

コンピュータホログラフィシステムの実用
に向けた高速化と画質改善の研究
2022年2月

長谷川 鋭

(千葉大学審査学位論文)

コンピュータホログラフィシステムの実用
に向けた高速化と画質改善の研究

2022年2月

長谷川 鋭

概要

ホログラフィは物体の 3 次元情報を物体光と参照光を干渉縞（ホログラム）として記録・再生する技術である。コンピュータシミュレーションを利用してホログラフィを再現したものをコンピュータホログラフィと呼ぶ。コンピュータホログラフィによって生成されたホログラムを、計算機合成ホログラム CGH（Computer-Generated Hologram）と呼称する。コンピュータホログラフィの応用には 3 次元テレビジョンのような 3 次元物体を投影する電子ホログラフィと 3 次元顕微鏡のような 3 次元物体を計測するデジタルホログラフィがある。どちらも情報処理の高速化と高画質化が課題となっており、実用には至っていない。そこで本研究では、コンピュータホログラフィの実用化に向けた研究として、RGB-D カメラによる実写の電子ホログラフィシステム及び最適化計算を用いたデジタルホログラフィの 2 つの研究を行った。

1 つ目の研究は RGB-D カメラによる実写の電子ホログラフィシステムに関する研究を行った。RGB-D カメラで取得した実写データは、CGH を再生する空間光変調器 SLM（Spatial Light Modulator）に対して情報量が大きくなり、再生像の画質に影響を与えてしまう問題がある。そこで RGB-D カメラで取得した実写データを用いた CGH の作成に見合うデータの補正を行うことにより問題解決を試みた。本研究では、RGB-D カメラで取得した 3 次元点群データを格子状のフィルタを用いてダウンサンプリングすることで、入力データの情報を削減した。ダウンサンプリングする際、点群データに対して格子状のグリッドを設定し、各格子の中にある点の重心を求め、求めた重心を新しい点群として扱うことで、ダウンサンプリングを行うという方法で入力データの情報を削減するのだが、このとき格子のサイズは決まっておらず、格子サイズで入力データの情報が変動するため、複数パターンの格子サイズでダウンサンプリングを行った。その結果からダウンサンプリングする前のポイントクラウドから空間分解能 $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$ に粗くすることで、物体点数を 15% に減らしても、高画質の CGH 再生像が得られた。計算時間は CGH 1 枚あたり約 82 秒から約 14 秒に短縮された。動画化でも同様な結果になることが確認できた。また空間分解能 $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$ にしてもピーク信号対雑音比 PSNR（Peak Signal-to-Noise Ratio）の値が 30[dB] 近い値になっていることも確認された。

2 つ目の研究は最適化計算を用いたデジタルホログラフィについての研究を行った。デジタルホログラフィは撮像素子を用いて 3 次元情報をホログラムとして記録し、コンピュータ上で可視化する技術である。計算によって試料の振幅と位相を得ることが可能である。しかし、現在の撮像素子は解像度が十分ではなく、より高精細な再生像を得るために、平面波によるインラインホログラフィを用いることが多い。ただし、インラインホログラフィは所望の 3 次元情報に不要な光情報が重なるという難点がある。また、平面波を作るためにはコリメータレンズ等を必要とするなど、光学系が大がかりになる。そこで、平面波よりも光学系を簡素化できる球面波参照光を用

いたインラインデジタルホログラフィに最適化計算を適用したシステムを提案し、反復計算を必要としない新たな推定法を見出し、数値実験で定量評価を行ったところ、代表的な画質回復手法である Gerchberg-Saxton 法に比べて、50 倍の速さで同程度の画質を得た。

Abstract

Holography is a technology for recording and reproducing three-dimensional (3D) information of an object as interference fringes (holograms) of object light and reference light. Computer holography is the reproduction of holography on a computer simulation. The hologram generated by computer holography is called a computer-generated hologram (CGH). The applications of computer holography include electro-holography for projecting 3D objects such as 3D television, and digital holography for measuring 3D objects such as 3D microscope. Both types of holography have yet to be put to practical use because of the challenges of speeding up information processing and improving image quality. In this study, I conducted two researches for the practical use of computer holography: one is a real scene electro-holography system using an RGB-D camera, and the other is a digital holography system using optimization calculations.

In the first research, I studied a real scene electro-holography system using an RGB-D camera, because the real scene data acquired by the RGB-D camera has a large amount of information for the spatial light modulator (SLM). A large amount of information affects the image quality of the reproduced image. In this study, I attempted to solve this problem by correcting the data suitable for the creation of CGH using the actual data acquired by the RGB-D camera. I reduced the amount of information in the input data by downsampling the 3D point cloud data acquired by the RGB-D camera using a grid of filters. In the downsampling process, a grid is set up for the point cloud data, and the center of gravity of the points in each grid is calculated. Then the calculated center of gravity is treated as a new point cloud to reduce the amount of information in the input data. In this case, the size of the grid is not fixed. Since the amount of information in the input data varies depending on the grid size, downsampling was performed with multiple grid sizes. As a result, by coarsening the point cloud before downsampling to a spatial resolution of $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$, I was able to obtain the reconstructed 3D images with accurate image quality even when the number of object points was reduced to 15%. The computation time was reduced to about 14 seconds per CGH. It was confirmed that the same results could be obtained for the moving images. It was also confirmed that the peak signal-to-noise ratio (PSNR) value was close to 30 [dB] even with a spatial resolution of $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$.

In the second study, I investigated digital holography using optimization calculations. Digital holography is a technique that uses an imaging sensor to record 3D information as a hologram and visualize it on a computer. It is possible to obtain the amplitude and the phase of a sample by calculation. However, current imaging sensors do not have sufficient resolution, and inline holography using plane waves is often used to obtain a higher resolution reproduction image. However, inline holography has the drawback that unwanted optical information is superimposed on the desired 3D information. In addition, the optical system to create a plane wave requires a collimator lens and other large components. I proposed a system that applies optimization

calculations to inline digital holography using spherical reference light, which simplifies the optical system more than plane waves. I found a new estimation method that does not require iterative computation, and quantitatively evaluated it in numerical experiments, and obtained the same level of image quality 50 times faster than the Gerchberg-Saxton method, a typical image quality recovery method.

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 論文の構成	3
第2章 ホログラフィの原理と応用	4
2.1 ホログラフィの原理	4
2.1.1 ホログラムへの記録	4
2.1.2 ホログラムからの再生	5
2.1.3 電子ホログラフィ	6
2.2 計算機合成ホログラム	7
2.2.1 CGH の計算方法	8
2.2.2 高速計算のためのアプローチ	9
2.2.3 フレネル近似	10
2.2.4 漸化式法	10
第3章 RGB-D カメラによる実写の 電子ホログラフィシステムに関する研究	14
3.1 RGB-D カメラ	15
3.2 ポイントクラウドデータ	16
3.3 ダウンサンプリング	16
3.4 Kinect による撮影	17
3.5 取得したポイントクラウドのダウンサンプリングと光学系による再生	20
3.6 画質の定量評価	27
3.7 実写 CGH の動画化	28
3.8 考察	32
第4章 最適化計算を用いたデジタルホログラフィに関する研究	33
4.1 ホログラムの定式化と直接推定手法	33
4.2 数値実験による画質の評価	36
4.3 計算速度の評価	42
4.4 考察	43
第5章 おわりに	44
5.1 今後の展望	44
参考文献	45
謝辞	47
業績リスト	48
査読付き論文（筆頭）	48
査読付き論文（共著）	48
国際会議（筆頭）	49
国内会議（筆頭）	49

第 1 章 序論

1.1 研究背景

近年 3 次元技術の研究が注目されており，ヘッドマウントディスプレイやライトフィールドディスプレイなど様々な 3 次元映像製品の研究が盛んとなっている．人間が物体を立体的にとらえられる要因は，左右の眼球のついている位置の違いで生じる視差で立体として知覚する両眼視差，物体の奥行き距離の差により眼球が内側，外側に回転し立体感を知覚する輻輳，視点位置が変化したときに視野範囲が変化することで立体感を知覚する運動視差，眼球の水晶体のピントが合う位置によって立体感を知覚する焦点調節が挙げられる．3 次元映像製品の多くは両眼視差方式を用いているが，この方式だと視点位置が固定されてしまい焦点調節による奥行き感が感じ取れない問題がある．特に輻輳と焦点調節によって感じられる距離感には強い相関があり，これらが一致しないと輻輳調節矛盾が生じ，長時間使用による不快感や眼精疲労の原因となってしまう問題がある．

そこで人間が物体を立体的にとらえられる要因をすべて満足し，観察者に不快感を与えない 3 次元表現技術としてホログラフィが研究されている[1]．この技術は物体の 3 次元情報を参照光と物体光を用いて干渉縞として記録し，記録した干渉縞に光を照射することにより 3 次元情報を再生する技術のことである．このホログラフィの技術で作られた記録物体をホログラムと呼ぶ．この技術を計算機上でシミュレーションしたものをコンピュータホログラフィと呼ぶ[2,3]．コンピュータホログラフィの応用には 3 次元テレビジョンのような 3 次元物体を投影する電子ホログラフィ[4]と 3 次元顕微鏡のような 3 次元物体を計測するデジタルホログラフィ[5]がある．

コンピュータホログラフィの技術を電子的に記録・再生する技術が電子ホログラフィである．電子ホログラフィは，感光材料の代わりに液晶ディスプレイ LCD (Liquid Crystal Display) などの空間光変調器 SLM (Spatial Light Modulator) を用いることで，計算機上でホログラフィを再現する技術のことであり，この技術によって作成されたホログラムが計算機合成ホログラム CGH (Computer-Generated Hologram) と呼ばれるものである．

デジタルホログラフィは被写体を CCD (Charge Coupled Device) や CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) センサなどの撮像素子にホログラムとして記録し，コンピュータ上で可視化する技術である．

どちらも情報処理の高速化と高画質化が課題となっており，実用には至っていない．そこで本研究では，コンピュータホログラフィの実用化に向けた研究として，RGB-D カメラによる実写の電子ホログラフィシステム及び最適化計算を用いたデジタルホログラフィの 2 つの研究を行った．

1 つ目の研究では RGB-D カメラによる実写の電子ホログラフィシステムに関する研究を行った．ホログラフィの技術で CGH を作成しようとする場合，感光材料に記録できる程の微細な干渉縞を完全に再現できるような表示デバイスは現状では開発されておらず，不完全な 3 次元情報の撮影となってしまう．そこで CGH を作成する際，ホログラフィ技術とは別の方法を用いて実写の 3 次元取得のための撮影が必要となってくる．

実写の 3 次元情報の取得方法としてはいくつか挙げられる。複数のレンズが連続して配置されているマイクロレンズアレイを用いて、各レンズから対象物を撮影し、3 次元情報を得るインテグラルフォトグラフィ IP (Integral Photography) を用いて撮影する方法[6,7]や、撮影対象物を複数視点から撮影し、撮影した画像間の特徴点の対応関係からカメラの位置姿勢を推定し、三角測量に基づいて特徴点の 3 次元位置を推定し、3 次元情報を復元する方法[8,9]、RGB-D カメラを用いて撮影する方法[10]などが挙げられる。IP を用いて撮影する方法では、専用の光学系を組む必要があり手間がかかってしまう。また複数視点から撮影する方法だと、撮影対象物を複数回撮影する必要や、カメラのキャリブレーションを行う必要が出てくる。そこで、今回行った研究では RGB-D カメラを用いて撮影する方法を採用した。

RGB-D カメラとは色情報 (RGB) と奥行き情報 (D) が同時に取得できるカメラのことである。専用の光学系やカメラキャリブレーションの必要がなく、奥行情報を取得することができる。ただし、RGB-D カメラから取得した 3 次元情報をそのまま用いて CGH を作成すると、取得した 3 次元情報の密度が高く、鮮明な再生像が得られない場合があり、その際は取得した 3 次元情報に対してダウンサンプリングを行う必要がある。

ダウンサンプリングとはサンプリングレートを落とすことによりサンプル点を減らす技法のことであり、密度が高い 3 次元情報にダウンサンプリングを施すことにより、CGH の作成に適正な量のサンプリングデータを得ることができる。ただし CGH の作成に適正なサンプリングレートは 3 次元像を再生する SLM の解像度や、取得した 3 次元情報の量に依存するため、定数として定めることはできない。そのため、本研究の目的は複数パターンのサンプリングレートから CGH を作成し、比較、画像の定量評価を行い、ダウンサンプリングによる画質劣化を見極め、ダウンサンプリングが CGH の計算に有効な技法であることを提案することである。

本研究では、RGB-D カメラで取得した 3 次元画像データを格子状にダウンサンプリングすることで入力データの情報量を削減した。一辺のサイズを ΔL とし、立方体のサイズを 10.0[mm] 間隔で変えることによって削減量を調整した。格子サイズが $\Delta L = 40.0$ [mm] のとき、物体点数を 15% に減らしても、正確な画質の CGH 再生像が得られた。計算時間は CGH 1 枚あたり 14 秒に短縮された。動画化でも同様な結果になることが確認できた。また格子サイズ $\Delta L = 40.0$ [mm] にしてもピーク信号対雑音比 PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) の値が 30[dB] 近い値になっていることも確認された。

2 つ目の研究は最適化計算を用いたデジタルホログラフィについての研究を行った。デジタルホログラフィでは、撮影対象を撮像素子にホログラムとして記録し、計算によって 3 次元情報をコンピュータ上で復元し、可視化する。しかし、現時点においては CCD や CMOS センサなどの撮像素子の解像度が十分ではなく、より高精細な 3 次元像を取得するために、平面波を参照光に用いたインラインホログラムを利用することが多い。ただし、オフアクシスホログラムに比べてインラインホログラムでは所望の 3 次元情報に不要な直接光や共役光が重なってしまうという欠点がある。不要光を除去する手法として、位相シフト法[11]や GS 法 (Gerchberg-Saxton Algorithm) [12]などが利用されている。しかし、位相シフト法は複数回の撮像を必要とし、GS 法は反復計算による負荷が高い。3 次元像をリアルタイムで動画測定しようとする場合には障壁となる。

この課題に対して、オフアクシスホログラムについて最適化手法を用いた物体光の推定手法

が Khare らによって提案されている[13]. この手法は 1 回の撮像で良いことや反復計算に光波伝搬計算を組込まないので計算コストが小さいことが利点であり, 位相シフト法や GS 法の難点を克服している. ただし, Khare らの研究では参照光に平面波を用いており, 平面波を作るにはコリメータレンズなどの光学系が必要になる. 球面波に置き換えることができればシステムは簡素化し, ポータブルタイプへの応用も広がる. また, 球面波参照光はホログラム面の各画素に異なった角度で照射されるため, オフアクシスホログラムと同様に扱う必要があり, Khare らの最適化手法を適用できる可能性が高い.

本研究の目的は, 球面波のインラインホログラムに Khare らの最適化手法を適用し, 高速なデジタルホログラフィシステムを提案することにある. さらに, Khare らが 20 回の反復計算を行っていたのに対して, 本研究では誤差関数の複素平面における幾何学的特性から反復計算をせずに直接収束位置が推定できることを見出した. 数値実験による球面波参照光のインラインホログラムに最適化計算を適用した結果を示すとともに, 反復計算を必要としない新たな収束位置の推定方法を提案し, 本手法の有効性を見出した.

1.2 論文の構成

本論文は, 全 5 章で構成される. 本章では, 研究の背景, 目的, 論文の構成について述べた. 第 2 章では, ホログラフィの原理およびその応用について述べる. 第 3 章では, RGB-D カメラによる 3 次元情報取得や, RGB-D カメラを用いた CGH の作成とダウンサンプリングによる画質改善について述べる. 第 4 章では, 最適化計算を用いたデジタルホログラフィの研究について述べ, 最後に第 5 章で本研究のまとめについて述べる.

第2章 ホログラフィの原理と応用

ホログラフィは1948年にデニス・ガボールによって提案された技術である[1]。この技術は光の干渉と回折を利用した波面の記録および再生技術であり、波面が記録された干渉縞をホログラムと呼ぶ。ホログラフィは一般的な写真技術と違い、干渉縞として物体の明るさである光の振幅と、物体の方向成分である位相の両方を記録する技術である。光の振幅と位相の両方を忠実に再現することが可能なため、ホログラフィを用いて再生された光を我々が観察すると、3次元的な物体があたかもそこに存在しているかのように感じられる。本章では、ホログラフィの原理について簡単に述べ、本研究のホログラフィの利用方法である3次元ディスプレイのためのCGHについて述べる。

2.1 ホログラフィの原理

2.1.1 ホログラムへの記録

図2.1にホログラム記録時の概略図を示す。ホログラムの記録には既知である参照光と、物体情報が含まれる物体光が必要となる。まず光源からの光をビームスプリッタによって分割する。片方の光をミラーによって物体に照射し、反射した光が物体光となる。ビームスプリッタを用いて分割した他方の光を参照光と呼び、この参照光と物体光を電子撮像デバイスのような2次元記録媒体に干渉させてきた干渉縞がホログラムとなる。このホログラムは3次元の情報を有しているので、3次元像を復元することが可能である。

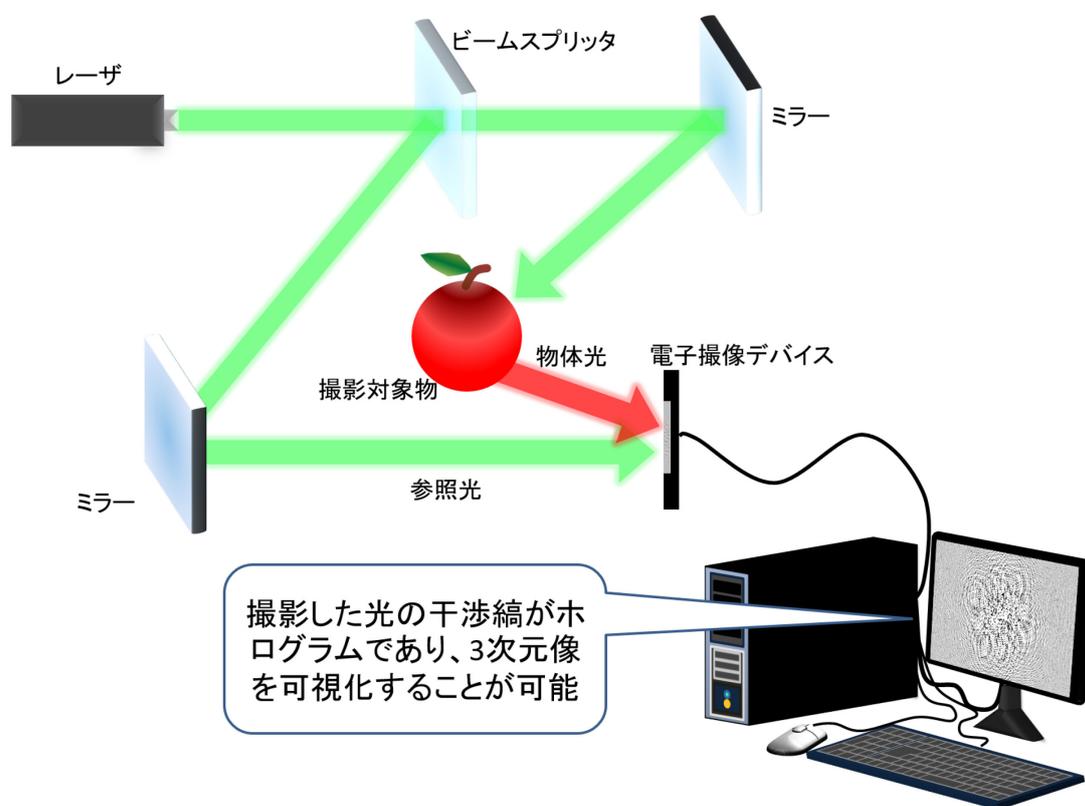


図 2.1: ホログラムへの記録

ここでホログラムの記録を式で表す．物体光 (U_O)，参照光 (U_R) を以下の式で記述する．

$$U_O = |U_O|\exp[i\phi] \quad (2.1)$$

$$U_R = |U_R|\exp[i\psi] \quad (2.2)$$

ここで ϕ は物体光の位相分布， ψ は参照光の位相分布を表す． i は虚数単位である．これらの式から，ホログラム面での光の干渉による強度 I は以下の式で記述できる．

$$\begin{aligned} I &= |U_O + U_R|^2 \\ &= |U_O|^2 + |U_R|^2 + U_R^* U_O + U_R U_O^* \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで*は複素共役を表す．

従来のレーザホログラムでは強度 $I = |U_O + U_R|^2$ を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できる感光材料に記録する．そのときの振幅透過率分布は式(2.4)となる[14]．

$$T = t_b + \beta I \quad (2.4)$$

ここで t_b や β は感光材料などに依存する定数である．

2.1.2 ホログラムからの再生

図 2.2 にホログラム再生時の概略図を示す．ホログラムに記録された物体の情報は，記録時に使用した参照光をホログラムに照射することにより再生が可能となる．ホログラムは回折格子のような細かい干渉縞を記録しているため，入射した方向へ直進する光の他に別方向へ光が進む回折現象が生じる．この回折した光は再生光と呼ばれ，記録された物体光と同等の性質を持っている．この再生光を観察することによって，あたかも記録した物体が存在するかのようになり立体像を見ることができる．ホログラムに対して記録に用いた参照光 U_R を照射した場合，再生される光波場は以下の式で記述できる．

$$\begin{aligned} U_R(x, y)T(x, y) &= t_b U_R + \beta U_R |U_O|^2 + \beta U_R U_R^* U_O + \beta U_R U_R U_O^* \\ &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \end{aligned} \quad (2.5)$$

式(2.5)の第三項をまとめると，

$$U_3 = \beta |U_R|^2 U_O \quad (2.6)$$

となり，物体光に比例した光が再生される．つまり記録した物体があった所に虚像が発生する．

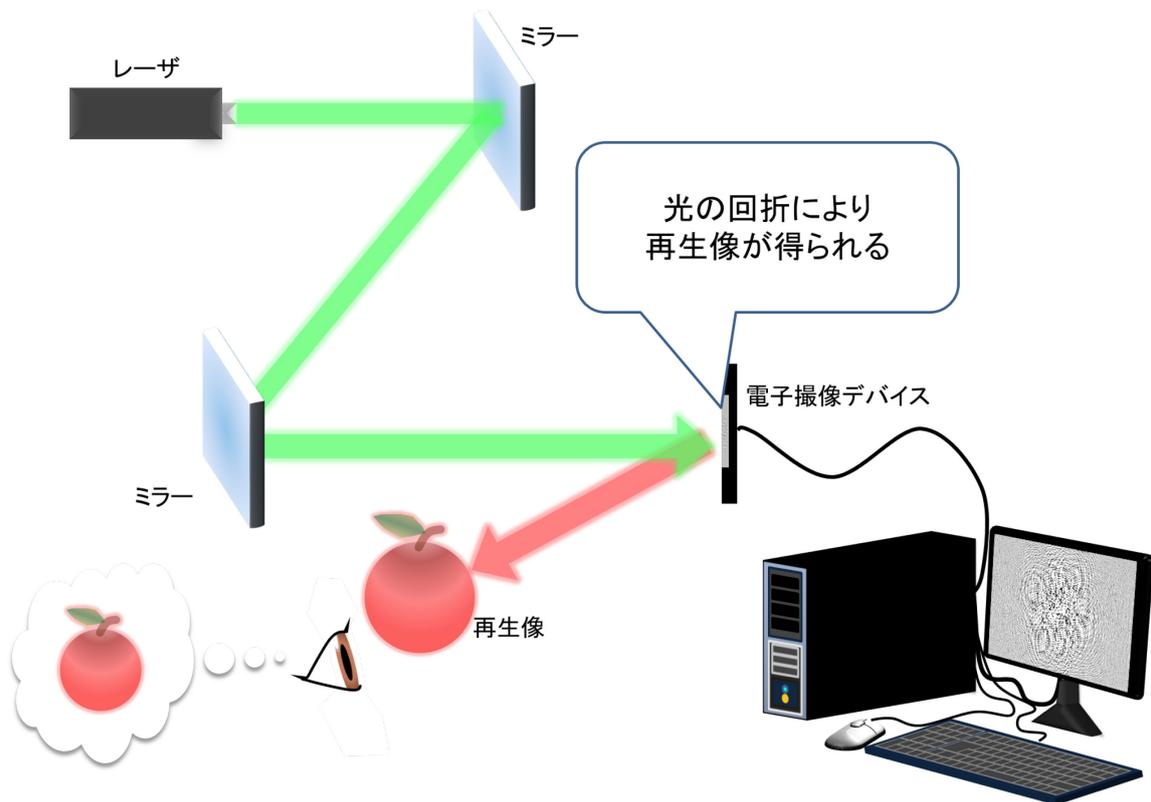


図 2.2: ホログラムからの再生

2.1.3 電子ホログラフィ

1960年にレーザが発明されて以降、ホログラフィの研究は急速に進展した[15, 16]。ただし、レーザホログラムは記録媒体に写真乾板等の感光材料を用いているため、物体の一瞬の状態についての記録や再生しかできない。ホログラフィを用いて立体映像を再生するためには、連続的にホログラムを記録や再生する必要がある。電子ホログラフィは、感光材料の代わりにLCDなどのSLMを用いることで、計算機上でホログラフィを再現する技術のことである。この技術を用いることでホログラフィの機能を電子的に実現できるため、自然な像を観察できる立体映像を作り出すことができる[3]。

電子ホログラフィに用いられる光学系の概要図を図2.3に示す。使用する参照光源は、レーザや高輝度の発光ダイオードLED (Light Emitting Diode) を用いる。光源から発せられた光は、コリメータレンズを介して平行光に変えられ、ハーフミラーによってSLMへ入射される。SLMに入射された光は変調され、その反射光はホログラムに記録された立体像から発せられる物体光と同様の性質を持つ。この光を人間が捉えることにより、動きのある立体映像を再生できる。

以上のようにして、電子ホログラフィを用いた立体映像システムを作ることができる。

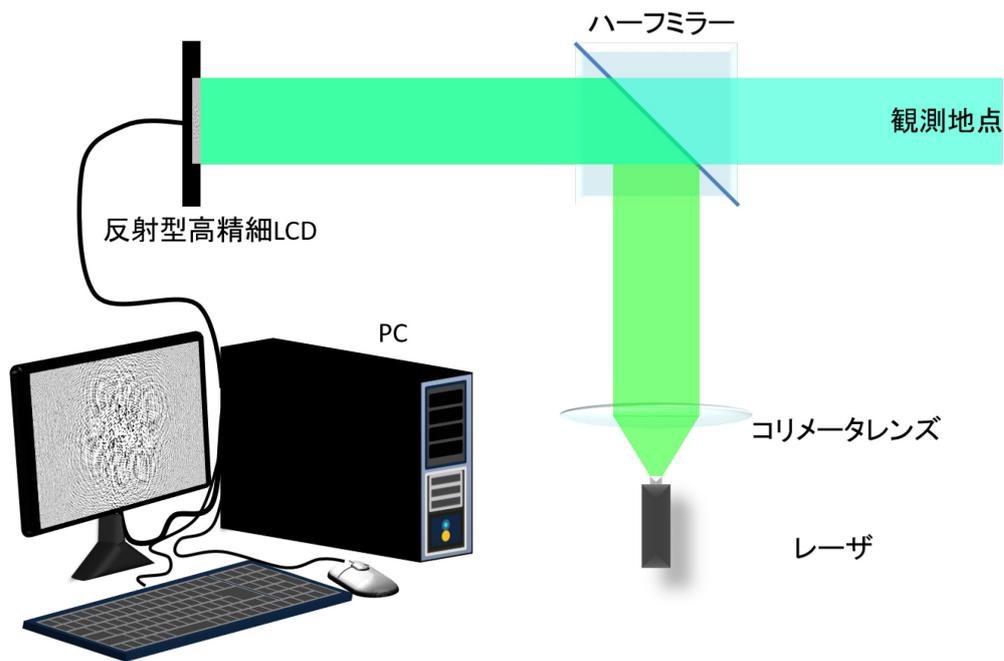


図 2.3: 電子ホログラフィの概要図

2.2 計算機合成ホログラム

SLMにはCGHを入力する。CGHは、コンピュータに入力された立体像の情報をもとに物体光をシミュレートし、ホログラム面上で参照光との干渉縞を計算することで作成される。立体像の情報は、実空間の立体情報をカメラなどのデバイスによって入力する方法[7]や、CG (Computer Graphics) で仮想的に立体像を作成して入力する方法[17]などで取り込むことができる。基本的に、物体から発せられる光は Huygens-Fresnel の原理に従い、球面波の重ね合わせによって解析することができる[18]。CGHにおける物体光は、入力された立体像を点光源の集合とみなし、それぞれから発せられる球面波の重ね合わせをシミュレートすることで求められる。

しかし、三角関数演算を含む球面波の計算負荷は非常に高く、数百万点にもなる点光源のすべてを計算するには、膨大な時間がかかる。任意の入力に対してリアルタイム再生できる立体映像を実現するためには、計算量を削減し、計算時間を短くしなければならない。

現在ではそれらを目的として、主に2つの方法が提案されている。点光源モデル[19-21]は、立体像を構成する点光源を間引きし、立体像の形状を粗くすることで計算量を削減したモデルである。点光源モデルにおけるCGHは、構成する点光源からの球面波をシミュレーションすることで得られる。球面波をシミュレーションすればよいため、計算の構成が単純になり、計算機等への実装が容易であるという利点がある。ポリゴンモデルは、3次元モデルを複数の平面で近似したモデルである[19]。平面からの光伝搬は、高速フーリエ変換FFT (Fast Fourier Transform) によって計算が可能であるため、大幅な計算量の削減が可能である。このモデルは平面で構成されているため、点光源モデルよりも表現性は高くなる利点がある。しかし、これらの簡略化を経てもその計算量は膨大であり、必要な計算時間も長い。これも電子ホログラフィを用いた立体映像システムの実現へ向けた大きな課題の一つである。

2.2.1 CGH の計算方法

点光源モデルにおける CGH の具体的な計算方法について述べる。点光源モデルからの物体光は球面波の重ね合わせによって求められる。点光源 p_j から距離 r_j に位置する点での球面波の複素振幅 $U_j(r_j)$ は、

$$U_j(r_j) = A_j \frac{\exp(ikr_j)}{r_j} \quad (2.7)$$

と表される。このとき、 k は球面波の波数、 i は虚数単位である。 A_j は点光源の振幅を表す。以下すべての点光源が同強度、同位相とし、 $A_j = 1$ とする。 N 点の点光源によって構成される立体像の場合、求めるホログラムのある位置 r における複素振幅 $U(r)$ は、

$$\begin{aligned} U(r) &= \sum_{j=0}^{N-1} U_j(r_j) \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \frac{\exp(ikr_j)}{r_j} \end{aligned} \quad (2.8)$$

と表される。点光源からホログラム面までの距離が十分に大きい場合、 $1/r_j \approx \text{const.}$ としても問題がない。ホログラムは $U(r)$ の複素振幅や偏角を階調化して記録するため、物体光の計算においてこの項を考慮する必要はない。したがって式は、

$$\begin{aligned} U(r) &= \sum_{j=0}^{N-1} U_j(r_j) \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \exp(ikr_j) \end{aligned} \quad (2.9)$$

として計算できる。上式では、簡単のため参照光の振幅強度を 1 とし、参照光を光軸方向から入射させたとしている。そのため、ホログラム面上に作られる物体光と参照光が干渉した複素振幅分布は式(2.9)と一致する。こうして得られた複素振幅から CGH を計算する。

CGH は記録の方法から 2 種類に分けられる。ホログラフィは光の振幅情報と位相情報の両方を記録・再生できる技術だが、電子ホログラフィで用いられる SLM のうち、その両方を同時に変調できるものは存在しない。そのため、現在では振幅か位相のいずれかを CGH に記録する手法が取られている。

2.2.2 高速計算のためのアプローチ

CGH は、式(2.9)に従い、点光源から発せられる球面波をホログラム面上で重ね合わせて計算する。

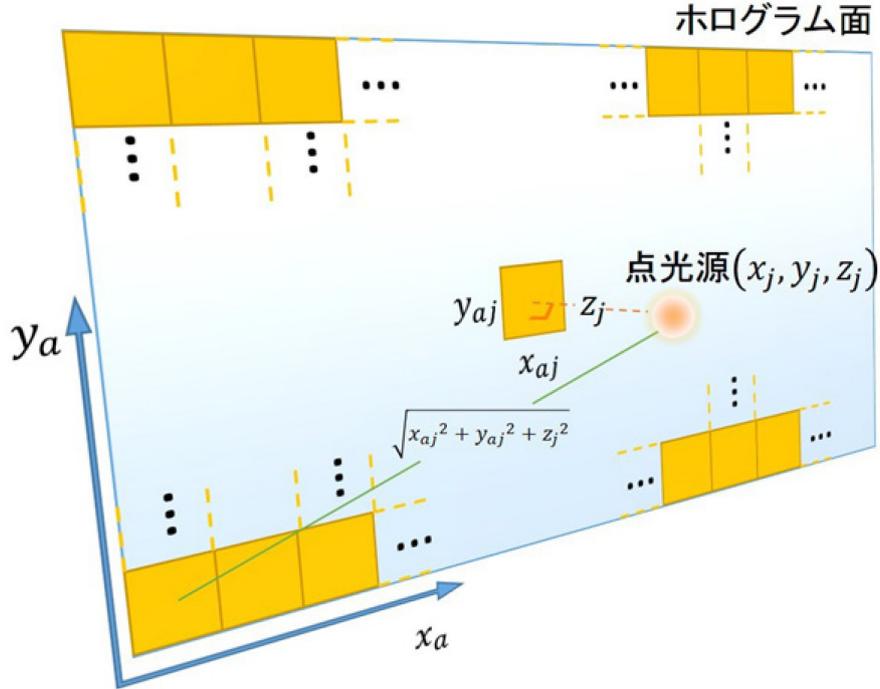


図 2.4: CGH 計算の座標系

図 2.4 のように、計算に必要な座標系を定義する。 j 番目の物体点の位置を (x_j, y_j, z_j) 、ホログラム面の画素を (x_a, y_a) とする。また、 $x_{aj} = x_a - x_j$ 、 $y_{aj} = y_a - y_j$ とする。 SLM の画素ピッチ p で規格化された空間を考えると、 x_j 、 y_j 、 z_j 、 x_a 、 y_a は無次元量になる。物体点と画素の距離 r_{aj} は

$$r_{aj} = p \{x_{aj}^2 + y_{aj}^2 + z_{aj}^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

と表せる。また、式(2.9)より、

$$\begin{aligned} \text{Re}[U(x_a, y_a)] &= \sum_{j=0}^{N-1} \text{Re}[U_j(r_{aj})] \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \cos(kr_{aj}) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned}
\text{Im}[U(x_a, y_a)] &= \sum_{j=0}^{N-1} \text{Im}[U_j(r_{aj})] \\
&= \sum_{j=0}^{N-1} \sin(kr_{aj})
\end{aligned} \tag{2.12}$$

である。実際の計算では、CGHの画素数の要素を持つ単精度、あるいは倍精度のバッファを用意し、複素振幅分布の実部、虚部それぞれについて計算を行う。すべての計算が終わった後に偏角を取り、CGHとして出力する。つまり、CGHの画素値 $c(x_a, y_a)$ は、

$$c(x_a, y_a) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[U(x_a, y_a)]}{\text{Re}[U(x_a, y_a)]} \cdot \frac{255}{2\pi} \tag{2.13}$$

となる。

本研究において、 $c(x_a, y_a)$ は256階調(8bit)で記録される。以上の式による計算式を直接計算法と呼ぶ。直接計算法では、式(2.10)に含まれる平方根演算、式(2.11)、式(2.12)に含まれる三角関数演算にかかる計算コストが大きい。そのため、膨大な計算時間を必要とする。

2.2.3 フレネル近似

フレネル近似は、式(2.10)における平方根の計算コストを削減するための手法であり、非常に広く用いられている[18]。式(2.10)において、ホログラムのサイズが3次元モデルとホログラムの距離と比較して非常に小さい場合、すなわち $z_j \gg x_j, y_j$ が成り立つ場合、式(2.10)のテイラー級数展開の3項目以降を無視すると、

$$r_{aj} \approx z_j + \frac{x_{aj}^2 + y_{aj}^2}{2z_j} \tag{2.14}$$

となる。平方根の代わりに除算が加わるが、総合的な計算コストは直接計算法に比べて小さくなる。

2.2.4 漸化式法

漸化式法は、フレネル近似と同様に式(2.10)における計算コストを削減するための手法である[22-24]。漸化式法における座標系を図2.5に示す。

フレネル近似を適用した式(2.14)に対し、 x 軸方向に隣接する画素との関係を考える。このとき、計算はある一つの点光源に対する球面波の複素振幅分布のみを考えるものとし、画素の y 座標は一定と考える。

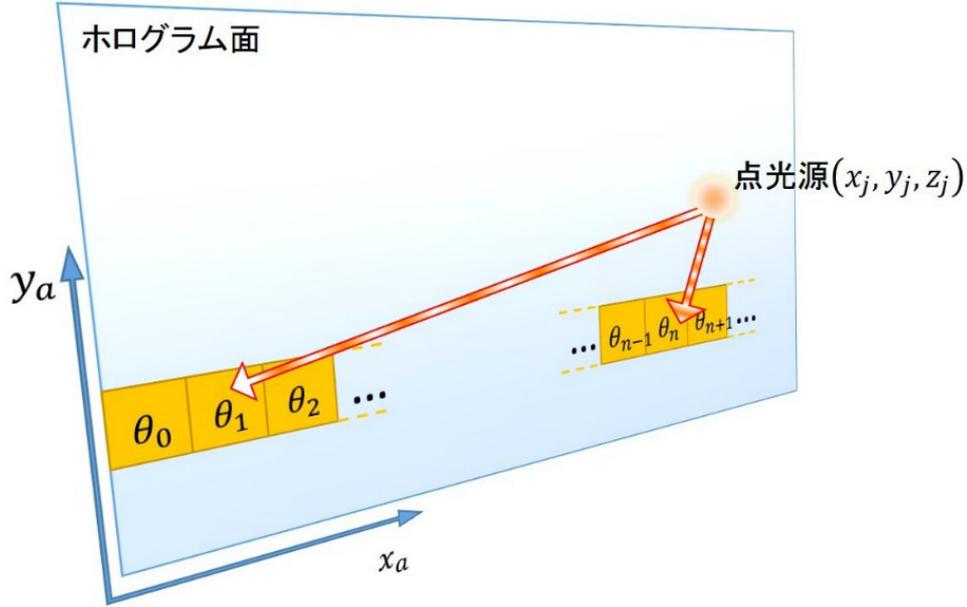


図 2.5: 漸化式法における座標系

ホログラム面上の任意の点 (x_a, y_a) から x 軸方向に $n \in (\mathbb{N})$ だけ離れた点における位相 Θ_n を考えると,

$$\begin{aligned}
 \Theta_n &= \frac{p}{\lambda} \left\{ \frac{(x_{aj} + n)^2 + y_{aj}^2}{2z_j} + z_j \right\} \\
 &= \frac{p}{2\lambda z_j} \left\{ (x_{aj} + n)^2 + y_{aj}^2 \right\} + \frac{pz_j}{\lambda} \\
 &= \frac{p}{2\lambda z_j} (x_{aj}^2 + y_{aj}^2) + \frac{p}{2\lambda z_j} (2x_{aj}n + n^2) + \frac{pz_j}{\lambda}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

となる. 同様に Θ_{n-1} は,

$$\begin{aligned}
 \Theta_{n-1} &= \frac{p}{\lambda} \left\{ \frac{(x_{aj} + n - 1)^2 + y_{aj}^2}{2z_j} + z_j \right\} \\
 &= \frac{p}{2\lambda z_j} \left\{ (x_{aj} + n - 1)^2 + y_{aj}^2 \right\} + \frac{pz_j}{\lambda} \\
 &= \frac{p}{2\lambda z_j} (x_{aj}^2 + y_{aj}^2) + \frac{p}{2\lambda z_j} \{ 2x_{aj}(n - 1) + (n - 1)^2 \} + \frac{pz_j}{\lambda}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

となる. 差分を取ると

$$\begin{aligned}\Theta_n - \Theta_{n-1} &= \frac{p}{2\lambda z_j} (2x_{aj}n + n^2) - \frac{p}{2\lambda z_j} \{2x_{aj}(n-1) + (n-1)^2\} \\ &= \frac{p}{2\lambda z_j} (2x_{aj} + 1) + \frac{p}{\lambda z_j} (n-1)\end{aligned}\quad (2.17)$$

となり, Θ_n についての漸化式になっている. 初項 Θ_0 は,

$$\Theta_0 = \frac{pz_j}{\lambda} + \frac{p}{2\lambda z_j} (x_{aj}^2 + y_{aj}^2)\quad (2.18)$$

となる.

ここで, さらに新しい変数として次の2つを導入する.

$$\Delta_0 = \frac{p}{2\lambda z_j} (2x_{aj} + 1)\quad (2.19)$$

$$\Gamma = \frac{p}{\lambda z_j}\quad (2.20)$$

式(2.19), 式(2.20)を式(2.17)に代入すると,

$$\Theta_n = \Theta_{n-1} + \Delta_0 + (n-1)\Gamma\quad (2.21)$$

となる. ここで Δ_{n-1} について次のように定義する.

$$\Delta_{n-1} = \Delta_0 + (n-1)\Gamma\quad (2.22)$$

すると, 式(2.21)は次のように表せる.

$$\Theta_n = \Theta_{n-1} + \Delta_{n-1}\quad (2.23)$$

さらに，式(2.22)より $\Delta_n - \Delta_{n-1}$ を求めると，

$$\begin{aligned}\Delta_n - \Delta_{n-1} &= (\Delta_0 + n\Gamma) - \{\Delta_0 + (n-1)\Gamma\} \\ &= \Gamma\end{aligned}\tag{2.24}$$

となり，式(2.24)は Δ についての漸化式になっている．

式(2.23)及び式(2.24)に示した 2 つの漸化式を行うことにより，隣接する画素の位相を，初項計算を除いて加算のみで求めることができる[24]．漸化式法により，位相計算の平方根計算にかかる計算コストを大幅に削減することができる．また，パイプライン化に適したアルゴリズムであるため，ハードウェア実装に適している．

第 3 章 RGB-D カメラによる実写の電子ホログラフィシステムに関する研究

第 1 章で説明したように、CGH での計算で用いるデータは 3 次元情報である。それゆえ実写物を CGH で再生しようとするならば、実写物の 3 次元情報を計算機に読み込む必要がある。そこで色情報と同時に深度情報を取得できる RGB-D カメラを用いることにより、現実にある物体の 3 次元情報を取得し、実写の CGH を作成することができるようになる。この章では RGB-D カメラについて簡単に説明し、RGB-D カメラから取得した 3 次元情報と、そのデータの扱いについて説明し、RGB-D カメラである Kinect for Windows v2[25] (以降、Kinect と表記する) を用いて実写の CGH を作成することについて説明し、作成した実写の CGH についての考察を述べる。

RGB-D カメラを用いた CGH 作成の流れを図 3.1 に示す。CGH 作成の流れとして、初めに Kinect を用いて撮影対象物を撮影する。Kinect を制御することにより、色情報と深度情報をポイントクラウド (Point Cloud) として出力することができる。ポイントクラウドとはコンピュータ上で扱う点の集合体のことであり、ポイントクラウドデータとして記録された物体はすべて点の集合体として扱うデータ形式である。出力したポイントクラウドを CGH の計算に用いることによって実写物の CGH を作成し、再生することができる。また出力したポイントクラウドにダウンサンプリングを施すことにより、点数を削減したポイントクラウドを得ることができ、点の密度が高すぎない鮮明な像を再生することができる。Kinect から撮影するごとに更新し、再びポイントクラウドを取得することを繰り返すことによってポイントクラウドを動画として出力することができる。

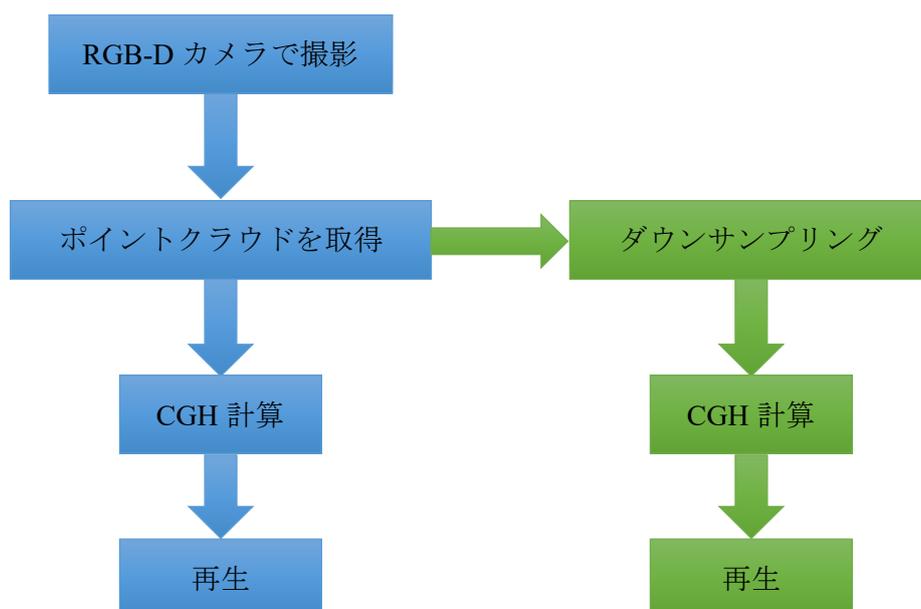


図 3.1: RGB-D カメラによる CGH 作成の流れ図

3.1 RGB-D カメラ

RGB-D カメラとはその名の通り、RGB（色）と D（深度）を同時に取得できるカメラのことである。RGB-D カメラの深度情報の取得方式は、様々な方式があり、投影光方式や ToF（Time of Flight）方式などが挙げられる。投影光方式では図 3.2 のようなドットパターンなどを撮影対象物に投影し、反射してきたパターンを読み取り、取得したパターンの歪み具合から深度を計測するものである。ToF 方式は図 3.3 のように光を撮影対象物に投影し、反射してくる光の時間を計測して深度を計測する。



図 3.2: 投影光方式

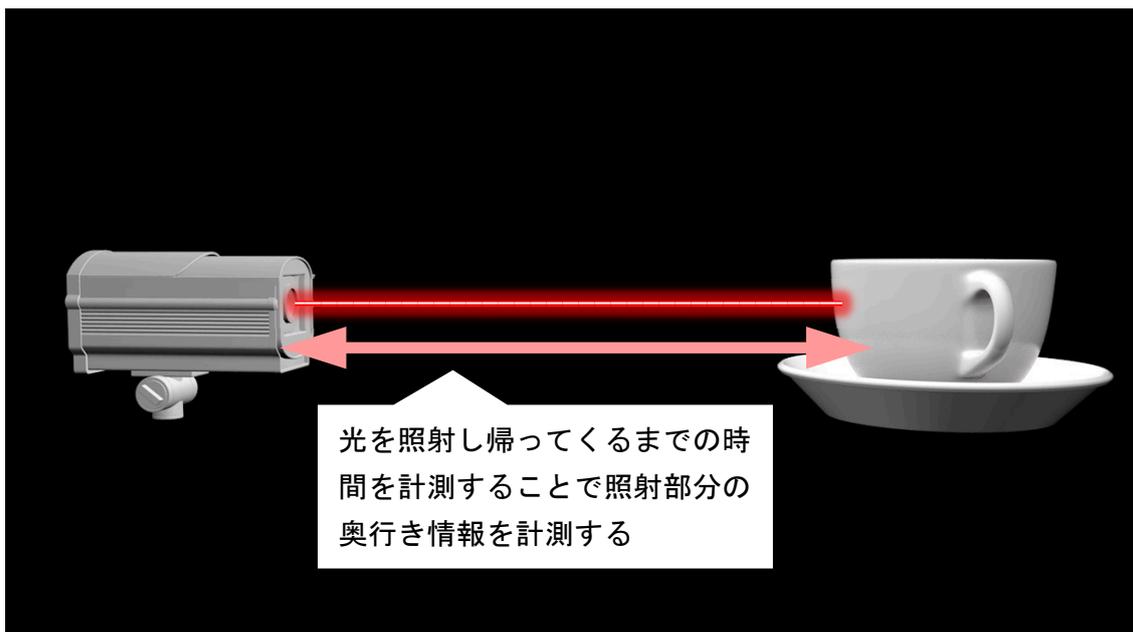


図 3.3: ToF 方式

本実験で使用した RGB-D カメラである Kinect は ToF 方式である. 表 3.1 に Kinect (Kinect for Windows v2) の仕様を示す.

表 3.1: Kinect for Windows v2 の仕様表

カラー画像	解像度	1,920 × 1,080
	フレームレート	30[fps]
デプス画像	解像度	512 × 424
	フレームレート	30[fps]
	検出範囲	0.5 ~ 8.0[m]

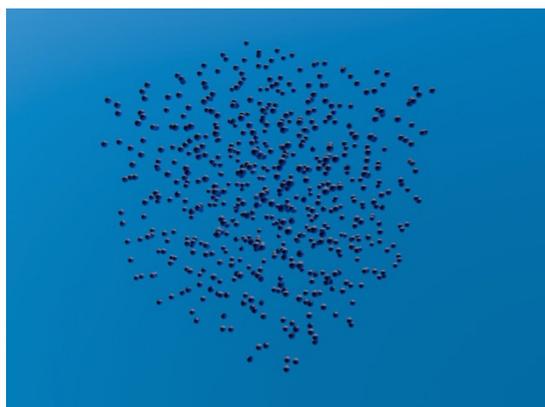
3.2 ポイントクラウドデータ

実写物の 3 次元情報を計算機に読み込むには 3 次元の情報をデータとして取得する必要がある. Kinect で取得したデータを色と深度情報のポイントクラウドデータとして出力することにより, 実写の CGH 作成が行える. 一般的には 3 次元の直交座標系として表現される場合が多いが, 色情報も含んだ 4 次元データとして扱われる場合もある. 本研究では Kinect を用いて実写の 3 次元情報を取得するので, 取得するデータは色情報を含んだ 4 次元のポイントクラウドデータを用いて CGH の計算を行うことになる.

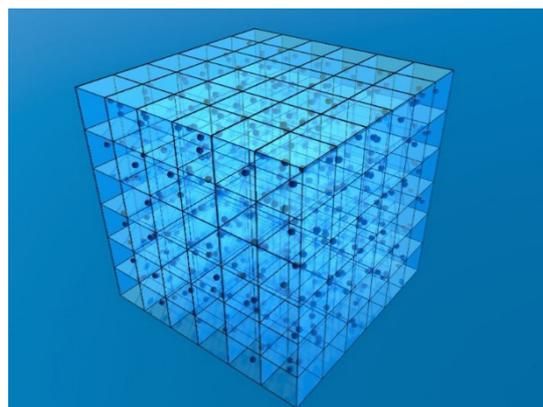
3.3 ダウンサンプリング

ダウンサンプリングとはサンプリングレートを落とすことによりサンプル点を減らす技法のことである. 点数の多いポイントクラウドデータで CGH を作成すると, LCD パネルの表示性能を超えてしまうことがある. 例えば, 100 万点のポイントクラウドモデルから 200 万画素 (1,920 × 1,080) の CGH を作成しても, 高画質な 3 次元像を再生することは難しい. ホログラフィは冗長性の高い記録方式であるため情報量が多く, 過度なデータ量の CGH ができてしまうので, ダウンサンプリングを施す必要がある. Kinect から取得したポイントクラウドデータをダウンサンプリングすることにより, LCD パネルの表示性能を超えない CGH を作成することができる.

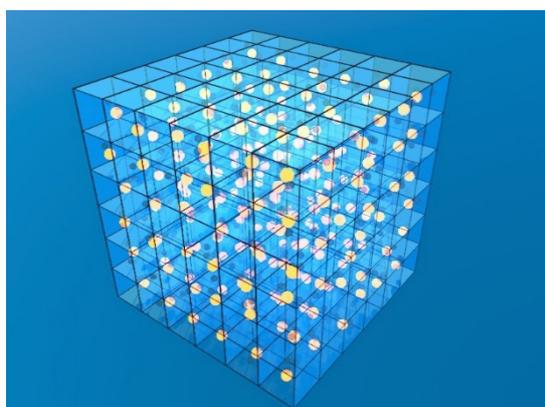
本研究ではダウンサンプリングのアルゴリズムとして VoxelGrid filter[26]を使用した. VoxelGrid filter は, 図 3.4(a)のようなポイントクラウドがあるとすると, そこに図 3.4(b)のように正方形のグリッドを等間隔に設定し, 各グリッドの中にある点を図 3.4(c)のようにそれぞれのグリッドの中の点の座標の総和の平均値を重心として求め, 求めた重心を図 3.4(d)のように新しいポイントクラウドとして扱うことで, ダウンサンプリングを行うアルゴリズムである. 本論文では図 3.4(b)のグリッドを設定する際, 一辺のサイズを ΔL とし, ΔL の立方体のサイズを変えることによってポイントクラウドの削減量を調整した.



(a) ポイントクラウド図



(b) グリッド設定図



(c) 重心によるポイントクラウド図



(d) ダウンサンプル適用図

図 3.4: VoxelGrid filter の概略

3.4 Kinect による撮影

Kinect を用いて人物を撮影し、撮影したポイントクラウドデータを用いて CGH の作成を行った。撮影した状況を図 3.5 に示す。Kinect から 2.5[m]離れた地点に人物がいる状況を撮影した。

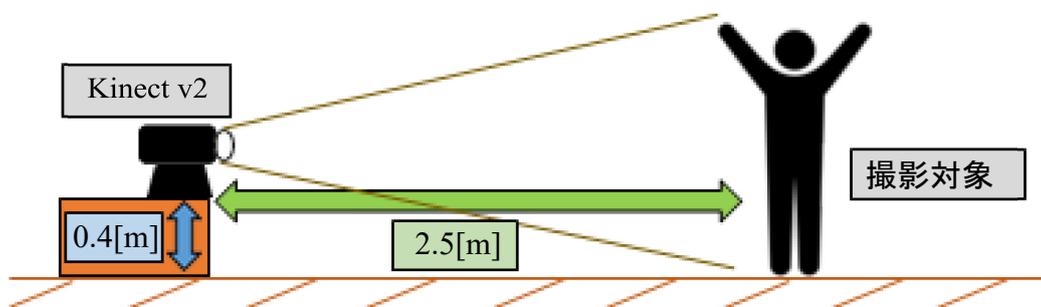


図 3.5: Kinect による撮影状況

この状況を撮影した結果を図 3.6 と図 3.7 に示す. 図 3.6 はカラー画像 (RGB:1,920×1,080), 図 3.7 はそのときの奥行き画像 (D: 512×424) を示している. 図 3.7 は, カメラから近いものは黒, 遠いものは白で表されている. また奥行き情報がない部分は黒で塗りつぶされている. この黒の部分はデータを取得できないため, 実際の計測ではエラー値として除去されている. 図 3.7 は可視化のためにグレースケール (256 階調) で表しているが, 実際には奥行き方向に 16bit (65,536 階調) の解像度を保持している.

図 3.8 は, 撮影したカラー画像とデプス画像を用いて得られたポイントクラウドデータの 3 次元空間上に表示したものをスナップショットした画像となる. 各ポイントは色情報に加えて奥行き情報を含む.



図 3.6: 撮影されたカラー画像



図 3.7: 撮影されたデプス画像



図 3.8: 取得したポイントクラウド画像

取得できるポイントクラウドの解像度は、最大 $512(x) \times 424(y) \times 216(z:16bit)$ となる。奥行きがすべて一定のサイズの場合でも最大 $512(x) \times 424(y)$ となり 217,088 点となる。この解像度に対し、本実験に使用した CGH を表示する LCD の解像度は $1,920 \times 1,080$ ピクセルである。ホログラフィは冗長性の高い記録技術であるため、200 万画素のホログラムに 10 万点を超える物体点データを正しく記録することは困難である。特に高密度領域の空間分解能が低下する恐れがあるため、ダウンサンプリングを行ってポイントクラウドの点数を間引く必要がある。

3.5 取得したポイントクラウドのダウンサンプリングと光学系による再生

ダウンサンプリングする際、フィルタの格子の一辺の長さである空間分解能 ΔL を 10[mm]刻みで増加させ、再構成した画質を検証した。表 3.2 に CGH 計算に利用した開発環境を示す。

表 3.2: CGH 計算の開発環境

OS	Windows 10 Enterprise 64 bit
CPU	Intel Core i7-7700K @4.20 GHz
コア数	4
スレッド数	8
RAM	32[GB]
コンパイラ	Microsoft Visual C++ 2015

ポイントクラウドモデルの場合、CGH の計算時間は物体点数に比例する。表 3.3 と図 3.9 は CGH の直接計算した計算時間と物体点数の比例関係を示す。

表 3.3: 空間分解能 ΔL によるダウンサンプリング対応表

ΔL [mm]	物体点数	CGH 計算時間[s]
オリジナル	153,943	81.67
10.0	118,781	63.00
20.0	64,156	34.10
30.0	38,176	20.37
40.0	25,026	13.71
50.0	17,316	9.51
60.0	12,880	7.05
70.0	9,916	5.42
80.0	7,820	4.32
90.0	6,308	3.50

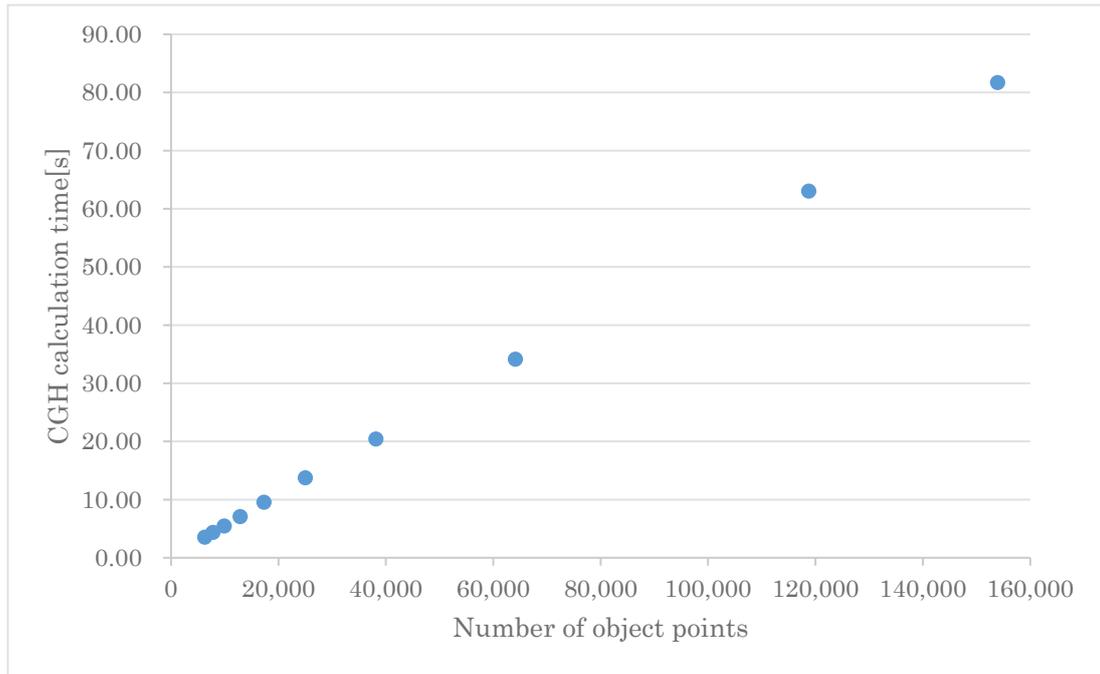


図 3.9: 物体点数に対する CGH の計算時間

ここで Kinect の撮影時，読み取れなかった物体点を外れ値として除去した．そのためダウンサンプリング前のオリジナルのポイントクラウドは，217,088 点 (512×424) ではなく，153,943 点になっている．

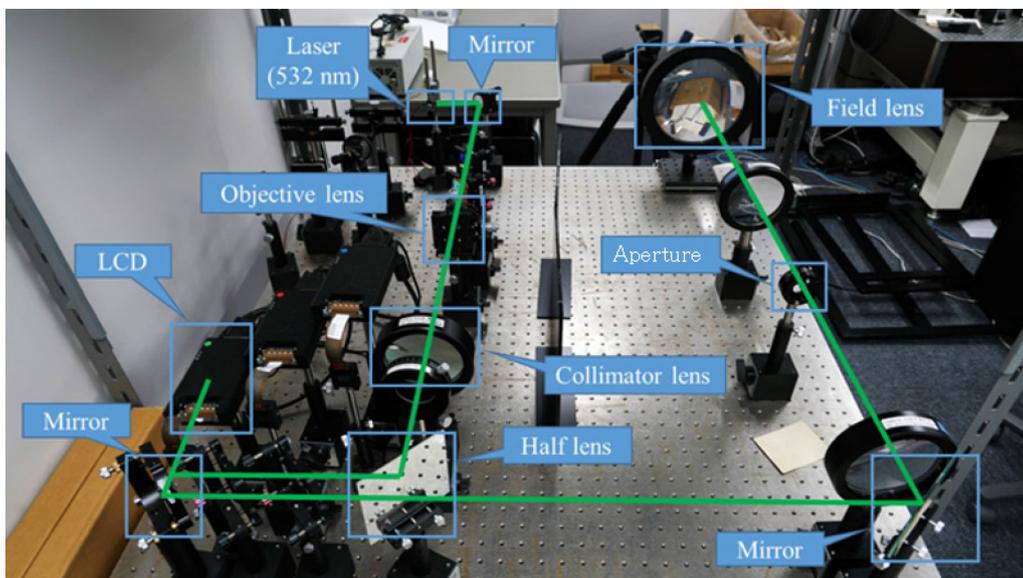


図 3.10: 再生に使用した光学系

図 3.10 に CGH の再生で使用した再生光学系の構成を示す．使用したレーザー光の波長は 532[nm]の緑色光を用いた．対物レンズ (倍率 20 倍) とコリメータレンズ (焦点距離[30.0mm]) を用いて，レーザー光を平行光にした．CGH を表示するディスプレイには，解像度 1,920×1,080

画素, 画素ピッチ 8.0[μm], サイズ 15.36[mm]×8.64[mm]の LCD ディスプレイを使用した. 0 次回折光の除去にはアパーチャを使用し, CGH の再生像をフィールドレンズを通して観察した.

図 3.11-図 3.15 はそれぞれ空間分解能 $\Delta L = 10.0\sim 50.0$ [mm]でダウンサンプリングを施したポイントクラウド画像を示す. オリジナルサイズである図 3.8 と比べて図 3.11-図 3.15 のポイントクラウド画像では, $\Delta L = 20.0$ [mm]から像の粗さが目立ってくる.

図 3.16 に図 3.8 のポイントクラウドで作成した CGH の再生像を示す. また図 3.17-図 3.21 には空間分解能 $\Delta L = 10.0\sim 50.0$ [mm]でダウンサンプリングを施したポイントクラウドで作成した CGH の再生像を示す. 図 3.16-図 3.21 の CGH の再生像では, オリジナルのポイントクラウド画像と比べて ΔL を 2 倍の 40.0[mm]にしても, 再生像の粗さはあまり見られず, 表 3.3 から物体点数と計算時間がオリジナルサイズと比べて 15%程度に削減されていることがわかる. また $\Delta L = 50.0$ [mm]だと, 再生像の粗さが目立ってくる.



図 3.11: 空間分解能 $\Delta L = 10.0$ [mm]のポイントクラウド画像



図 3.12: 空間分解能 $\Delta L = 20.0$ [mm]のポイントクラウド画像

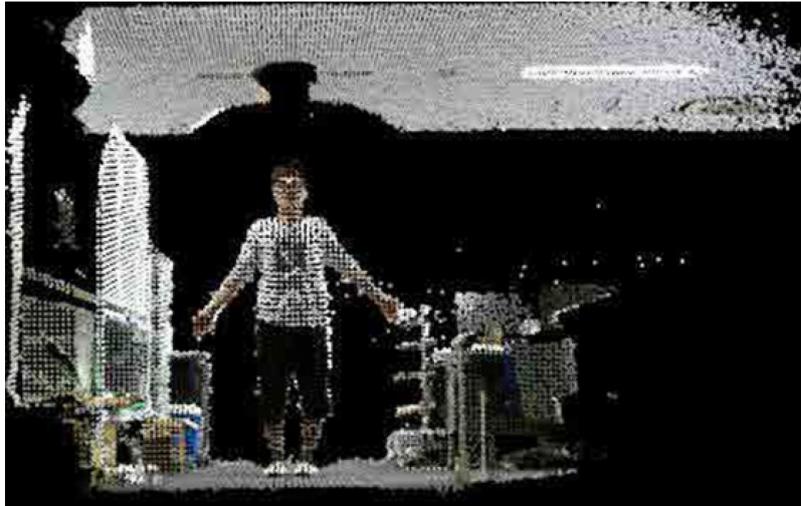


図 3.13: 空間分解能 $\Delta L = 30.0[\text{mm}]$ のポイントクラウド画像

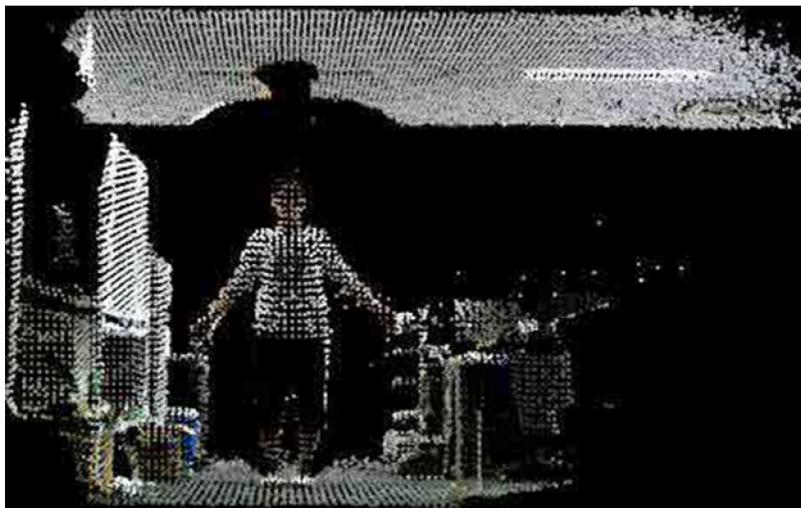


図 3.14: 空間分解能 $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$ のポイントクラウド画像

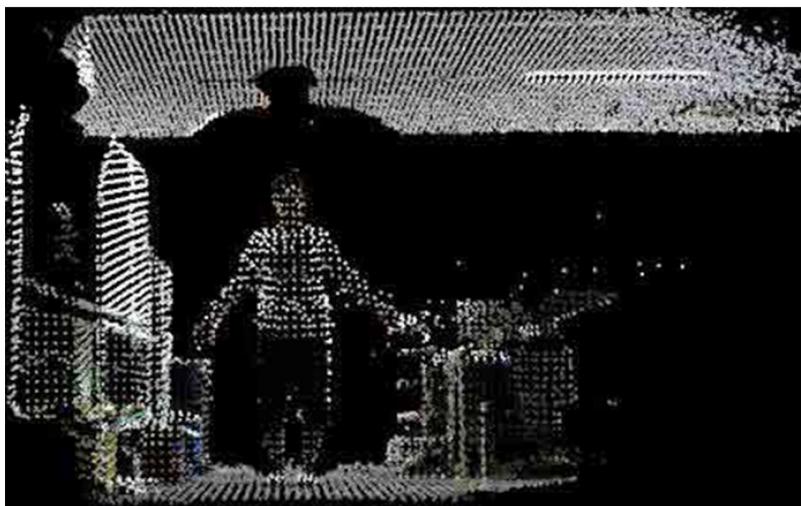


図 3.15: 空間分解能 $\Delta L = 50.0[\text{mm}]$ のポイントクラウド画像



図 3.16: オリジナルサイズの CGH 再生画像



図 3.17: 空間分解能 $\Delta L = 10.0[\text{mm}]$ の CGH 再生画像

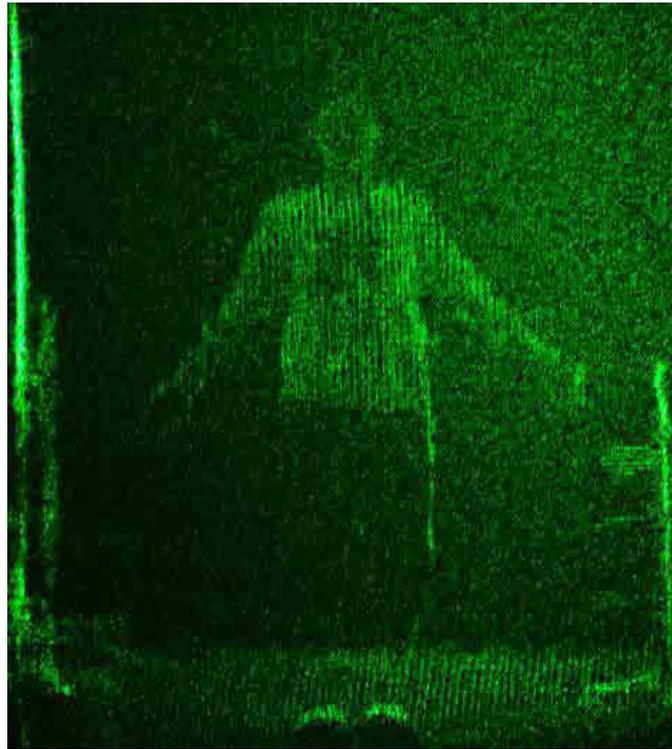


図 3.18: 空間分解能 $\Delta L = 20.0[\text{mm}]$ の CGH 再生画像

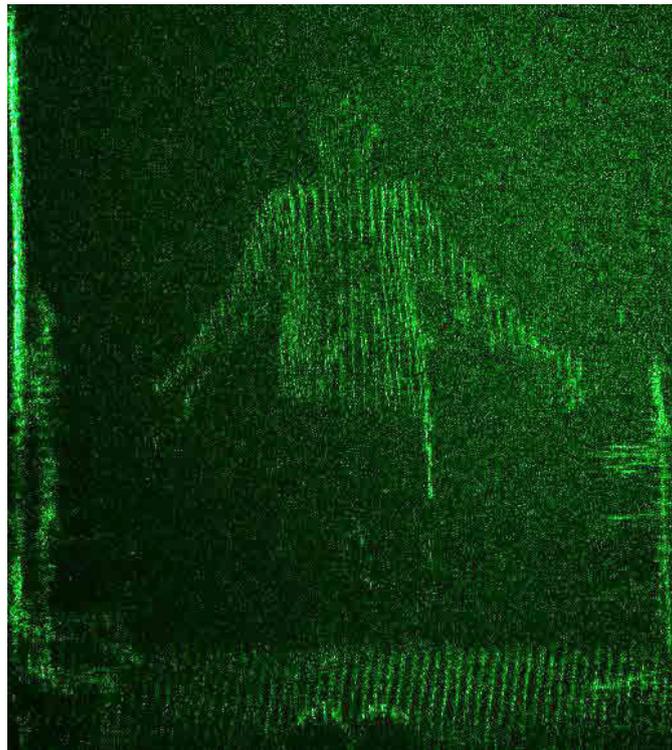


図 3.19: 空間分解能 $\Delta L = 30.0[\text{mm}]$ の CGH 再生画像



図 3.20: 空間分解能 $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$ の CGH 再生画像

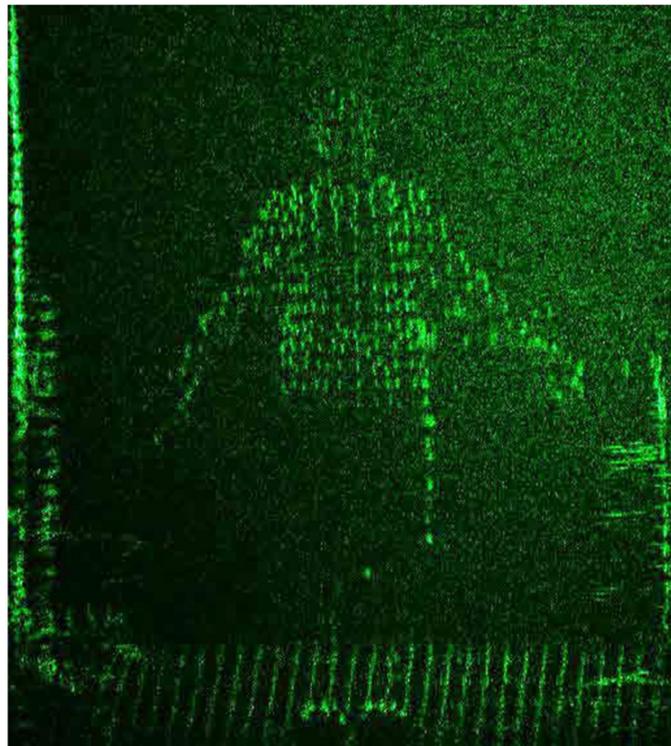


図 3.21: 空間分解能 $\Delta L = 50.0[\text{mm}]$ の CGH 再生画像

3.6 画質の定量評価

画質を定量的に評価するために、CGH の再生シミュレーションを行い、2次元画像の評価指標ではあるが PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) と SSIM (Structural SIMilarity) を算出した。シミュレーションには、オープンソースライブラリである CWO++ライブラリ[27]を使用した。(カッコの書式を他の略語とそろえる)

PSNR は、2つのイメージ間のピーク S/N 比をデシベル単位で計算したものである。この比率は、元の画像との品質測定に使用されており、PSNR が高いほど比較した画像の品質が高いことを表す。式(3.1) に示すように PSNR は平均二乗誤差 MSE (Mean Squared Error) を用いて計算する。 M と N は画像の行と列の値であり R は画像の変動ビット数である。

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= \frac{\sum_{I_1, I_2} \{I_1(m, n) - I_2(m, n)\}^2}{M \times N} \\ \text{PSNR} &= 10 \log_{10} \left(\frac{R^2}{\text{MSE}} \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

MSE や PSNR では画像全体で少しずつ違う画像や局所的に大きく違う画像でもほぼ同じ値として計算してしまう場合がある。人間は画像全体で少しずつ違う画像では違いがあまり感じ取れないが、局所的に大きく違う画像は強い違いを感じる傾向がある。その人間が感じる違いをより正確に指標化するためにできたのが SSIM である。具体的な計算方法は以下の式となる。ここで μ_x, μ_y は平均、 σ_x, σ_y は標準偏差、 σ_{xy} は共分散を表す。 C_1 や C_2 は自由に決めることができるが、8ビット画像の場合 $C_1 = (0.01 \times 255)^2$, $C_2 = (0.03 \times 255)^2$ を用いることが多い。

$$\text{SSIM} = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (3.2)$$

PSNR と SSIM を算出した結果を表 3.4 および図 3.22 に示す。PSNR と SSIM のそれぞれは、 ΔL が 40.0[mm]と 50.0[mm]の間で有意な差を示した。

表 3.4: 空間分解能 ΔL の差による CGH 再生像の定量評価表

ΔL [mm]	PSNR[dB]	SSIM
10.0	31.15	0.7056
20.0	31.69	0.7326
30.0	27.60	0.5657
40.0	28.42	0.6041
50.0	23.82	0.3970
60.0	24.25	0.4138
70.0	22.99	0.3622
80.0	25.26	0.4661
90.0	24.61	0.4343
100.0	24.82	0.4474

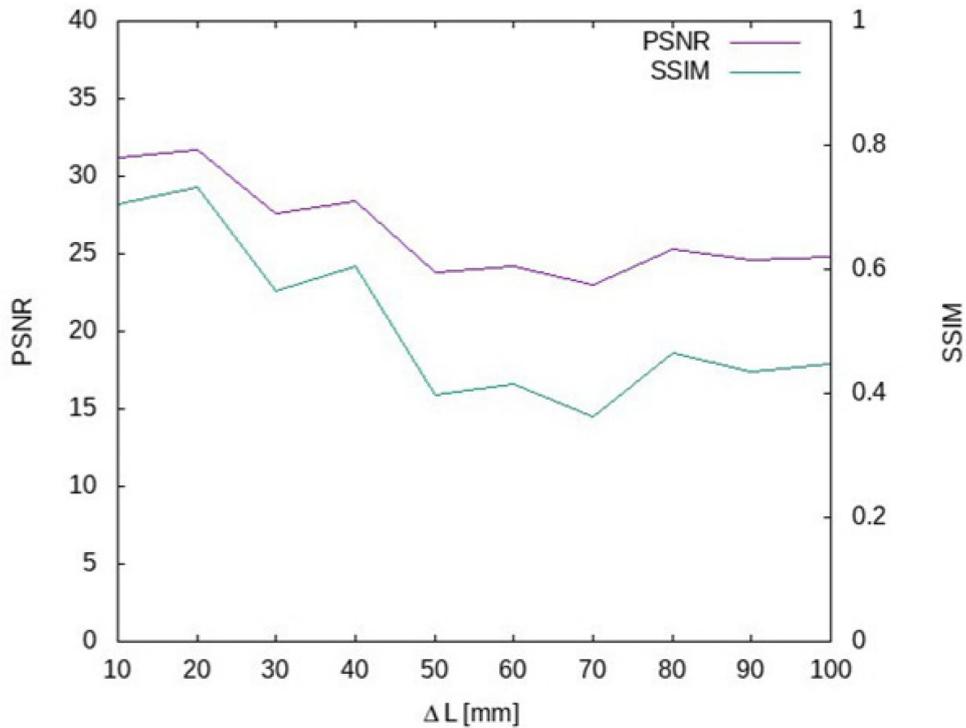


図 3.22: 空間分解能 ΔL の差による CGH 再生像の定量評価グラフ

3.7 実写 CGH の動画化

図 3.20(a)-(d)は、ダウンサンプリングされていない原画，図 3.21(a)-(d)は空間分解能 $\Delta L = 30.0$ [mm]，図 3.22(a)-(d)は空間分解能 $\Delta L = 50.0$ [mm]の CGH 再生動画を撮影したものである． $\Delta L = 30.0$ [mm]の動画は原画とあまり変わらないが， $\Delta L = 50.0$ [mm]の動画では ΔL が大きすぎて疎な状態が目立っていることがわかる．



(a)



(b)



(c)



(d)

図 3.20: ダウンサンプリングされていない CGH の動画の再生像



(a)



(b)

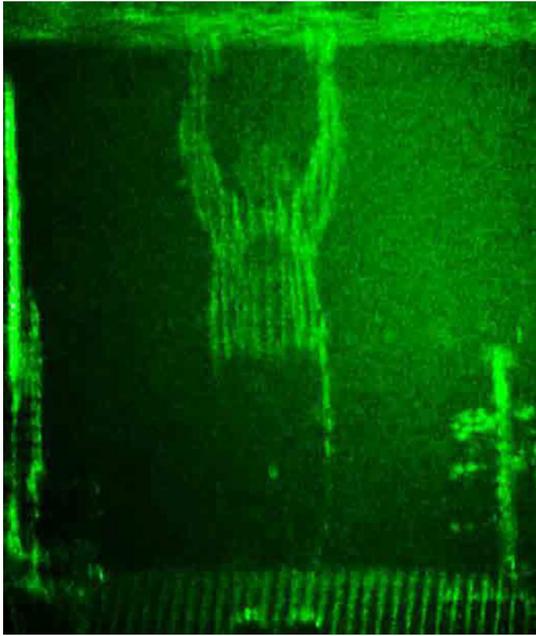


(c)



(d)

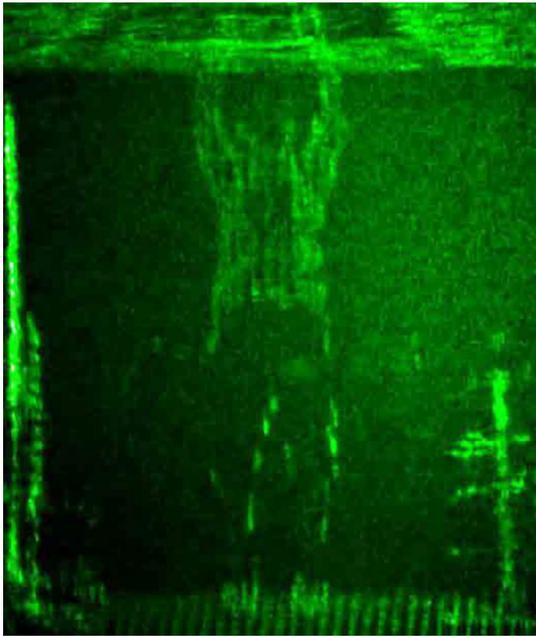
図 3.21: 空間分解能 $\Delta L = 30.0[\text{mm}]$ の CGH 再生動画の再生像



(a)



(b)



(c)



(d)

図 3.22: 空間分解能 $\Delta L = 50.0[\text{mm}]$ の CGH 再生動画の再生像

3.8 考察

ダウンサンプリングを施したポイントクラウドの CGH は、空間分解能 $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$ にしても CGH 再生像は PNSR の値が 30[dB] 近い値になっていることが確認され、品質が保たれていることが判明した。計算時間は CGH 1 枚あたり 14 秒に短縮され、動画化でも同様な結果になることが確認できた。このことからダウンサンプリング技法は実写の CGH 作成に有用であることが判明した。今回の撮影環境だとダウンサンプリングの空間分解能 $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$ のときに有用であったが、他の撮影環境だと有用な空間分解能のサイズは変動すると考えられる。理由として今回ダウンサンプリングに用いたアルゴリズムの VoxelGrid filter は等間隔に立方体の格子を並べているため、局所的に密なポイントクラウドだと著しく品質が落ちると考えられる。ゆえに等間隔の立方体のフィルタではなく、局所的に密な部分に適したサイズに動的に変化するようなフィルタを実装できれば、効率の良い高品質の実写の CGH 作成が可能になると考えられる。また今回使用した RGB-D カメラは約 20 万点のポイントクラウドデータしか収集できない仕様となっているため、例えば 100 万点を超えるような大規模で高密度なポイントクラウドに対して、今回のダウンサンプリング手法を適用すれば、より有効な結果が望める可能性があると考えられる。

第4章 最適化計算を用いたデジタルホログラフィに関する研究

デジタルホログラフィは撮像素子を用いて3次元情報をホログラムとして記録し、コンピュータ上で可視化する技術である。計算によって撮影対象の振幅と位相を得ることが可能である。しかし、現在の撮像素子は解像度が十分ではなく、より高精細な再生像を得るために、平面波によるインラインホログラフィを用いることが多い。ただし、インラインホログラフィは所望の3次元情報に不要な光情報が重なるという難点がある。また、平面波を作るためにはコリメータレンズ等を必要とするなど、光学系が大がかりになる。そこで、平面波よりも光学系を簡素化できる球面波参照光を用いたインラインデジタルホログラフィに最適化計算を適用したシステムを提案する。この章ではホログラムの定式化と直接推定手法について述べ、数値実験による画質の評価について述べ、計算速度の評価、考察を述べる。

4.1 ホログラムの定式化と直接推定手法

撮像素子から得られたホログラム \mathbf{H} 、ホログラム面での物体光 \mathbf{O} 及び参照光 \mathbf{R} を式(4.1)-(4.3)のように表す。 \mathbf{H} は実数を要素とするベクトルであり、 \mathbf{O} と \mathbf{R} は複素数を要素とするベクトルである。

$$\mathbf{H} = [H_1, H_2, \dots, H_N]^t \quad (4.1)$$

$$\mathbf{O} = [O_1, O_2, \dots, O_N]^t \quad (4.2)$$

$$\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots, R_N]^t \quad (4.3)$$

ホログラム \mathbf{H} は \mathbf{O} と \mathbf{R} の重ね合わせ強度であり、次式で求められる。

$$\mathbf{H} = |\mathbf{O} + \mathbf{R}|^2 = |\mathbf{O}|^2 + |\mathbf{R}|^2 + \mathbf{O}\mathbf{R}^* + \mathbf{O}^*\mathbf{R} \quad (4.4)$$

ここで*は複素共役を表す。

p 番目の要素を $O_p = A_{op} \exp(i\phi_{op})$, $R_p = A_{rp} \exp(i\phi_{rp})$ として成分で表記すると次式のとおりである。

$$H_p = |A_{op}|^2 + |A_{rp}|^2 \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} &+ A_{op} \exp(i\phi_{op}) A_{rp} \exp(-i\phi_{rp}) \\ &+ A_{op} \exp(-i\phi_{op}) A_{rp} \exp(i\phi_{rp}) \\ &= |A_{op}|^2 + |A_{rp}|^2 + 2A_{op}A_{rp} \cos(\phi_{op} - \phi_{rp}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

H および R を既知の値として式(4.7)で目的関数 $f(\mathbf{O})$ を定義し、 $f(\mathbf{O})$ を最小化する \mathbf{O} を求める。

$$f(\mathbf{O}) = \frac{1}{2} \sum_p \left| H_p - (|O_p|^2 + |R_p|^2 + O_p R_p^* + O_p^* R_p) \right|^2 + \alpha P(\mathbf{O}) \quad (4.7)$$

式(4.7)の第1項は誤差を表す誤差関数である。第2項は平滑化制約条件で、光が伝搬する過程で物体のエッジはぼやけるので、物体光 \mathbf{O} において局所的に値に大きな差が生じた場合にペナルティを課す。 α は重みであり、正の値をとる。つまり、式(4.7)は推定物体光が光学系を経たときに実測したホログラムになるべく近くなり、また、ホログラム面上の物体光が滑らかになるような推定を行う。

式(4.7)を、式(4.8)に示した最急降下法に適用する。 \otimes は畳み込み演算子で式(4.7)の平滑化制約をフィルタ \mathbf{G} で行う。 t は更新量を決める重みパラメータであり、 $\zeta(\mathbf{O})$ は式(4.7)第1項目の誤差関数である。 $\zeta(\mathbf{O})$ の勾配を加減算していくことで物体光 \mathbf{O} の極小値となる最適解を求める。 k は更新回数である。

$$\mathbf{O}^{(k+1)} = \mathbf{G} \otimes \{ \mathbf{O}^{(k)} - t \nabla \zeta(\mathbf{O}^{(k)}) \} \quad (4.8)$$

ここで、ある画素1点についての誤差関数に注目すると式(4.9)になる。

$$\begin{aligned} \zeta_p(O_p) &= \frac{1}{2} \left| H_p - (|O_p|^2 + |R_p|^2 + O_p R_p^* + O_p^* R_p) \right|^2 \\ &= \frac{1}{2} \left| H_p - |O_p + R_p|^2 \right|^2 \quad (\geq 0) \end{aligned} \quad (4.9)$$

式(4.9)が最小値0になるとき、

$$|O_p + R_p|^2 = H_p \quad (4.10)$$

であり、 O_p の最適解は中心 $(-R_p)$ 、半径 $\sqrt{H_p}$ の複素平面上的円周上にあることがわかる。これは、初期値を設定すると、そこから最も近い円周上の点に収束することを示唆している。

考察として、目的関数のグラフ化したものを図4.1に示す。グラフ化する際に目的関数そのままであると変数が多く、上手くグラフ化できないので1ピクセルの誤差にのみ注目してグラフ化を行った。全体像として中央が膨らんだ椀状になっていることがわかる。

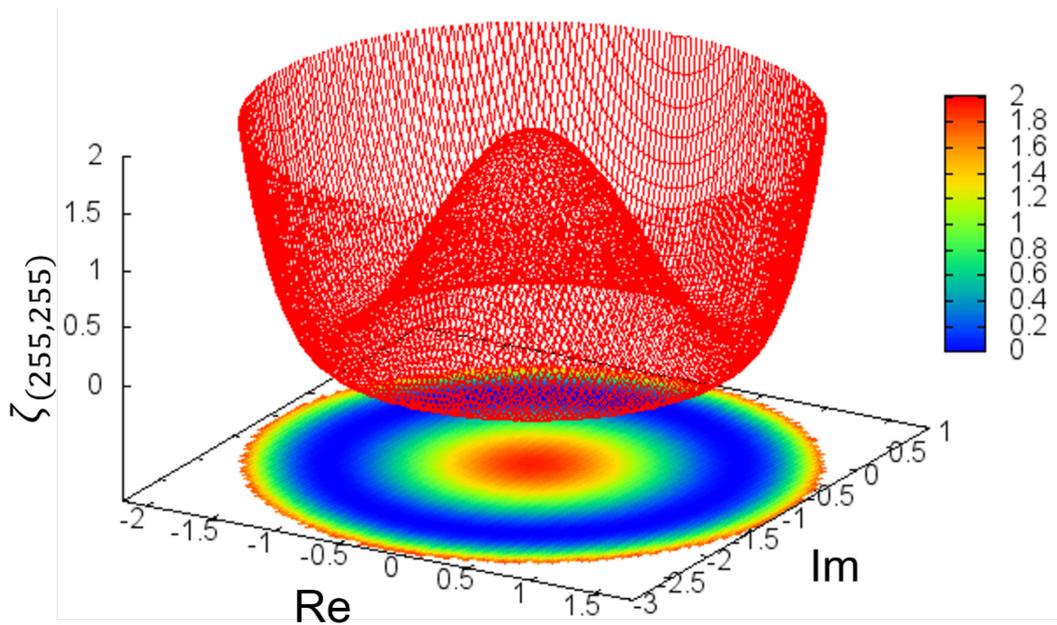


図 4.1: 目的関数のグラフ化

この画像を 2 次元表示したものを図 4.2 に示す. 最小値は 0 であるため最適解は円状に存在することが確認できる. よって図 4.2 から, ある初期位置を定めると, 初期位置と円の中心を結ぶ直線と円の交点に収束することがわかる.

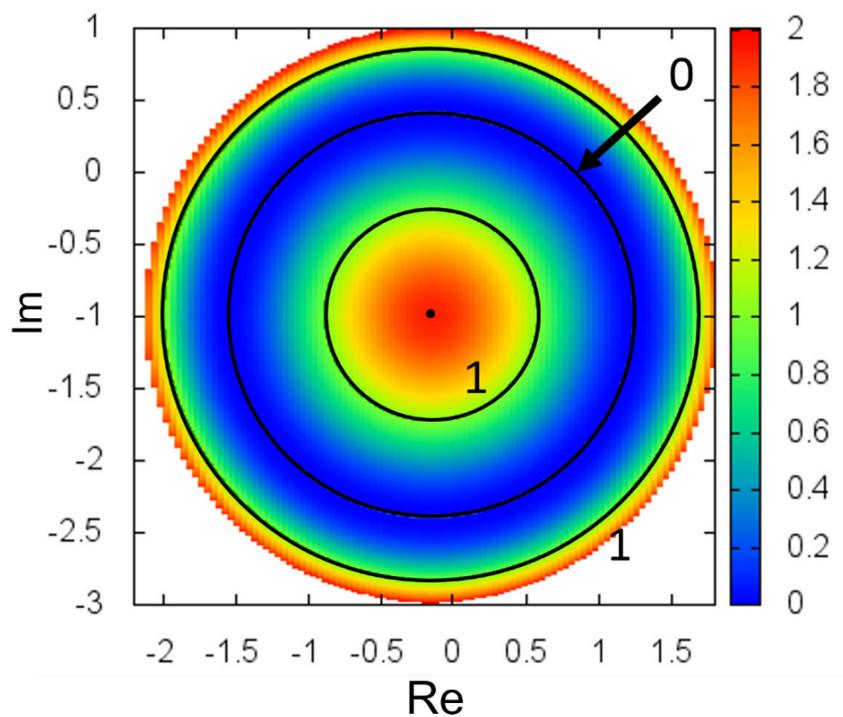


図 4.2: 目的関数の 2 次元表示

今回の研究では初期値を原点に設定したので、図 4.3 に示すように、中心 $-R_p$ と原点を結ぶ半直線と円が交わる点になる。複素平面で R_p をベクトルとして扱くと収束位置は $O_p^\infty = \sqrt{H_p} \frac{R_p}{|R_p|} - R_p$ となる。

ここで H_p と R_p は既知なので、 O_p^∞ は反復計算を行わずに1回の計算で求められることになる。このように直接推定する本手法（直接推定法）は最急降下法で反復計算を行った場合と同様な結果が得られることが期待される。

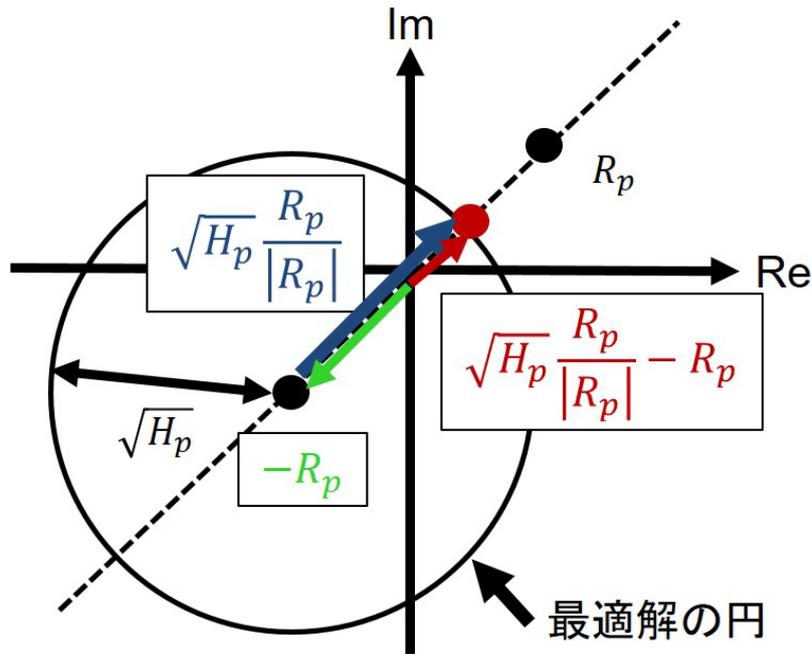


図 4.3: 収束位置の算出方法

4.2 数値実験による画質の評価

直接推定法は参考文献[13]をもとに考察を進めて得られた結果である。したがって、オフアキシスホログラムでも適用可能であるが、本論文では球面参照波インラインホログラムに適用した結果を示す。

数値実験のパラメータ設定は図 4.4 のとおりである。また、光波の伝搬には CWO++ライブラリ[27] の角スペクトル法を用いた。

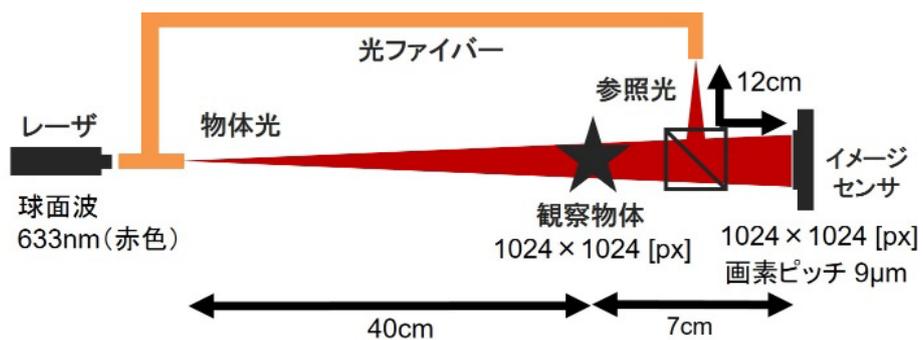


図 4.4: 数値実験の設定

2 種類の物体について数値実験を行った。観察物体 1 は、振幅情報として図 4.5(a) ，位相情報として図 4.5(b) を用いた。



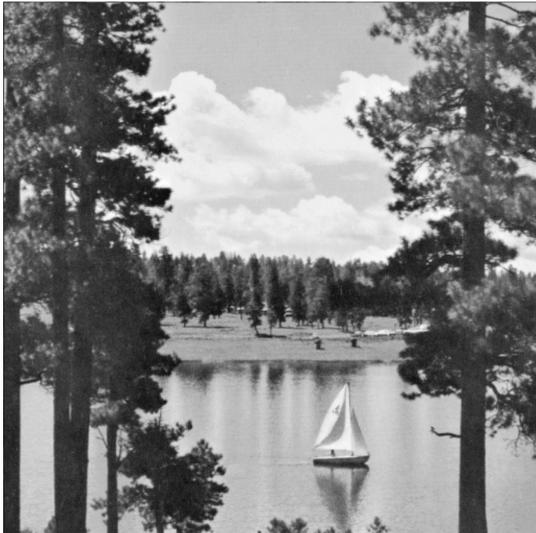
(a) 振幅情報



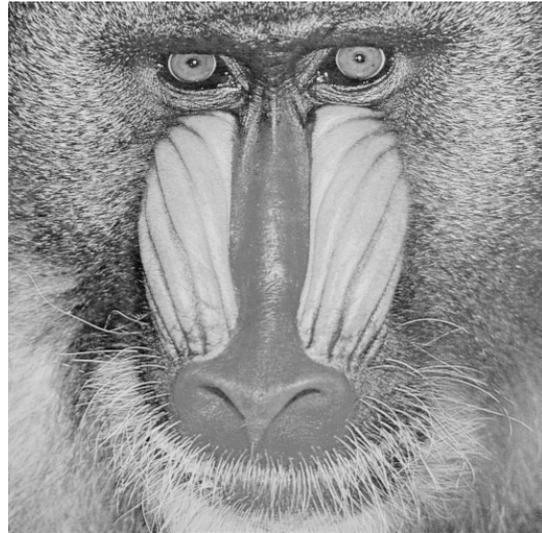
(b) 位相情報

図 4.5: 観察物体 1

観察物体 2 は、振幅情報として図 4.6(a) ，位相情報として図 4.6(b)を用いた。



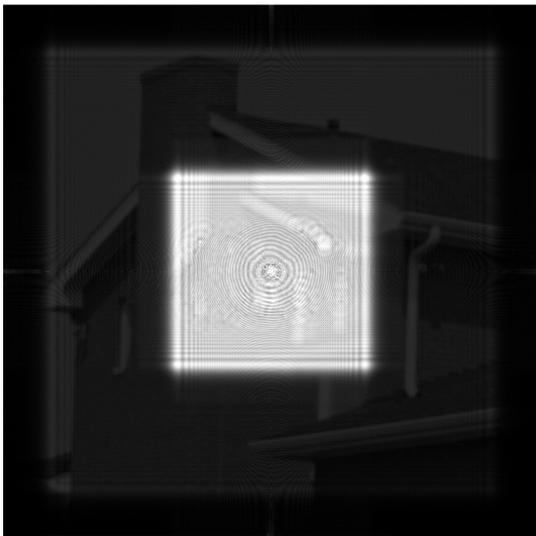
(a) 振幅情報



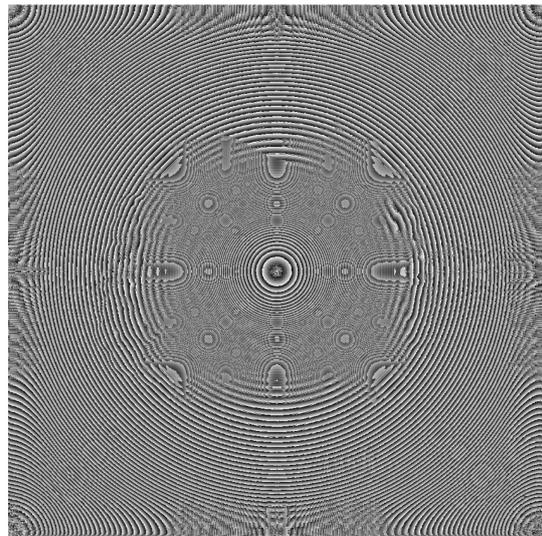
(b) 位相情報

図 4.6: 観察物体 2

図 4.5(a)(b)からホログラムを生成し、そのホログラムから光波の伝搬計算によって再生したものが図 4.7(a)(b)となる。



(a) 振幅情報



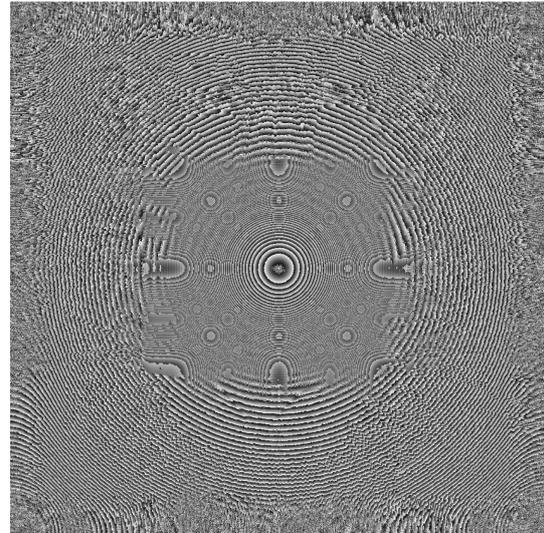
(b) 位相情報

図 4.7: 光波逆伝搬のみの再生像 1

図 4.6(a)(b)からホログラムを生成し、そのホログラムから光波の伝搬計算によって再生したものが図 4.8(a)(b)である。どちらも振幅情報は薄く再現されているが、不要光によって著しく劣化している。位相情報については何もわからない状況である。



(a) 振幅情報



(b) 位相情報

図 4.7: 光波逆伝搬のみの再生像 2

図 4.9(a)(b)及び図 4.10(a)(b)は、それぞれのホログラムに式(4.8)の最急降下法を 50 回反復計算し、再生した結果である。図 4.7(a)(b), 図 4.8(a)(b)に比べて、どちらも振幅情報, 位相情報とも大幅に改善している。



(a) 振幅情報

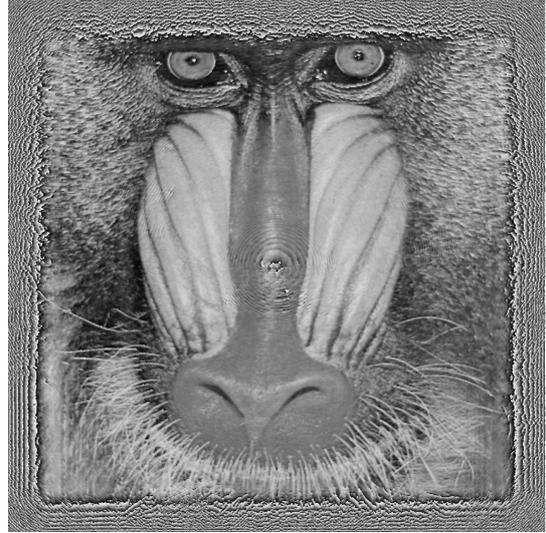


(b) 位相情報

図 4.9: 最急降下法による再生像 1 (50 ループ)



(a) 振幅情報



(b) 位相情報

図 4.10: 最急降下法による再生像 2 (50 ループ)

図 4.11(a)(b)及び図 4.12(a)(b)は、反復計算を行わない直接推定法によるホログラムから得られた再生像である。どちらも図 4.9(a)(b)及び図 4.10(a)(b)と同様な結果となっていることがわかる。



(a) 振幅情報

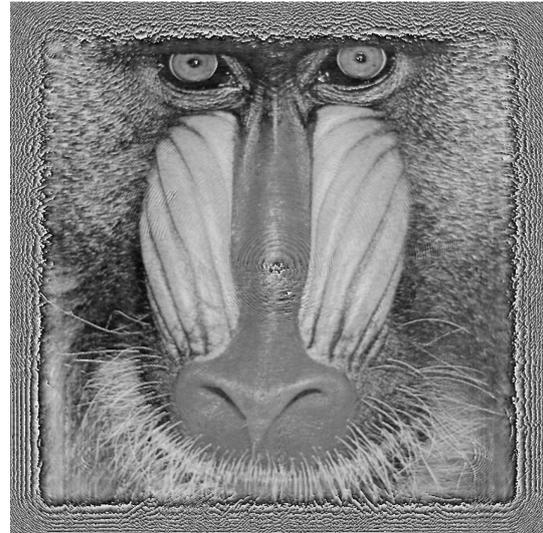


(b) 位相情報

図 4.11: 直接推定法による再生像 1 (1 ループ)



(a) 振幅情報



(b) 位相情報

図 4.12: 直接推定法による再生像 2 (1 ループ)

3次元画像の定量的な評価指標が定まっていないので、PSNRを計算したところ、表4.1及び表4.2のような結果になった。

表 4.1: 観察物体 1 の定量評価 (PSNR)

	図 4.7 光波逆伝搬のみ	図 4.9 最急降下法 (50 ループ)	図 4.11 直接推定法 (1 ループ)
(a)振幅情報	6.7 [dB]	14.7 [dB]	15.6 [dB]
(b)位相情報	8.7 [dB]	24.7 [dB]	24.7 [dB]

表 4.2: 観察物体 2 定量評価 (PSNR)

	図 4.8 光波逆伝搬のみ	図 4.10 最急降下法 (50 ループ)	図 4.12 直接推定法 (1 ループ)
(a)振幅情報	6.7 [dB]	11.7 [dB]	12.1 [dB]
(b)位相情報	9.5 [dB]	25.7 [dB]	25.7 [dB]

表 4.1 及び表 4.2 を見ると、画質改善手法を行った再生像について、特に振幅情報の画像（図 4.9(a), 図 4.10(a), 図 4.11(a), 図 4.12(a)）で見た目以上に低い数値となっている。この原因の一つは、周囲に復元できない枠のようなエリアが残っていることにある。これは、図 4.13 に示すように観察対象を通過した球面波が広がって伝搬することにより、すべての物体情報が撮像素子に到達しないためだと考えられる。その影響は端で顕著である。

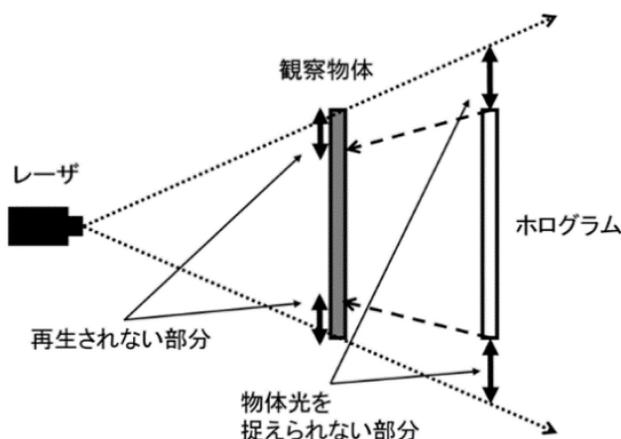


図 4.13: 球面波による撮像問題

4.3 計算速度の評価

本節では、画質改善でよく用いられている GS 法も含めた計算時間の評価を行った。計算には、CPU : Intel Core i5-4670 3.40GHz, 8GB メモリの PC を用いた。計算した観察対象は図 4.5 の観察物体 1 である。

結果は表 4.3 のとおりである。ループ回数はそれぞれの手法で最高画質となったところ（画質改善が進まなくなったところ）とした。なお、GS 法の画質も図 4.7 及び図 4.9 と同程度であった。

表 4.3: 計算時間の比較

手法	ループ回数	計算時間[s]	高速化率
GS 法	200	35.9	1
最急降下法	50	4.6	7.8
直接推定法	1	0.7	51

表 4.3 から、GS 法を用いた場合に比べて、最急降下法は 8 倍程度、直接推定法は 50 倍程度高速であることが確認された。

4.4 考察

球面波を用いたインライン型のデジタルホログラフィに最急降下法である最適化手法を適用することは有力であることが明らかになった。また，最急降下法の変数を固定値にし，反復計算を必要としない直接推定法を提案し，再生像を確認したところ画質の向上及び計算速度の向上に対する有効性を確認した。数値実験で定量評価を行ったところ，代表的な画質回復手法である GS 法に比べて，50 倍の速さで同程度の画質を得ることができることを確認した。しかし振幅情報の再生像の PSNR の値を見てみると最良とは言い切れない値となった。これは前節で説明したように球面波の伝播問題があるためだと考えられる。そこで図 4.14 に示すように，観察物体の撮影範囲を限定してやればある程度軽減できると考えられる。記録するホログラムのサイズ X に対し観察物体の撮影範囲を $X' = \frac{z_{lo}}{z_{lo} + z_{oh}} X$ に限定して撮影を行えば PSNR の値が良好な再生像が得られると考えられる。

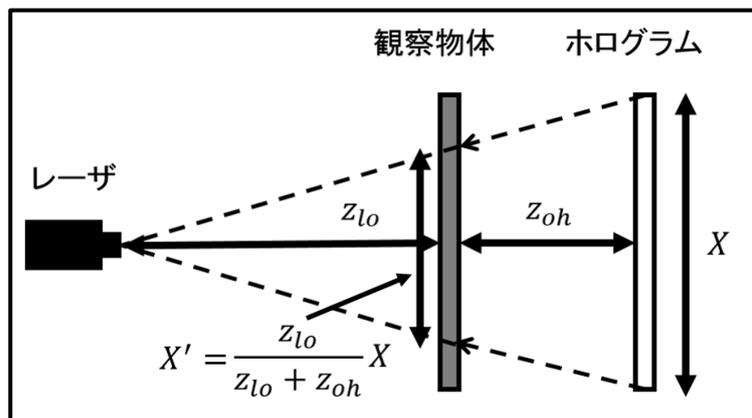


図 4.14: 撮影範囲を限定した撮影方法

第5章 おわりに

本論文では、コンピュータホログラフィの実用化に向けた研究として、RGB-D カメラによる実写の電子ホログラフィシステム及び最適化計算を用いたデジタルホログラフィの2つの研究を行った。

1つ目の研究では、RGB-D カメラを用いて取得した実写のポイントクラウドデータをダウンサンプリングすることで、CGHの再生像の画質改善を行った。ダウンサンプリングする前のポイントクラウドから空間分解能 $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$ に粗くすることで、物体点数を15%に減らしても、良好な画質のCGH再生像が得られた。計算時間はCGH 1枚あたり14秒に短縮された。動画化でも同様な結果になることが確認できた。また空間分解能 $\Delta L = 40.0[\text{mm}]$ にしても PNSR の値が 30[dB] 近い値になっていることも確認された。今回使用した RGB-D カメラは約 20 万点のポイントクラウドデータしか収集できない仕様となっているため、例えば 100 万点を超えるような大規模で高密度なポイントクラウドに対して、今回のダウンサンプリング手法を適用すれば、より有効な結果が望める可能性がある。

2つ目の研究では、球面波を用いたインライン型のデジタルホログラフィに最適化手法を適用することは有力であることが明らかになった。また、反復計算を必要としない直接推定法を提案し、画質の向上及び計算速度の向上に対する有効性を確認した。数値実験で定量評価を行ったところ、代表的な画質回復手法である GS 法に比べて、50 倍の速さで同程度の画質を得た。

5.1 今後の展望

1つ目の研究の展望としては、次のような事項が考えられる。ポイントクラウドモデルのCGH計算はGPU (Graphics Processing Unit) を用いることで約100倍に高速化できることが報告されている[28]。本研究では、GPUを用いることによりリアルタイムで動画のCGHを再生することができると考えられる。また、カラーの電子ホログラフィはRGB各色のCGH生成が必要となり、単色のCGH計算に比べて3倍の時間がかかる問題があるが、ダウンサンプリングによって物体の点数を減らすことでリアルタイムでのカラーの電子ホログラフィ再生が可能になると考えられる。今回は単純に空間上で同じサイズのボクセルのフィルタを用いたが、ポイントクラウドの密度が高い部分や、輝度値が高い部分などで場合分けを行うようにフィルタサイズの変更方法を考える必要があると考えられる。

2つ目の研究の展望は、次のような事項が考えられる。再生像をよく見ると中央部に不要光が重畳している。これは、球面波が中心軸近傍では平面波に近似される影響で、平面波参照光のインラインホログラムの問題点が表れていると考えられる。また球面波のため、図4.13に示すように、ホログラムの端まできれいに撮像できない問題がある。これらの改善が今後の課題である。端の影響は本質的ではない場合が多いが、画像中央部の影響は取り除く必要があると考えられる。

参考文献

- [1] D. Gabor “A new microscope principle”, *Nature* 161, 777–778 (1948).
- [2] 伊藤智義, 下馬場朋祿, “ホログラフィ入門—コンピュータを利用した3次元映像・3次元計測—”, 講談社 (2017).
- [3] T. Shimobaba and T. Ito, “Computer Holography - Acceleration Algorithms and Hardware Implementations,” CRC press (2019).
- [4] P. St-Hilaire, S. A. Benton, M. E. Lucente, J. K. Mary Lou Jepsen, H. Yoshikawa, and J. S. Underkoffler, “Electronic display system for computational holography,” *Proc. SPIE* 1212, 174–182 (1990).
- [5] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, “Digital Image Formation from Electronically Detected Holograms,” *Appl. Phys. Lett.* 11, 77–79 (1967)
- [6] G. Lippmann, “Epreuves reversibles photographies integrals,” *Comptes-Rendus Acad. des Sci.* 146, 446–451 (1908).
- [7] J. Arai, M. Kawakita, T. Yamashita, H. Sasaki, M. Miura, H. Hiura, M. Okui, and F. Okano, “Integral three-dimensional television with video system using pixel-offset method,” *Opt. Express* 21, 3474–3485 (2013).
- [8] Y. Ohsawa, K. Yamaguchi, T. Ichikawa, and Y. Sakamoto, “Computer-generated holograms using multiview images captured by a small number of sparsely arranged cameras,” *Appl. Opt.* 52, A167–A176 (2013).
- [9] H. Sato, T. Kakue, Y. Ichihashi, Y. Endo, K. Wakunami, R. Oi, K. Yamamoto, H. Nakayama, T. Shimobaba, and T. Ito, “Real-time colour hologram generation based on ray-sampling plane with multi-gpu acceleration,” *Sci. Rep.* 8, 1500 (2018).
- [10] D. Hiyama, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, “Acceleration of color computer-generated hologram from rgb-d images using color space conversion,” *Opt. Commun.* 340, 121–125 (2015).
- [11] I. Yamaguchi, and T. Zhang, “Phase-shifting Digital Holography,” *Opt. Lett.* 22, 1268–1270 (1997).
- [12] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, “A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures,” *Optik* 35, 237–246 (1972).
- [13] K. Khare, P. T. S. Ali, and J. Joseph: “Single Shot High Resolution Digital Holography”, *Opt. Express.* 21, 2581–2591 (2013).
- [14] 久保田敏弘, “ホログラフィ入門,” 朝倉書店 (2010).
- [15] E. N. Leith and J. Upatnickes, “Reconstructed wavefronts and communication theory,” *J. Opt. Soc. Am.* 52, 1123–1130 (1962).
- [16] Y. N. Denisyuk, “Photographic reconstruction of the optical properties of an object in its own scattered radiation field,” *Soviet Physics Doklady.* 7, 543–545 (1962).
- [17] 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).
- [18] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Company (2004).
- [19] 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).
- [20] Y. Ogihara and Y. Sakamoto, “Fast calculation method of a cgh for a patch model using a point-based method,” *Appl. Opt.* 54, A76–A83 (2015).
- [21] T. Sugie, T. Akamatsu, T. Nishitsuji, R. Hirayama, N. Masuda, H. Nakayama, Y. Ichihashi, A. Shiraki, M. Oikawa, N. Takada, Y. Endo, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, “High-performance parallel computing for next-generation holographic imaging,” *Nat. Electron.* 1, 254–259 (2018).
- [22] K. Matsushima, “Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture,” *Appl. Opt.* 44, 4607–4614 (2005).
- [23] H. Yoshikawa, “Fast Computation of Fresnel Holograms Employing Difference,” *Opt. Rev.* 8, 331–335 (2001).
- [24] 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).
- [25] Kinect - Windows アプリの開発 – Microsoft Developer, <https://developer.microsoft.com/ja-jp/windows/kinect/> (閲覧日:2022年2月20日).
- [26] VoxelGrid filter - Documentation - Point Cloud Library (PCL), https://pointclouds.org/documentation/tutorials/voxel_grid.html (閲覧日:2022年2月20日).
- [27] 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).

- [28] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie, “Computer generated holography using a graphics processing unit,” *Opt. Express* 14, 603–608 (2006).

謝辞

本研究にて、様々なご指導をしてくださり、社会人博士課程、単位取得退学と紆余曲折な進路にもかかわらず研究環境の提供やアドバイス、指導をしていただいた千葉大学大学院 工学研究院、伊藤智義教授に深く感謝申し上げます。

また研究の際こちらの不手際で迷惑をかけてしまったお詫びとともにご指摘、指導してくださった同工学研究院、下馬場朋禄教授に深く感謝申し上げます。

学生の立場に近いところから指導アドバイスをしてくださった同工学研究院、角江崇助教に深く感謝申し上げます。

進学途中、社会人博士課程の身で雇用していただいた国立天文台小久保英一郎教授に深く感謝申し上げます。

また様々な助言や指導、そして素晴らしき研究室生活を提供してくださった本研究室の皆様に深く感謝申し上げます。

最後にここまでの長い進学を許していただいた家族に感謝いたします。

本当にありがとうございました。

業績リスト

査読付き論文（筆頭）

1. Satoki Hasegawa, Hidenari Yanagihara, Yota Yamamoto, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, and Tomoyoshi Ito, “Electroholography of real scene by RGB-D camera and downsampling method,” *OSA Continuum*, Vol. 2, Issue 5, pp. 1629-1638 (2019).
2. 長谷川 鋭, 下馬場 朋禄, 角江 崇, 伊藤 智義, “最適化計算を用いた球面波インラインデジタルホログラフィ,” *画像電子学会誌*, 第 50 巻, 4 号, pp. 580-583 (2021).

査読付き論文（共著）

1. Tomoyoshi Shimobaba, Yutaka Endo, Takashi Nishitsuji, Takayuki Takahashi, Yuki Nagahama, Satoki Hasegawa, Marie Sano, Ryuji Hirayama, Takashi Kakue, Atsushi Shiraki, and Tomoyoshi Ito, “Computational ghost imaging using deep learning,” *Optics Communications* 413, 147-151 (2018).
2. Tomoyoshi Shimobaba, Kyoji Matsushima, Takayuki Takahashi, Yuki Nagahama, Satoki Hasegawa, Marie Sano, Ryuji Hirayama, Takashi Kakue, and Tomoyoshi Ito, “Fast, large-scale hologram calculation in wavelet domain,” *Optics Communications* 412, 80-84 (2018).
3. Tomoyoshi Shimobaba, Naoki Kuwata, Mizuha Honma, Takayuki Takahashi, Yuki Nagahama, Marie Sano, Satoki Hasegawa, Ryuji Hirayama, Takashi Kakue, Atsushi Shiraki, Naoki Takada, and Tomoyoshi Ito, “Convolutional neural network-based data page classification for holographic memory,” *Applied Optics* 56, 7327-7330 (2017).
4. Tomoyoshi Shimobaba, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama, Yuki Nagahama, Satoki Hasegawa, Marie Sano, Takayuki Takahashi, Takashi Kakue, Minoru Oikawa, and Tomoyoshi Ito, “Holographic micro-information hiding,” *Applied Optics* 56, 833-837 (2017).
5. Tomoyoshi Shimobaba, Michal Makowski, Yuki Nagahama, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama, Satoki Hasegawa, Marie Sano, Takashi Kakue, Minoru Oikawa, Takashige Sugie, Naoki Takada, and Tomoyoshi Ito, “Color computer-generated hologram generation using the random phase-free method and color space conversion,” *Applied Optics* 55, 4159-4165 (2016).
6. Takuho Sanpei, Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama, Satoki Hasegawa, Yuki Nagahama, Marie Sano, Minoru Oikawa, Takashige Sugie, and Tomoyoshi Ito, “Optical encryption for large-sized images,” *Optics Communications* 361, 138-145 (2016).
7. Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama, Satoki Hasegawa, Yuki Nagahama, Marie Sano, Minoru Oikawa, Takashige Sugie, and Tomoyoshi Ito, “Improvement of the image quality of random phase-free holography using an iterative method,” *Optics Communications* 355, 596-601 (2015).
8. Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama,

Satoki Hasegawa, Yuki Nagahama, Marie Sano, Minoru Oikawa, Takashige Sugie, and Tomoyoshi Ito, “Random phase-free kinoform for large objects,” *Optics Express*, 23, 17269-17274 (2015).

9. Tomoyoshi Shimobaba, Michal Makowski, Takashi Kakue, Naohisa Okada, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama, Satoki Hasegawa, Yuki Nagahama, and Tomoyoshi Ito, “Numerical investigation of lensless zoomable holographic projection to multiple tilted planes,” *Optics Communications* 333, 274-280 (2014).

国際会議（筆頭）

1. Satoki Hasegawa, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, “Creating a computer-generated hologram using RGB-D camera,” The 1st International Conference on Advanced Imaging, National Center of Science, Tokyo, JAPAN, (June. 2015).

国内会議（筆頭）

1. 長谷川鋭, 角江 崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, “RGB-D カメラとダウンサンプリング手法を用いた電子ホログラフィ,” 映像情報メディア学会年次大会 2015, 東京理科大学 葛飾キャンパス, (2015年 8月).