

In addition, I investigated another method by decimating the pixel resolution of the RGB and depth images in order to further speed-up the computation time.

Keywords - *Electro-Holography, Three-dimensional television, Computer
Generated Hologram*

目次

第1章	はじめに	9
1.1	はじめに	9
1.2	論文の構成	10
	参考文献	11
第2章	ホログラフィ	12
2.1	ホログラフィ	12
2.2	3次元像の記録・再生法	12
2.3	ホログラムへの記録	14
2.4	ホログラムの再生	16
2.5	電子ホログラフィ	17
	参考文献	19
第3章	計算機合成ホログラム	20
3.1	計算機合成ホログラム	20
3.2	点光源モデル	20
3.3	ポリゴンモデル	21
3.4	RGB-Dモデル	22
	参考文献	24
第4章	帯域制限ダブルステップフレネル回折	25
4.1	光伝搬計算手法	25
4.2	角スペクトル法	25
4.3	シングルステップフレネル回折計算	26
4.4	帯域制限ダブルステップフレネル計算	28
	参考文献	31
第5章	波面記録法	32
5.1	波面記録法	32
5.2	波面記録法を用いたBL-DSF	34
	参考文献	35
第6章	検討および結果	36
6.1	画質比較方法	36
6.2	計算時間	36
6.3	波面記録法における記録面数の検討	38
6.4	更なる高速化への検討	41
	参考文献	44
第7章	まとめと考察	45

第 8 章 今後の展望.....	46
謝辞	47
業績リスト.....	48

目次

図 2.1	ホログラムの記録.....	13
図 2.2	ホログラムの再生.....	13
図 2.3	ホログラム記録の位置関係	15
図 2.4	ホログラム再生の位置関係	17
図 2.5	電子ホログラフィの光学系	18
図 3.1	点光源モデルの概略図.....	20
図 3.2	ポリゴンモデルの概略図	21
図 3.3	Axi-vision カメラ	22
図 3.4	Axi-vision によって取得した RGB 画像	22
図 3.5	Axi-vision によって取得したデプス画像.....	23
図 3.6	RGB-D モデル.....	23
図 4.1	平行平面間の伝搬計算.....	25
図 4.2	ダブルステップフレネル回折.....	28
図 4.3	帯域制限を行っていない時の CGH.....	30
図 4.4	帯域制限を行った時の CGH	30
図 5.1	波面記録法のアルゴリズムの概要.....	32
図 5.2	波面記録法の適用.....	34
図 6.1	角スペクトル法を用いて作成された CGH での再生像.....	36
図 6.2	波面記録法を適用した BL-DSF により作成された CGH での再生像.....	37
図 6.3	WRP 数 16 面での再生像	38
図 6.4	WRP 数 32 面での再生像	39
図 6.5	WRP 数 64 面での再生像	39
図 6.6	WRP 数 128 面での再生像	40
図 6.7	1/2 に間引いたときの再生像.....	41
図 6.8	1/4 に間引いたときの再生像.....	42
図 6.9	1/8 に間引いたときの再生像.....	42
図 6.10	1/16 に間引いたときの再生像.....	43

表 目次

表 6.1 角スペクトル法および波面記録法を適用した BL-DSF での計算時間	37
表 6.2 各記録面数での計算時間と PSNR	38
表 6.3 原画から間引いた場合での計算時間と PSNR.....	41

第1章 はじめに

1.1 はじめに

近年、3D映画や3Dテレビの登場により、3次元映像技術が注目されている。現在、主流の3次元映像技術は「二眼立体方式」と呼ばれており、目の錯覚を利用しているため目に負担がかかる等の問題がある。これに対し、究極の3次元映像技術と呼ばれるホログラフィは、写真乾板などの2次元の媒体に3次元の情報を記録し、空間上に3次元の像を再生する技術である。この3次元情報を記録した媒体をホログラムという。ホログラフィは実際の物体が出す光と同じものを再現するため、目に負担をかからない自然な立体像を再生することが可能である。また、ホログラムはコンピュータ上で作成することが可能である。これを計算機合成ホログラム(CGH: Computer Generated Hologram)と呼び、CGHを液晶ディスプレイ(LCD: Liquid Crystal Display)のような電子デバイスに表示し、光学系において再生する手法を電子ホログラフィという[1]。

電子ホログラフィの抱える問題として、CGHの計算時間が膨大であることが挙げられる。CGHの計算は3次元モデルに応じていくつかの方法に大別され、扱うモデルによってアルゴリズムが異なる。従来手法である点光源モデルにおけるアルゴリズムでは、記録面の1つの画素に対して物体点の情報を1点ずつ記録する。その計算量は物体点数とCGHの画素数の積に比例するため、物体点数が多い複雑なモデルのCGH計算には多大な時間がかかってしまう。

そこで本研究ではデプス平面モデルによる手法を使用した。この手法によるアルゴリズムでは、物体点の奥行き方向を平面で分割し、その平面群(2次元断面画像)からの光伝搬を計算することでCGHを生成する。また、この光伝搬には帯域制限ダブルステップフレネル回折計算(BL-DSF: Band Limited-Double-Step Fresnel diffraction)を利用する。この手法は角スペクトル法のような畳み込みに基づいた回折計算と比較し、要求されるメモリおよび演算時間が少ないといった利点がある。DSFに含まれるチャープ関数がエイリアシング発生原因になるため、窓関数を用いることで帯域制限を行いエイリアシングの発生を抑制したものがBL-DSFである。また、BL-DSFに波面記録法を組み合わせることで更なる高速化を目指した。波面記録法[2-4]は物体の近傍に仮想面として波面記録面を配置し物体光の当たる範囲を微小とすることで計算量の削減を行う。作成されたWRPとCGH間で回折計算を行うことでCGH上の複素振幅を計算する。WRPには物体光の振幅情報と位相情報が記録されているため、回折計算は物体からCGH上の複素振幅を計算する場合と等しくなる。

また、波面記録法におけるWRP面数の検討および使用したRGB画像とデプス画像を間引いてCGHの作成を行うことで更なる計算時間の高速化を図った。

1.2 論文の構成

本論文は全 7 章で構成される。第 1 章では研究の背景と論文の構成について述べた。第 2 章では、ホログラフィの記録・再生の原理およびその計算式について述べる。第 3 章では、CGH 計算における代表的な 3 つのモデルについて述べる。第 4 章では光伝搬計算について述べる。まずコンボリューション(畳み込み)をベースとした光伝搬計算である角スペクトル法を示し、その後、フーリエ変換ベースの回折計算であるシングルステップフレネル回折と本研究で用いた帯域制限ダブルステップフレネル回折計算について説明する。第 5 章では、波面記録法の原理および計算方法について述べる。第 6 章では、結果についてまとめ更なる高速化のために行った検討について述べる。第 7 章では全体のまとめと今後の展望について述べる

参考文献

- [1] T. C. Poon (Ed.), “Digital holography and three-dimensional display: Principles and Applications”, Springer (2006).
- [2] 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).
- [3] T. Shimobaba, H. Nakayama, N. Masuda and T. Ito, “Rapid calculation of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display” , Opt. Express **18**, 19504-19509 (2010).
- [4] J. Weng, T. Shimobaba, N. Okada, H. Nakayama, M. Oikawa, N. Masuda and T. Ito, “Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method” , Opt. Express **20**, 4018-4023 (2012).

第2章 ホログラフィ

2.1 ホログラフィ

ホログラフィとは光の干渉と回折を応用し、3次元の物体の情報を二次元の写真乾板上に干渉縞として記録する技術であり、ノーベル物理学賞受賞者でもあるD.Gaborによって1948年に提案された。電子顕微鏡の像の改善のためにGaborは、まず電子線を物体に当てた際の回折波と物体の周りを透過したバックグラウンド波とを重ね合わせた干渉パターンを記録し、これに光を当てて光学像として再生するという方法を試みた。この記録された干渉パターンは、ギリシア語で「完全な」を意味するholosと「メッセージ」を意味するgram から『すべてが記録されたもの』という意味でホログラム(hologram)と呼ばれた。そしてホログラムと写真技術(photography)を結びつけホログラフィ(holography)という言葉が生まれた[1-3]。

2.2 3次元像の記録・再生法

ホログラフィは回折と干渉という光波の基本的な性質を応用した技術である。図 2.1 ホログラムの記録にホログラムの記録方法の簡略図を示す。ホログラムの記録には、まずレーザ光をビームスプリッターにより2つに分ける。分けられたレーザ光の1つを、対物レンズによって拡大し物体に当てると物体の各点から反射光が生じる。この反射光はあらゆる方向に広がり、物体から適当な距離に置かれている記録材料にもやってくる。この反射光のことを物体から生じる光として物体光と呼ぶ。もう1つのレーザ光はミラーによって方向を変え、対物レンズによって広げて記録材料に当てる。この光のことを参照光と呼ぶ。この物体光と参照光が記録材料上で干渉しあうことで干渉縞ができる。この干渉縞がホログラムである。

ホログラムによって記録された情報を取り出すには、図 2.2 ホログラムの再生のように図 2.1 ホログラムの記録で使用したのと同じ条件で参照光のみをホログラムに当てればよい。ホログラムは細かい干渉縞を記録した一種の回折格子であるため、入射した参照光はホログラムを直進する光と、別の方向に進む回折光に分かれる。この回折光は再生光と呼ばれ、記録した物体光と同様の性質を持っている。物体が見えるということは物体に反射して伝搬した光が目に入ることを意味しており、物体光と同様の光である再生光を見ることによって物体のあった位置に物体の3次元画像を見ることが出来る。このようにして物体の光学的な情報を記録し再生する技術がホログラフィである。

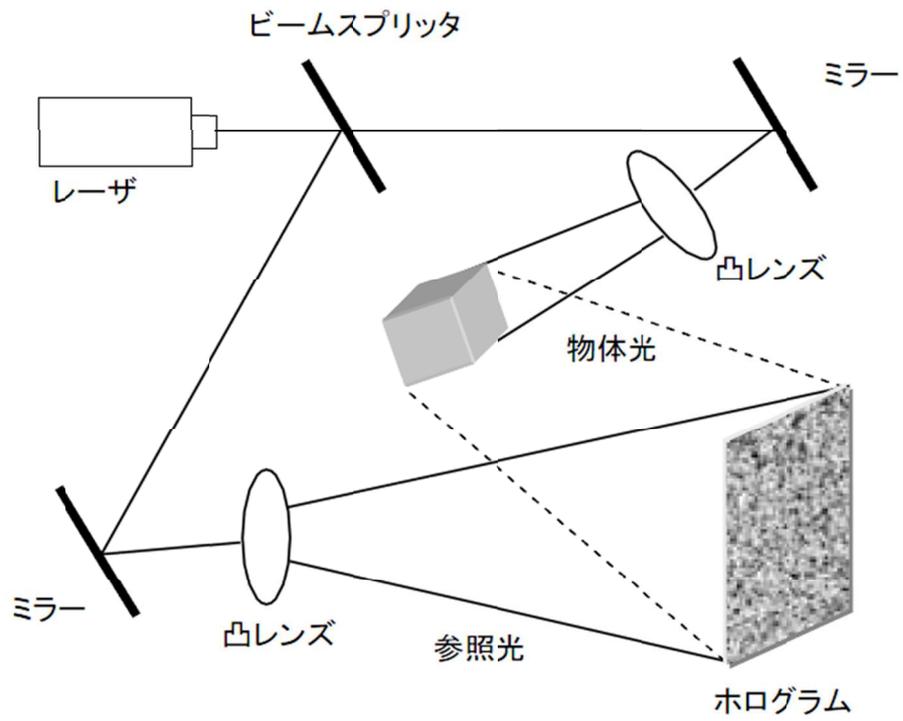


図 2.1 ホログラムの記録

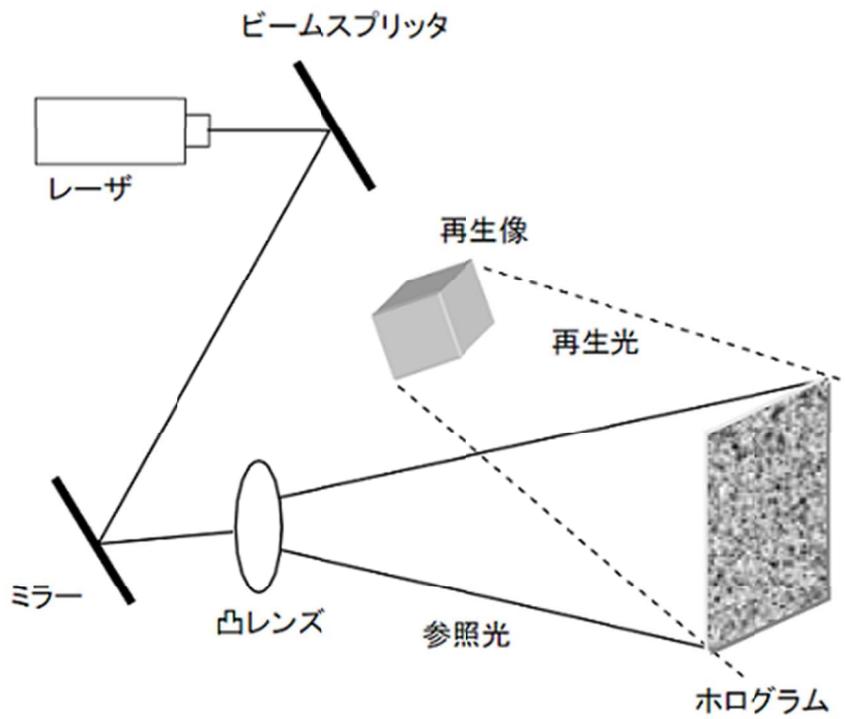


図 2.2 ホログラムの再生

2.3 ホログラムへの記録

エラー! 参照元が見つかりません。に三次元物体をホログラムに記録するときの、物体とホログラムの位置関係を示す。はじめに物体光について考える。物体を小さな点の集合とみなし、それぞれが光を反射する点光源として考えると、三次元物体のある1点 j から生じる光 L_{Oj} は式(2.1)のような球面波になる。

$$L_{Oj} = \frac{A_j}{r_j} \exp i(kr_j - \omega t + \phi_j) \quad (2.1)$$

ここで k は波数、 ω は角振動数、 ϕ_j は三次元物体のある1点 j からの物体光の初期位相、 A_j は物体光の振幅、 r_j は物体点からの距離を表す。次に参照光は式(2.2)のように表される。

$$L_R = B \exp i(kx \sin \theta - \omega t + \phi_R) \quad (2.2)$$

ここで、 B は参照光 L_R の振幅、 ϕ_R は参照光 L_R の初期位相である。

以上のことから、点 j からの物体光 L_{Oj} と参照光 L_R との記録材料上での干渉を考える。光の干渉の強度分布は物体光と参照光の和の絶対値の2乗 $|L_{Oj} + L_R|^2$ の形で表すことができるので、記録材料上での光強度分布 I は式(2.3)のようになる。

$$\begin{aligned} I(x_\alpha, y_\alpha) &= |L_{Oj} + L_R|^2 \\ &= \left| \frac{A_j}{r_{\alpha j}} \exp i(k r_{\alpha j} - \omega t) + B \exp i(k x_\alpha \sin \theta - \omega t) \right|^2 \\ &= \left(\frac{A_j}{r_{\alpha j}} \right)^2 + B^2 + \frac{A_j B}{r_{\alpha j}} \exp(-ik x_\alpha \sin \theta) \exp(ik r_{\alpha j}) \\ &\quad + \frac{A_j B}{r_{\alpha j}} \exp(ik x_\alpha \sin \theta) \exp(-ik r_{\alpha j}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで、初期位相 ϕ_j と ϕ_R はともに0とし、 $r_{\alpha j}$ は点 j と記録材料までの距離で、

$$r_{\alpha j} = \sqrt{(x_\alpha - x_j)^2 - (y_\alpha - y_j)^2 + z_j^2} \quad (2.4)$$

で表される値である。式(2.3)の第一項は物体光の自己相関、第二項は参照光の自己相関、第三項は物体光に関する項、第四項は物体光の共役像に関する項である。式(2.3)で時間に関する項は、記録材料の反応速度が光の速度に比べ遅いため、強度は時間平均値となるため無視した。

写真乾板のような光の強度分布を透過率分布として記録する感光材料に記録すると、その振幅透過率分布 T は

$$T = T_0 + t_1 I(x_\alpha, y_\alpha) \quad (2.5)$$

となる。 T_0 , t_1 は感光材料の種類や記録法によって決まる定数である。

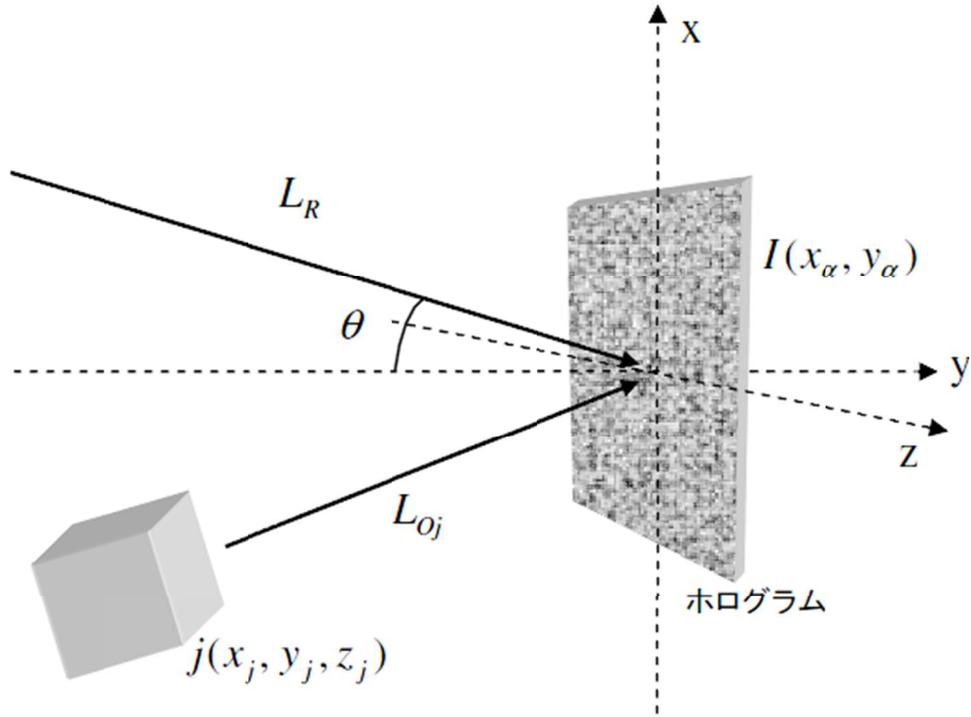


図 2.3 ホログラム記録の位置関係

2.4 ホログラムの再生

次に, 前節のようにして作成されたホログラムから三次元像を再生することを考える. 再生はホログラム作成時に使用した参照光を再び当てればよい. 参照光を当てると, ホログラムの干渉縞が回折格子としてはたらき光の回折が起こる. このときの物体のある点 j に関する光の振幅分布 L は式(2.2)と式(2.3)から

$$\begin{aligned}
 L &= L_R T = L_R \{T_0 + t_1 I(x_\alpha, y_\alpha)\} \\
 &= L_R T_0 + L_R t_1 \left\{ \left(\frac{A_j}{r_{\alpha j}} \right)^2 + B^2 \right\} \\
 &\quad + L_R t_1 \frac{A_j B}{r_{\alpha j}} \exp(-ikx_\alpha \sin \theta) \exp(ikr_{\alpha j}) \\
 &\quad + L_R t_1 \frac{A_j B}{r_{\alpha j}} \exp(ikx_\alpha \sin \theta) \exp(-ikr_{\alpha j})
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$= L'_R + L'_D + L'_C \tag{2.7}$$

となる. 式(2.6)の第一項と第二項をまとめて L'_R , 第三項を L'_D , 第四項を L'_C とした. L'_R は直進してホログラムを通過する光, L'_D はホログラムから x 軸の正方向へ向かう光, L'_C はホログラムから x 軸の負の方向へ向かう光を表している.

L'_D は物体の 1 点からの光に比例しているのので, この操作によって物体光とまったく同じ波面が再現されたことになる. これは他の物体点に関しても同様なので, この光を目で見るとホログラムの後方に物体の像が再現されて見えるので, 物体の虚像が再生されたことになる. この像は物体光と同じ波面によって再生されているので, 直接像と呼ばれる.

また L'_D は L'_C の複素共役の関係になっている. したがって, この光は参照光 L'_R に対して物体点からの光と対称な方向に進み, ホログラム前方で実像をつくる. これを共役像という. ホログラムの再生には L'_D , L'_C の 2 つの光が関与している.

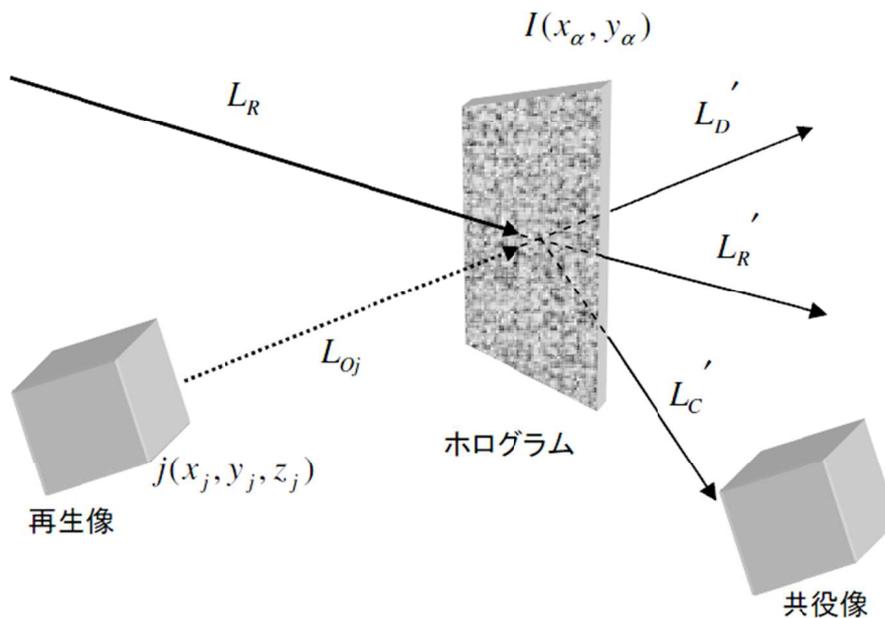


図 2.4 ホログラム再生の位置関係

2.5 電子ホログラフィ

静止画のホログラフィの技術の発達は著しいが、それを動画にするためにはいくつかの困難を伴う。これまでに述べたように、ホログラムは光の干渉縞を記録して作成するため、露光中に振動を与えることも、被写体が動くこともできない。

そこで、動画として実写映像や CG (Computer Graphics)を用いる場合、それらの情報を電子データとして扱うことで、ホログラムを数値計算によってシミュレートすることができる。そうして作成したホログラムを動画として表示することで、ホログラフィ技術を用いた動画を容易に作成することが可能である。このように数値計算によりホログラムを作成し、空間光変調器(SLM: Spatial Light Modulator)として高精細液晶ディスプレイ(LCD: Liquid Crystal Display)などの電子デバイスを用いて立体像を再生する手法を電子ホログラフィという。図 2.5 電子ホログラフィの光学系 に電子ホログラフィの光学系の概略図を示す。参照光源は一般的にレーザや高輝度の LED(Light Emitting Diode)を使用する。光源から発せられた光はコリメータレンズを通して平行光に変えられ、ビームスプリッターによって LCD へ入射される。図 2.5 電子ホログラフィの光学系 で示したように、ホログラムの位置に対して光が透過した先に結像するのが実像であるが、ここでは反射型のディスプレイを用いているので、参照光が来る方向に実像ができる。

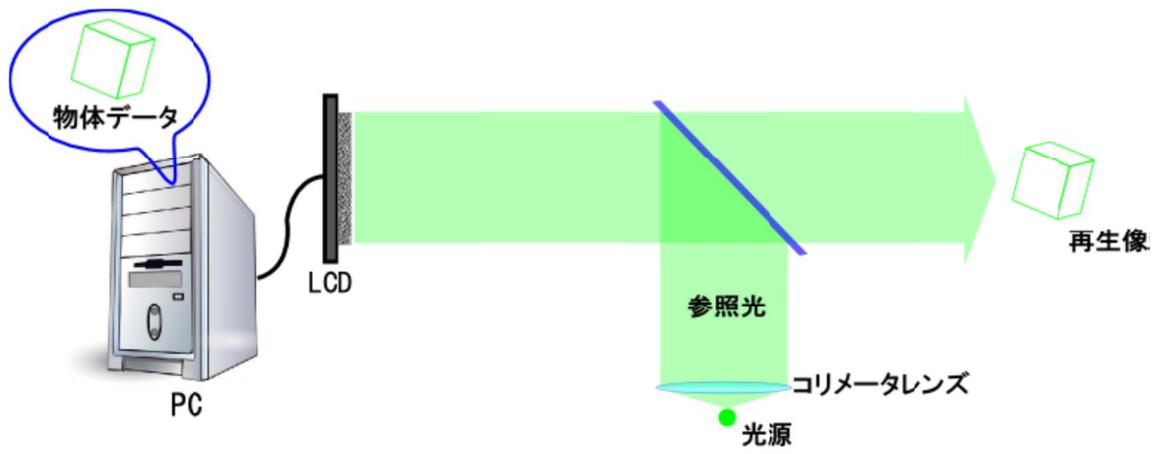


図 2.5 電子ホログラフィの光学系

参考文献

- [1] 村田和美, “ホログラフィ入門”, 朝倉書店(1976).
- [2] 久保田敏弘, “ホログラフィ入門”, 朝倉書店(1995).
- [3] 辻内順平, “ホログラフイー”, 裳華房(1997).

第3章 計算機合成ホログラム

3.1 計算機合成ホログラム

ホログラムは前章で述べたように実際の光学機器を用いて作成するのが一般的であるが, コンピュータ上で光の伝播を計算することによって任意の3次元物体からホログラムを作成することも可能である. このように計算機で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. CGHの計算は大別すると, 3次元物体を点光源の集合とみなす点光源モデル[1], 3次元物体をポリゴンで構成しポリゴンからの光の伝播を計算するポリゴンモデル[2], 3次元物体のRGB画像と深度(Depth)情報から光伝播を計算するRGB-Dモデルの3つがある[3]. 本研究ではRGB-DモデルからのCGH計算を行った.

3.2 点光源モデル

点光源モデルでは3次元物体を点光源の集合とみなし, 各点からCGH面に対して光伝播計算を行うことでCGHの作成を行う. 図3.1に点光源モデルの概略図を示す.

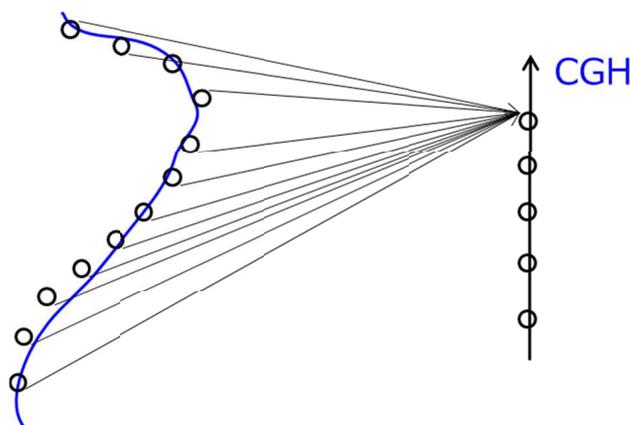


図 3.1 点光源モデルの概略図

点光源モデルにおける, CGH作成計算の式を以下に示す.

ホログラム上のある1点の光強度 $I(x_\alpha, y_\alpha)$ は式(2.3)で表される. この時, 第2章で述べたように第1項と第2項はホログラフィの再生に関係ないため, 式(2.3)における第1項と第2項を無視して整理すると次式のようなになる

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \frac{2A_j B}{r_{ai}} \cos\{k(r_{ai} - x_\alpha \sin\theta)\} \quad (3.1)$$

したがって, N 点で構成される物体像から作られるホログラム上の光強度は次のように

なる.

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{2A_j B}{r_{ai}} \cos\{k(r_{ai} - x_\alpha \sin\theta)\}$$

(3.2)

式(3.2)より, CGH の計算には三角関数や平方根の計算が含まれている.

その計算量は物体点数 N と, CGH の画素数 M に比例しているため,

$$\text{CGHの計算量} = N \times M$$

と表される. 物体点が1万点, 画素サイズが $1,920 \times 1,080$ (約200万画素)の場合を仮定すると, およそ200億回もの三角関数と平方根の計算を行わなければならない. また物体点数が10万点と仮定した場合, その計算量は2000億回にもなる.

3.3 ポリゴンモデル

ポリゴンモデルでは3次元物体をポリゴンで構成しポリゴンからの光の伝搬の計算を行うことでCGHの作成を行う. 図3.2にポリゴンモデルの概略図を示す.

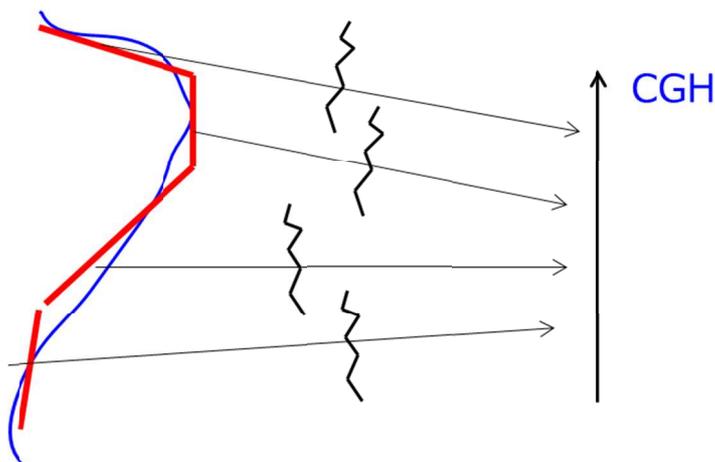


図 3.2 ポリゴンモデルの概略図

ポリゴンモデルによるCGH計算では各ポリゴンから光伝搬計算を行いホログラム面上の複素振幅の計算を行い, 足し合わせることで生成することが可能である. この時, 各ポリゴンを開口面と考えると各ポリゴンの光伝搬計算は回折計算によって計算が可能である.

3.4 RGB-D モデル

RGB-D モデルでは RGB 画像と深度情報を記録したデプス画像から CGH の作成を行う。本研究で用いる RGB 画像とデプス画像は NHK が開発したデプスカメラである Axi-vision(図 3.3)によって取得される画像を用いた[4]。図 3.4 に撮影された RGB 画像を図 3.5 にデプス画像を示す。

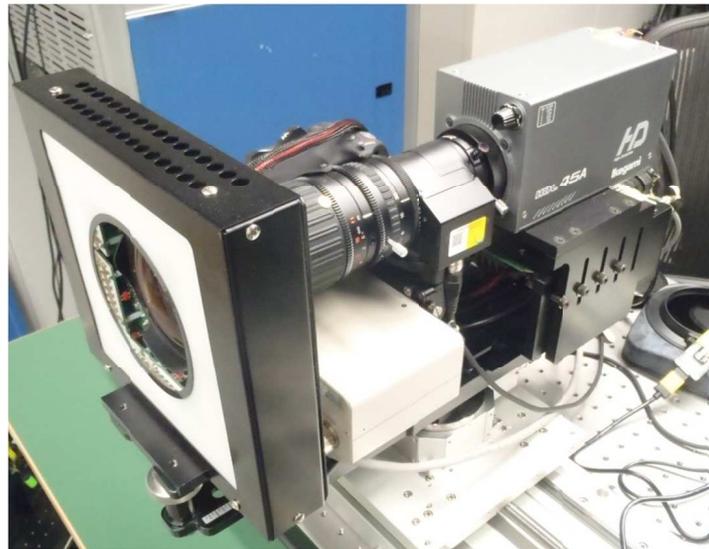


図 3.3 Axi-vision カメラ



図 3.4 Axi-vision によって取得した RGB 画像

(出典) N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, “Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms”, Opt. Express, 9192--9197 (2013)



図 3.5 Axi-vision によって取得したデプス画像

(出典) N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, “Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms”, *Opt. Express*, 9192--9197 (2013)

RGB-D モデルでは初めに CGH に対して平行な面を作成し、同じ深度情報を持つテクスチャのピクセルをピックアップし、それぞれの平行な面からの回折計算を行うことで CGH の計算を行う(図 3.6)。この時、デプス画像は 256 の値を有しているため、256 回の回折計算を行わなければならない。

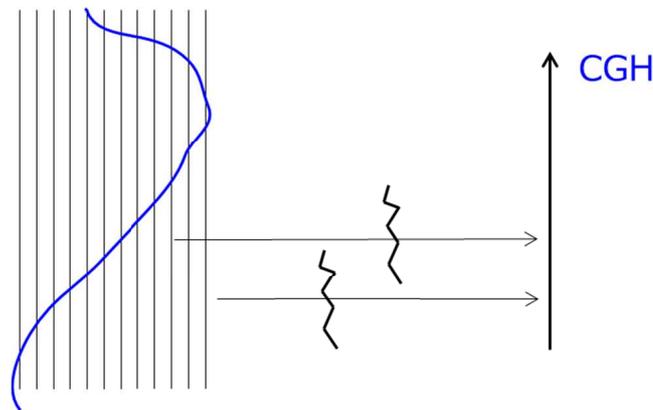


図 3.6 RGB-D モデル

参考文献

- [1] 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).
- [2] K. Matsushima, H. Shimmel, and F. Wyrowski, “Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves”, *J. Opt. Soc. Am. A.* 20-9, 1755-1762 (2003).
- [3] N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, “Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms ”, *Opt. Express*, 9192--9197 (2013).
- [4] M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, H. Kikuchi, H. Fujikake, J. Yonai, and K. Takizawa, “Axi-Vision Camera (Real-Time Distance-Mapping Camera)“ , *Appl. Opt.* 39, 3931-3939 (2000).

第4章 帯域制限ダブルステップフレネル回折

4.1 光伝搬計算手法

RGB-D モデルからの CGH 計算[1]では, 図 4.1 平行平面間の伝搬計算のようにホログラム記録面に対して平行な平面からの光伝搬を考える. 平行平面間の光伝搬の計算手法は, コンボリューション(畳み込み)をベースとしたものとフーリエ変換をベースとしたものの 2 種類に分けられる. 本章では従来法である角スペクトル法を示し, その後, フーリエ変換ベースの回折計算であるシングルステップフレネル回折と新たな計算手法である帯域制限ダブルステップフレネル回折計算について説明する.

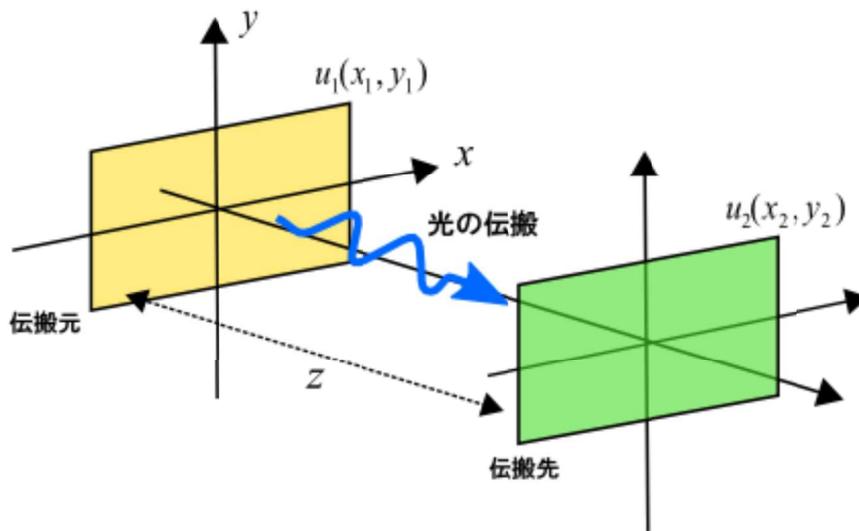


図 4.1 平行平面間の伝搬計算

4.2 角スペクトル法

角スペクトル法による光伝搬は以下の式で表される.

$$U_1(f_x, f_y) = F[u_1(x_1, y_1)] = \iint u_1(x_1, y_1) \exp\{-2\pi i(x_1 f_x + y_1 f_y)\} dx_1 dy_1 \quad (4.1)$$

$$U_2(f_x, f_y) = U_1(f_x, f_y) \exp(-2\pi f_z z) \quad (4.2)$$

$$u_2(x_2, y_2) = F^{-1}[U_2(f_x, f_y)] = \iint U_2(f_x, f_y) \exp\{2\pi i(x_2 f_x + y_2 f_y)\} df_x df_y \quad (4.3)$$

ここで, (x_1, y_1) と (x_2, y_2) は光の伝搬元の平面と伝搬先の平面を表している. また,

f_z はz軸方向の空間周波数成分を表しており、 $f_z = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - f_x^2 - f_y^2}$ で表すことができる。

式 **U1** $(f_x, f_y) = F[u_1(x_1, y_1)] = \iint u_1(x_1, y_1) \exp\{-2\pi i(x_1 f_x + y_1 f_y)\} dx_1 dy_1$
(4.1)と**(4.3)**はフーリエ変換**F**と逆フーリエ変換**F⁻¹**で表されており、高速フーリエ変換(FFT)を用いることで角スペクトル法による高速計算を行うことができる

また、コンボリューションベースの光伝搬計算のメリットは、伝搬前と伝搬後のサンプリング間隔が変わらないことである。光伝搬の前後でサンプリング間隔が変化してしまうと、ホログラムの再生像が表示されなくなってしまう。ただし、FFTを用いて畳み込み積分を行う場合、巡回畳み込みによるエイリアシングが発生してしまう。これは伝搬元と伝搬先の平面の画素数を水平・垂直方向にそれぞれ2倍することで解消できるが、計算時間が増えてしまうというデメリットがある。

4.3 シングルステップフレネル回折計算

シングルステップフレネル回折計算(SSF)による光伝搬は以下のようになる。

$$\begin{aligned} u_1(x_2, y_2) &= \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \iint u_1(x_1, y_1) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda z} ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)\right) dx_1 dy_1 \\ &= \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \iint u_1(x_1, y_1) \exp\left(\frac{i\pi(x_1^2 + y_1^2)}{\lambda z}\right) \exp\left(\frac{-2\pi i(x_1 x_2 + y_1 y_2)}{\lambda z}\right) dx_1 dy_1 \end{aligned} \quad (4.4)$$

λ は光の波長である。ここで、離散化座標を

$$(x_1, y_1) = \left((m_1 - N_x/2)p_{x_1}, (n_1 - N_y/2)p_{y_1} \right) \quad (4.5)$$

$$(x_2, y_2) = \left((m_2 - N_x/2)p_{x_2}, (n_2 - N_y/2)p_{y_2} \right) \quad (4.6)$$

とおく。 m_1, m_2 は0から $N_x/2 - 1$ までの整数、 n_1, n_2 は0から $N_y/2 - 1$ までの整数である。

また、 p_{x_1}, p_{y_1} はそれぞれ伝搬元の平面のサンプリング間隔であり、2つの平面の画素数は $N_x \times N_y$ である。このとき、伝搬先の平面のサンプリング間隔は

$$\begin{aligned} p_{x_2} &= \lambda z / (N_x p_{x_1}) \\ p_{y_2} &= \lambda z / (N_y p_{y_1}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

と表され、式(4.4)は以下のようになる。

$$u_2(x_2, y_2) = \text{SSF}_z[u_1(m_1, n_1)] = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \text{FFT} \left[u_1(m_1, n_1) \exp\left(\frac{i\pi(x_1^2 + y_1^2)}{\lambda z}\right) \right] \quad (4.8)$$

角スペクトル法と比較すると、SSFではFFTを1回行うだけなので画素数を倍拡張する必要がないので、計算時間が少ないというメリットがある。しかし、式(4.7)のように伝搬先の平面のサンプリング間隔が光の波長と伝搬距離によって変化してしまうデ

メリットがある.

4.4 帯域制限ダブルステップフレネル計算

SSFにおけるサンプリング間隔の変化を解消する手法として、ダブルステップフレネル回折計算(DSF)を使用する[2]。この手法は伝搬元、伝搬先の平面の他に仮想平面を1枚用意し、始めに伝搬元の平面-仮想平面のSSFを行った後、仮想平面-伝搬先の平面のSSFを行う。DSFの計算モデルを図4.2に示す

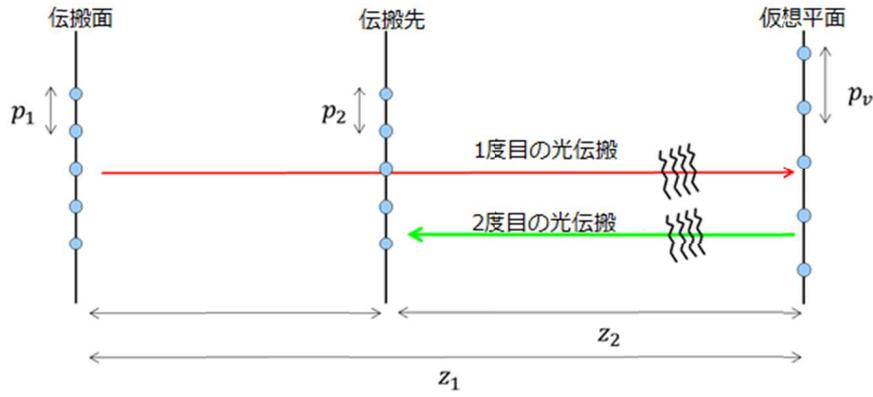


図 4.2 ダブルステップフレネル回折

まず、伝搬元の平面-仮想平面間の距離を z_1 、仮想平面におけるサンプリング間隔を p_{x_v} 、 p_{y_v} とすると式(4.7)より $p_{x_v} = \lambda z_1 / (N_x p_{x_1})$ 、 $p_{y_v} = \lambda z_1 / (N_y p_{y_1})$ となる。同様に伝搬先の平面-仮想平面の距離を z_2 とすると、 $p_{x_2} = \lambda z_2 / (N_x p_{x_v})$ 、 $p_{y_2} = \lambda z_2 / (N_y p_{y_v})$ となる。よって、最終的な伝搬距離は $z = z_1 + z_2$ であり、伝搬先のサンプリング間隔は

$$\begin{aligned} p_{x_2} &= \lambda z_2 / (N_x p_{x_v}) = |z_2 / z_1| p_{x_1} \\ p_{y_2} &= \lambda z_2 / (N_y p_{y_v}) = |z_2 / z_1| p_{y_1} \end{aligned} \quad (4.9)$$

となる。仮想平面の配置によってサンプリング間隔の変化を低減することができる。

また、DSFに窓関数(ここでは矩形関数)を導入することで、以下に示す帯域制限ダブルステップフレネル回折計算(BL-DSF)が導かれる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_2(x_2, y_2) &= \text{DSF}_z[\mathbf{u}_1(\mathbf{m}_1, \mathbf{n}_1)] = \text{SSF}_{z_2}[\text{SSF}_{z_1}[\mathbf{u}_1(\mathbf{m}_1, \mathbf{n}_1)]] \\ &= \frac{\exp(ikz_2)}{i\lambda z_2} \text{FFT}^{\text{sgn}(z_2)} \\ &\left[\exp\left(\frac{i\pi z(x_v^2 + y_v^2)}{\lambda z_1 z_2}\right) \text{Rect}\left(\frac{x_v}{x_v^{\text{max}}}, \frac{y_v}{y_v^{\text{max}}}\right) \text{FFT}^{\text{sgn}(z_1)} \left[\mathbf{u}_1(\mathbf{m}_1, \mathbf{n}_1) \exp\left(\frac{i\pi(x_1^2 + y_1^2)}{\lambda z_1}\right) \right] \right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

ここで、 $\text{FFT}^{\text{sgn}(z)}$ は z が正の場合は順FFT、負の場合は逆FFT を行う関数である。

また、式(4-10)中の $\exp\left(\frac{i\pi z(x_v^2+y_v^2)}{\lambda z_1 z_2}\right)$ はチャープ関数であり、エイリアシングの原因となる(図 4.3)。SSF 回折の結果は周波数領域と見なされるため、矩形波を用いることで帯域制限を行いエイリアシングの発生を抑制することができる(図 4.4)。

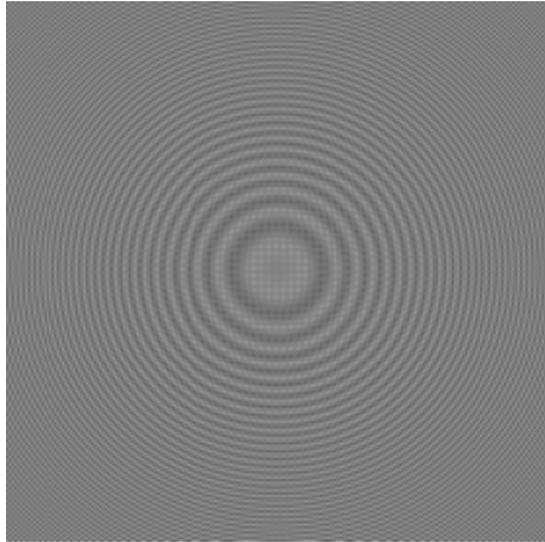


図 4.3 帯域制限を行っていない時の CGH

(出典) N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, “Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms”, *Opt. Express*, 9192--9197 (2013)

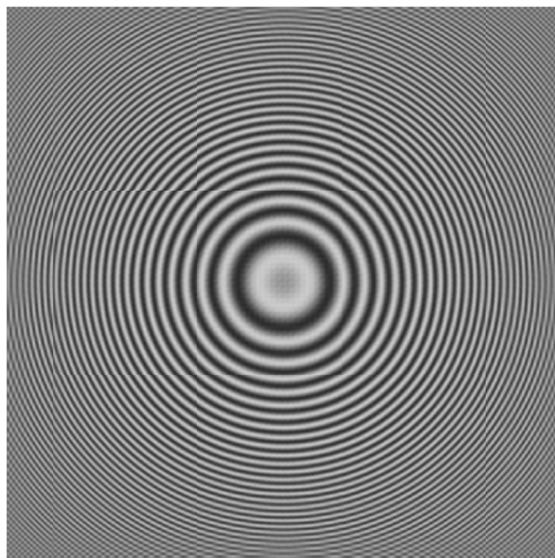


図 4.4 帯域制限を行った時の CGH

(出典) N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, “Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms”, *Opt. Express*, 9192--9197 (2013)

参考文献

- [1] N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda, and T. Ito, “Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms”, *Opt. Express* **21**, 9192-9197 (2013).

- [2] F. Zhang, I. Yamaguchi, and L. P. Yaroslavsky, “Algorithm for reconstruction of digital holograms with adjustable magnification”, *Opt. Lett.* **29**, 1668-1670 (2004).

第5章 波面記録法

5.1 波面記録法

波面記録法では2ステップの計算を行なうことで計算量の削減をしたCGHの作成を可能としている．図5.1にアルゴリズムの概要を示す．

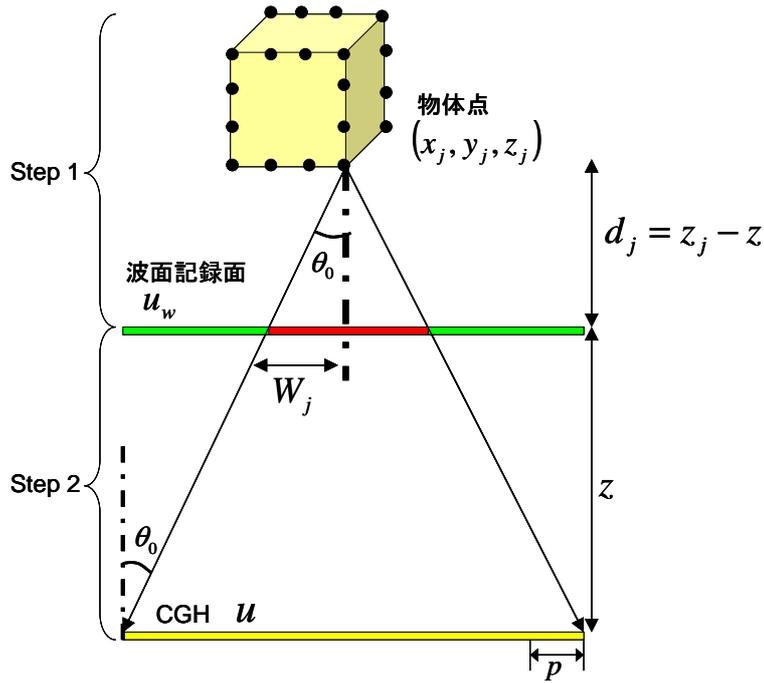


図 5.1 波面記録法のアルゴリズムの概要

波面記録法の第1ステップとして物体点と波面記録面の間でレイトレーシングを行い波面記録面に物体点の複素振幅の記録を行う．振幅の記録は以下の式を用い，三次元物体におけるすべての物体点での複素振幅 u_w の記録を行う．

$$u_w(x_w, y_w) = \sum_j^N \frac{A_j}{R_{wj}} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} R_{wj}\right) \quad (5.1)$$

このとき， $R_{wj} = \sqrt{(x_w - x_j)^2 + (y_w - y_j)^2 + d_j^2} \approx d_j + \left(\frac{(x_w - x_j)^2 + (y_w - y_j)^2}{2d_j}\right)$ は物体点と波面記録面上の座標 (x_w, y_w) との距離である．また， (x_j, y_j, z_j) および A_j はCGH上に原点を置いた場合のj番目の物体点の座標および輝度， λ は参照光の波長であり， N は物体点の総数， $d_j = z_j - z$ は波面記録面と物体点との垂直距離，そして $i = \sqrt{-1}$ である．波面記録面を物体の近くに置いたとき，物体光が波面記録面を通過する領域は微小となる(このときの領域の半径を W_j とする)．このことから，式(5.1)にお

る計算量が削減されることとなる。

第2ステップでは波面記録面とCGH間で回折計算を行うことでCGH上の複素振幅 $u(x, y)$ を計算する。波面記録面には物体光の振幅情報と位相情報が記録されているため、回折計算は物体からCGH上の複素振幅を計算する場合と等しくなる。ここではフレネル回折計算を用いる

$$u(x, y) = \frac{\exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}z\right)}{i\lambda z} \iint u_w(x_w, y_w) \exp\left(i\frac{\pi}{\lambda z}((x-x_w)^2 + (y-y_w)^2)\right) dx_w dy_w$$

$$= \frac{\exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}z\right)}{i\lambda z} \mathbf{F}^{-1} \left[\mathbf{F}[u_w(x, y)] \mathbf{F}[h(x, y)] \right] \quad (5.2)$$

ここで、 $\mathbf{F}[\]$ と $\mathbf{F}^{-1}[\]$ はそれぞれフーリエ変換と逆フーリエ変換の演算子、 z は波面記録面とCGHとの垂直距離、 $h(x, y) = \exp(i\pi(x^2 + y^2)/(\lambda z))$ はインパルス応答である。

最後に、CGHの計算を行う。振幅型のCGHを計算する場合、輝度 $I(x, y)$ の計算は

$$I(x, y) = |u(x, y) + R(x, y)|^2 \text{で行うことができる。この時の} R(x, y) \text{は参照光である。}$$

一方、位相型のCGHを計算する場合は $\theta(x, y) = \arg\{u(x, y)\}$ を計算することとなる。このときの $\arg\{\ }$ 演算子は偏角を求める演算子である。

WRPとCGH面を M^2 画素とし点光源の数を N とすると、第1ステップの計算量 O_{first} は、

$$O_{first} = O(NW^2)$$

$$W = \frac{1}{N} \sum_j^N W_j \quad (5.3)$$

となる。第2段階は回折計算であり、回折計算はFFTが計算量を決めるため、

$$O_{second} = O(M^2 \log M) \quad (5.4)$$

となる。波面記録法の計算量は、これらの和になる。 $W_j \ll M$ のため、式(5.1)を用いてCGH面上に直接計算した場合の計算量 $O(NM^2)$ に比べて計算量が小さくなる。

電子ホログラフィの場合、CGHの画素は表示するSLMの解像度によって決まるため、第2段階の計算量は変化しない。

5.2 波面記録法を用いた BL-DSF

さらなる高速化を得るために、波面記録法と DSF 回折を組み合わせた[1-3]。前述した波面記録法における第 2 ステップである光伝搬計算として BL-DSF を行うことで計算時間の高速化を図った。

また、本研究では複数の波面記録面を用いて CGH 作成計算を行った。複数の WRP を用いた CGH 計算は研究されている[4][5]。まず、図 5.3 の緑の線として示されているように仮想平面を複数作成し、RGB 画像及びデプス画像から点光源を生成する。仮想平面に近い点光源から仮想平面上に複素振幅の計算を行う。複素振幅の計算を行った仮想平面から CGH 面までの光伝搬計算として BL-DSF を行うことで CGH の計算を行う。

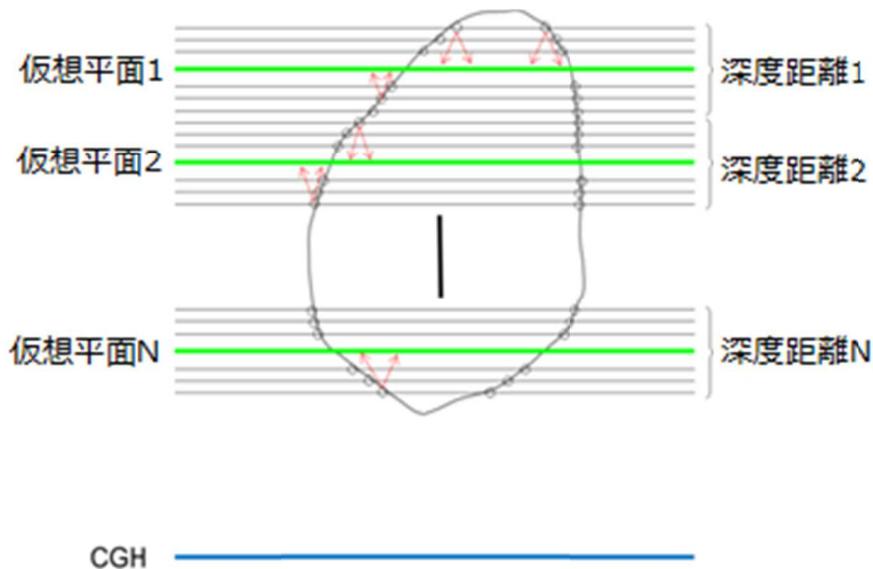


図 5.2 波面記録法の適用

参考文献

- [1] T. Shimobaba, N. Masuda and T. Ito, “Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane”, *Optics Letters*, 34, 20, 3133-3135 (2009).
- [2] T. Shimobaba, H. Nakayama, N. Masuda and T. Ito, “Rapid calculation of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display”, *Optics Express*, 18, 19, 19504-19509 (2010).
- [3] J. Weng, T. Shimobaba, N. Okada, H. Nakayama, M. Oikawa, N. Masuda and T. Ito, “Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method”, *Optics Express* , 20, 4018-4023 (2012).
- [4] T. Shimobaba, T. Kakue, N. Masuda, Y. Ichihashi, K. Yamamoto and T. Ito, “Computer holography using wavefront recording method”, *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging(DH) DH2013, DTu1A.2, Hawaii USA* (2013).
- [5] A. -H. Phan, M. -l. Piao, S. -K. Gil, and N. Kim, “Generation speed and reconstructed image quality enhancement of a long-depth object using double wavefront recording planes and a GPU”, *Appl. Opt.* **53**, 4817-4824 (2014).

第6章 検討および結果

6.1 画質比較方法

本研究におけるシミュレーションによる再生像の画質比較の手法としてピーク信号対雑音比(Peak Signal to Noise Ratio: PSNR)による比較を行った。PSNRとは、評価の基準となる画像における最大画素値の自乗値と、基準となる画像の画素値と評価対象の画像の画素値の差分自乗平均値をデシベルで表現した値である。

本研究では基準となる画像として角スペクトル法を用いて作成された CGH からシミュレーションによって作成された再生像を基準画像として用いた。基準画像として用いた再生像を図 6.1 に示す。



図 6.1 角スペクトル法を用いて作成された CGH での再生像

6.2 計算時間

畳み込みを基にした回折計算, BL-DSF を 256 回繰り返したとき, 波面記録法を適用した BL-DSF[1-3]を用いて 8K×4K の CGH を 3 色作成したときの計算時間および PSNR を表 6.1 に示す。この時, 波面記録法で作成した WRP 数は 32 面である。本研究では CPU に Intel の CPU Core i5-3570(CPU は 4 スレッド使用), GPU に NVIDIA の Geforce GTX 670 を使用した。表中の角スペクトル法を用いた GPU での計算時間が N.A.となっているのは GPU に角スペクトル法に必要な量のメモリが搭載されていないため計算時間を計測できないためである。

表 6.1 角スペクトル法および波面記録法を適用した BL-DSF での計算時間

	CPU	GPU	PSNR
角スペクトル法	10611(s)	N.A.	
BL-DSF	2422(s)	48.51(s)	20.497
波面記録法を適用した BL-DSF	487.6(s)	15.67(s)	20.468

表 6.1 より波面記録法を適用した BL-DSF を用いた場合角スペクトル法を用いた CPU に対して CPU では約 22 倍, GPU では約 670 倍の高速化が得られていることが見て取れる.

また, 波面記録法を適用した BL-DSF によって作成された CGH によって再生した再生像のシミュレーション画像を図 6.2 に示す.

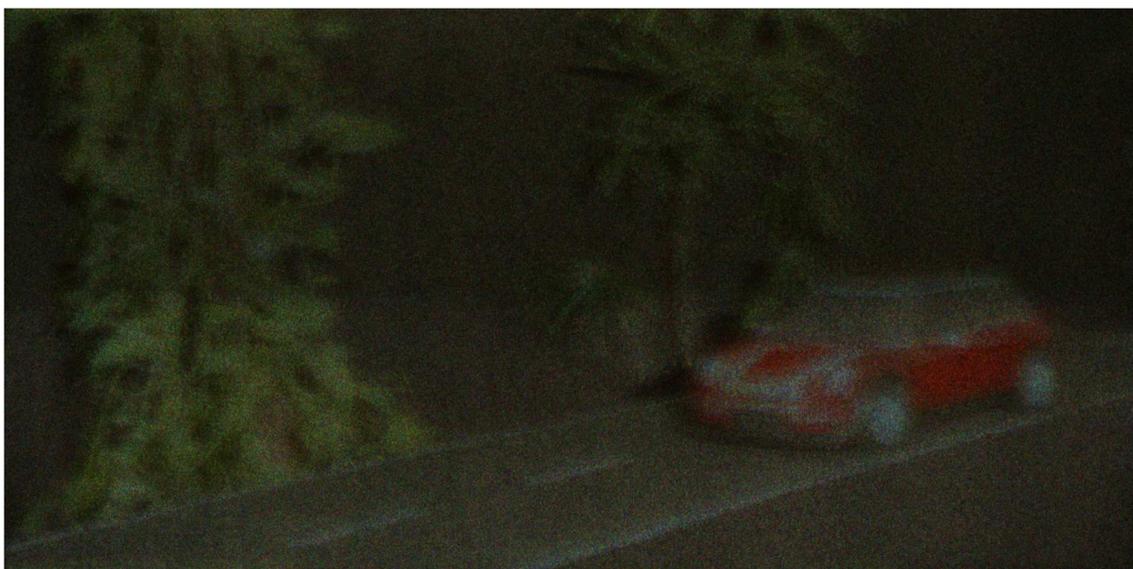


図 6.2 波面記録法を適用した BL-DSF により作成された CGH での再生像

6.3 波面記録法における記録面数の検討

波面記録法における WRP 面の数の検討を行った. 表 6.2 に各 WRP 数での計算時間および PSNR を示す.

表 6.2 各記録面数での計算時間と PSNR

WRP の数	CGH 計算時間(s)	PSNR
16	15.617	18.496
32	15.671	20.468
64	20.688	20.112
128	32.957	20.119

本研究では WRP 数が 32 の場合が計算時間, 画質ともに良好であると判断したため採用した.

また, 各 WRP 数で作成された CGH により再生されたそれぞれの再生像のシミュレーション画像を図 6.3 から図 6.6 に示す.

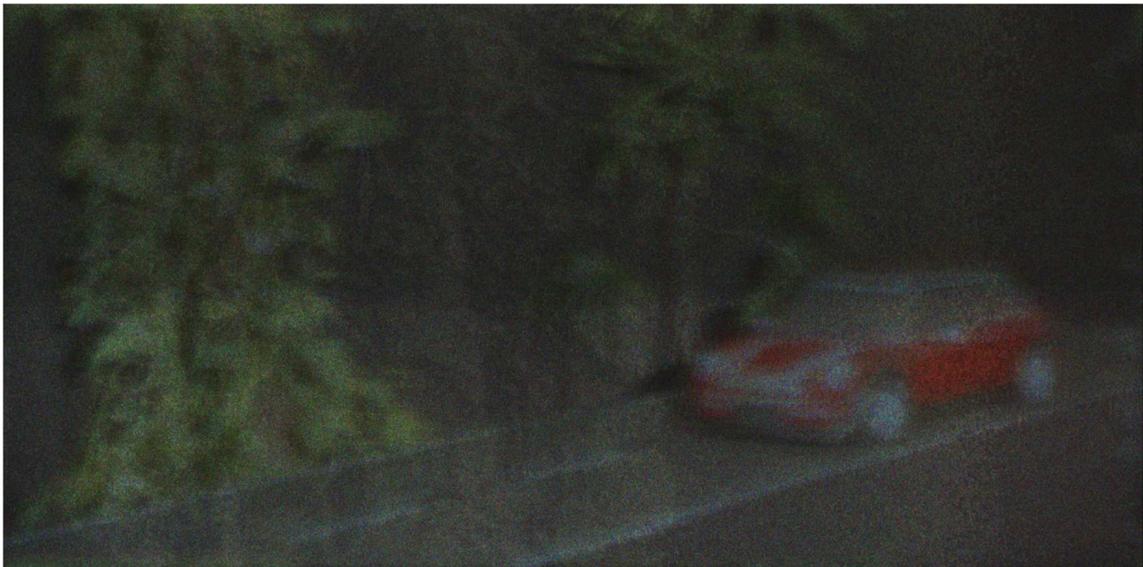


図 6.3 WRP 数 16 面での再生像



図 6.4 WRP 数 32 面での再生像



図 6.5 WRP 数 64 面での再生像



図 6.6 WRP 数 128 面での再生像

6.4 更なる高速化への検討

また，更なる計算時間の高速化を図るため使用した RGB 画像とデプス画像を間引いて CGH の作成を行った．ホログラムの再生像の分解能は人間の目の分解能を超えているため，情報を間引いても観察される再生像には影響が少ない[4]．この時の計算時間および PSNR を表 6.3 に示す．

表 6.3 原画から間引いた場合での計算時間と PSNR

原画からの間引き方	CGH 計算時間(s)	PSNR
間引かない場合	15.671	20.47
1/2に間引いたとき	12.195	19.91
1/4に間引いたとき	11.466	19.74
1/8に間引いたとき	11.175	18.99
1/16に間引いたとき	11.073	17.19

表 6.3 より 1/8 に間引いた場合が，画質の劣化が少なく，また，間引いた場合の CGH によって再生されたそれぞれの再生像のシミュレーション画像を図 6.7 から図 6.10 に示す．



図 6.7 1/2 に間引いたときの再生像



図 6.8 1/4 に間引いたときの再生像

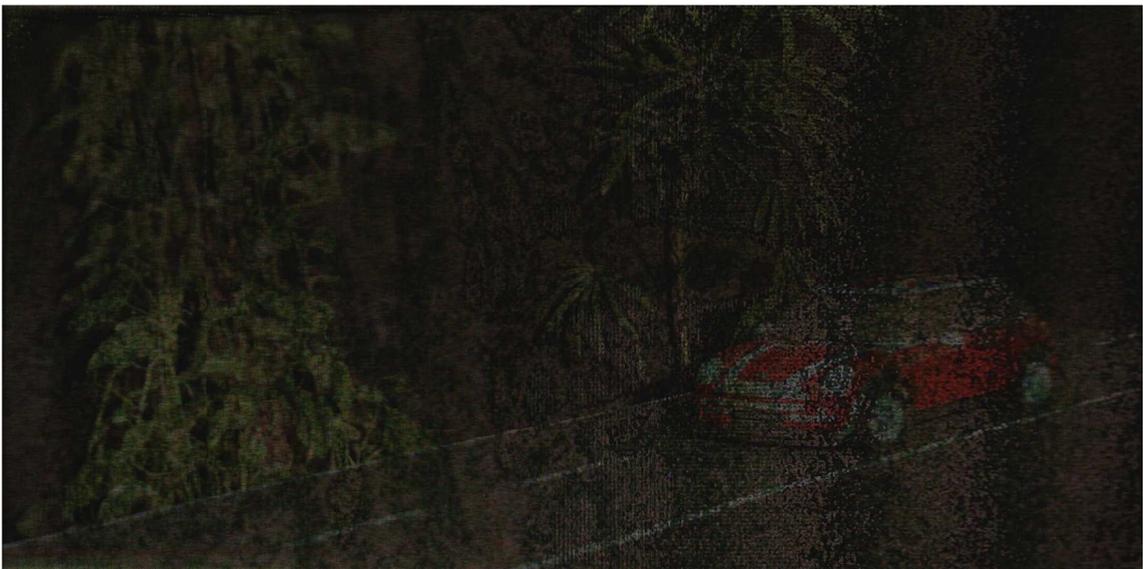


図 6.9 1/8 に間引いたときの再生像



図 6.10 1/16 に間引いたときの再生像

参考文献

- [1] T. Shimobaba, N. Masuda and T. Ito, “Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane”, *Optics Letters*, 34, 20, 3133-3135 (2009).
- [2] T. Shimobaba, H. Nakayama, N. Masuda and T. Ito, “Rapid calculation of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display”, *Optics Express*, 18, 19, 19504-19509 (2010).
- [3] J. Weng, T. Shimobaba, N. Okada, H. Nakayama, M. Oikawa, N. Masuda and T. Ito, “Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method”, *Optics Express*, 20, 4018-4023 (2012).
- [4] 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).

第7章 まとめと考察

本研究では CGH の計算時間が膨大であるという問題を解決するため BL-DSF と波面記録法を用いた CGH 計算の高速化手法について研究および検討を行った。その結果従来手法である畳み込みを基にした回折計算に比べ、波面記録面の枚数を 32 枚にした場合、CPU では 22 倍、GPU では 677 倍の速度が得られた。また、検討として原画像を 1/8 に間引いた場合、GPU では畳み込みを基にした回折計算に対して 950 倍の速度が得られる結果となった。

第8章 今後の展望

今後の展望として更なるホログラム作成の高速化を行うために GPU の並列化による計算領域の分割・並列処理による高速化や新しい高速化アルゴリズムの考案, 各種パラメータの検討などを行っていく必要がある.

また, 今回再生像の評価方法として角スペクトル法の再生像を基準画像とした PSNR を評価指標としたが PSNR 以外の再生像の評価方法についても検討および研究を行いたい.

謝辞

本研究を進めるにあたり，研究の機会と環境を与えて下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．本研究を進める上で，理論や論文執筆などにおいて多くのアドバイスを下さり，最後まで面倒を見てくださった同工学研究科，下馬場朋禄准教授に深く感謝申し上げます．私の稚拙な質問にいつも丁寧に答えてくださり，私たち学生の面倒を夜中まで見てくださった同工学研究科，角江崇助教に深く感謝申し上げます．

最後になりましたが，様々なアドバイスや指導，そして楽しい研究室生活を提供してくださった本研究室の先輩，後輩，同輩の皆様に深く感謝申し上げます．本当にありがとうございました．

業績リスト

査読付学術論文

- [1] A. Sugiyama, N. Masuda, M. Oikawa, N. Okada, T. Kakue, T. Shimobaba and T. Ito, “Acceleration of computer-generated hologram by Greatly Reduced Array of Processor Element with Data Reduction”, *Optical Engineering*, 53(11), 113104 (2014)
- [2] N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, T. Kakue and T. Ito, “Fast calculation of computer-generated hologram for RGB and depth images using wavefront recording plane method”, *Photonics Letters of Poland*, 6, 3, 90-92 (2014)
- [3] T. Shimobaba, M. Makowski, T. Kakue, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, and T. Ito, “Numerical investigation of lensless zoomable holographic projection to multiple tilted planes”, *Optics Communications*, 333, 274-280 (2014)
- [4] T. Shimobaba, T. Kakue, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama and T. Ito, “Ptychography by changing the area of probe light and scaled ptychography”, *Optics Communications*, 331, 189–193 (2014)
- [5] T. Shimobaba, T. Kakue, M. Oikawa, N. Takada, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama and T. Ito, “Calculation reduction method for color computer-generated hologram using color space conversion”, *Optical Engineering* 53(2), 024108 (2014)
- [6] T. Shimobaba, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, N. Masuda and T. Ito, “Non-uniform sampled scalar diffraction calculation using non-uniform Fast Fourier transform”, *Optics Letters*, 38, 5130-5133 (2013)
- [7] T. Shimobaba, M. Makowski, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama and T. Ito, “Lensless zoomable holographic projection using scaled Fresnel diffraction”, *Optics Express*, 21, 25285-25290 (2013)
- [8] T. Shimobaba, H. Yamanashi, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, N. Masuda and T. Ito, “Inline digital holographic microscopy using a consumer scanner”, *Scientific Reports*, 3, 2664 (2013)

- [9] T. Shimobaba, T. Kakue, N. Okada, M. Oikawa, Y. Yamaguchi and T. Ito, “Aliasing-reduced Fresnel diffraction with scale and shift operations”, *Journal of Optics*, 15, 075302(5pp) (2013)
- [10] N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda and T. Ito, “Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms,” *Optics Express*, Vol.21, pp.9192-9197 (2013)
- [11] 宮兆喆, 岡田直久, 増田信之, 伊藤智義, “Cell プロセッサを用いた並列処理によるスネーク法”, *Medical Imaging Technology*, Vol.31, No.1, pp.72-74 (2013)
- [12] 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” , *Applied Optics*, Vol.51, pp.7303-7307 (2012)
- [13] J. Weng, T. Shimobaba, N. Okada, H. Nakayama, M. Oikawa, N. Masuda and T. Ito, “Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method”, *Optics Express*, Vol.20, pp.4018-4023 (2012)
- [14] 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”, *Computer Physics Communications*, Vol.183, pp.1124-1138 (2012)

査読付国際会議

- [1] A. Sugiyama, M. Oikawaa, N. Okada, H. Nakayama, N. Masuda, T. Fukushige, T. Shimobaba, and T. Ito, “Computer-Generated Hologram on GRAPE-DR”, *The 20th International Display Workshops (IDW '13)*, 3Dp-18L, Sapporo Convention Center, Hokkaido, Japan (2013)
- [2] (招待講演) T. Kakue, N. Masuda, Y. Endo, R. Hirayama, N. Okada, T. Shimobaba and T. Ito, “Special-purpose computer for real-time reconstruction of holographic motion picture”, *OIT'13*, Beijing, China (2013)

- [3] N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda and T. Ito, “Fast calculation of computer-generated-horogram using band-limited double-step Fresnel diffraction”, 3DSA2013 (2013)
- [4] (招待講演) 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)
- [5] N. Okada, Daichi Hirai, Y. Ichihashi, Atsushi Shiraki, T. Kakue, T. Shimababa, N. Masuda and T. Ito, “Special-Purpose Computer HORN-7 with FPGA Technology for Phase Modulation Type Electro-Holography”, The 19th International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2012 (IDW/AD '12) (2012)
- [6] Y. Ichihashi, N. Okada, D. Hirai, H. Uehara, H. Nakayama, T. Shimobaba, N. Masuda and T. Ito, “Cluster System Using a Special-Purpose Computer for Electronic Holography and Application of Phase Hologram”, IUCS2011, Korea (2011)

国内外学会口頭発表

- [1] 岡田直久, 下馬場朋禄, 市橋保之, 大井隆太朗, 山本健詞, 老川稔, 角江崇, 増田信之, 伊藤智義, “帯域制限ダブルステップフレネル回折を用いた計算機合成ホログラムの高速計算”, 3次元画像コンファレンス 2013, P-17, 早稲田大学・西早稲田 (2013)
- [2] 遠藤優, 紀井建彦, 増田信之, 岡田直久, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “DVI出力を持つ位相変調型ホログラム専用計算機の開発”, 3次元画像コンファレンス 2013, 早稲田大学・西早稲田 (2013)
- [3] 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) (2012)
- [4] 下馬場朋禄, 角江崇, 岡田直久, 老川稔, 増田信之, 伊藤智義, “不等間隔スカラー回折計算の開発”, Optics and Photonics Japan 2012 (OPJ2012) (2012)
- [5] 下馬場朋禄, 柳橋健, 角江崇, 岡田直久, 老川稔, 増田信之, 伊藤智義, “スケール回折計算による広視野・高分解能定量位相計測の数値検証”, Optics and Photonics Japan 2012 (OPJ2012) (2012)

- [6] 増田信之, 平井大智, 岡田直久, 紀井健彦, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, 市橋保之, “FPGA を用いた位相 ホログラム専用計算機 HORN-7 の開発”, 第 11 回情報科学技術フォーラム(FIT2012), C-010, 法政大学・小金井キャンパス (2012)
- [7] 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, 法政大学・小金井キャンパス (2012)
- [8] 高田直樹, 下馬場朋禄, 杉山充, 岡田直久, 中山弘敬, 白木厚司, 増田信之, 伊藤智義, “シングル LCD 用マルチ GPU 環境 PC を用いた計算機合成ホログラムの計算高速化”, 第 11 回情報科学技術フォーラム(FIT2012), C-007, 法政大学・小金井キャンパス (2012)
- [9] (招待講演) 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・長岡技術科学大学 (2012)
- [10] 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・函館大学 (2011)
- [11] 丹羽雅志, 白木厚司, 荒井大輔, 岡田直久, 増田信之, 伊藤智義, “(GPU チャレンジ自由課題部門最優秀賞) GPU による計算機合成ホログラムのソフトウェア開発”, 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS 2009 (Symposium on Advanced Computing Systems and Infrastructures), 論文集, 広島・広島国際会議場 (2009)