

デジタルホログラフィックディスプレイシステムの
視差確保と性能向上に関する研究

平成 27 年 3 月

和歌山大学大学院システム工学研究科

森 裕

Improvement of Parallax and Image Quality
on Digital Holographic Display

by

Yutaka Mori

Doctoral Thesis

Graduate School of Systems Engineering

Wakayama University

March 2015

概要

さまざまな 3 次元ディスプレイ技術が提案される中で、ホログラフィックディスプレイは立体知覚や視点数などの観点から優れた立体ディスプレイとして注目されている。ホログラフィックディスプレイはホログラフィによる立体技術をディスプレイに応用したものである。本研究では、ホログラフィックディスプレイのためのホログラムの作製に、デジタルホログラフィによる実験的物体情報の記録方法を採用したデジタルホログラフィックディスプレイシステムを提案する。本システムは、記録システム、信号処理、再生システムの三つの要素からなる。まず、記録システムでは干渉計を用いて物体の 3 次元情報を記録する。次に、取得したデジタルホログラムに信号処理を施す。最後に、信号処理後の情報を空間光変調器を用いて再生する。本研究では、このデジタルホログラフィックディスプレイの視差確保と性能の向上、すなわち、デジタルホログラフィックディスプレイにおける記録・再生デバイス間の画素サイズの異なりから生じる再生距離問題の解決と単一の高画質ホログラムの作製を目指す。

視差確保に関する課題は、ホログラムの記録に用いる撮像素子と再生に用いる空間光変調器の画素サイズの相違から生じ、この相違により 3 次元像の再生距離が非常に長くなってしまう。映像が遠方に再生されると、視差の変化が少なくなるため、立体感が損なわれる。画素サイズ比が m であった場合、再生距離には m^2 倍の係数が掛かる。一般的に、空間光変調器の画素サイズは撮像素子の画素サイズよりも大きく、5~15 倍ほどの大きさであるため、3 次元像は遠方に再生されることになる。本研究では、この問題に対し、信号処理のみによる解決方法を 2 種類提案した。一つは回折伝搬計算法、もう一つは球面位相付加法である。本研究では、これら二つの解決方法のサンプリング定理に基づく条件、制限を明らかにし、光学再生実験により本手法の有用性を実証した。再生距離はおおよそ 8 分の 1 まで短縮できることを示し、ヒトの目視による奥行き知覚実験では距離推定値の標準偏差が 1060 mm から 108 mm までの低減に成功した。

加えて、本システムの性能向上について、ホログラフィ技術特有の画質低下に関する課題であるスペckルノイズに注目した。スペckルノイズはレーザなどの光源の高いコヒーレンスによってもたらされる画質低下の要因であり、高コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた場合には、単一のホログラムのスペckルノイズを取り除くことは非常に難しい。そこで本研究では、低コヒーレンスデジタルホログラフィを用い、記録した複数のホログラムから解析・合成などの演算、つまり、信号処理によって高画質な単一のホログラムを生成する方法を提案した。数値再生シミュレーションにより、本手法の性能を評価、比較し、本手法の有用性を実証した。分散によりスペckルノイズの低減を定量評価し、高コヒーレンス光源を用いた場合と比べ、提案手法は分散値を半分以下にまで低減できることを示した。

提案手法により、ヒトの奥行き知覚向上の達成、スペckルノイズの大幅な削減に成功した。本研究成果は、デジタルホログラフィックディスプレイ実現に貢献しうる成果である。

Abstract

Several three-dimensional displays have been proposed. Holographic display technique has advantages in the depth perception, the number of observing points, and so on. A digital holographic display system using the digital holography with an optical interferometer as a hologram generation method is proposed. This system has also above advantages. It consists of three sub-systems, which are recording system, signal processing, and reconstruction system. In the proposed system, there are the problems which the parallax issue and the image degradation. The purpose is the improvement of the parallax and the image quality in the proposed system.

The parallax issue depends on the difference of the pixel size between a recording device and a reconstructing device. The reconstruction distance of a real image is different from the original one in the digital holographic display. In general, the distance is longer since the pixel size of the reconstructing device is larger than the recording device. This makes it hard to recognize perception of the stereoscopic effect when holographic reconstructed images are used for the stereopsis system. A numerical propagation and a spherical phase addition methods are proposed to shorten the distance. The limitation of each method was verified to clear the criterion. By combining two methods, the reconstruction distance was shortened from 4440 mm to 547 mm. In addition, the visual depth perception evaluation was conducted. The standard variation of the depth perception was reduced by the proposed method. It was successfully shown that the proposed combining method is useful for the stereopsis.

The image degradation depends on speckle noise. Speckle noise occurs when a coherent light is diffused by a rough surface object. It degrades the holographic reconstructed image quality. A method for improvement of reconstructed image quality by synthesizing low-coherence digital holograms is proposed, and two synthesis approaches are presented. One is a plane multiplexing method, and other is spherical waves synthesis method. A numerical reconstruction simulation was performed to confirm the proposed methods. The image quality was evaluated by variance of the gray-scale amplitude image. In the plane multiplexing method, the reconstructed image quality was compared with the case of high-coherence digital holography. It was shown that speckle noise was completely reduced. In addition, in the spherical waves synthesis method, the more improvement of image quality was performed as compared with the plane multiplexing approach. The image quality of the spherical waves synthesis method was improved more than twice of the high-coherence digital holography. Quantitative evaluation was given to confirm the proposed methods.

The improvement methods by only signal processing are proposed for the problem which is caused depending on the devices or holography technique. In the proposed methods, the improvement of the parallax and the image quality was achieved. The research products are capable of achieving the proposed digital holographic display.

目次

1	緒論	1
1.1	研究背景	1
1.2	ホログラフィックディスプレイシステム実現のための課題	3
1.2.1	ホログラフィックディスプレイシステムの再生距離と視差に関する課題	3
1.2.2	スペックルノイズによる画質低下	4
1.3	研究目的	5
1.4	本論文の構成	6
2	デジタルホログラフィックディスプレイの再生距離調節法	8
2.1	緒言	8
2.2	デジタルホログラフィックディスプレイ	8
2.3	デジタルホログラフィックディスプレイの再生距離の問題	10
2.4	再生距離調節法	11
2.4.1	回折伝搬計算法	11
2.4.2	球面位相付加法	13
2.5	再生距離調節法の検証実験	15
2.5.1	ホログラム記録実験	15
2.5.2	回折伝搬計算法	16
2.5.3	球面位相付加法	17
2.5.4	SFFT 法による回折伝搬計算	17
2.6	再生距離短縮法を用いた光学再生実験および単眼像知覚評価実験	21
2.7	結言	24
3	低コヒーレンスデジタルホログラム合成による高画質ホログラム生成	25
3.1	緒言	25
3.2	低コヒーレンスデジタルホログラム合成法	25
3.3	ノイズ低減手法	28
3.3.1	しきい値処理法	28
3.3.2	最大振幅抽出法	29
3.4	再生像の画質評価	31
3.4.1	低コヒーレンスデジタルホログラム記録実験	31
3.4.2	しきい値処理法のしきい値決定	33
3.4.3	画質評価	34
3.5	結言	37

4	球面波合成法による低コヒーレンスデジタルホログラム合成	39
4.1	緒言	39
4.2	球面波合成法によるホログラム生成	39
4.2.1	球面波合成法	39
4.2.2	面伝搬合成法との相違	41
4.3	再生像の画質評価	41
4.4	開口の大きさと再生像画質の関係	44
4.5	結言	47
5	総括	48

謝辞

参考文献

著者発表論文

付録

1 緒論

1.1 研究背景

3次元ディスプレイはリアルな立体映像を観察することができる臨場感のあるディスプレイとして注目され、医療・産業・教育・エンターテインメントなど幅広い分野への応用が期待されている¹⁾。その反面、3次元ディスプレイの普及にともない、3次元映像の立体視による目の負担や気分の悪化などの身体への悪影響についても注目が高まっている。これらはヒトが立体を知覚する要因を満足しているかどうかの原因である。ヒトが立体を知覚する要因は主に輻輳、焦点調節、両眼視差、運動視差の4種類がある¹⁾。

4種類の知覚要因の概念図を Fig. 1.1 に示す。輻輳は一点を注視した際に両眼の回転角を用い、三角測量の原理から奥行きを知覚することである。焦点調節は水晶体の伸縮による眼のピント調節から奥行きを知覚することである。両眼視差は両眼の網膜に映る像（網膜像）の対応点の相違から奥行きを知覚することである。最後に、運動視差は視点移動に基づく網膜像の変化から奥行きを知覚することである。これらの要因は無意識に機能する働きであり、3次元ディスプレイの開発においてはこれらを矛盾なく満足することが望ましい。前述の立体視による目の負担や気分の悪化などの身体への悪影響は輻輳と焦点調節の矛盾によって生じるものであり、この二つは特に満足すべき要因である。

これまでに3次元ディスプレイ技術としてさまざまな立体視手法が研究され、それ

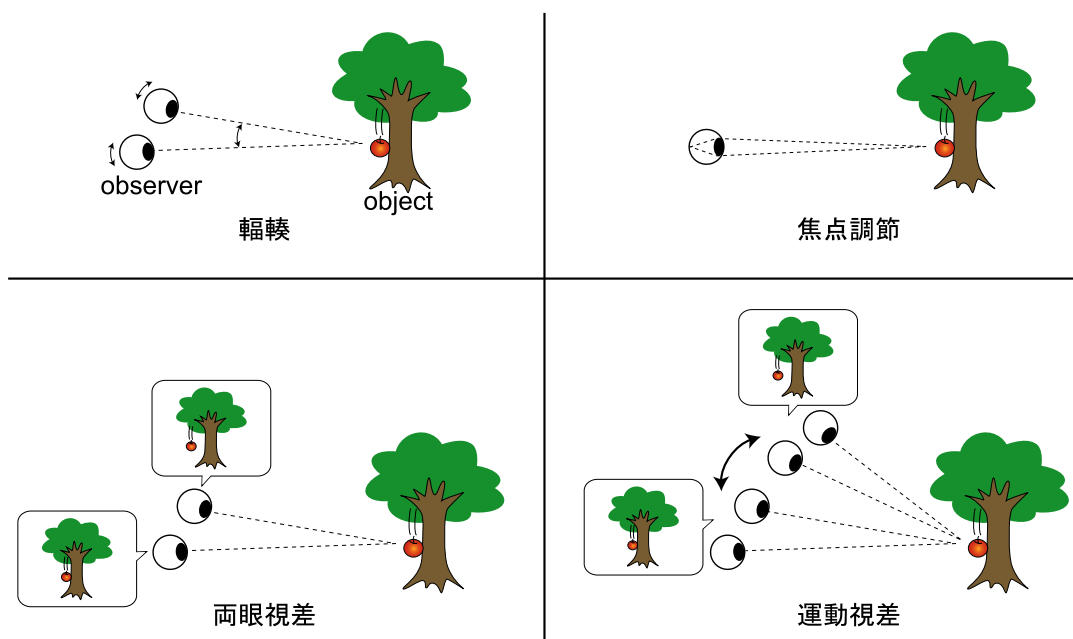


Fig. 1.1 立体知覚要因の概念図

らは主に 4 種類に分類される¹⁾。水平視差方式、多視点方式²⁻⁴⁾、体積表示方式⁵⁻⁸⁾、像再生方式⁹⁻¹¹⁾である。それぞれの技術の特徴についてまとめる。

水平視差方式は、ヒトの眼が水平に並んでいることから、水平方向の視差による立体知覚が支配的であることを利用し、水平方向のみに視差を与え、立体視を実現するものである。これは作製の簡易性から現在最も実用化されている立体視手法である。これには、偏光子を用いる方式、両眼視差画像の表示と同期させたシャッターを用いる方式、視差を設けた赤と青の二つの画像を重ねたアナグリフなどのメガネ方式、シリンドリカルレンズを一行に並べたレンチキュラレンズによる視線分割を利用したレンチキュラ方式、遮蔽開口により視線分割をおこなう視差バリア（あるいはパララックスバリア）方式がある。しかし、これらの手法では両眼用の 2 種類の視差画像のみを用いるため、立体が観察できる位置は狭い範囲に限定される。また、立体知覚の要因である輻輳と両眼視差しか満足していない。

多視点方式は、斜めレンチキュラ方式²⁾、ステップバリア方式⁴⁾がある。これらは、レンチキュラ方式のレンチキュラレンズ、あるいは視差バリア方式の遮蔽開口をどちらも斜めに配置し、多視点を実現する。斜めレンチキュラ方式ではレンチキュラレンズを一つのレンズに対して 2 画素を対応させるのに対し、このレンズを傾けることによって 3 画素以上に対応させる。これにより、斜め方向の視点数を増加させ、多くの位置から立体視を可能にする。ステップバリア方式においても同様にディスプレイ画面に対して斜めに遮蔽開口を配置し、斜め方向への視点数増加を実現している。これらの方式は、水平視差方式に比べて視点数が多いため、滑らかな視差を立体像に与えることができる。多視点方式では立体知覚の要因である輻輳と両眼視差の加えて、視点数が増加したために運動視差も満足している。

体積表示方式は、奥行き方向に 2 次元の画像を並べることによって立体視を実現する。これは立体知覚の 4 種類の要因すべてを満足し、水平方向の視差だけでなく垂直方向の視差も有する。この方式は非常に簡易に立体像を作製することができる反面、物体間のオクルージョンの表現が困難であるという問題がある。オクルージョン表現とは、たとえば、二つ物体が前後に並んでいた場合、前面にある物体が背面にある物体を遮蔽することである。この方式では奥行き方向に並べた 2 次元画像を全て観察できるため、自然な物体遮蔽をおこなうことができない。

像再生方式も、4 種類の立体知覚の要因すべてを満足した方式である。また、体積表示方式と同様、水平方向の視差だけでなく垂直方向の視差も有する。像再生方式はさらに光線再生方式^{9,10)}と波面再生方式¹¹⁾に分類される。光線再生方式はインテグラルイメージングと呼ばれ、代表的な構成はフレットパネルディスプレイとレンズアレイを組み合わせたものである。3 次元物体から発せられた光線の出射位置と向きに関する情報をレンズアレイを通して記録し、ディスプレイからの光線を同様にレンズアレイを通して元の立体像を結像させる。この方式では光線を再生しているため、視差の分解能が粗く、運動視差については擬似連続的¹⁰⁾であるといわれている。それに対して、波面再生方式はホログラフィ¹²⁻¹⁴⁾をディスプレイに応用したものであり、物

Table 1.1 立体表示方法の比較

表示方式 評価項目	水平視差	多視点	体積表示	像再生	
				光線再生	波面再生
満足する立体知覚要因	輻輳 両眼視差	輻輳 両眼視差 運動視差	輻輳 両眼視差 焦点調節 運動視差	輻輳 両眼視差 焦点調節 運動視差	
視点数	1点	多点	連続的	多点	連続的
視差	水平方向	水平方向	全方向	全方向	
オクルージョン問題	なし	なし	あり	なし	

体からの光線ではなく物体光波の波面そのものを再生する。波面再生方式は光線再生方式に対し、波面そのものを再生しているため、視差は連続的であり、真の3次元映像を観察することができる技術として注目されている。

以上の内容を Table 1.1 にまとめる。Table 1.1 から、立体知覚の要因をすべて満足していること、その他の項目においても優れていることから、波面再生方式、すなわちホログラフィを用いた3次元ディスプレイが最も優秀であるといえる。

1.2 ホログラフィックディスプレイシステム実現のための課題

ホログラフィを応用したディスプレイ技術であるホログラフィックディスプレイ¹⁵⁾は空間光変調器にホログラムの情報を表示し、再生光を照射することによって像を再生する。本研究では、表示するホログラム情報は、デジタルホログラフィ¹⁶⁾により実験的に取得する。このデジタルホログラフィを用いたホログラフィックディスプレイシステム（以降、デジタルホログラフィックディスプレイシステム）実現のためには大きな課題がある。

1.2.1 ホログラフィックディスプレイシステムの再生距離と視差に関する課題

デジタルホログラフィックディスプレイシステムは記録システム・信号処理・再生システムの三つの要素から構成される。まず、物体光情報をデジタルホログラフィを用いて取得し、空間光変調器を用いて3次元像を光学的に再生する。このディスプレイは、記録デバイスである撮像素子と再生デバイスである空間光変調器の画素サイズの違いによって映像の再生距離が記録時の物体-カメラ間距離から極端に変わってしまうという問題がある。一般的に、空間光変調器の画素サイズは撮像素子の画素サイズよりも大きく、1辺が5~15倍ほどの大きさである。映像の再生距離は元の物体-カメラ間距離から画素サイズ比の2乗倍となるため、映像が元の距離から非常に遠方に再生されることになる。映像が遠方に再生された場合、運動視差あるいは両眼視差の

変異が少なくなるため、立体感が損なわれるのは明らかである。そのため、これを解決する、すなわち視差を確保する必要がある。このことを解決するために縮小光学系を再生システムに導入する方法が考えられる。しかし、この場合、システムが巨大化してしまうという問題も新たに発生するため、信号処理のみによる解決が望ましい。

1.2.2 スペックルノイズによる画質低下

デジタルホログラフィは、撮像素子を用いて実験的に物体の複素振幅情報をデジタルホログラムとして記録し、光波回折伝搬計算により物体像を再生する。この技術は、CCD (Charge Coupled Device) や CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) などのイメージセンサの高解像度化やコンピュータの性能向上による演算処理の高速化の実現により、3次元ディスプレイ^{11,15,17-24)}のみならず、干渉計測²⁵⁾、光暗号化²⁶⁻²⁸⁾、物体形状計測²⁹⁻³¹⁾、顕微鏡³²⁻³⁴⁾、パターン認識³⁵⁻³⁸⁾など、さまざまな分野に応用されている^{39,40)}。

デジタルホログラフィは、簡易な光学系で高速に光波の複素振幅情報を記録できる反面、光源の高コヒーレンスによるスペックルノイズが再生像画質を劣化させる原因となっている。一般的なデジタルホログラフィの再生像に含まれるスペックルノイズの様子を Fig. 1.2 に示す。Fig. 1.2 の再生像に含まれる明暗の斑点模様がスペックルノイズである。このスペックルノイズは物体からの散乱光どうしが空間上でランダムに干渉し合うことによって発生する。複数のホログラムを多重化する方式⁴¹⁻⁴⁶⁾、回転あるいは走査させた光学素子を用いて記録した複数のホログラムを時間積分する方式⁴⁷⁻⁴⁹⁾、あるいは、合成により大きなホログラムを作製する合成開口法⁵⁰⁻⁵³⁾など、多くのスペックルノイズ低減手法が提案されている。これらの手法は非常に効果的にスペックルノイズ低減を実現している。しかし、再生デバイスである空間光変調器の応答速度に限界があることや光学素子の振動による外乱が生じるため、1枚の高画質なホログラムを作製することが望ましい。

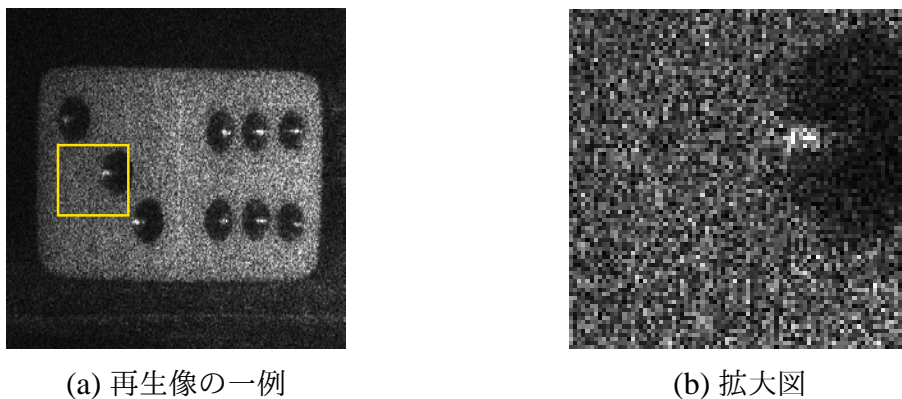


Fig. 1.2 デジタルホログラフィの再生像に含まれるスペックルノイズ

1.3 研究目的

本研究では、デジタルホログラフィックディスプレイの視差確保と性能の向上、すなわち、デジタルホログラフィックディスプレイにおける記録・再生デバイス間の画素サイズの異なりから生じる再生距離の問題解決と単一の高画質ホログラムの作製を目指す。

本システムの視野確保に関して、信号処理のみによる解決法として回折伝搬計算法と球面位相付加法を組み合わせた手法を提案する。回折伝搬計算法は、既存の光波回折伝搬計算により任意の伝搬位置における光波の情報を算出し、その伝搬後の情報を再生デバイス、空間光変調器に表示することによって再生距離を調節する。球面位相付加法は、物体光の複素振幅分布に球面位相を付加することによって再生距離の調節をおこなう。各々の手法の制限や条件についてシミュレーションと実験により明らかにし、本手法の有用性を映像知覚実験により評価する。回折伝搬アルゴリズムの違いによる振る舞いについても明らかにする。

デジタルホログラフィにおけるスペックルノイズによる画質劣化の解決に関して、1枚の高画質ホログラム生成に関する手法を提案する。本手法では、低コヒーレンスデジタルホログラムを単純な加算合成することにより高画質な再生像を得られるホログラムを作製する。これは、スペックルノイズがほとんど発生しない低コヒーレンス光源を用いたデジタルホログラフィ（以降、低コヒーレンスデジタルホログラフィ）を用いて物体情報を記録するものである。1枚の低コヒーレンスデジタルホログラムでは光源のコヒーレンス長を越える物体奥行き情報は記録できない。物体全体の情報を取得するために参照ミラーを走査し、複数枚ホログラムを記録する。最終的に、物体全体の情報を含む1枚のホログラムを、記録した全てのホログラム情報の加算合成により作製する。また、低コヒーレンスデジタルホログラフィはスペックルノイズは少ないことは自明であるが、干渉効率が低く、スペックルノイズ以外の振動や空気の揺らぎなどの外乱によるノイズの影響を強く受ける。このノイズを低減するためにノイズ低減手法を提案し、本合成手法と組み合わせることによって高画質な再生像の取得を実現する。ノイズ低減手法として、しきい値処理法と最大振幅抽出法を提案する。しきい値処理法は画像処理分野で広く用いられているしきい値処理を再生画像に適用する方法であり、ある値をしきい値とし、それ以下の画素値を0に置き換える処理である。これを低コヒーレンスデジタルホログラフィによって取得した再生画像に適用することにより各々のホログラムに含まれる外乱を取り除く。外乱によるノイズは基本的に干渉信号強度よりも低いことが知られ、しきい値処理によって必要な情報のみを抽出することが可能である。最大振幅抽出法は物体光と参照光の光路差0位置の強度値のみを抽出し、それ以外を0に置き換える処理である。この方法は、低コヒーレンスデジタルホログラフィの干渉信号が光路差0位置付近の非常に狭い範囲でのみ干渉信号が得られ、また、干渉信号が光路差0位置で最大強度を取ることを利用する。光軸に対して垂直である面方向のすべての座標において、光軸方向

に再生像強度の変化を求め、その最大ピークを取る位置が光路差 0 位置であり、そのときの最大ピーク値のみを用いる。しきい値処理法でも述べたように、光路差 0 位置の情報、干渉強度の高い位置では耐ノイズ性があり、そのときの情報のみを用いることによってノイズ低減が期待できる。また、本研究では、ホログラム生成法として面伝搬合成法と球面波合成法を提案し、両手法を比較する。面伝搬合成法は物体をレイヤーの集合と考える。3次元物体を2次元平面が奥行き方向に数枚、数十枚と堆積したものと考え、各面からの回折光波を加算計算により合成することによりホログラムを作製する方法である。球面波合成法は物体を点光源の集合と考え、物体点光源からの発散球面波の複素振幅分布を合成し、元の物体を再生するホログラムを生成する方法である。

1.4 本論文の構成

本論文の構成と内容を記す。その構成図を Fig. 1.3 に示す。

本論文は 5 章構成である。

第 2 章では、まず、デジタルホログラフィックディスプレイの記録再生システムについて述べる。本システムの距離調節問題について述べ、それを解決するための回折伝搬計算と球面位相付加法のそれぞれの条件について述べる。さらに、これらの 2 手法の条件を実験的に検証した結果について述べ、最後に、被験者 10 名による奥行き知覚実験をおこない、本手法の有用性を実証する。

第 3 章では、再生像の高画質化手法として低コヒーレンスデジタルホログラフィに基づくホログラムの合成法について述べる。加えて、本手法に適用するノイズ低減手法として、しきい値処理法と最大振幅抽出法を提案し、その比較結果について述べる。提案手法による再生像の画質をシミュレーションにより評価し、本手法の有用性を実証する。また、高コヒーレンス光源を用いた一般的なデジタルホログラフィとの比較もおこなう。

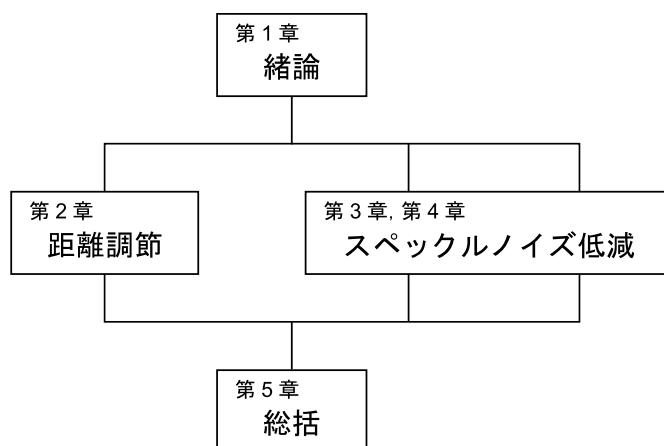


Fig. 1.3 論文の構成図

第4章では，3章で提案した画質向上手法よりもスペckルノイズを低減可能なホログラム生成法として，球面波合成法を提案する．そのホログラム作製方法と3章で述べるホログラム合成法との違いについて述べる．シミュレーションによりそれぞれの手法を比較し，本手法の有用性を示す．

最後に，本研究の成果について総括し，今後の展望について述べる．

2 デジタルホログラフィックディスプレイの再生距離調節法

2.1 緒言

本章では、まず、デジタルホログラフィックディスプレイシステムとそのシステムにおける再生距離が記録と再生で大きく変化するために生じる立体感が欠乏する問題と、これを解決する意義について述べる。次に、提案する再生距離調節法⁵⁴⁾である回折伝搬計算法と球面位相付加法について述べ、それらの手法の有効な条件について述べる。回折伝搬計算には伝搬後の空間分解能を保つために角スペクトル法⁵⁵⁻⁵⁹⁾を用いる。両手法ともサンプリング定理に基づく制限が存在するため、これを考慮し有効なパラメータを選択する。最後に、再生距離調節法の有用性について検証するため、再生距離調節法を物体光の複素振幅分布に適用し、被験者 10 人による再生位置知覚評価実験をおこなった結果について述べる。

2.2 デジタルホログラフィックディスプレイ

デジタルホログラフィックディスプレイは Fig. 2.1 に示すように記録システム、信号処理、再生システムの三つの要素からなる。一つ目の記録システムでは、干渉計を用いて物体の 3 次元情報（デジタルホログラム）を記録する。二つ目は、取得したデジタルホログラムに信号処理を施す。数値解析や再生デバイスに表示するためのコーディングがこれに相当する。そして三つ目の再生システムでは、信号処理後のデジタルホログラムを空間光変調器に表示して 3 次元像を再生する。

デジタルホログラフィでは、物体情報を記録する場合、再生像以外の不要な光波の情報も記録される。物体光の複素振幅分布を $U_o(x, y)$ 、参照光の複素振幅分布を $U_r(x, y)$ とすると、これらの光波からなる干渉縞の強度分布 $I(x, y)$ は

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |U_o(x, y) + U_r(x, y)|^2 \\ &= |U_o(x, y)|^2 + |U_r(x, y)|^2 + U_o^*(x, y)U_r(x, y) + U_o(x, y)U_r^*(x, y) \quad (2.1) \\ &= a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos\{\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y)\} \end{aligned}$$

となる。ここで、 $a_o(x, y), a_r(x, y)$ はそれぞれ物体光と参照光の振幅分布であり、 $\phi_o(x, y), \phi_r(x, y)$ はそれぞれ物体光と参照光の位相分布である。また、 $*$ は複素共役をあらわす。右辺の第一項、第二項はバイアス成分をあらわす 0 次回折光であり、ほとんど回折しない。第三項は物体光の共役を含む -1 次回折光である。第四項は元の物体光の情報を含む 1 次回折光である。この光波が再生面で再生像を形成する。(2.1) 式からわかるように、通常、これらの四つの項を含むホログラムを再生すると、上述の三つの回折光が再生される。三つの回折光のうち、必要な光波は 1 次回折光のみであり、0 次回折光と -1 次回折光は不要である。

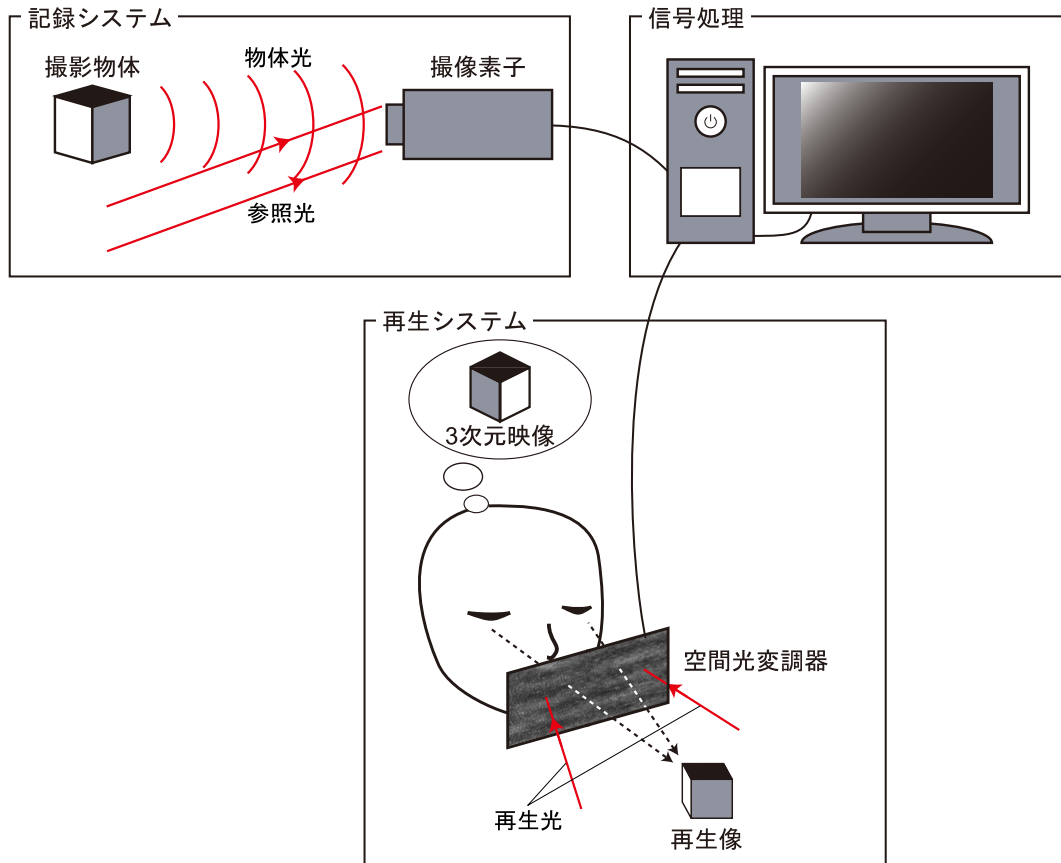


Fig. 2.1 デジタルホログラフィックディスプレイシステム

これらの不要光を除去する手法に位相シフト法⁶⁰⁾がある。位相シフト法は物体光に対して参照光の位相をシフトし、複数枚のホログラムを記録する。これらを用いて連立方程式を解くことによって再生像である1次回折光の成分のみを取り出す手法である。一般的に位相シフト量が $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の4種類のホログラムからの計算^{27,60)}が用いられている。このとき、ホログラムの強度分布はそれぞれ

$$I_1(x, y) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y) \cos \{ \phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) \}, \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} I_2(x, y) &= a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y) \cos \{ \phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) + \pi/2 \} \\ &= a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) - 2a_o(x, y)a_r(x, y) \sin \{ \phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) \}, \quad (2.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_3(x, y) &= a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y) \cos \{ \phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) + \pi \} \\ &= a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) - 2a_o(x, y)a_r(x, y) \cos \{ \phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) \}, \quad (2.4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_4(x, y) &= a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y) \cos \{ \phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) + 3\pi/2 \} \\ &= a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y) \sin \{ \phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) \} \quad (2.5) \end{aligned}$$

となる。(2.2) 式から (2.5) 式を用いて連立方程式を解くことにより

$$U_o(x, y)U_r^*(x, y) = \frac{\sqrt{\{I_1(x, y) - I_3(x, y)\}^2 + \{I_4(x, y) - I_2(x, y)\}^2}}{4} \cdot \exp \left\{ i \tan^{-1} \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right\} \quad (2.6)$$

となる。ここで、 i は虚数単位である。参照光に平行光を用いた場合、 $U_r^*(x, y) = 1$ とおくことができるため、物体光の複素振幅分布を取り出すことができる。位相シフト法により求めた物体光の複素振幅分布を用いて空間光変調をおこなうことにより、再生像のみを観察することができる。

2.3 デジタルホログラフィックディスプレイの再生距離の問題

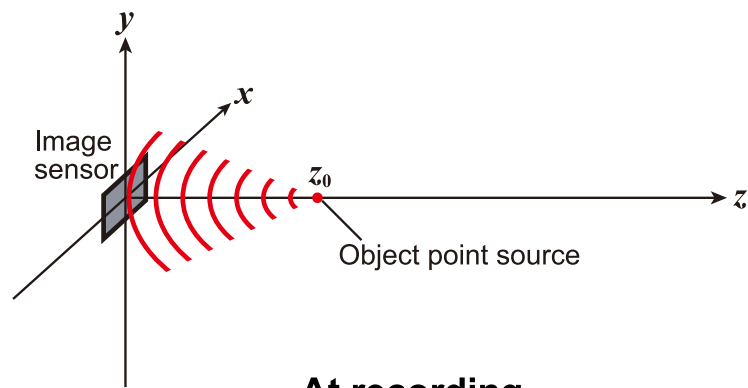
ホログラムの記録に用いる撮像素子の画素サイズと再生に用いる空間光変調器の画素サイズは一般的に異なっている。この場合、再生距離が物体情報記録時の物体-撮像素子間距離と異なってしまう。現状では、カメラと同じ画素分解能をもつ空間光変調器はなく、一般的に撮像素子に比べて空間光変調器の画素サイズは大きいいため、再生距離は元の距離よりも長くなる。このことを Fig. 2.2 に示すように収束球面波を例に示す。撮像素子面から距離 z_0 の位置に収束する球面波の撮像素子面における複素振幅分布 $U_c(x, y)$ は

$$U_c(x, y) = a_c \exp \left\{ -i \frac{k}{2z_0} (x^2 + y^2) \right\} \quad (2.7)$$

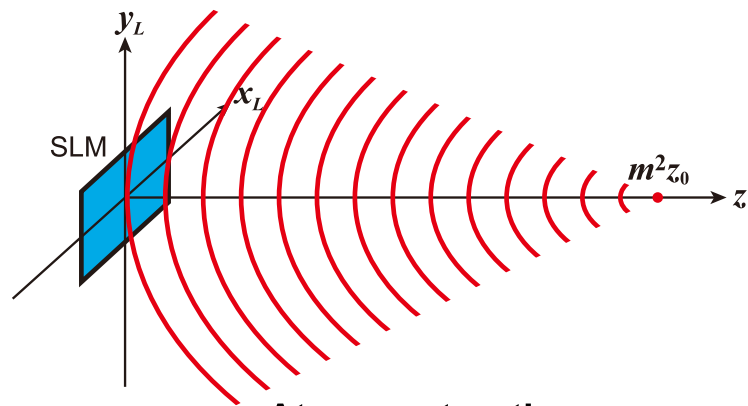
とあらわされる。ここで、 a_c は収束球面波の振幅、 z_0 は記録時の物体-撮像素子間距離、 k は波数である。撮像素子と空間光変調器の画素サイズ比を m とし、撮像素子面から空間光変調器面 $(x_s, y_s) = (mx, my)$ に変換すると

$$\begin{aligned} U_c(x_s, y_s) &= a_c \exp \left\{ -i \frac{k}{2z_0} \left(\frac{x_s^2}{m^2} + \frac{y_s^2}{m^2} \right) \right\} \\ &= a_c \exp \left\{ -i \frac{k}{2m^2 z_0} (x_s^2 + y_s^2) \right\} \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる。(2.8) 式から画素の一辺のサイズが m 倍された場合、再生距離は元の再生距離 z_0 から m^2 倍されることがわかる。先に述べたように $m > 1$ であるため、非常に遠方に 3 次元像が再生されることになる。遠方に 3 次元像が再生された場合、両眼と物体のなす角が小さくなるため、視差がほとんど得られず、立体感が欠乏してしまう。そのため、この問題を解決する必要がある。将来的に撮像素子に対して同じあるいはより小さい画素サイズの空間光変調器が開発された場合も、次節で述べる距離調節手法は、その名の通り再生距離を任意に調節する方法として活用することができる。



At recording



At reconstructing

Fig. 2.2 点光源の場合の再生距離問題

2.4 再生距離調節法

本研究では、再生像の立体感向上を目的とし、信号処理によって再生距離を調節する回折伝搬計算法と球面位相付加法を提案する。この2手法は組み合わせて用いる。それぞれの手法とその有効な条件について述べる。

2.4.1 回折伝搬計算法

回折伝搬計算法の概念図を Fig. 2.3 に示す。回折伝搬計算による再生距離短縮は、物体光の複素振幅分布を任意の面まで回折伝搬計算をおこない、伝搬後の面の情報を光学再生に用いることによって再生距離を元の距離と計算による伝搬距離の差とすることができる。伝搬後の空間分解能を保つために伝搬アルゴリズムとして角スペクトル法を用いる。伝搬後の面の空間分解能が低下するフレネル回折積分を一度の高速フーリエ変換で計算するアルゴリズム (SFFT: Single Fast Fourier Transform)⁶¹⁾ を用いた場合、再生像が複数あらわれてしまうからである。この詳細については後に述べる。角スペクトル法において、撮像素子面から距離 z 離れた (X, Y) 面における物体光の複

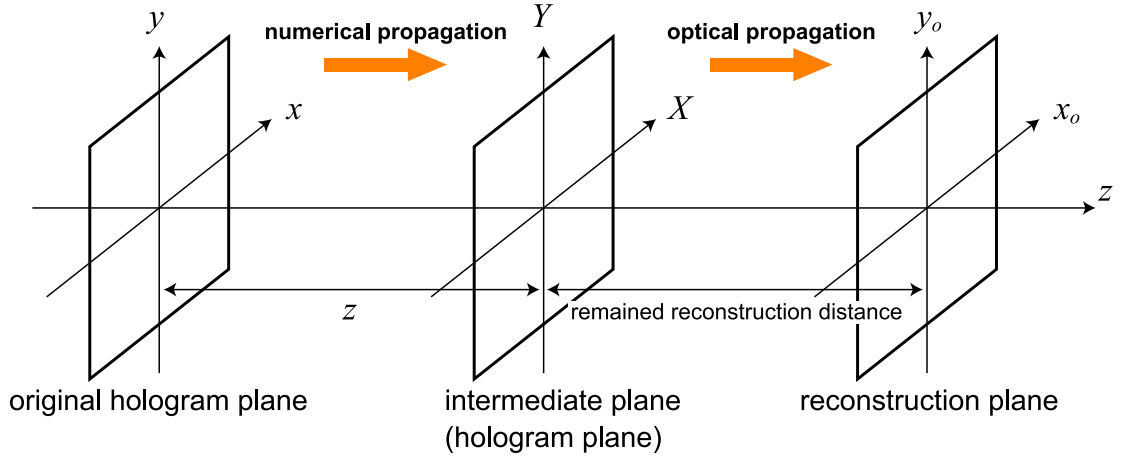


Fig. 2.3 回折伝搬計算法の概念図

素振幅分布は

$$U_o(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_o(\nu_x, \nu_y) \cdot \Phi(\nu_x, \nu_y) \cdot \exp \{i2\pi(\nu_x X + \nu_y Y)\} d\nu_x d\nu_y \quad (2.9)$$

となる。ここで、 $A_o(\nu_x, \nu_y)$ は物体光の複素振幅分布 $U_o(x, y)$ のフーリエ変換であり、 ν_x, ν_y は (x, y) 面の空間周波数である。また、 $\Phi(\nu_x, \nu_y)$ は

$$\Phi(\nu_x, \nu_y) = \exp \left(i2\pi z \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \nu_x^2 - \nu_y^2} \right) \quad (2.10)$$

である。 z は伝搬距離、 λ は光源の波長である。 $\Phi(\nu_x, \nu_y)$ は元の複素振幅分布 $U_o(x, y)$ の角スペクトルに重み付けする位相遅延量分布をあらわす。(2.9) 式から伝搬後の面における物体光の位相分布を算出し、得られる位相分布を光学再生する。しかし、角スペクトル法を実行すると、伝搬距離が長い場合に誤差を生じる⁵⁷⁾。これは、(2.10) 式からわかるように空間周波数が高くなるにつれ繰り返し周期が短くなるため、離散化した際にエイリアシング誤差が生じるためである。エイリアシングが生じた $\Phi(\nu_x, \nu_y)$ の高周波数領域に相当する物体光 $U_o(x, y)$ の空間周波数成分は所望の再生位置には得られず、再生面においてノイズとなる。これを防ぐために $\Phi(\nu_x, \nu_y)$ のサンプリング条件を考える。 $\Phi(\nu_x, \nu_y)$ の位相分布 $\phi(\nu_x, \nu_y)$ は

$$\phi(\nu_x, \nu_y) = 2\pi z \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \nu_x^2 - \nu_y^2} \quad (2.11)$$

である。サンプリング定理を満たすには、(2.11) 式の隣接画素間における位相変化が π 以下である必要がある⁶²⁾。つまり、最も空間周波数の高い座標における位相変化が π 以下であれば良い。このことを式であらわすと

$$\Delta\nu_x \left| \frac{\partial\phi(\nu_x, \nu_y)}{\partial\nu_x} \right|_{\max} \leq \pi \quad (2.12)$$

となる．ここで， $\Delta\nu_x$ は ν_x 方向のサンプリング間隔である．簡略化のために x 方向の 1 次元でのみ述べるが， y 方向も同様の計算ができる．位相シフト法によって取得した物体光の複素振幅分布の最大空間周波数を $\nu_{x\max}$ とすると，(2.12) 式は

$$\Delta\nu_x \cdot \frac{2\pi z |\nu_{x\max}|}{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - |\nu_{x\max}|^2}} \leq \pi \quad (2.13)$$

となる．(2.13) 式を z について解くと

$$z \leq \frac{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - |\nu_{x\max}|^2}}{2|\nu_{x\max}| \Delta\nu_x} \quad (2.14)$$

となる．(2.14) 式で与えられる範囲がサンプリング定理を満足する範囲であり，これが伝搬距離の条件となる．

2.4.2 球面位相付加法

球面位相付加による再生距離短縮は，物体光の位相分布に球面位相を付加することによって実現する．Fig. 2.4 (a) に示すように球面位相を付加しない場合，再生距離は 2.3 節で述べたとおり $m^2 z_0$ である．Fig. 2.4 (a) は空間光変調器から距離 $m^2 z_0$ の位置に点像が再生している様子を示す．このときの空間光変調器を焦点距離 f_1 のレンズと仮定する．次に，Fig. 2.4 (b) に示すように空間光変調器出射後に焦点距離 f_2 のレンズを配置した場合，そのときの再生距離は 2 枚の薄肉レンズの合成焦点距離

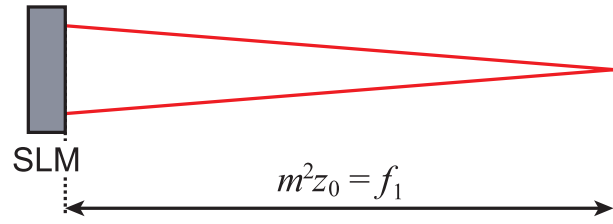
$$z_1 = \frac{f_2(d - f_1)}{d - (f_1 + f_2)} \quad (2.15)$$

となる．ここで， d は空間光変調器-レンズ間距離である．さらに，Fig. 2.4 (c) に示すように焦点距離 f_2 のレンズの代わりに球面位相をコンピュータ上で付加した場合， $d = 0$ となり，このときの再生距離は

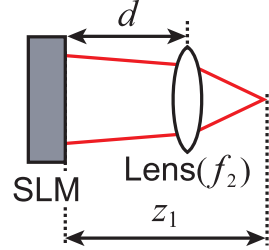
$$z_2 = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2} \quad (2.16)$$

となる．(2.16) 式から，球面位相の曲率半径を r とすると，球面位相付加後の再生距離は

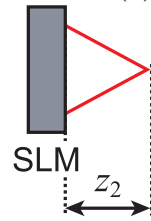
$$\begin{aligned} z_2 &= \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2} \\ &= \frac{f_1 r}{f_1 + r} \\ &= \frac{m^2 z_0 r}{m^2 z_0 + r} \end{aligned} \quad (2.17)$$



(a) 球面位相付加なし



(b) レンズによる球面位相付加



(c) 数値計算による球面位相付加

Fig. 2.4 球面位相付加法の概念図

となる． $z_2 < m^2 z_0$ であることから再生距離を短縮することができる．しかし，選択できる球面位相の曲率半径は回折伝搬計算と同様にサンプリング定理を満足しなければならない．物体光の位相分布に付加する球面位相は

$$\phi_{sph}(x, y) = \frac{k}{2r}(x^2 + y^2) \quad (2.18)$$

とあらわされる．(2.18) 式がサンプリング定理を満たすためには (2.12) 式と同様に

$$\Delta x \left| \frac{\partial \phi_{sph}(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} \leq \pi \quad (2.19)$$

を満足すれば良い．これを r について解くと

$$r \geq \frac{2|x_{\max}|\Delta x}{\lambda} \quad (2.20)$$

となる．ここで， x_{\max} は物体光の複素振幅分布の x 方向の大きさである．これを満足する球面波を用いる必要がある．

2.5 再生距離調節法の検証実験

本節では、提案手法である再生距離調節法の検証実験をおこなう。まず、ホログラムの記録実験について述べた後、提案手法の検証実験について述べる。加えて、再生像の奥行き知覚評価実験により提案手法の有用性を実証する。

2.5.1 ホログラム記録実験

デジタルホログラムの記録実験について述べる。デジタルホログラムの記録実験に用いた光学系を Fig. 2.5 に示す。これは反射型のマッハツェンダー干渉計である。光源には波長 632.8 nm の He-Ne レーザを用いた。CCD カメラは画素数 1024 × 768、画素サイズ 4.65 μm × 4.65 μm のものを用いた。撮影物体には 1 辺 8 mm のサイコロを用い、撮像素子面から 240 mm の位置に配置した。参照光の経路中に 1/2 波長板 (HWP) と 1/4 波長板 (QWP) を配置した。これらは位相シフターとして用い²⁷⁾、参照光の位相遅延量が 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ となるように回転角を組み合わせた。そして、位相遅延量の異なる 4 種類のデジタルホログラムを記録し、位相シフト法を適用することによって物体光のみの情報を取得した。本研究で用いた位相シフト法は記録時刻の異なる複数枚のホログラムから物体光情報を求める時分割位相シフト法⁶⁰⁾である。リアルタイム記録・再生システムを実現するためには単一記録で解析可能な波面分割位相シフト法⁶³⁻⁶⁶⁾を用いる必要があるが、本研究では再生距離の問題解決について取り組むため、時分割位相シフト法を用いた。

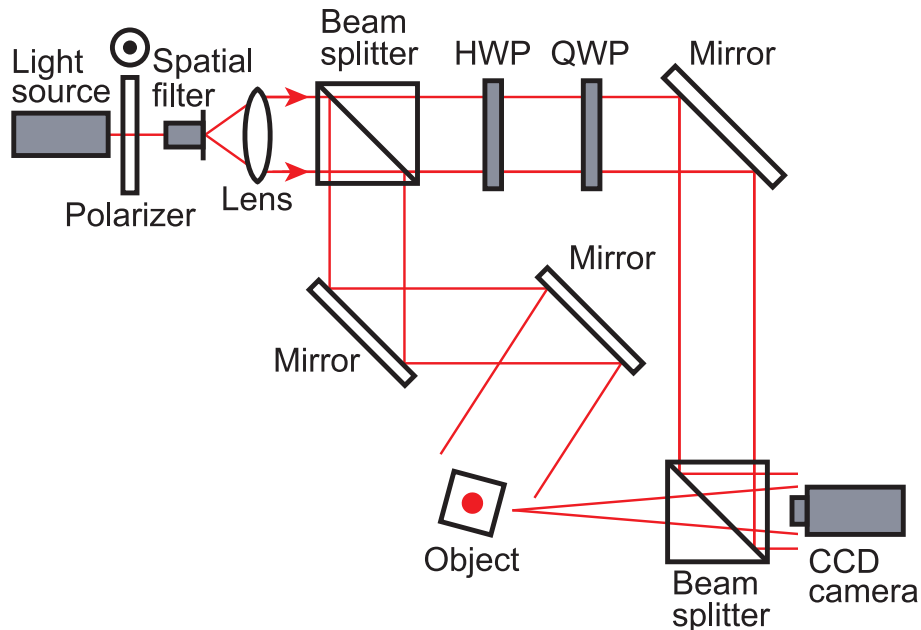


Fig. 2.5 ホログラム記録実験光学系

2.5.2 回折伝搬計算法

回折伝搬計算法の有効な伝搬距離は (2.14) 式と実験条件 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $\Delta\nu_x = 210 \text{ m}^{-1}$, $\nu_{x\text{max}} = 1.08 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$) から $z \leq 34.9 \text{ mm}$ となる. 実験的にこの条件を実証するためにホログラムの光学再生実験をおこなった. 用いた実験光学系を Fig. 2.6 に示す.

光源と CCD カメラはホログラム記録実験と同じものを用いた. 空間光変調器は画素数 792×600 , 画素サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ の LCOS-SLM (Liquid Crystal on Silicon Spatial Light Modulator) を用いた. 位相シフト法により算出した物体光の複素振幅分布のうち位相分布を位相ホログラムとして LCOS-SLM に表示することにより記録物体を再生する. CCD カメラには焦点距離 25 mm の結像レンズを取り付け, これを用いて虚像を観察する.

伝搬距離を 30 mm から 80 mm まで 10 mm ずつ変化させ, Fig. 2.6 に示す光学系を用いて虚像を観察した. 得られた再生像を Fig. 2.7 に示す. 伝搬距離が長くなるにつれ, 再生像が左下から情報が欠落しているようすがわかる. まず, サンプリング定理から算出した伝搬距離の範囲は $z \leq 34.9 \text{ mm}$ である. つまり, Fig. 2.7 (a) の 30 mm のみ条件を満足している. しかし, Fig. 2.7 (b), (c) はサンプリング定理を満たす Fig. 2.7 (a) と定性的に大きな変化は見られない. この原因として物体の位置や大きさに依存する物体光に含まれる空間周波数の分布が考えられる. つまり, 40 mm や 50 mm のときに伝搬計算で遮断されるような高空間周波数成分が, 記録した物体光にほとんど含まれていなかったためであると考えられる.

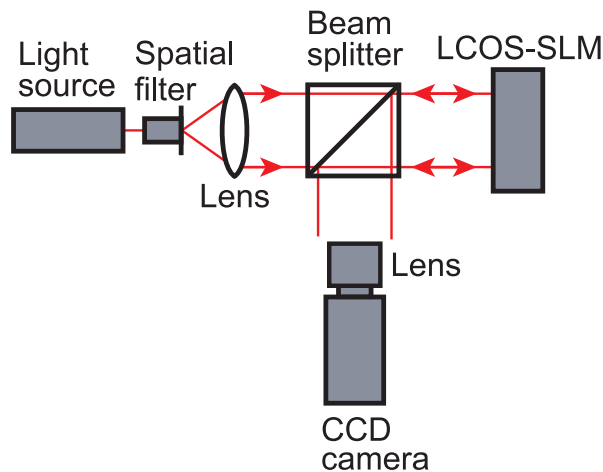


Fig. 2.6 光学再生実験光学系

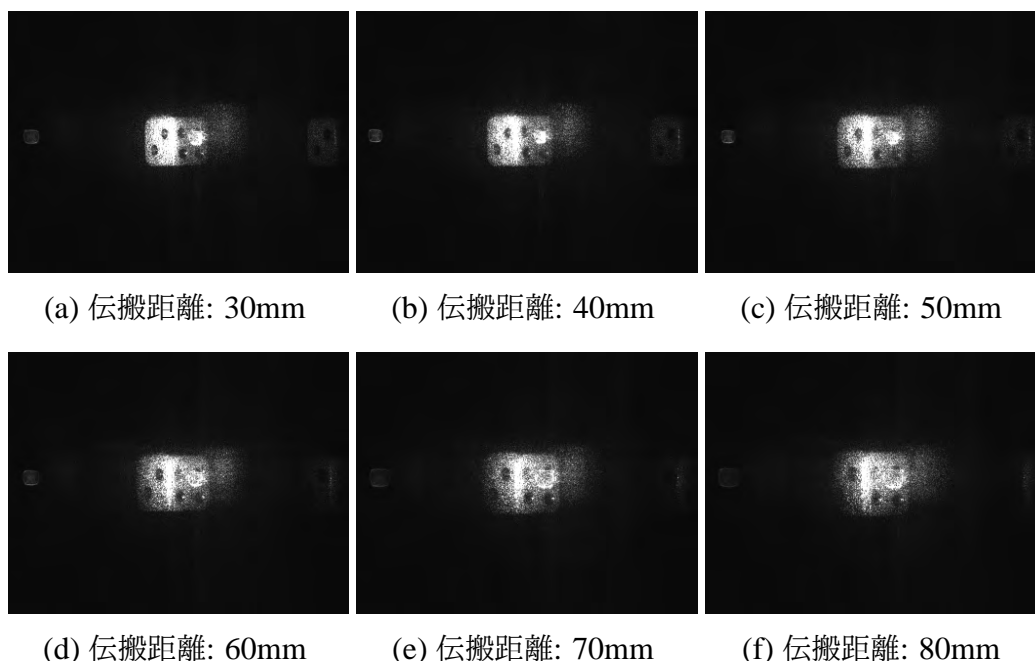


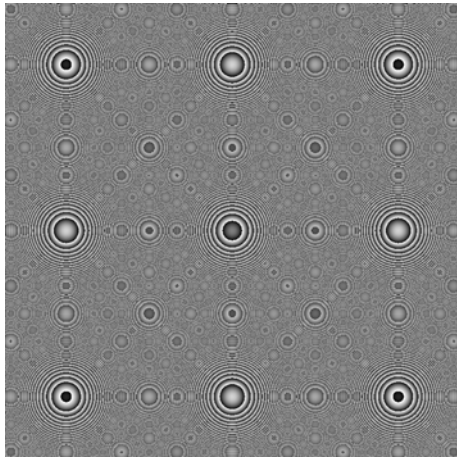
Fig. 2.7 回折伝搬計算法を用いたときの光学再生像

2.5.3 球面位相付加法

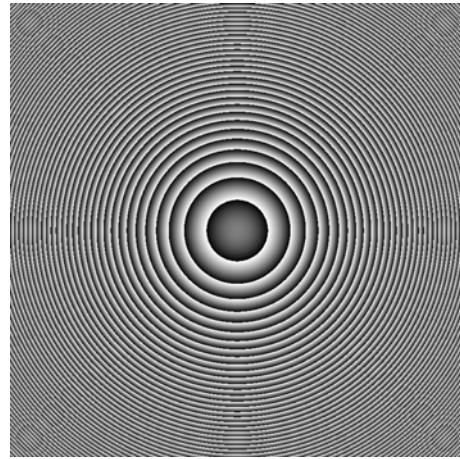
(2.20) 式から球面位相付加法の有効な球面位相の曲率半径は実験条件 ($\Delta x = 4.65 \mu\text{m}$) から $r \geq 35 \text{ mm}$ となる。球面位相付加法の検証実験をおこなった。物体光の複素振幅分布に与える球面位相の曲率半径は 10 mm と 100 mm の 2 種類とした。明確な違いを観察するためにサンプリング条件である $r \geq 35 \text{ mm}$ から大きく異なる値を設定した。与えた位相分布を Fig. 2.8 に示す。Fig. 2.8 (a) は明らかにエイリアシングが生じていることがわかる。これらの位相分布を物体光の複素振幅分布に与え、Fig. 2.6 に示す光学系で虚像を観察した。得られた再生像を Fig. 2.9 に示す。サンプリング定理を満たす Fig. 2.9 (b) では再生像は問題なく得られているが、Fig. 2.9 (a) では再生像が複数観察された。Fig. 2.8 (a) に示すように、サンプリング定理を満足しない球面位相はエイリアシングにより複数のレンズが生じているような位相分布となるからである。曲率半径 10 mm の場合では、九つのレンズが並んでいるように見える。そのため、各レンズの中央に相当する箇所に再生像があらわれ、球面位相付加法ではサンプリング定理を満足する必要があることを示している。

2.5.4 SFFT 法による回折伝搬計算

回折伝搬アルゴリズムとして角スペクトル法ではなく SFFT 法を用いた場合について述べる。2.4.1 項で算出したように、伝搬計算に含まれる位相項のサンプリング条件を求める。

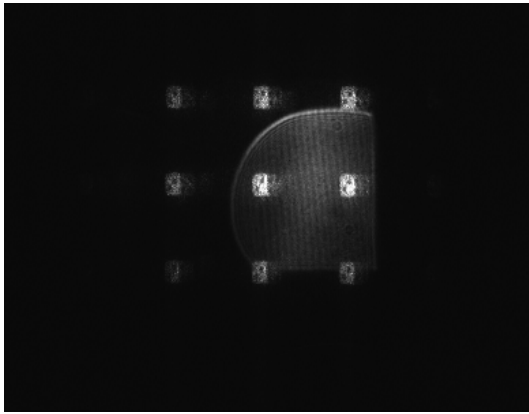


(a) 曲率半径: 10mm

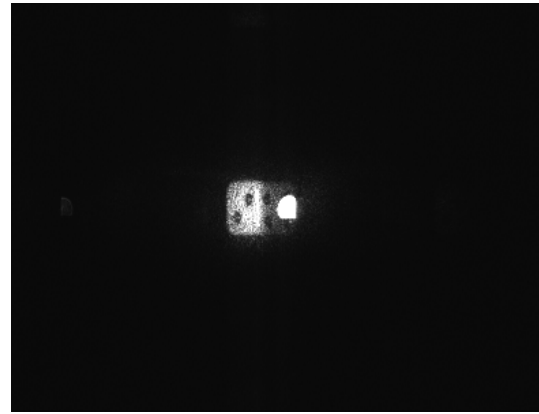


(b) 曲率半径: 100mm

Fig. 2.8 物体光に与える球面位相



(a) 曲率半径: 10mm



(b) 曲率半径: 100mm

Fig. 2.9 球面位相付加法を用いたときの光学再生像

SFFT 法は

$$U_o(X, Y) = \exp \left\{ \frac{ik}{2z} (X^2 + Y^2) \right\} \text{FT} \left[U_o(x, y) \exp \left\{ \frac{ik}{2z} (x^2 + y^2) \right\} \right] \quad (2.21)$$

とあらわされる．ここで，FT はフーリエ変換演算子である．このとき， x, y 方向の画素数を N_x, N_y とし，画素サイズを $\Delta x, \Delta y$ とすると，伝搬後の面である (X, Y) 面におけるサンプリング間隔は

$$\Delta X = \frac{\lambda z}{N_x \Delta x}, \quad \Delta Y = \frac{\lambda z}{N_y \Delta y} \quad (2.22)$$

で与えられる．これは伝搬距離 z に比例して伝搬後の面における空間分解能が低下することを示す．(2.21) 式では位相項が二つ存在する．これまでと同様に，位相項のサ

ンプリング条件を求める。まず、物体光の複素振幅分布 $U_o(x, y)$ に掛かる位相項について考える。その位相項を

$$\phi_{\text{SFFT1}}(x, y) = \frac{k}{2z}(x^2 + y^2) \quad (2.23)$$

とおく。(2.23) 式のサンプリング条件は

$$\Delta x \left| \frac{\partial \phi_{\text{SFFT1}}(x, y)}{\partial x} \right| \leq \pi \quad (2.24)$$

と与えられる。これまでと同様に z について解くと

$$z \geq \frac{2|x_{\max}|\Delta x}{\lambda} \quad (2.25)$$

と球面位相付加法の条件である (2.20) 式の右辺と同じ式となり、実験条件から $z \geq 35$ mm となる。同様に、もう一つのフーリエ変換後に掛かる位相項についても考える。その位相項を

$$\phi_{\text{SFFT2}}(X, Y) = \frac{k}{2z}(X^2 + Y^2) \quad (2.26)$$

とおく。(2.26) 式のサンプリング条件は

$$\Delta X \left| \frac{\partial \phi_{\text{SFFT2}}(X, Y)}{\partial X} \right| \leq \pi \quad (2.27)$$

と与えられる。これを z について解くと

$$z \geq \frac{2|X_{\max}|\Delta X}{\lambda} \quad (2.28)$$

となる。ここで、 X_{\max} は (X, Y) 面における X 方向の大きさである。(2.22) 式、(2.28) 式と実験条件から伝搬距離の条件は $z \leq 35$ mm となる。ここで注目すべきことは、(2.25) 式、(2.28) 式から導いた二つの条件式である $z \leq 35$ mm と $z \geq 35$ mm は、値が同じで不等号の向きが逆になっていることである。このことから、SFFT 法は、本実験条件では 35 mm のみがサンプリング定理を満足し、それ以外は満足しないことをあらかず。角スペクトル法では空間周波数面における物体光の複素振幅分布に位相を与えるが、この伝搬アルゴリズムでは球面位相付加法と同様、物体光の複素振幅分布に直接位相を与える。そのため、与える位相分布のエイリアシングは再生像が複数あらわれることに繋がってしまう。

シミュレーションにより、このことを実証する。伝搬距離はサンプリング条件を満足する 35 mm に加え、20 mm から 60 mm までを 10 mm 間隔で変化させた 6 種類とした。それぞれホログラム面まで伝搬した後、残りの再生距離を SFFT 法により再度伝搬する。このアルゴリズムを再生に用いる際は、最終的に強度を求めるため、

(2.21) 式の第 1 項のエイリアシングは影響せず問題はない。また、再生距離はすべて $z \geq 35 \text{ mm}$ を満たしているため、(2.21) 式の物体光の複素振幅分布 $U_o(x, y)$ に掛かる位相項のエイリアシングは生じない。得られた再生像を Fig. 2.10 に示す。伝搬距離 35 mm では一つの再生像が観察できる。しかし、それ以外の場合では二つの条件式のうちどちらか一方を満足しないため、その位相分布にエイリアシングが生じ、再生像が複数あらわれている。すなわち、再生距離短縮法として SFFT 法を用いる場合、本実験条件では 35 mm の単一の距離しか利用できず、調節の役目を果たすことができない。また、SFFT 法は (2.22) 式によって伝搬距離が増えるにつれて伝搬後のサンプリング間隔が大きくなる。これは伝搬計算に比例して伝搬後の面の空間分解能が低下することを示している。つまり、新たなホログラムを形成する光波の複素振幅分布の空間分解能が低下することになる。このことは再生像画質低下につながる。これらのことから SFFT 法は与える位相項に非常に厳しい制限があるため、伝搬後の面の強度分布を求める際には有効な手法であるが、新たな複素振幅分布をも求める回折伝搬計算法には不向きな手法であることを示している。

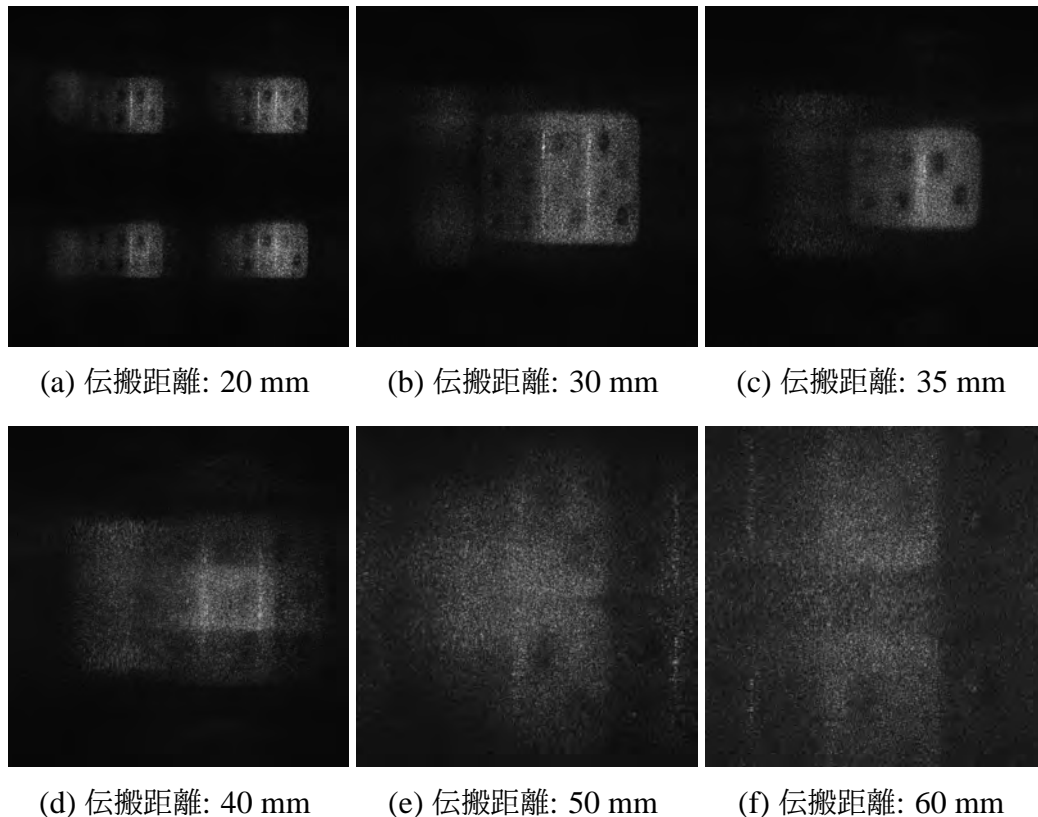


Fig. 2.10 SFFT 法を伝搬アルゴリズムに用いたときの数値再生像

2.6 再生距離短縮法を用いた光学再生実験および単眼像知覚評価実験

回折伝搬計算法と球面位相付加法を組み合わせ、提案手法の有用性を光学再生実験により実証する。Fig. 2.6 に示す光学系を用いて光学再生像を観察する。再生距離短縮法を用いずに直接再生した場合、回折伝搬計算法のみ、球面位相付加法のみ、2手法を組み合わせた場合の4通りを比較する。2.5.2項から回折伝搬計算の伝搬距離は50 mm と、2.5.3項から球面位相の曲率半径を35 mm と設定した。観察した再生像をFig. 2.11 に示す。それぞれの手法で再生像が定性的に問題なく観察できることがわかる。しかし、空間光変調器の画素構造により中央の再生像以外にも回折像があらわれている。高次回折光をより鮮明に観察するために、長時間露光したものをFig. 2.12 に示す。Fig. 2.12 に示すように、空間光変調器の画素構造によって十字方向に回折像があらわれている。しかし、Fig. 2.11 に示すように、回折像強度は所望の像に比べ十分小さいため、本研究では議論しない。

次に、各手法による再生像の再生距離を測定する。測定は、曖昧性はあるが、CCDカメラに取り付けたマニュアルフォーカスレンズの合焦位置を調節する距離メモリに

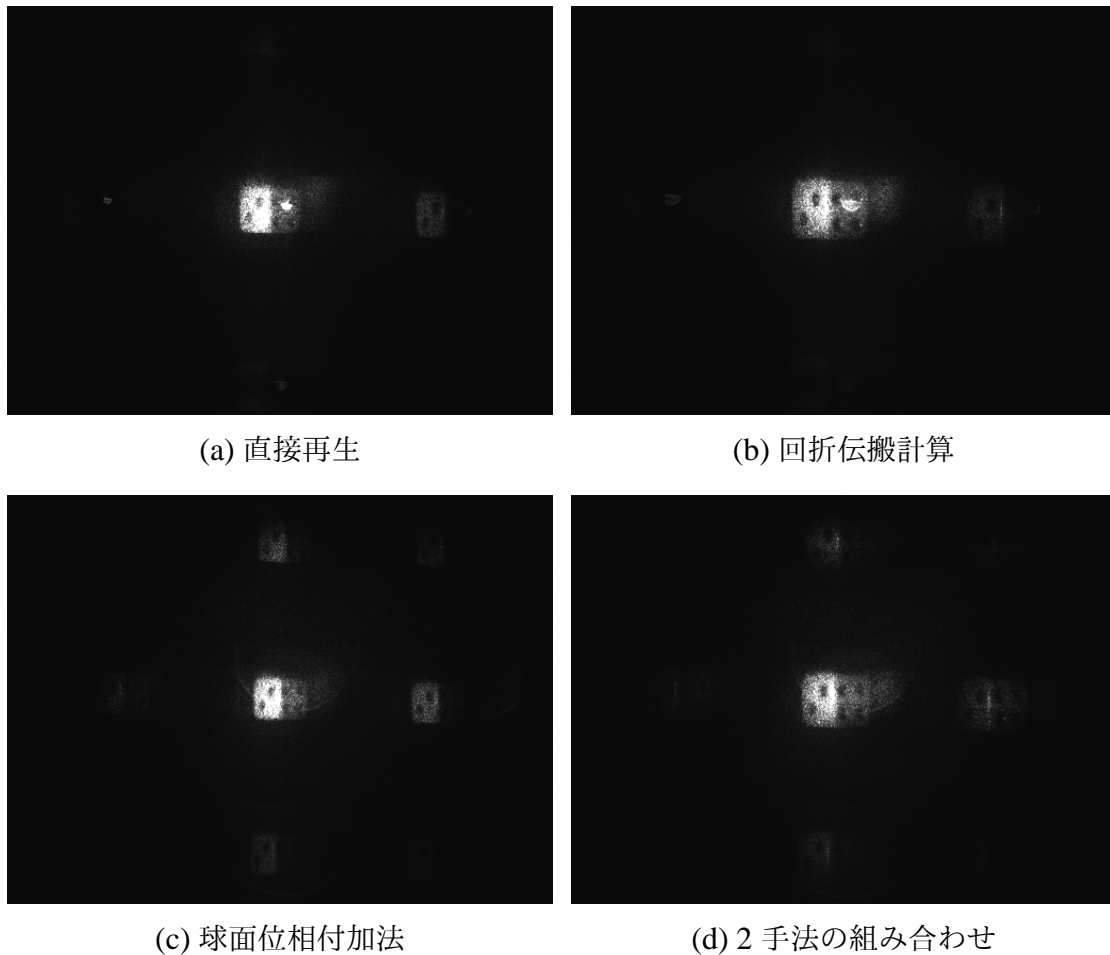


Fig. 2.11 各手法による光学再生像

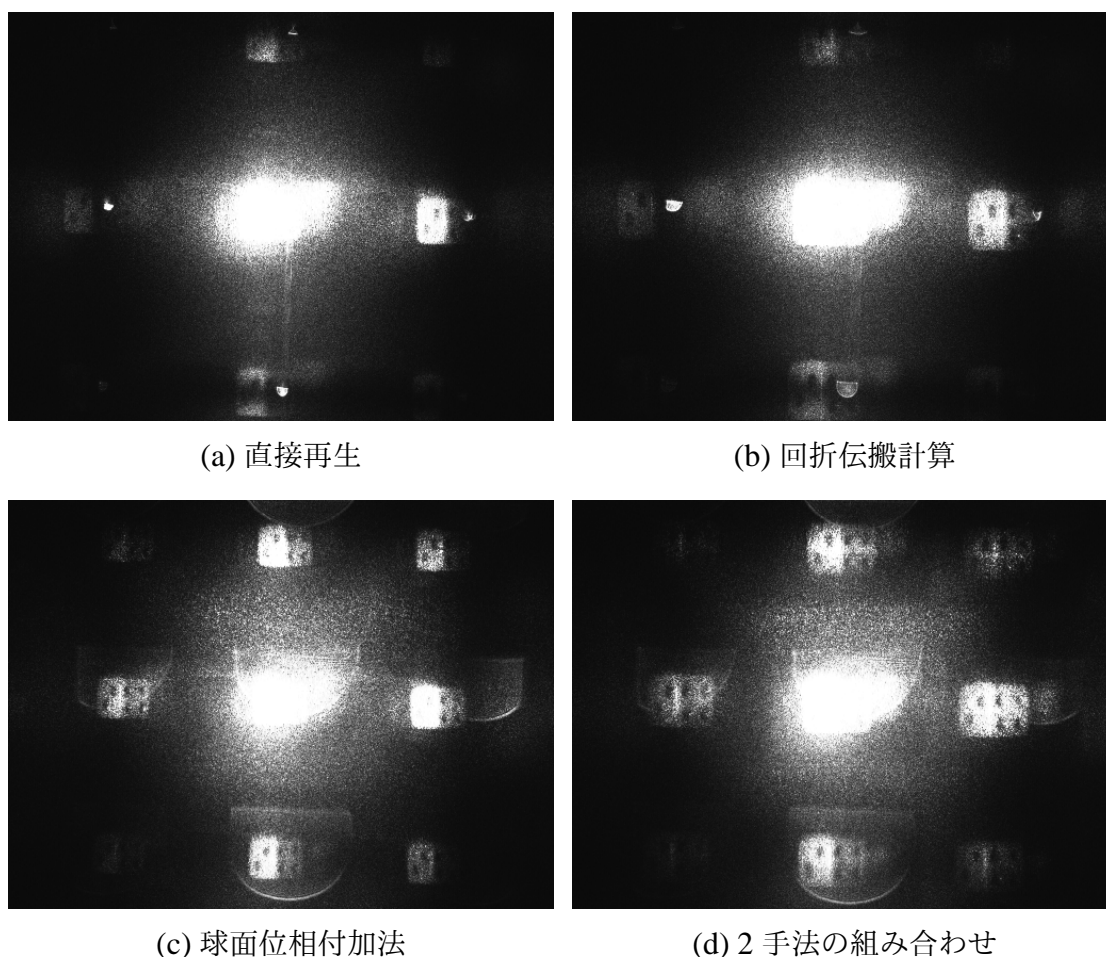


Fig. 2.12 長時間露光した各手法の光学再生像

よりおこなった。得られた再生距離とそれらの理論値を Table 2.1 に示す。Table 2.1 から、測定した再生距離はそれらの理論値との誤差がおおよそ $-6\% \sim 9\%$ で得られた。

次に、ヒトの目視による再生距離知覚評価実験をおこなう。用いた光学系を Fig. 2.13 に示す。被験者 10 人が再生距離を推定する。再生像とは別に駆動可能なターゲットを配置し、知覚する再生像の再生位置と同じ位置にターゲットを前後に移動させて再生位置を推定する。再生像とターゲットが同じ位置にあると判断したときの空間光変

Table 2.1 各手法の光学再生距離

	Experimental (mm)	Theoretical (mm)	Error (%)
Direct reconstruction	4835	4440	+8.9
Numerical propagation	3835	3515	+9.1
Addition a spherical phase	615	565	+8.8
Proposed combining method	515	547	-5.9

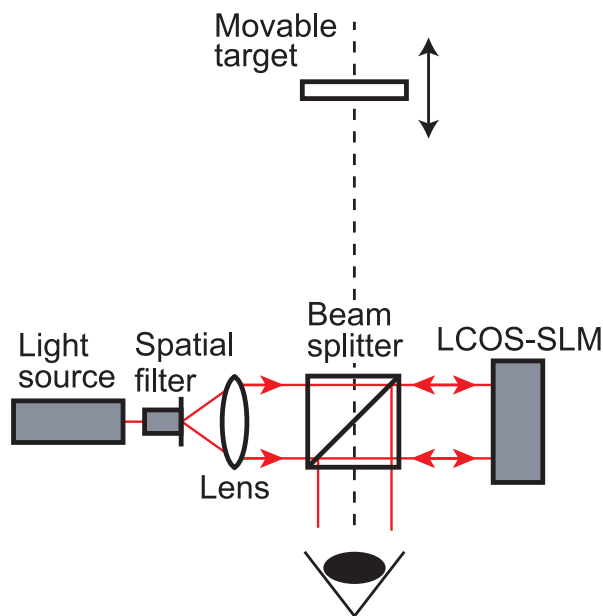


Fig. 2.13 再生像知覚評価実験光学系

調器からターゲットまでの距離を測定する。奥行き知覚は再生光学系が単眼用のシステムであるため、両眼視差はなく、運動視差によりおこなう。評価実験は再生距離が4440 mmの直接再生の場合と547 mmの2手法の組み合わせの2通りについておこなった。直接再生の場合は、被験者による推定値は1910 mmから5830 mmの範囲に分布し、平均値は4110 mm、標準偏差は1060 mmであった。2手法を組み合わせた場合は、被験者による推定値は327 mmから663 mmの範囲に分布し、平均値は531 mm、標準偏差は108 mmであった。各被験者の個々の計測結果については付録に示す。提案手法によって推定距離の標準偏差をより小さくすることができた。しかし、元々の再生距離が大きく異なるため、それが誤差に影響していることが考えられる。そこで、より厳密な比較をおこなうために、得られた距離と理論値との相対比で評価する。評価実験結果、理論値との相対比をTable 2.2に示す。Table 2.2から、知覚する再生位置の誤差を低減することができ、標準偏差や相対比の両方において提案手法が有用であることを示した。標準偏差は低減することができたが、まだ誤差は残っている。この原因は、ヒトの奥行きを知覚する最も重要な要因は両眼視差であり、本

Table 2.2 再生位置知覚実験結果と相対比

	Theoretical	Experiment	Average	Standard deviation
Direct reconstruction (mm)	4440	1910–5830	4110	1060
Ratio	–	0.43–1.31	0.93	0.24
Combination (mm)	547	327–663	531	108
Ratio	–	0.60–1.21	0.97	0.20

実験では運動視差のみによる奥行き知覚をおこなったためであると考えられる。これらの結果から実験的に本手法により知覚される奥行き位置の誤差が減少したことを実証した。

2.7 結言

本章では、デジタルホログラフィックディスプレイシステムにおける再生距離が記録と再生の間で大きく変化してしまう問題について述べ、提案した2種類の再生距離調節法の有用性を実証した。

デジタルホログラフィックディスプレイは記録に用いる撮像素子と再生に用いる空間光変調器の画素サイズの相違から、再生距離が記録時の物体-カメラ間距離と大きく異なってしまう問題がある。この問題の解決手法として、回折伝搬計算法と球面位相付加法を提案し、それぞれの手法の有効な条件について明らかにした。どちらの手法もサンプリング定理に基づく制限が存在し、それらを実験的に実証した。2手法を組み合わせることによって、再生距離は4440 mm から547 mm へとおおよそ8分の1に短縮することができ、元の240 mm の2倍近くまで調節することに成功した。これは画素サイズがおおよそ $7\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$ の空間光変調器を用いたときと同じ距離である。

さらに、再生距離調節法の有用性について検証するため、被験者10名の目視による再生位置推定実験をおこなった。被験者による再生距離の推定値の標準偏差は、提案手法によって1060 mm から108 mm まで低減し、提案手法の有用性を示した。

3 低コヒーレンスデジタルホログラム合成による高画質ホログラム生成

3.1 緒言

ホログラフィックディスプレイは真の3次元像を再生することができる。ホログラフィックディスプレイシステムでは物体情報を記録再生するためにはデジタルホログラフィによるホログラムの実験的記録が必要であるが、一般的な高コヒーレンス光源を用いたデジタルホログラフィ（以降、高コヒーレンスデジタルホログラフィ）はスペックルノイズによって再生像画質が劣化する問題がある。そこで、スペックルノイズを低減した高画質な再生像が得られる単一のホログラムの生成法として低コヒーレンスデジタルホログラム合成法を提案する⁶⁷⁾。

本章では、まず最初に低コヒーレンスデジタルホログラフィについて述べた後、提案手法であるホログラムの合成法について述べる。さらに、本手法に適用するノイズ低減手法として、しきい値処理法と最大振幅抽出法を提案し、これら2手法の詳細を述べる。最後に、数値再生により提案手法の有用性を実証する。ホログラムの記録実験について述べた後、2手法と一般的な高コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた場合との比較をおこなう。

3.2 低コヒーレンスデジタルホログラム合成法

一般的に光源が高コヒーレンスあるいは低コヒーレンスという場合、時間コヒーレンスを指す。デジタルホログラフィにおいて、光源の時間コヒーレンスの高さは一度に記録可能な奥行き方向の広さに寄与する。光源が高コヒーレンスであれば広い奥行き範囲を一度に記録でき、低コヒーレンスであれば非常に狭い範囲の情報しか記録できない。しかし、奥行き情報を広く記録することができる高コヒーレンス光源ではスペックルノイズという画質劣化の原因となる不要な干渉パターンが発生してしまう。Fig. 3.1 に示すようなマイケルソン干渉計の場合を考える。物体光と参照光により生じる干渉縞はそれぞれの光波の光路差に依存して強度分布を形成する。Fig. 3.1 では物体側を光軸方向に走査するよう描いているが、物体でも参照ミラーでもどちらを走査しても同じ現象が起きる。ここでは、物体を走査した場合について述べる。物体を走査し、その都度、2光波の光路差の異なる干渉縞を記録する。このとき、光源の時間コヒーレンスによって得られる干渉縞の強度が変化する。Fig. 3.2 に光源が高コヒーレンス光源と低コヒーレンス光源の場合について得られる干渉強度と光路差の関係について示す。Fig. 3.2 (a) に示すように高コヒーレンス光源では、平行光である参照光は光軸方向のどの位置からの物体光とでも容易に干渉縞を形成することをあらわしている。この場合、さまざまな点から散乱した光が空間上でランダムに干渉し合い、スペックルノイズが発生してしまう。これに対し、低コヒーレンス光源では、Fig. 3.2 (b)

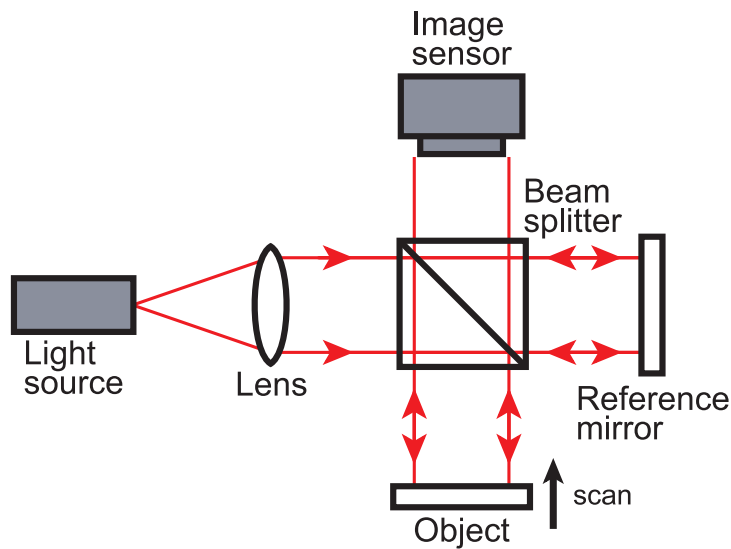


Fig. 3.1 マイケルソン干渉計

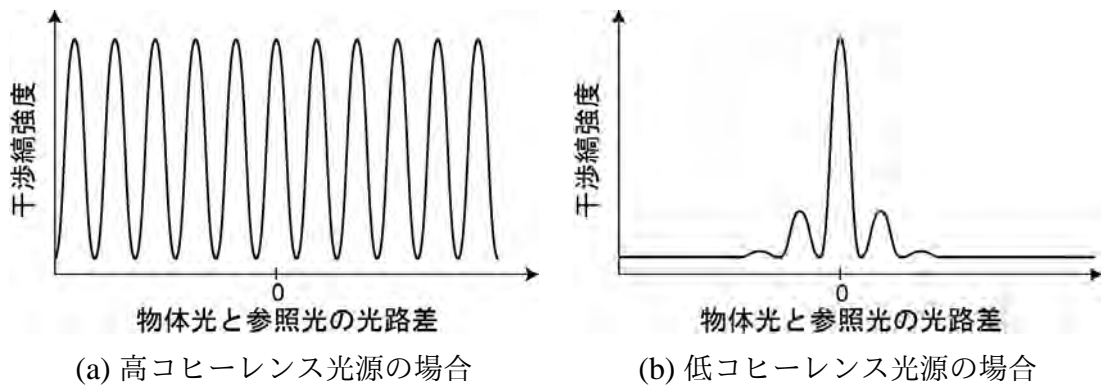


Fig. 3.2 時間コヒーレンスに対する干渉強度と光路差の関係

に示すように、光路差 0 位置付近の非常に狭い範囲でしか干渉しない。そのため、低コヒーレンスデジタルホログラフィでは余分な干渉が起きないため、スペックルノイズの発生を抑えることができる。非常に狭い範囲でしか干渉縞が得られないため、光軸方向に非常に狭い範囲の物体情報を記録することができる。このことを利用して、低コヒーレンスデジタルホログラフィは一般的に物体の 3 次元形状計測^{29,68)} や光干渉断層撮影 (OCT: Optical Coherence Tomography)⁶⁹⁻⁷¹⁾ などに用いられている。低コヒーレンスデジタルホログラフィでは、1 枚のホログラムで取得できる物体情報は非常に狭い範囲である。数 mm オーダーあるいはそれ以上の奥行きを有する物体を記録する場合、物体あるいは参照ミラーをわずかに走査していき、複数枚のホログラムを記録することにより物体全体の情報を記録することができる。干渉の範囲は光源のコヒーレンス長に依存する。1 枚のホログラムには光源のコヒーレンス長内の範囲の情報しか記録することができない。そのため、物体全体を隙間なく記録するために、

走査間隔は光源のコヒーレンス長以内とする必要がある。コヒーレンス長^{72,73)}は

$$l_c = \frac{4 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_c^2}{\Delta \lambda} \quad (3.1)$$

で与えられる。ここで、 λ_c は光源の中心波長、 $\Delta \lambda$ は光源スペクトルの半値全幅である。

次に、物体全体の情報を含むよう記録した複数枚の低コヒーレンスデジタルホログラムを合成する。ホログラム合成の概念図を Fig. 3.3 に示す。Fig. 3.3 の光学系に示すように奥行きのある物体情報を記録する。物体を走査して物体光と参照光の光路差がわずかに異なる複数のホログラムを記録し、位相シフト法によって得られる物体光の複素振幅分布を加算合成する。合成ホログラムの複素振幅分布は

$$O(x, y) = \sum_{j=1}^n \text{FT}^{-1} [\text{FT} [O_j(x, y)] \exp(i2\pi\nu_z \Delta z_j)] \quad (3.2)$$

で与えられる。ここで、 $O_j(x, y)$ は記録した個々の低コヒーレンスデジタルホログラムの複素振幅分布であり、 n は記録枚数、 ν_z は伝搬方向の空間周波数である。また、

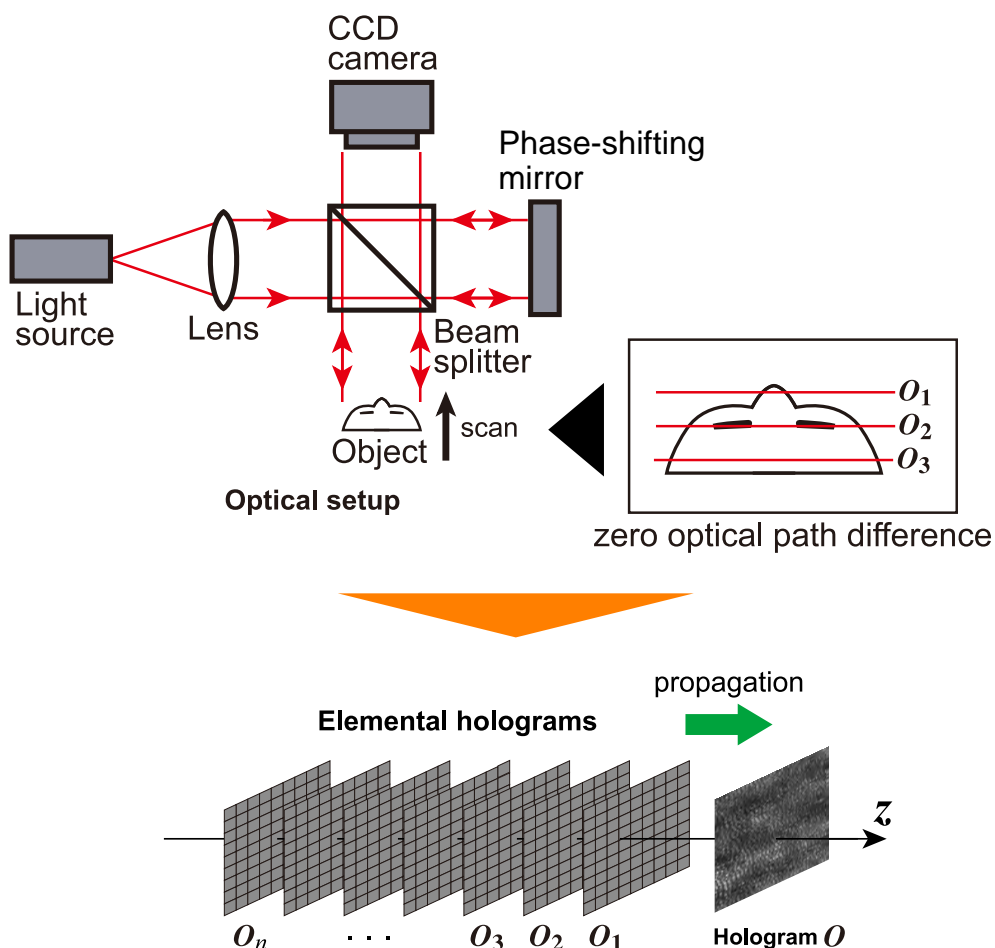


Fig. 3.3 低コヒーレンスデジタルホログラム合成の概念図

Δz_j は j 枚目のホログラムの伝搬距離であり，物体の走査距離に相当する．ホログラムのフーリエ変換に掛かる位相項は表現が異なるが (2.9) 式の $\Phi(\nu_x, \nu_y)$ に相当する．(3.2) 式は角スペクトル法により微小距離 Δz_j ごと伝搬した複素振幅分布を加算する計算である．本手法では物体側を走査するため， $O_j(x, y)$ の再生距離は全て同じである．すなわち，それらの分布をそのまま加算した場合，同じ面に全ての物体情報が再生され，奥行き情報を再生できない．(3.2) 式では元の奥行き情報を再生するために物体を走査間隔分伝搬し，加算合成をおこなっている．

3.3 ノイズ低減手法

(3.2) 式によって作製した合成ホログラム $O(x, y)$ は物体全体の情報を含む．しかし，低コヒーレンスデジタルホログラフィではスペックルノイズの発生は抑制できるが，干渉信号が弱いためそれ以外に外乱によるノイズの影響を強く受けてしまう．ノイズを含んだ各ホログラムを用い，そのまま加算合成をおこなうとそのノイズの総和も再生されてしまう．ノイズが増大すると，所望の再生像に重なってノイズの強度分布も観察してしまうことになり，ディスプレイの像として望ましくない．そのため，個々のホログラムに含まれるノイズ低減をおこなう．本研究では記録した各ホログラムに適用するノイズ低減手法として，しきい値処理法と最大振幅抽出法を提案する．本節では，これら 2 手法について述べる．

3.3.1 しきい値処理法

しきい値処理法は，一般的な画像処理の分野で用いられているしきい値処理をホログラムの再生画像に適用する手法である．各再生画像に対し，ある値をしきい値として，それ以下の画素値を 0 とする処理である．

Fig. 3.4 にしきい値処理法の概念図を示す．まず，干渉計により，わずかに奥行き位置の異なる物体情報を含むホログラム $O_k(x, y)$ を記録し，記録したホログラムを数値再生する．再生アルゴリズムは SFFT 法を用いる．個々のホログラムには外乱によるノイズが含まれるため，そのまま合成するとノイズの総和も再生されてしまう．そのため，そのまま合成すると，合成されたノイズの強度が再生像強度を上回り，再生像がノイズに隠れてしまう．これを解決するために任意のしきい値を設定し，再生画像の画素値がそのしきい値以下の場合，再生像振幅を 0 とする．外乱によるノイズは基本的に再生像強度よりも弱く，しきい値を巧く設定すればノイズのみを遮断することができる．しきい値処理後の複数の再生像をホログラム面まで SFFT 法により逆伝搬計算をおこなう．再生像を逆伝搬する際は再生面の強度分布に $[0, 2\pi)$ のランダム位相分布を付加し，キノフォーム型のホログラムを作製する． $[0, 2\pi)$ のランダム位相分布を振幅情報に与えることにより，仮想的に物体からの拡散光波を求め，ホログラム面で近似的に一様な振幅が得られるために位相ホログラムを作製することができる．以上の手順により，しきい値処理を施したホログラム面における複素振幅分布 $O'_k(x, y)$

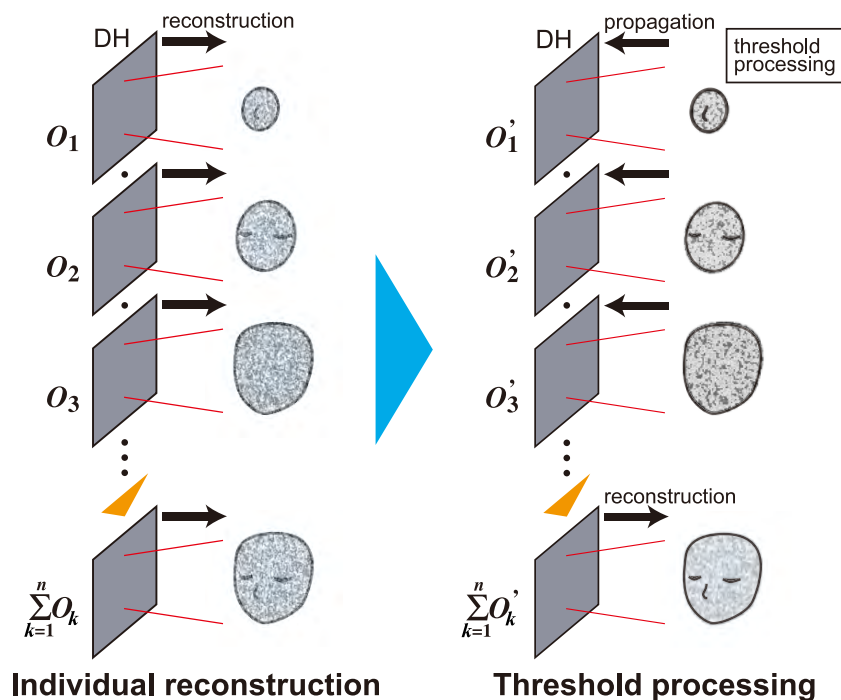


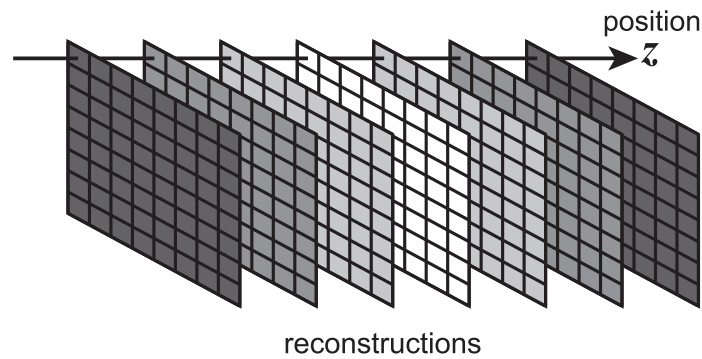
Fig. 3.4 しきい値処理法概念図

を求める。そして、新たな複素振幅分布 $O'_k(x, y)$ を用いて (3.2) 式による加算合成をおこない、ホログラムを作製する。

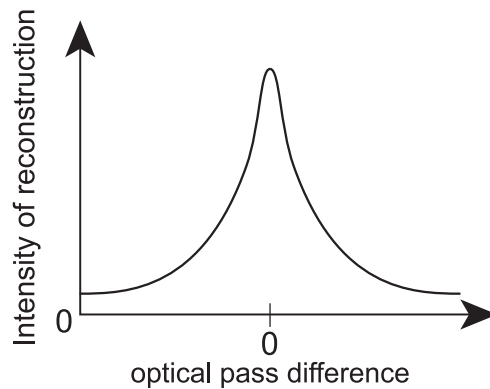
3.3.2 最大振幅抽出法

最大振幅抽出法はより低コヒーレンスデジタルホログラフィの特性を利用したノイズ低減手法である。3.2 節で低コヒーレンスデジタルホログラフィが光路差 0 位置付近でしか再生像が得られないことを述べた。ミラーどうしの低コヒーレンス干渉では得られる再生像は Fig. 3.5 (a) に示すように光路差 0 位置に近づくにつれ強度が高くなり、離れるにつれ低くなる。これらの再生像の任意の画素に注目し、横軸を物体光と参照光の光路差、縦軸を再生像振幅としてプロファイルを求めると Fig. 3.5 (b) のようなグラフを得る。このプロファイルのピークは光路差 0 位置で得られ、その位置は注目画素における記録物体の実際の位置である。光路差 0 位置は記録したホログラムの信号対雑音比が最も高くなる位置であり、この情報は外乱の影響を受けにくいといえる。

最大振幅抽出法では、この光路差 0 位置の情報のみを残し、それ以外を 0 とする。最大振幅抽出法の手順を Fig. 3.6 に示す。まず、記録したホログラムを SFFT 法により再生する。Fig. 3.6 (a) に示すように、取得した再生像に対してすべての画素に注目し、横軸を物体光と参照光の光路差、縦軸を再生像振幅としてプロファイルを求める。その際、Fig. 3.6 (b) に示すように光路差 0 位置である最大ピークのみを残し、それ以外を 0 とする。得られた新たな再生像をホログラム面まで SFFT 法により逆伝搬計算



(a) 再生像群



(b) 任意の画素位置の強度と光路差の関係

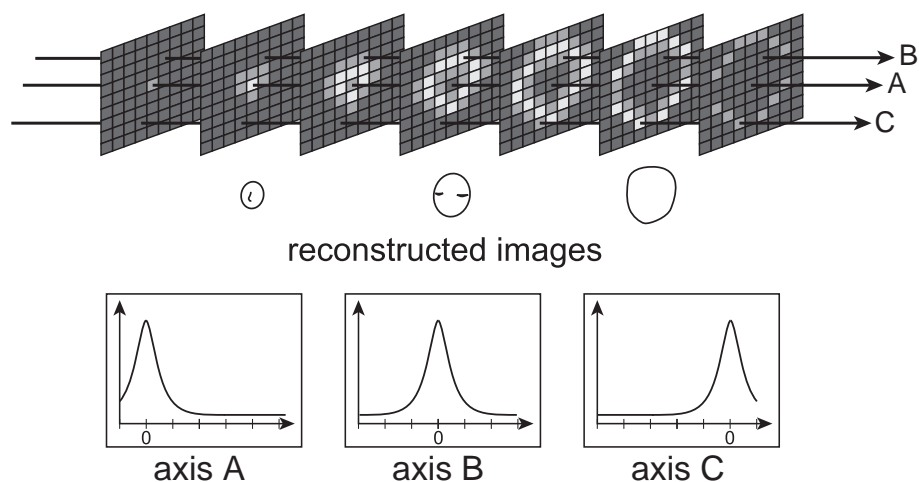
Fig. 3.5 ミラーどうしの低コヒーレンス干渉による再生像強度と光路差 0 位置

をおこない、各最大振幅のみを残した新たな再生像からホログラム面における複素振幅分布 $O'_k(x, y)$ を求める。このとき、しきい値処理法と同様、再生像に $[0, 2\pi)$ のランダム位相を付加する。新たな複素振幅分布 $O'_k(x, y)$ を用いて (3.2) 式による加算合成をおこない、ホログラムを作製する。最大振幅抽出法はしきい値処理法に比べて1枚のホログラムから得られる物体情報が非常に少ないといえるが、最も信用のできる情報のみを用いてホログラムを作製することによって再生像の高画質化を図る。

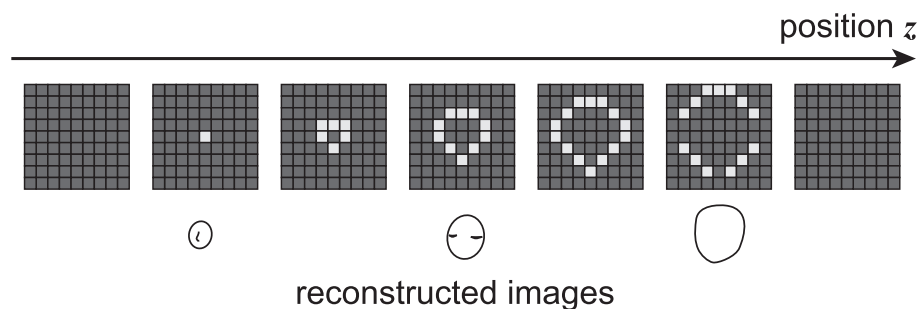
最大振幅抽出法では記録時に走査するのは物体側でなければならない。SFFT 法では伝搬距離が異なると伝搬後のサンプリング間隔が変化する。(2.22) 式を再度示すことになるが、SFFT 法による伝搬後の面のサンプリング間隔は

$$\Delta X = \frac{\lambda z}{N_x \Delta x}, \quad \Delta Y = \frac{\lambda z}{N_y \Delta y} \quad (3.3)$$

であらわされ、伝搬距離 z と比例の関係にある。各再生面のサンプリング間隔が異なると、同じ (x, y) 位置に対して z と強度の関係を求めることができず、正確な光路差 0 位置を求めることができない。前述のように、物体側を走査する場合はすべてのホログラムの再生距離は等しくなり、この問題を回避できる。



(a) 元の再生像



(b) 最大振幅抽出による新たな要素再生像

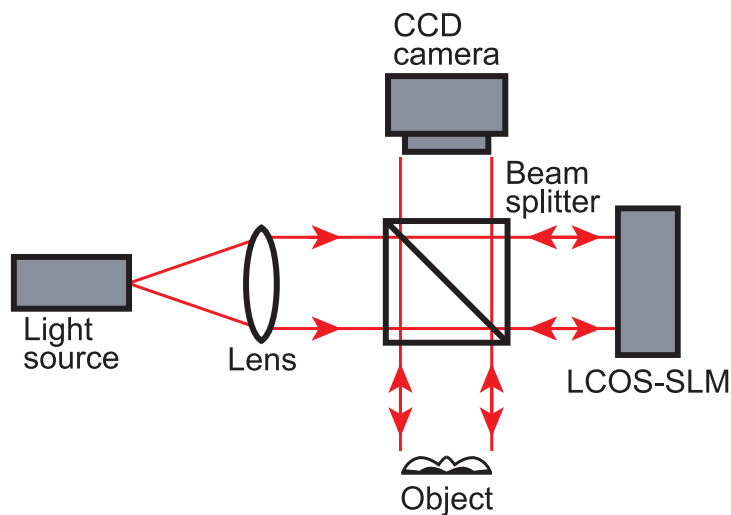
Fig. 3.6 最大振幅抽出法の手順の概念図

3.4 再生像の画質評価

本節では、提案した二つのノイズ低減手法の有効性をシミュレーションにより実証する。まず、低コヒーレンスデジタルホログラムの記録実験について述べた後、提案するホログラム生成法と高コヒーレンスデジタルホログラフィによる再生像画質を評価、比較する。

3.4.1 低コヒーレンスデジタルホログラム記録実験

低コヒーレンスデジタルホログラフィによるホログラム記録実験について述べる。記録実験光学系を Fig. 3.7 に示す。光源は中心波長 677.2 nm 、コヒーレンス長 $52.1 \mu\text{m}$ の Superluminescent Diode を用いた。CCD カメラは画素数 1024×769 、画素サイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ のものを用いた。記録物体は Fig. 3.7 に示すものを用いた。記録物体の大きさは $20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ であり、CCD カメラから 275 mm の位置に配置した。物体の走査間隔は光源のコヒーレンス長が $52.1 \mu\text{m}$ であることから往



(a) 記録実験光学系



(b) 記録物体正面



(c) 記録物体側面

Fig. 3.7 低コヒーレンスデジタルホログラム記録実験光学系と記録物体

復の光路を考慮して $10 \mu\text{m}$ とし、550 回走査させた。LCOS-SLM は画素数 792×600 、画素サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ のものを位相シフターとして用い、位相遅延量を $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の 4 種類とした。記録した 550 箇所の物体光の複素振幅分布を位相シフト法により取得し、提案手法により高画質ホログラムを作製する。ここで時分割位相シフト法を用いている理由は再生像画質を重要視したためであり、より高速な記録をおこなうためには波面分割位相シフト法を用いることにより実現可能である。ただし、再生像画質と記録時間の関係はトレードオフである。さらに、ランダムノイズの低減をおこなうために、すべてのホログラムを 6 枚ずつ記録し、加算平均をとった。ランダムノイズは時間的にランダムなものであり、記録時刻の異なるホログラムの加算平均をとることによって低減することができる。

3.4.2 しきい値処理法のしきい値決定

しきい値処理法について、しきい値を変化させたときの再生像画質の変化について明らかにする。しきい値は、しきい値処理後の要素振幅分布をそれらの最大値で規格化し、1/255 から 1 まで 1/255 ずつ変化させた。本手法は位相ホログラムを作製するものであるが、再生は複素振幅と位相の両方でおこない、その差異をみる。位相ホログラムは複素振幅分布のうち振幅を 1 と置き、位相分布をそのまま用いて再生する。

しきい値を決定するための評価指標として再生像の暗部と明部のコントラストを用いる。コントラスト C は、暗部の強度分布の平均値 $\langle I_{\text{off}} \rangle$ と明部の強度分布の平均値 $\langle I_{\text{on}} \rangle$ を用いて

$$C = \frac{\langle I_{\text{on}} \rangle - \langle I_{\text{off}} \rangle}{\langle I_{\text{on}} \rangle + \langle I_{\text{off}} \rangle} \quad (3.4)$$

とする。評価する暗部と明部の領域は Fig. 3.8 に示す領域を用いる。コントラストは値が 1 に近づくほど明暗が鮮明に再生され、再生像画質は高いといえる。

しきい値を変化させた際のコントラストを Fig. 3.9 に示す。複素振幅、位相のみの両方の場合でしきい値 17/255 以降は再生光波が全て取り除かれ、値が得られなかったために記していない。複素振幅、位相のみの両方で、しきい値が 16/255 が最も再生像画質が高く得られた。以降、このしきい値 16/255 のときの再生像を用い、他手法と比較する。



Fig. 3.8 しきい値決定のための評価領域

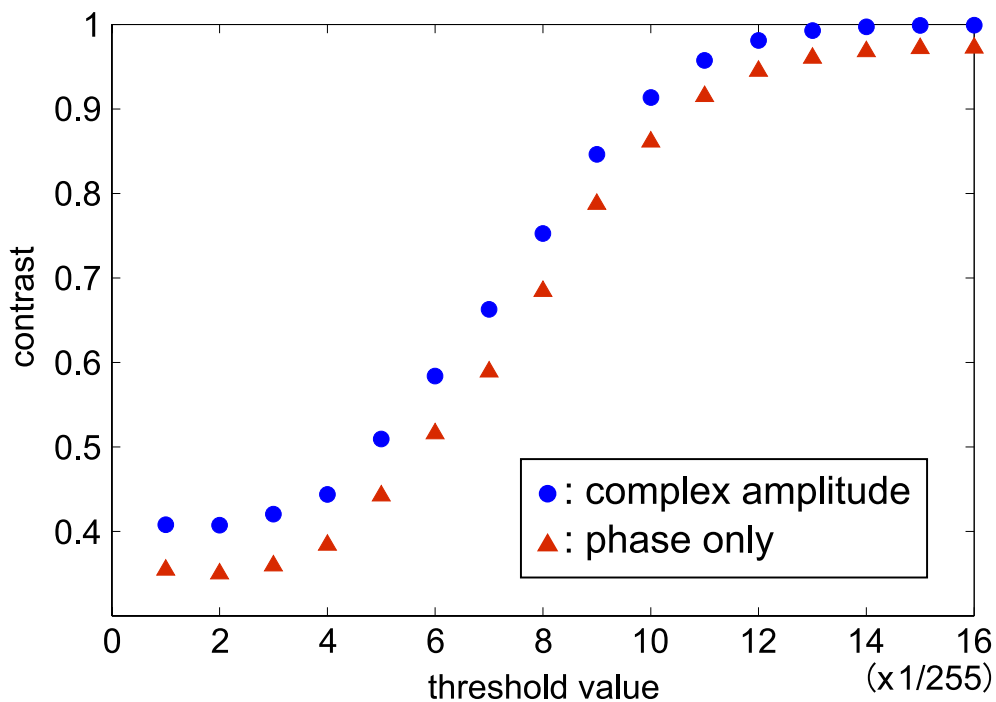


Fig. 3.9 しきい値に対するコントラストの推移

3.4.3 画質評価

しきい値処理法，最大振幅抽出法，高コヒーレンスデジタルホログラフィの3種類を比較する．高コヒーレンスデジタルホログラフィは Fig. 3.7 に示す記録光学系の光源を波長 632.8 nm の He-Ne レーザに置き換え，それ以外は同じ配置で記録した．まず，ノイズ低減手法を用いず，元の記録した低コヒーレンスデジタルホログラムに対して直接加算合成をおこなった結果を Fig. 3.10 に示す．3.3 節で再生像はノイズ低減手法なしでは観察することが困難であると述べた．これにより，再生像がノイズ

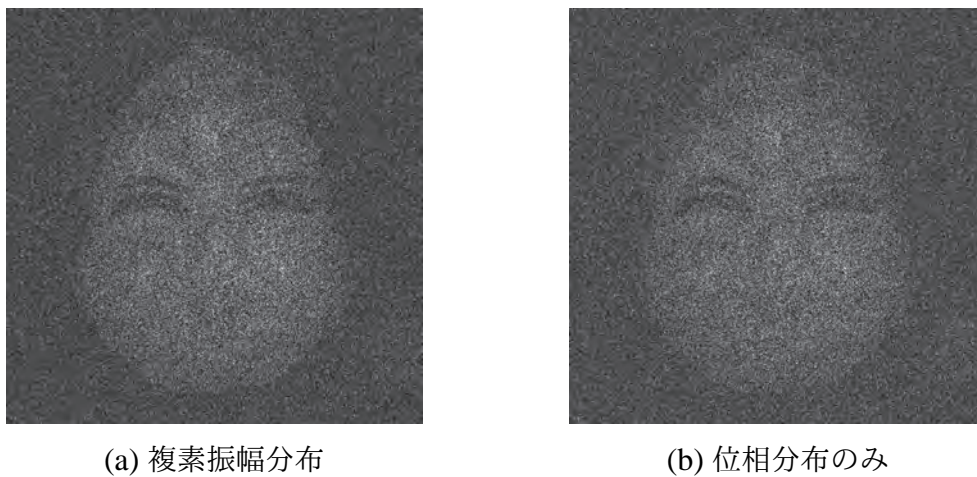


Fig. 3.10 ノイズ低減手法を用いない場合の合成ホログラムの数値再生像

の強度和に隠れてしまい観察できないことを実証した。次に、3手法の数値再生像を Fig. 3.11 から Fig. 3.13 にそれぞれ示す。定性的に高コヒーレンスデジタルホログラフィに比べて提案手法による再生像はスペックルノイズが減少していることを示している。また、位相ホログラムを再生させたものと複素振幅を用いて再生されたものが、定性的にほとんど差異なく再生できることを示した。しきい値処理法と最大振幅抽出法とでは比較は困難であり、次に再生像画質を定量評価する。

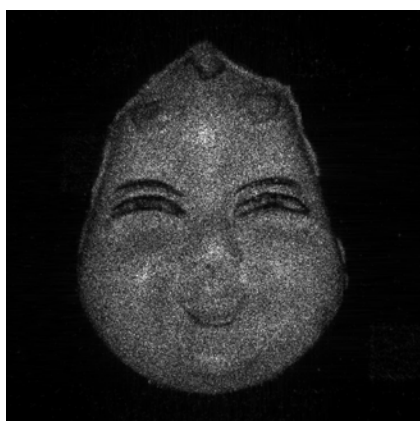
提案手法の再生像画質、すなわちスペックルノイズが低減しているかどうかを再生像振幅の分散により定量評価する。分散は

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 \quad (3.5)$$

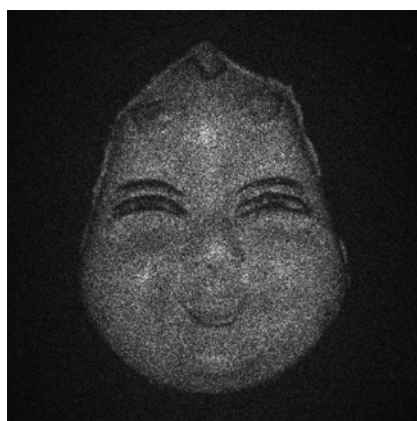
で与えられ、 X_j , \bar{X} はそれぞれ評価領域内の再生像振幅値とその平均値である。また、 N は評価領域の画素数である。評価領域は Fig. 3.14 の実線で囲んだ矩形の領域内とした。分散値が低いほど振幅のばらつきが小さく再生像画質が良いといえる。

しきい値処理、最大振幅抽出法、高コヒーレンスデジタルホログラフィの3種類の結果を Table 3.1 に示す。Table 3.1 から、高コヒーレンスデジタルホログラフィに比べ、提案手法はスペックルノイズが低減していることがわかり、提案手法の有効性が実証された。また、分散値は最大振幅抽出法が最も低く、画質が高いことがわかった。本合成手法では、不要な光波を取り除くしきい値処理法よりも、必要な光波のみを取り出す最大振幅抽出法のほうが良い結果であった。ただし、それは再生像が存在する箇所に限る。しきい値処理法では合成前の各再生面でしきい値処理を施し、物体光のような高強度で再生されるような光波のみを残し、ランダムノイズのような弱い情報を遮断している。つまり、物体の無い再生光強度の低い座標では暗くなる。それに対し、最大振幅抽出法では全ての座標における最大強度を残し、物体の無い本来暗く再生される箇所も何らかの高い値が得られることになる。

そこで、Fig. 3.15 に矩形で示す領域の分散を提案する2手法で比較する。得られた分散値を Table 3.2 に示す。分散値は最大振幅抽出法に比べてしきい値処理法のほうが低く、再生像の無い暗部はより暗く再生されているといえる。再生像のみに注目すると最大振幅抽出法がより有効であり、再生像の無い箇所に注目するとしきい値処理法のほうが有効であることがわかり、適材適所で使い分けることが効果的であるといえる。

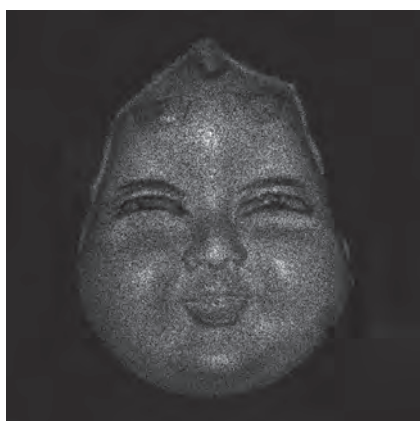


(a) 複素振幅分布



(b) 位相分布のみ

Fig. 3.11 しきい値処理法による数値再生像

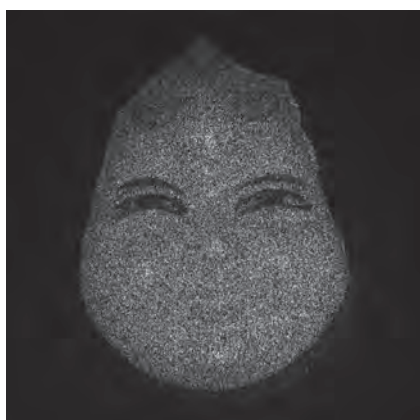


(a) 複素振幅分布



(b) 位相分布のみ

Fig. 3.12 最大振幅抽出法による数値再生像



(a) 複素振幅分布



(b) 位相分布のみ

Fig. 3.13 高コヒーレンスデジタルホログラフィによる数値再生像



Fig. 3.14 再生像画質の評価領域

Table 3.1 各手法による再生像振幅の分散値

	Complex amplitude	Phase only
Thresholding	4.8×10^{-2}	4.8×10^{-2}
Picking a peak	3.0×10^{-2}	2.9×10^{-2}
High-coherence digital holography	6.3×10^{-2}	6.2×10^{-2}

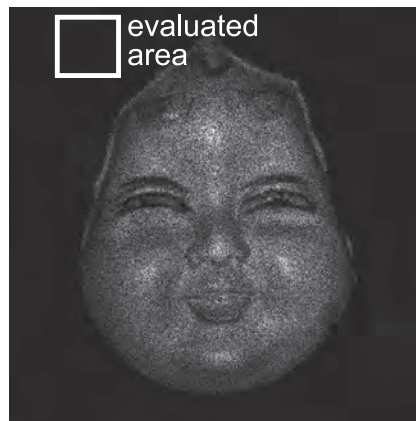


Fig. 3.15 再生像の暗部の評価領域

Table 3.2 2手法による暗部の分散値

	Complex amplitude	Phase only
Thresholding	0.6×10^{-2}	0.7×10^{-2}
Picking a peak	1.2×10^{-2}	1.6×10^{-2}

3.5 結言

スペckルノイズの発生を抑えた高画質な単一の位相ホログラムの作製を目的とし、低コヒーレンスデジタルホログラム合成法を提案した。低コヒーレンスデジタルホログラフィはスペckルノイズが高コヒーレンスデジタルホログラフィに比べて

非常に少なく、また、低コヒーレンスデジタルホログラム 1 枚に記録可能な奥行き情報が非常に狭いという特徴を有する。本手法は、これらの特徴を利用し、複数の低コヒーレンスデジタルホログラムを合成することによって高画質ホログラムを作製するものである。さらに、低コヒーレンスデジタルホログラフィでは外乱などの影響を受けやすいため、それによるノイズを低減するために二つの手法、しきい値処理法と最大振幅抽出法を提案した。

本章では、提案する低コヒーレンスデジタルホログラム合成法とそれに適用するノイズ低減手法について述べた後、提案手法と高コヒーレンスデジタルホログラフィによる再生像と比較し、提案手法の有用性を実証した。再生像振幅の分散を指標とし、再生像画質の定量的評価をおこなった。さらに、提案する二つのノイズ低減手法を比較した。再生像に注目する場合、最大振幅抽出法のほうがよりノイズ低減に成功しているといえる。それに対し、再生像の無い暗部に注目した場合は、しきい値処理法のほうが有効であることを示した。

4 球面波合成法による低コヒーレンスデジタルホログラム合成

4.1 緒言

3章では高画質ホログラム生成法として低コヒーレンスデジタルホログラム合成法（以降，面伝搬合成法）を提案した．本章では，さらなるスペckルノイズ低減を目的として，低コヒーレンスデジタルホログラムからの合成方法に球面波合成法⁷⁴⁾を提案する．球面波合成法は，面伝搬合成法と同様，低コヒーレンスデジタルホログラフィにより物体情報を含む複数のホログラムを記録する．物体情報は3.3.2項で述べた最大振幅抽出法を用いて取得し，その物体情報を形成するように球面波の複素振幅分布を合成し，ホログラムパターンを生成する．ただし，面伝搬合成法とは異なり，球面波合成法により生成したホログラムは再生に複素振幅を必要とする．

本章では，球面波合成によるホログラム生成法について述べ，3章で述べた面伝搬合成法との差異を述べる．加えて，シミュレーションにより再生像画質を定量的に評価し，提案手法の有用性を実証する．

4.2 球面波合成法によるホログラム生成

本節では，球面波合成によるホログラム生成法について述べた後，面伝搬合成法と球面波合成法との差異について述べる．

4.2.1 球面波合成法

球面波合成法では再生する物体を点光源の集まりと考える．Fig. 4.1に球面波合成法の概念図を示す．Fig. 4.1に示すように，本手法は点光源のホログラムである球面波の複素振幅分布（以降，点像ホログラム）を物体上の各点像が再生されるように重ね合わせていく．基準面 (x_s, y_s) で点像ホログラムを加算合成し，最後に任意のホログラム面 (x, y) まで伝搬計算し，ホログラムを生成する．点像ホログラムを作製するための物体の位置・振幅情報は最大振幅抽出法により取得する．最大振幅抽出法の原理については3章で述べたとおりであり，本章では詳細については省略する． z 軸方向の最大振幅値を全座標に対して求め，その最大振幅値分布は物体の振幅分布である．また，その最大値を取る位置 z の分布は物体の奥行きである．この物体情報が再生されるように奥行き位置に応じて球面波の曲率半径を変化させ，点像ホログラムを合成する．

x_s, y_s に比べ，球面波の曲率半径が十分に大きい場合，近軸近似が成り立ち，このときの点像ホログラムである球面波の複素振幅分布は，振幅分布を1とすると

$$U(x_s, y_s; f) = \exp \left\{ \frac{i\pi}{\lambda f} (x_s^2 + y_s^2) \right\} \quad (4.1)$$

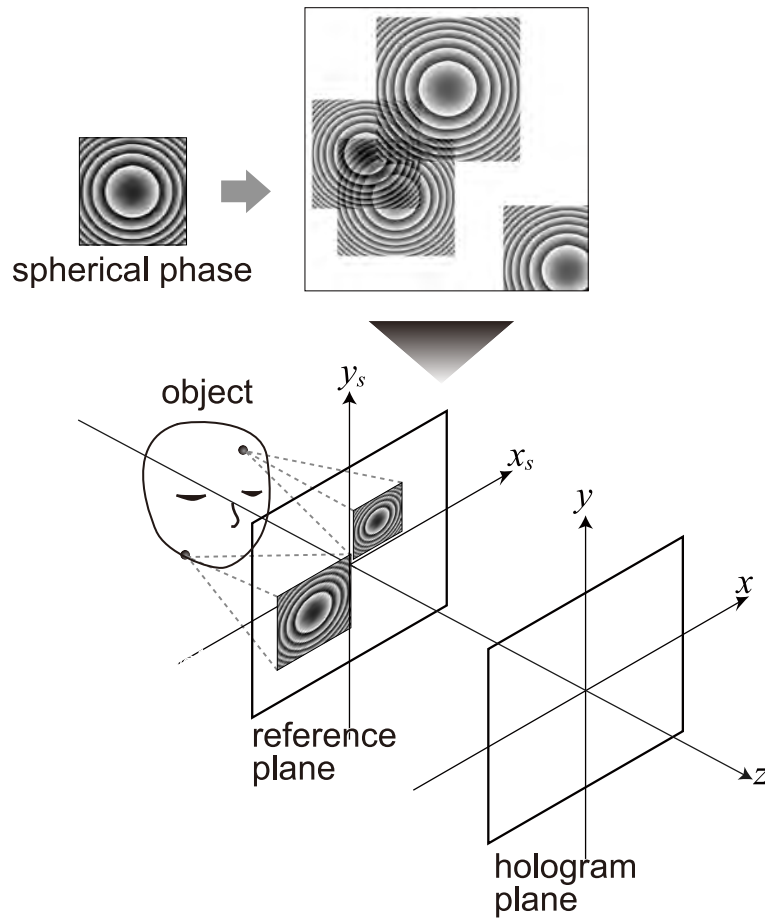


Fig. 4.1 球面波合成法の概念図

で与えられる．ここで， f は球面波の曲率半径である．この曲率半径 f は点光源の奥行き位置に応じて変化する．ここで，(4.1) 式で与えられる点像ホログラムの複素振幅分布の位相項に対してサンプリング条件を考える．デジタルデータでは位相分布は $0 \sim 2\pi$ で折り畳まれ，表現できる位相変化は隣接画素間で最大 π である．このことから，(4.1) 式の位相項 $\phi(x_s, y_s)$ のサンプリング条件は

$$\Delta x_s \left| \frac{\partial \phi(x_s, y_s)}{\partial x_s} \right|_{\max} \leq \pi \quad (4.2)$$

となる．ここで， Δx_s は x_s 方向の画素サイズである．微分演算をおこない，(4.2) 式は

$$\Delta x_s \frac{2\pi x_s}{\lambda f} \leq \pi \quad (4.3)$$

となる．(4.3) 式を x_s について解くと

$$x_s \leq \frac{\lambda f}{2\Delta x_s} \quad (4.4)$$

となる。この範囲を越える球面波の領域は所望の位置に点像を再生できず、再生面でノイズとなってしまふ。そのため、これを満足する x_s の範囲、つまりサンプリング条件を満足する範囲のみを用いるため、開口を用いて帯域制限をする。開口を設けた球面波の複素振幅分布 $U(x_s, y_s; f)$ を用い、基準面における合成した複素振幅分布 $H(x_s, y_s)$ は

$$H(x_s, y_s) = \sum_{x_i=1-\frac{N_x}{2}}^{\frac{N_x}{2}} \sum_{y_i=1-\frac{N_y}{2}}^{\frac{N_y}{2}} A(x_i, y_i) U(x_s + x_i, y_s + y_i; f) \quad (4.5)$$

であらわされる。最終的に、任意のホログラム面まで $H(x_s, y_s)$ を伝搬することによってホログラムを作製する。伝搬計算は角スペクトル法を用い、合成ホログラム $H_z(x, y)$ は

$$H_z(x, y) = \text{FT}^{-1} [\text{FT} [H(x_s, y_s)] \exp(i2\pi\nu_z z)] \quad (4.6)$$

となる。ここで、 z は基準面からホログラム面までの距離であり、任意に設定する。以上の手順によりホログラムを生成する。

4.2.2 面伝搬合成法との相違

提案した面伝搬合成法と球面波合成法の二つのホログラム生成法は数式上では酷似している。面伝搬合成法によるホログラムは (3.2) 式を再度示すが、

$$O(x, y) = \sum_{k=1}^n \text{FT}^{-1} [\text{FT} [O_k(x, y)] \exp(i2\pi\nu_z \Delta z_k)] \quad (4.7)$$

で与えられる。それに対し、球面波合成法によるホログラムは (4.6) 式で与えられ、これら二つの式が酷似していることがわかる。この二つの式の大きな相違点は球面波合成法の点像ホログラムに開口を設ける点である。4.2.1 項で述べたように、球面波の複素振幅分布にはエイリアシング誤差が生じる。エイリアシング誤差が生じた領域は再生面において点像を形成せず、ノイズとなる。球面波合成法では、開口によりこの各点像ホログラムのエイリアシング誤差が再生像に及ぼすノイズを除去することができる。そのため、面伝搬合成法に比べ、不要な干渉の要因を取り除くことができ、画質向上に繋がる。

4.3 再生像の画質評価

3.4.1 項で記録した低コヒーレンスデジタルホログラムを用い、面伝搬合成法と球面波合成法の再生像画質を比較する。記録した低コヒーレンスデジタルホログラムから最大振幅抽出法によって得られた振幅分布と奥行き分布を Fig. 4.2 に示す。この分布が再生されるように球面波の曲率半径を変化させ、点像ホログラムを合成する。また、面伝搬合成法は再生像画質の高い最大振幅抽出法の結果を用いた。

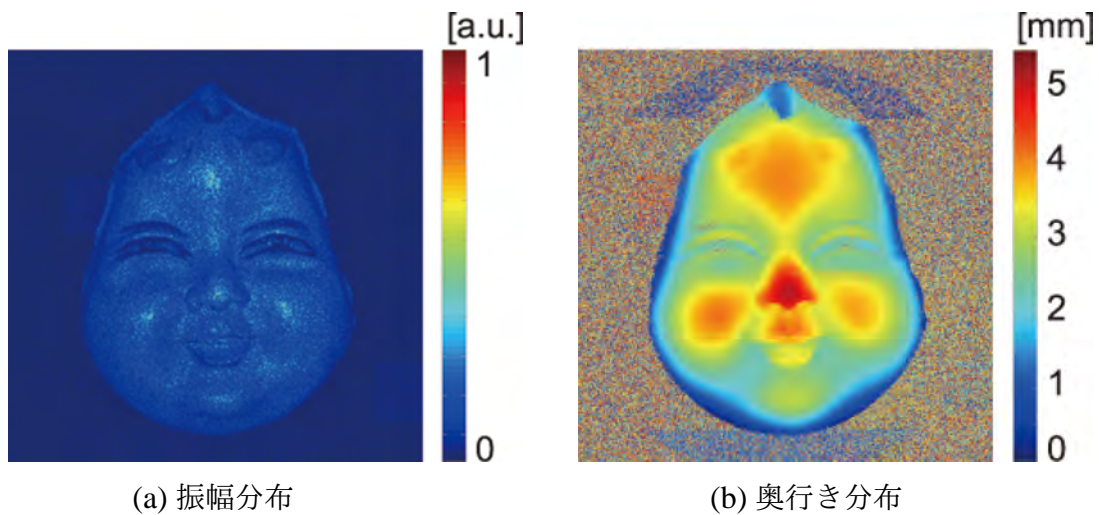


Fig. 4.2 最大振幅抽出法により取得した物体振幅と位置情報

面伝搬合成法と球面波合成法の数値再生像を Fig. 4.3 に示す．加えて，それぞれの再生像の 3D プロファイルを示す Fig. 4.4 に示す．Fig. 4.3 と Fig. 4.4 から，定性的には面伝搬合成法に比べて球面波合成法の再生像はスペckルノイズが低減していることがわかる．このことから，球面波合成法によりスペckルノイズのさらなる低減に成功したことを示した．次に，このスペckルノイズ低減を分散を用いて定量的に評価する．得られた面伝搬合成法と球面波合成法の再生像の分散を Table 4.1 に示す．球面波

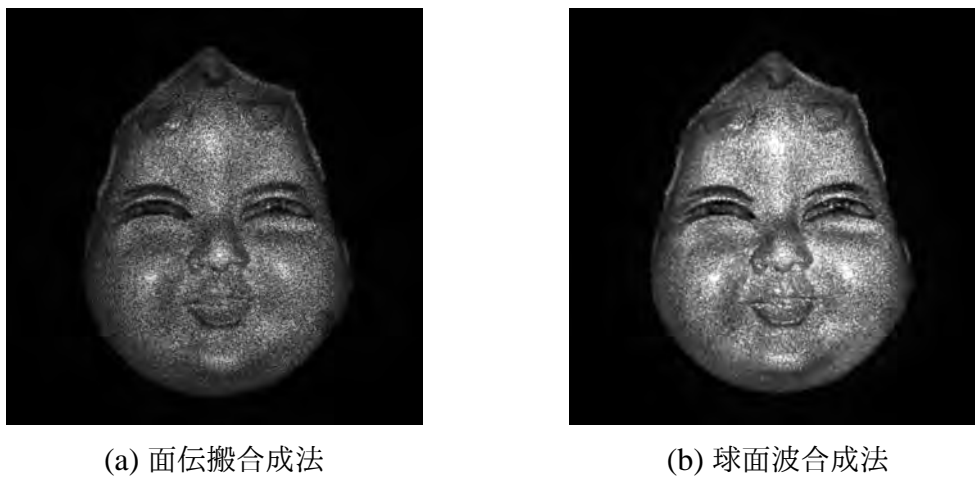
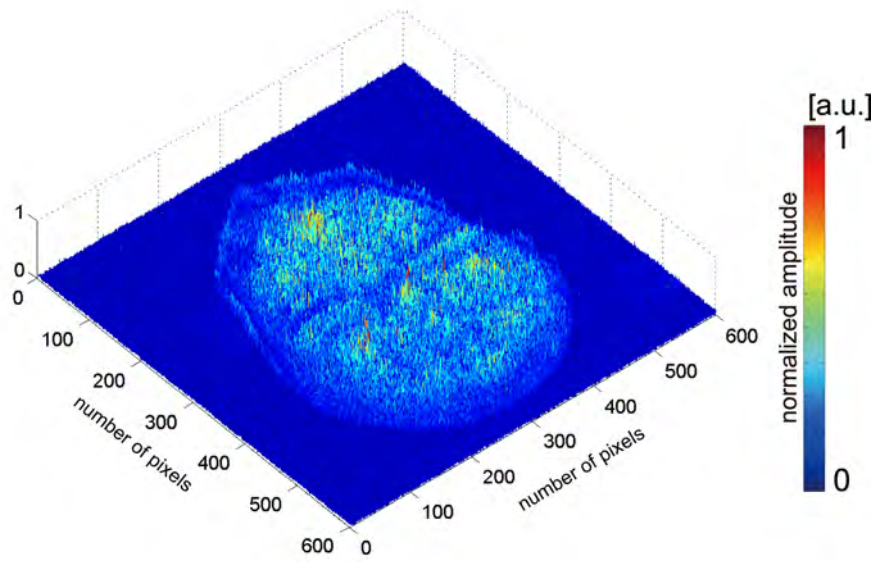


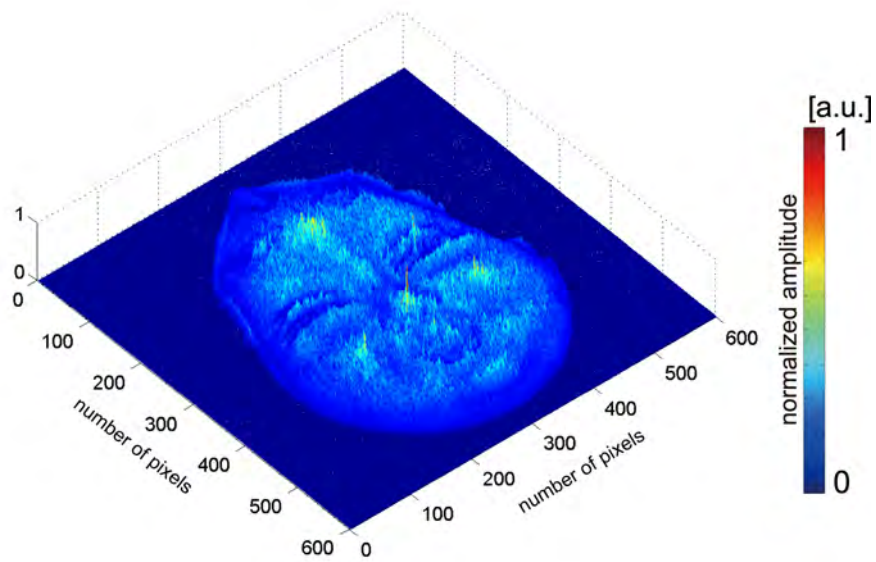
Fig. 4.3 各手法の数値再生像

Table 4.1 各再生像振幅の分散値

Propagated field synthesis	Spherical wave synthesis
3.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}



(a) 面伝搬合成法



(b) 球面波合成法

Fig. 4.4 各手法の数値再生像の 3D プロファイル

合成法の分散値は面伝搬合成法に比べて低減していることから、本手法の有効性を実証した。

4.4 開口の大きさと再生像画質の関係

本節では、点像ホログラムに与える開口の大きさと再生像画質の関係について明らかにする。

前節で示した球面波合成法の結果は、(4.4) 式のサンプリング条件を満たす最大の開口の大きさである

$$x_s = \frac{\lambda f}{2\Delta x_s} \quad (4.8)$$

を用いて作製した。開口の大きさと点広がりとは反比例の関係にあるが、一般的に開口が小さい場合、像にぼけが生じるため、再生像画質は低下する。しかし、スペックルノイズに関しては、開口を小さくすることによって輝点が広範囲に拡散するため、これによりスペックルノイズは低減する。そこで、与える開口の大きさと再生像の分散値との関係を明らかにする。

(4.8) 式で与えられる最大の開口の大きさに対する割合を R とし、開口の大きさ

$$d_w = \frac{\lambda f}{2\Delta x_s} \frac{R}{100} \quad (4.9)$$

を用い、 R を 10 % から 100 % まで 10 % 間隔で変化させた。開口の大きさを変化させたときに得られた分散を Fig. 4.5 に示す。分散は開口の大きさを小さくするにつれ、低減していることがわかる。これは上述したようにスペックルノイズの輝点が拡散したことを示している。開口の大きさを変化させたときのいくつかの再生像を Fig. 4.6

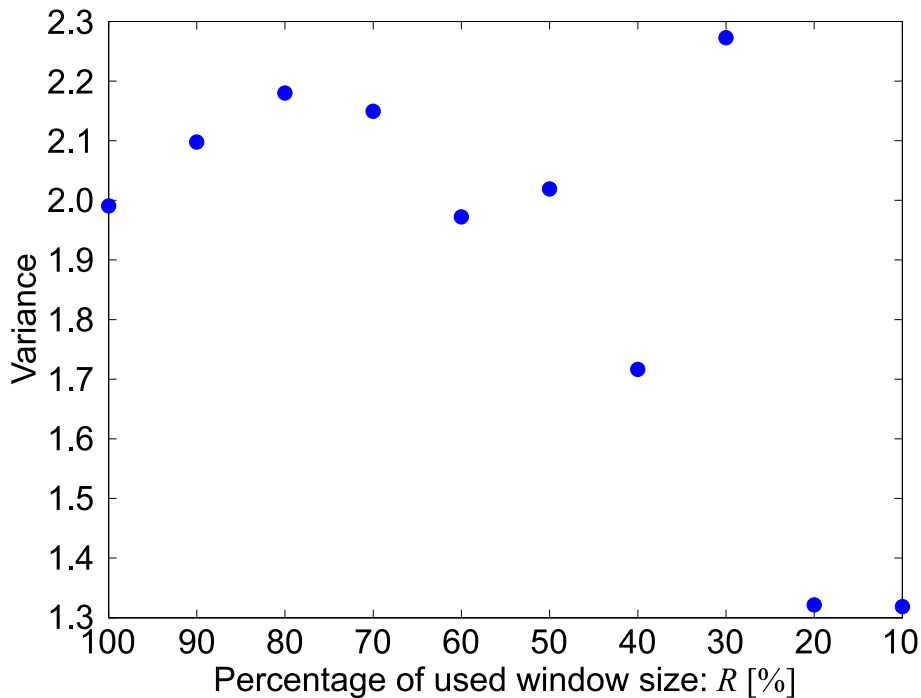


Fig. 4.5 開口の大きさと分散の関係

に示す。全ての再生像は付録に示す。Fig. 4.5 では、 $R = 10\%$ のときに分散が最も低く得られているものの、Fig. 4.6 (a), (b), (c) の再生像に比べ、Fig. 4.6 (d) の再生像は著しく不鮮明な像が得られている。これは再生する点像が過度に広がったためであり、与える開口が必要十分な大きさではなかったといえる。

次に、点分解能に注目する。Fig. 4.7 に示す二つの点像を用いてから作製した点像ホログラムを合成し、与える開口の大きさを変化させたときの再生した点像の分解能について調査した。二つの点像は1画素おきに配置し、二つの点像の奥行きは同じとした。開口の大きさを変化させたときの点像とそれらの水平方向の強度断面図をそれぞれ Fig. 4.8, Fig. 4.9 に示す。これらの結果は、開口が大きくなるにつれ、点を分解できなくなっていくことを示している。Fig. 4.9 から、本手法では $R = 70\%$ までの点像が分解できていることがわかり、それ未満の減少量 R では分解不能であることがわかる。しかしながら、Fig. 4.6 (c) に示す $R = 40\%$ のときの再生像は定性的には鮮明な像が得られている。以上のことから、状況に応じて分散と点分解能の両面から開口の大きさ調節することによって適切な再生像画質を選択することができると考えられる。



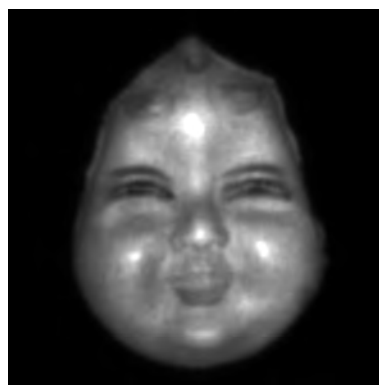
(a) $R = 90\%$



(b) $R = 70\%$



(c) $R = 40\%$



(d) $R = 10\%$

Fig. 4.6 開口の大きさを変化させたときの再生像の一部

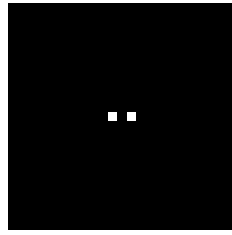


Fig. 4.7 点像物体

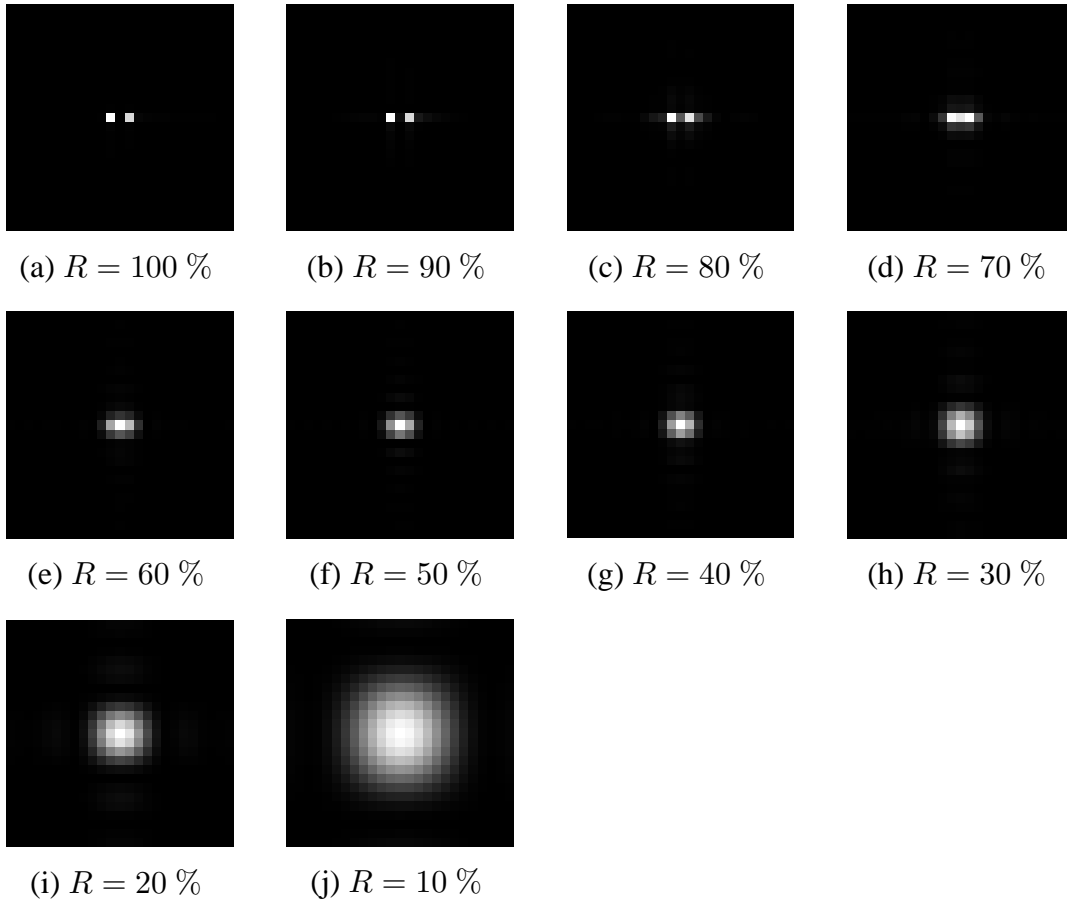


Fig. 4.8 開口の大きさを変化させたときの点分解能

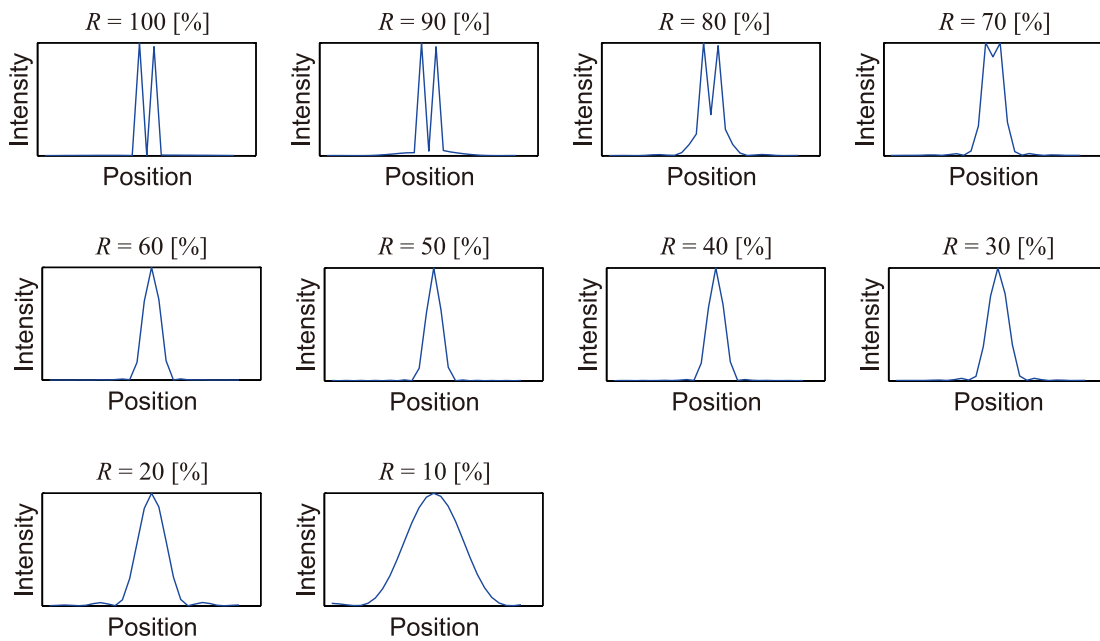


Fig. 4.9 二つの点像の水平方向強度断面図

4.5 結言

低コヒーレンスデジタルホログラム合成法の面伝搬合成法に対し、さらなるスペックルノイズの低減が可能なホログラム生成法として球面波合成法を提案した。本手法は再生する物体を点光源の集合と考え、それらからの発散球面波の複素振幅分布である点像ホログラムを加算合成することによってホログラムパターンを生成するものである。面伝搬合成法に比べ、本手法は点像ホログラムに適切な開口を設けることによって再生面における不要な光波の発生を抑えることにより、不要な干渉、すなわちスペックルノイズを低減することができる。

本章では、面伝搬合成法と球面波合成法について比較し、本手法の有効性を実証した。面伝搬合成法に比べ、球面波合成法は評価指標である分散が減少し、画質向上に成功した。さらに、点像ホログラムに与える開口の大きさを変化させ、そのときの再生像画質との関係を明らかにした。より小さな開口を用いると、再生する点像が広がることによってスペックルノイズを低減することができる。しかしながら、過度に小さな開口を設けた場合は、再生する各点像が広がり不鮮明な再生像となる。分散による評価だけでは適切な開口の大きさを選択することはできないことがわかり、分散と点分解能との相互の評価によって状況に適した再生像画質が選択することができることを示した。

5 総括

本論文では、デジタルホログラフィックディスプレイのデバイス間で生じる問題、またはホログラフィ技術そのものに生じる問題に注目し、それぞれに対して信号処理による計算のみを用いて解決・低減する手法を提案し、その成果を実証した。

総括として、本論文で得られた研究成果と知見を以下に挙げる。

- 再生距離調節法の提案，その有用性の数値的確認と実験的実証。
- 再生距離を数 m から数百 mm まで短縮したことによる運動視差の確保と，被験者 10 名の目視による運動視差の確保により知覚位置の誤差減少の実証。
- 再生距離調節法により，ホログラフィックディスプレイの再生距離はおおよそ 8 分の 1 倍まで縮小可能．このとき，空間光変調器の画素サイズは $2\sqrt{2}$ 分の 1 倍に相当。
- 低コヒーレンスデジタルホログラム合成による高画質ホログラム作製手法である面伝搬合成法の提案と数値計算による性能の確認。
- 2 種類のノイズ低減手法の提案とその性能評価．従来の高コヒーレンスデジタルホログラフィと比較して，分散値は 3 分の 2 から半分程度まで低減し，スペckルノイズ低減の有効性の数値計算による確認。
- 低コヒーレンスデジタルホログラム合成のための球面波合成法の提案とその性能の実証．面伝搬合成法による再生像に比べ，分散値が 3 分の 2 に低減し，スペckルノイズ低減の有効性の数値計算による確認。
- 球面波合成法において，開口サイズを変化したときの点分解能と再生像画質の関係を実証．点分解能，再生像画質の多面による評価から状況に応じた画質の選択方法の示唆。

デジタルホログラフィックディスプレイ実現のために，記録-再生デバイス間の問題解決と単一のホログラムのスペckルノイズ低減に成功したことを示した．再生距離調節法による視差の確保により，ヒトの立体知覚の精度向上を達成し，立体ディスプレイとしての実用性，立体感の向上を実現した．低コヒーレンスデジタルホログラム合成法により，ホログラム記録に含まれるスペckルノイズは大幅に削減することができ，高画質化を実現した．本研究成果により，デジタルホログラフィックディスプレイの実現に一步近づいたといえる。

本研究で取り挙げた問題点は，デジタルホログラフィックディスプレイの実現のために解決すべき課題のすべてではないが，本研究成果は，デジタルホログラフィックディスプレイの実現に貢献し得る成果である．今後，その他の課題を解決していくことによって，デジタルホログラフィックディスプレイの実現が期待できる。

謝辞

本学位論文は、和歌山大学大学院システム工学研究科情報フォトニクス研究室において、指導教員である野村孝徳教授の指導の下におこなった研究をまとめたものである。日頃からの熱心な研究指導，研究者としての思想の教示，本学位論文の執筆に至るまで，終始，貴重なご指導，ご鞭撻を賜りました本学システム工学部野村孝徳教授に深く感謝の意をあらわすとともに，心から厚く御礼申し上げます。

本学システム工学部沼田卓久教授には，研究報告会や研究討論を通して，研究に関する熱心なご指導，ご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

本学産学連携・教育支援センター似内映之准教授には，特に学部4年から博士前期課程の間，実験に必要なレンズやステージなどの素子に関してご指導，ご助言を賜り，ここに深く御礼申し上げます。

本学システム工学部最田裕介助教には，本学位論文執筆にあたり，貴重なご意見，ご指摘を賜り，ここに深く御礼申し上げます。

本学システム工学部土谷茂樹教授に，本学位論文の副査をご快諾くださり，審査をしてくださいましたことを心より感謝いたします。

同じく，本学システム工学部松本正行教授に，本学位論文の副査をご快諾くださり，審査をしてくださいましたことを心より感謝いたします。

博士後期課程2年次に，研究留学を快く受け入れてくださり，研究に関する熱心なご指導，ご鞭撻を賜り，また，海外経験の浅い小生に対して公私とも多岐にわたりご支援賜りました Universitat Jaume I (Spain) Associate Professor: Enrique Tajahuerce Romera 先生に深く感謝いたします。

同じく，研究留学を快く受け入れてくださり，研究に関する熱心なご指導，ご鞭撻を賜りました Universitat Jaume I (Spain) Professor: Jesús Lancis Suez 先生に深く感謝いたします。

同じく留学時，実験に関するご指導，ご助言を賜り，また，公私にわたりご支援賜りました Universitat Jaume I (Spain) Assistant Professor: Lluís Martínez León 先生に深く感謝いたします。

Institute of new imaging technologies (INIT) Universitat Jaume I のメンバーの皆様と留学中に会った全ての方々に，人生の財産として非常に有益な留學生活を経験させていただきましたことを，ここに深く御礼申し上げます。

学部1年生から博士前期課程・後期課程と9年間もの大学生活をともに過ごし，研究室でも良き友，良きライバルとして互いに切磋琢磨しあった博士後期課程3年生の井邊真俊氏に厚く御礼申し上げます。

研究室に配属してからの6年間，お世話になった情報フォトニクス研究室，ならびに光波テクノロジー研究室の皆様にご深く感謝いたします。

博士後期課程まで大学に通わせてくださり，長きにわたり激励して下さった両親，

ならびに、応援してくれた姉弟にこの場を借りて感謝の意を表します。

最後に、今まで多岐にわたりご支援，ご協力賜りました全ての方々に御礼申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- 1) J. Geng, “Three-dimensional display technologies,” *Adv. Opt. Photon.* **5**, 456–535 (2013).
- 2) Y. Takaki and N. Nago, “Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display,” *Opt. Express* **18**, 8824–8835 (2010).
- 3) K.-H. Lee, Y. Park, H. Lee, S. K. Yoon, and S.-K. Kim, “Crosstalk reduction in auto-stereoscopic projection 3D display system,” *Opt. Express* **20**, 19757–19768 (2012).
- 4) K. Mashitani, G. Hamagishi, M. Higashino, T. Ando, S. Takemoto, “Step barrier system multiview glassless 3D display,” *Proc. SPIE* **5291**, 265–272 (2014).
- 5) A. C. Traub, “Stereoscopic display using varifocal mirror oscillations,” *Appl. Opt.* **6**, 1085–1087 (1967).
- 6) Y. Igarashi, H. Murata, and M. Ueda, “3-D display system using a computer generated integral photograph,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **17**, 1683–1684 (1978).
- 7) D. L. MacFarlane, “Volumetric three-dimensional display,” *Appl. Opt.* **33**, 7453–7457 (1994).
- 8) Y. Maeda, D. Miyazaki, and T. Mukai, “Volumetric display using a rotating prism sheet as an optical image scanner,” *Appl. Opt.* **52**, A182–A187 (2013).
- 9) H. Hoshino, F. Okano, H. Isono, and I. Yuyama, “Analysis of resolution limitation of integral photography,” *J. Opt. Soc. Am. A* **15**, 2059–2065 (1998).
- 10) X. Xiao, B. Javidi, M. Martinez-Corral, and A. Stern, “Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications,” *Appl. Opt.* **52**, 546–560 (2013).
- 11) S. Reichelt, R. Häussler, N. Leister, G. Fütterer, 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. (INTECH, 2012), Chap. 29.
- 12) D. Gabor, “A new microscopic principle,” *Nature* **161**, 777–778 (1948).
- 13) 村田和美, “ホログラフィ入門,” 朝倉書店 (1976).
- 14) 久保田敏弘, “ホログラフィ入門—原理と実際—,” 朝倉書店 (1995).
- 15) M. L. Huebschman, B. Munjuluri, and H. R. Garner, “Dynamic holographic 3-D image projection,” *Opt. Express* **11**, 437–445 (2003).
- 16) J. W. Goodman and R. W. Lawrence, “Digital image formation from electronically detected holograms,” *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77–79 (1967).
- 17) O. Matoba, T. J. Naughton, Y. Frauel, N. Bertaux, and B. Javidi, “Real-time three-dimensional object reconstruction by use of a phase-encoded digital hologram,” *Appl. Opt.* **41**, 6187–6192 (2002).
- 18) J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park, and B. Lee, “Wide viewing angle dynamic holo-

- graphic stereogram with a curved array of spatial light modulators,” *Opt. Express* **16**, 12372–12386 (2008).
- 19) N. T. Shaked, B. Katz, and J. Rosen, “Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint projection based methods,” *Appl. Opt.* **48**, H120–H136 (2009).
 - 20) P.-A. Blanche, A. Bablumian, R. Voorakaranam, C. Christenson, W. Lin, T. Gu, D. Flores, P. Wang, W.-Y. Hsieh, M. Kathaperumal, B. Rachwal, O. Siddiqui, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto, and N. Peyghambarian, “Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer,” *Nature* **468**, 80–83 (2010).
 - 21) M. Paturzo, P. Memmolo, A. Finizio, R. Näsänen, T. J. Naughton, and P. Ferraro, “Synthesis and display of dynamic holographic 3D scenes with real-world objects,” *Opt. Express* **18**, 8806–8815 (2010).
 - 22) T. Kozacki, “On resolution and viewing of holographic image generated by 3D holographic display,” *Opt. Express* **18**, 27118–27129 (2010).
 - 23) K. Matsushima, Y. Arima, and S. Nakahara, “Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects,” *Appl. Opt.* **50**, H278–H284 (2011).
 - 24) J.-Y. Son, B.-R. Lee, O. O. Chernyshov, K.-A. Moon, and H. Lee, “Holographic display based on a spatial DMD array,” *Opt. Lett.* **38**, 3173–3176 (2013).
 - 25) V. Mico, Z. Zalevsky, and J. Garcia, “Superresolution optical system by common-path interferometry,” *Opt. Express* **14**, 5168–5177 (2006).
 - 26) B. Javidi and T. Nomura, “Securing information by use of digital holography,” *Opt. Lett.* **25**, 28–30 (2000).
 - 27) E. Tajahuerce and B. Javidi, “Encrypting three-dimensional information with digital holography,” *Appl. Opt.* **39**, 6595–6601 (2000).
 - 28) T. Nomura, E. Nitani, T. Numata, and B. Javidi, “Design of input phase mask for the space bandwidth of the optical encryption system,” *Opt. Eng.* **45**, 017006 (5 pages) (2006).
 - 29) G. Pedrini and H. J. Tiziani, “Short-coherence digital microscopy by use of a lensless holographic imaging system,” *Appl. Opt.* **41**, 4489–4496 (2002).
 - 30) L. Ma, H. Wang, Y. Li, and H. Jin, “Numerical reconstruction of digital holograms for three-dimensional shape measurement,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6**, 396–400 (2004).
 - 31) M. Yokota and T. Adachi, “Digital holographic profilometry of the inner surface of a pipe using a current-induced wavelength change of a laser diode,” *Appl. Opt.* **50**, 3937–3946 (2011).
 - 32) P. Langehanenberg, B. Kemper, D. Dirksen, and G. V. Bally, “Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging,”

- Appl. Opt. **47**, D176–D182 (2008).
- 33) T. Tahara, K. Ito, T. Kakue, M. Fujii, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Parallel phase-shifting digital holographic microscopy,” *Biomed. Opt. Express* **1**, 610–616 (2010).
 - 34) P. Gao, G. Pedrini, and W. Osten, “Structured illumination for resolution enhancement and autofocusing in digital holographic microscopy,” *Opt. Lett.* **38**, 1328–1330 (2013).
 - 35) B. Javidi and E. Tajahuerce, “Three-dimensional object recognition by use of digital holography,” *Opt. Lett.* **25**, 610–612 (2000).
 - 36) E. Tajahuerce, O. Matoba, and B. Javidi, “Shift-invariant threedimensional object recognition by means of digital holography,” *Appl. Opt.* **40**, 3877–3866 (2001).
 - 37) P. Xia, Y. Shimozato, T. Tahara, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Image recognition algorithm for recovering high-frequency information in parallel phase-shifting digital holography,” *Appl. Opt.* **52**, A210–A215 (2013).
 - 38) P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, O. Matoba, “Single-shot digital holography using a spectral estimation technique,” *Appl. Spectrosc.* **68**, 1296–1301 (2014).
 - 39) G. Nehmetallah and P. P. Banerjee, “Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging,” *Adv. Opt. Photon.* **4**, 472–553 (2012).
 - 40) W. Osten, A. Faridian, P. Gao, K. Körner, D. Naik, G. Pedrini, A. K. Singh, M. Takeda, and M. Wilke, “Recent advances in digital holography,” *Appl. Opt.* **53**, G44–G63 (2014).
 - 41) J. C. Dainty and W. T. Welford, “Reduction of speckle in image plane hologram reconstruction by moving pupils,” *Opt. Commun.* **3**, 289–294 (1971).
 - 42) J. Amako, H. Miura, and T. Sonehara, “Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator,” *Appl. Opt.* **34**, 3165–3171 (1995).
 - 43) J. Maycock, B. M. Hennelly, J. B. McDonald, Y. Frauel, A. Castro, B. Javidi, and T. J. Naughton, “Reduction of speckle in digital holography by discrete Fourier filtering,” *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 1617–1622 (2007).
 - 44) H. Zheng, Y. Yu, H. Qian, and A. Asundi, “Reduction of speckle noise by multi-kinoforms in holographic three-dimensional display,” *Proc. SPIE* **7155**, 71550C (2008).
 - 45) Y. Takaki and M. Yokouchi, “Speckle-free and grayscale hologram reconstruction using time-multiplexing technique,” *Opt. Express* **19**, 7567–7579 (2011).
 - 46) M. Makowski, “Minimized speckle noise in lens-less holographic projection by pixel separation,” *Opt. Express* **21**, 29205–29216 (2013).
 - 47) L. Wang, T. Tschudi, T. Halldorsson, and P. R. Petursson, “Speckle reduction in

- laser projection systems by diffractive optical elements,” *Appl. Opt.* **37**, 1770–1775 (1998).
- 48) L. Rong, W. Xiao, F. Pan, S. Liu, and R. Li, “Speckle noise reduction in digital holography by use of multiple polarization holograms,” *Chin. Opt. Lett.* **8**, 653–655 (2010).
 - 49) W.-F. Hsu and I.-L. Chu, “Speckle suppression by integrated sum of fully developed negatively correlated patterns in coherent imaging,” *Progress in Electromagnetics Research (PIER) B* **34**, 1–13 (2011).
 - 50) R. Binet, J. Colineau, and J.-C. Leheureau, “Short-range synthetic aperture imaging at 633 nm by digital holography,” *Appl. Opt.* **41**, 4775–4782 (2002).
 - 51) L. Martínez-León and B. Javidi, “Synthetic aperture single-exposure on-axis digital holography,” *Opt. Express* **16**, 161–169 (2008).
 - 52) D. Claus, “High resolution digital holographic synthetic aperture applied to deformation measurement and extended depth of field method,” *Appl. Opt.* **49**, 3187–3198 (2010).
 - 53) A. E. Tippie, A. Kumar, and J. R. Fienup, “High-resolution synthetic-aperture digital holography with digital phase and pupil correction,” *Opt. Express* **19**, 12027–12038 (2011).
 - 54) Y. Mori and T. Nomura, “Shortening method for optical reconstruction distance in digital holographic display with phase hologram,” *Opt. Eng.* **52**, 123101 (7 pages) (2013).
 - 55) J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, (McGraw-Hill, NY, 1968).
 - 56) K. Matsushima, H. Schimmel, 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**, 1755–1762 (2003).
 - 57) J. Weng, J. Zhong, and C. Hu, “Digital reconstruction based on angular spectrum diffraction with the ridge of wavelet transform in holographic phase-contrast microscopy,” *Opt. Express* **16**, 21972–21981 (2008).
 - 58) K. Matsushima and T. Shimobaba, “Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields,” *Opt. Express* **17**, 19662–19673 (2009).
 - 59) K. Matsushima, “Shifted angular spectrum method for off-axis numerical propagation,” *Opt. Express* **18**, 18453–18463 (2010).
 - 60) I. Yamaguchi and T. Zhang, “Phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.* **22**, 1268–1270 (1997).
 - 61) 山口一郎, 横田正幸, “位相シフトデジタルホログラフィと最近の進展,” *レーザー研究* **35**, 358–362 (2007).
 - 62) D. G. Voelz, *Computational Fourier Optics*, Society of Photo-Optical Instrumenta-

- tion Engineers (SPIE), Washington (2010).
- 63) Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1069–1071 (2004).
 - 64) L. Martínez-León, M. Araiza-E, B. Javidi, P. Andrés, V. Climent, J. Lancis, and E. Tajahuerce, "Single-shot digital holography by use of the fractional Talbot effect," *Opt. Express* **17**, 12900–12909 (2009).
 - 65) H. Suzuki, T. Nomura, E. Nitandai, and T. Numata, "Dynamic recording of a digital hologram with single exposure by a wave-splitting phase-shifting method," *Opt. Rev.* **17**, 176–180 (2010).
 - 66) T. Nomura and M. Imbe, "Single-exposure phase-shifting digital holography using a random-phase reference wave," *Opt. Lett.* **35**, 2281–2283 (2010).
 - 67) Y. Mori and T. Nomura, "Synthesis method from low-coherence digital holograms for improvement of image quality in holographic display," *Appl. Opt.* **52**, 3838–3844 (2013).
 - 68) Y. Tanaka, Y. Mori, and T. Nomura, "Single-shot three-dimensional shape measurement by low-coherent optical path difference digital holography," *Appl. Opt.* **53**, G19–G24 (2014).
 - 69) D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Piliafito, J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography," *Science* **254**, 1178–1181 (1991).
 - 70) A. M. Kowalewicz, T. Ko, I. Hartl, J. G. Fujimoto, "Ultrahigh resolution optical coherence tomography using a superluminescent light source," *Opt. Express* **10**, 349–353 (2002).
 - 71) Y. Yasuno, S. Makita, Y. Satou, M. Itoh, and T. Yatagai, "Birefringence imaging of human skin by polarization-sensitive spectral interferometric optical coherence tomography," *Opt. Lett.* **27**, 1803–1805 (2002).
 - 72) G. R. Fowles, "Coherence and interference," in *Introduction to Modern Optics*, (Dover Publications, Inc., NY, 1975), 58–84.
 - 73) 丹野直弘, 岸章治, "光コヒーレンス断層画像化法と臨床診断," *Med. Imag. Tech.* **17**, 3–10 (1999).
 - 74) Y. Mori and T. Nomura, "Speckle reduction in hologram generation based on spherical waves synthesis using low-coherence digital holography," *J. Display Technol.* DOI 10.1109/JDT.2014.2342254 (2014).

研究業績

査読付き国際論文誌

- 1) Yutaka Mori and Takanori Nomura, “Synthesis method from low-coherence digital holograms for improvement of image quality in holographic display,” *Applied Optics*, vol. 52, pp. 3838–3844 (2013).
(Selected for publication of the Virtual Journal for Biomedical Optics, vol. 8, iss. 7 (2013).)
- 2) Yutaka Mori and Takanori Nomura, “Shortening method for optical reconstruction distance in digital holographic display with phase hologram,” *Optical Engineering*, vol. 52, p. 123101 (7 pages) (2013).
- 3) Yuji Tanaka, Yutaka Mori, and Takanori Nomura, “Single-shot three-dimensional shape measurement by low-coherent optical path difference digital holography,” *Applied Optics*, vol. 53, pp. G19–G24 (2014).
- 4) Yutaka Mori and Takanori Nomura, “Speckle reduction in hologram generation based on spherical waves synthesis using low-coherence digital holography,” *Journal of Display Technologies*, DOI 10.1109/JDT.2014.2342254 (2014).
- 5) Yutaka Mori, Takahiko Fukuoka, and Takanori Nomura, “Speckle reduction in holographic projection by random pixel separation with time-multiplexing,” *Applied Optics*, vol. 53, pp. 8182–8188 (2014).

査読付き国際会議論文

- 1) Takanori Nomura and Yutaka Mori, “Digital holographic binocular stereopsis,” in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, OSA Technical Digest (2010), paper DWB5, Miami, Florida, USA, April 2010.
- 2) Yutaka Mori and Takanori Nomura, “Optical reconstruction of digital hologram using spatial light modulator for binocular stereopsis,” in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper DTuC7, Tokyo, Japan, May 2011.
- 3) Yutaka Mori and Takanori Nomura, “Adjustment of the reconstruction distance on the three-dimensional display using digital holography,” in *The 1st Laser Display Conference (LDC’12)*, LDCp7-21, Yokohama, Japan, April 2012.
- 4) Yutaka Mori and Takanori Nomura, “Synthesis from low-coherence digital holograms for three-dimensional imaging,” in *The Second Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP 2012)*, C009, Tokushima, Japan, November 2012.

- 5) Yutaka Mori and Takanori Nomura, “Fast hologram generation by spherical wave synthesis with adaptive aperture,” in *International Workshop on Holography and related technologies 2014 (IWH2014)*, 16p02, Beijing, China, October 2014.
- 6) Fukuoka Takahiko, Yutaka Mori, and Takanori Nomura, “Speckle reduction in digital holography using rectangular mask,” in *The Third Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP 2014)*, P12, Naha, Japan, December 2014.

国内会議

- 1) 森裕, 野村孝徳, “デジタルホログラフィにおける再生像の両眼立体視,” 第 8 回関西学生研究論文講演会講演予稿集, 17–18, 大阪, 2010 年 3 月.
- 2) 森裕, 野村孝徳, “空間光変調器を用いたデジタルホログラムの光学再生,” 第 11 回情報フォトニクス研究グループ研究会講演予稿集, 48, 栃木, 2011 年 9 月.
- 3) 森裕, 野村孝徳, “リアルタイムに記録・再生可能な 3 次元ホログラフィックディスプレイシステム,” 第 1 回計算オプティクス研究会講演予稿集, 2-1, 東京, 2012 年 6 月.
- 4) 森裕, 野村孝徳, “デジタルホログラフィックディスプレイにおける再生距離短縮と認識される再生距離,” 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 13a-PA2-1, 愛媛, 2012 年 9 月.
- 5) 森裕, 野村孝徳, “低コヒーレンスデジタルホログラフィによる高画質ホログラム作製法,” 第 3 回デジタルオプティクス研究グループ研究会講演予稿集, P4, 沖縄, 2012 年 12 月.
- 6) 森裕, 野村孝徳, “高画質ホログラム作製のための低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いたホログラム合成法,” 第 2 回計算オプティクス研究会講演予稿集, 1-4, 東京, 2013 年 1 月.
- 7) 福岡隆彦, 森裕, 野村孝徳, “両眼立体視のための位相付加によるデジタルホログラム再生法,” 第 11 回関西学生研究論文講演会講演予稿集, 3–4, 和歌山, 2013 年 3 月.
- 8) 森裕, 野村孝徳, “低コヒーレンスデジタルホログラムを用いた高画質ホログラム作製における合成法の検討,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013 講演予稿集, 14aE2, 奈良, 2013 年 11 月.
- 9) 福岡隆彦, 森裕, 野村孝徳, “単一空間光変調器を用いたホログラフィックディスプレイの位相付加による両眼立体視の実現,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013 講演予稿集, 13pP6, 奈良, 2013 年 11 月.
- 10) 森裕, Lluís Martínez León, 野村孝徳, Enrique Tajahuerce, “コンプレッシブホログラフィを用いた単一ピクセルセンシングによる 3 次元記録,” 第 4 回計算オプティクス研究会講演予稿集, 2-2, 大阪, 2013 年 12 月.
- 11) 森本峻行, 信川輝吉, 森裕, 野村孝徳, “複数の位相変調パターンを用いたホログ

ラフィックメモリにおける再生像の品質向上手法,” 第 12 回関西学生研究論文講演会講演予稿集, 27-28, 兵庫, 2014 年 3 月.

- 12) 森裕, 野村孝徳, “低コヒーレンスデジタルホログラフィに基づいた球面波合成による高画質ホログラム作製法,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 18a-PG1-3, 神奈川, 2014 年 3 月.
- 13) 森裕, 野村孝徳, “適応型開口による球面波合成ホログラム作製時間短縮,” 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 19p-S11-1, 北海道, 2014 年 9 月.
- 14) 福岡隆彦, 森裕, 野村孝徳, “ランダム点像分割と時分割再生によるホログラフィックディスプレイのスペックル低減,” 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 19p-S11-2, 北海道, 2014 年 9 月.
- 15) 森裕, 野村孝徳, “デジタルホログラフィックディスプレイの高画質化,” 第 15 回情報フォトンクス研究グループ研究会講演予稿集, 1-6, 京都, 2014 年 9 月.
(invited)
- 16) 森裕, 野村孝徳, “適応開口球面波合成法による計算機合成ホログラム高速生成とその空間周波数分割方法の検討,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014 講演予稿集, 7pP19, 東京, 2014 年 11 月.

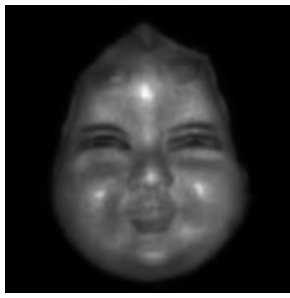
研究助成

- 1) 2014 年度第 18 回一般財団法人丸文財団第 3 期国際交流助成
(助成対象論文: Fast hologram generation by spherical wave synthesis with adaptive aperture)

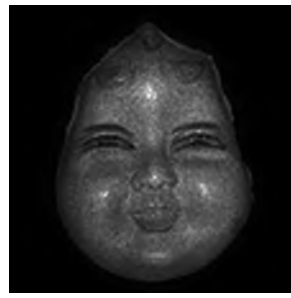
付録

Table A 被験者 10 人の再生位置知覚実験結果 (第 2 章)

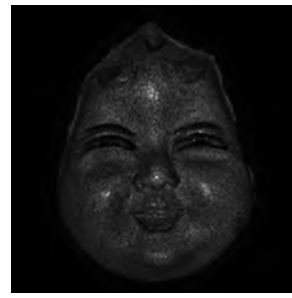
Testees' number	Direct reconstruction (mm)	Combination (mm)
1	5830	557
2	5010	555
3	4410	354
4	3750	538
5	1910	662
6	3490	327
7	3980	606
8	4745	533
9	3540	663
10	4450	519
Theoretical	4440	547
Average	4110	531
Standard deviation	1060	108



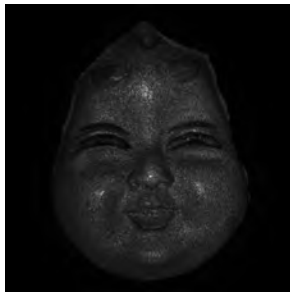
(a) $R = 10\%$



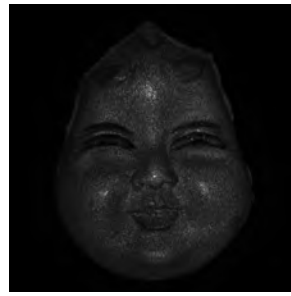
(b) $R = 20\%$



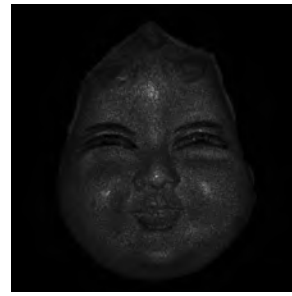
(c) $R = 30\%$



(d) $R = 40\%$



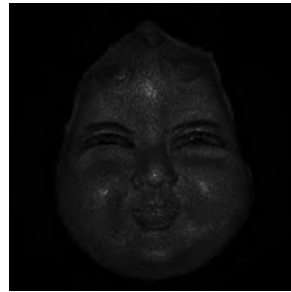
(e) $R = 50\%$



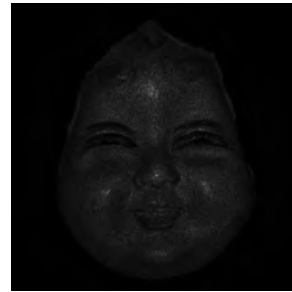
(f) $R = 60\%$



(g) $R = 70\%$



(h) $R = 80\%$



(i) $R = 90\%$

Fig. A 開口の大きさを変化させたときの再生像 (第4章)