

デジタルホログラム技術を融合した
多次元情報記録ホログラフィックメモリシステムの研究

平成 29 年 3 月

和歌山大学大学院システム工学研究科

信川 輝吉

Study on Multidimensional Holographic Data Storage
Systems with Digital Holography

March 2017

Graduate School of Systems Engineering
Wakayama University

Teruyoshi Nobukawa

概要

ホログラフィックメモリは大容量と高転送速度の両方を実現する次世代型光メモリとして期待が寄せられている。本研究では、従来型ホログラフィックメモリを超える大容量化を目的とし、デジタルホログラム技術の導入を提案する。従来システムの多くでは光波の振幅を情報とし、振幅分布のみを変調・検出する方式が提案されてきた。これら従来システムに対し、提案システムではデジタルホログラム技術により光波の複素振幅(振幅・位相)の変調・検出が可能である。さらに、デジタルホログラム技術の拡張により、ホログラフィックメモリで制御可能な光波のパラメータの自由度が、振幅・位相・偏光と多次元になる。本研究では、光波の多次元情報を活用することにより、振幅のみを情報とする従来システムでは解決困難であった技術的な課題を克服するとともに、新規の高密度記録技術の開発が可能であることを実証する。

具体的には、デジタルホログラムの位相設計技術を用いることにより、コアキシャル方式のホログラフィックメモリにおける光利用効率と再生像品質とのトレードオフの問題を解消することに成功した。さらに、位相設計技術により複数の位相パターンを生成することで、上述の問題を解決すると同時に、複数のデータを記録する際に弊害となっていたクロストークノイズを低減可能であることを実証した。以上の機能を実現するためには、光波の複素振幅分布を変調する必要があるため光学系が大型・複雑になるだけでなく、光学素子の配置ずれにより、再生データの品質が低下する課題が残されていた。本研究では、デジタルホログラム技術を応用することにより、以上の課題を解決し、光学系の小型化・簡略化に成功した。

光波の多次元情報を活用した高密度記録技術としては、機械的走査機構が不要な多層記録、複素振幅情報を利用した多値記録、データ記録スポットの極小化を可能とする超解像記録、の3つを実現してきた。さらに、光波の振幅・位相・偏光分布の変調技術を開発し、光波の多次元情報を記録可能なホログラフィックメモリシステムを構築した。本システムを用いて、ランダム位相マスクを用いることにより、高品質な多次元情報の記録が可能であることを実証した。

本研究によりホログラフィックメモリにおいて、光波の多次元情報を活用することの重要性が明らかとなった。以上から、デジタルホログラムを用いた提案システムは、革新的な高密度記録技術の開発を可能とし、ホログラフィックメモリの大容量化・実用化に貢献するものと期待される。

Abstract

Holographic data storage has been expected as a promising technology for achieving huge storage capacity and fast data transfer rate. The main aim of this study is realizing a large-capacity holographic storage system by the introduction of digital holographic techniques. In most of the conventional systems, digital data to be stored is encoded onto only the amplitude of a beam, and thus a recording system modulates and detects the amplitude. Unlike the conventional systems, a proposed system is capable of modulating and detecting the complex amplitude of a beam owing to digital holographic techniques. Moreover, expanding the function of digital holographic techniques increases the controllable degree of freedom of a beam, amplitude, phase, and polarization. This allows one to solve technical obstacles in conventional systems and to develop recording techniques by using multidimensional information of a beam.

In particular, the use of a design method for a phase pattern can solve the tradeoff between light efficiency and the quality of retrieved data in a coaxial system. In addition, it is possible to reduce cross talk noise during multiplexed recording with multiple phase patterns. To achieve the above improvements, it is required to spatially modulate complex amplitude of a beam. This requirement makes an optical setup large and complicated, and thus a recording system would be impractical. To solve the problem, the modulation technique using digital holographic techniques is introduced to a recording system. This system allows the modulation of complex amplitude in a compact and simple optical setup.

As recording techniques, multilayer recording without a mechanical actuator, multi-level recording of complex amplitude, and super-resolution recording for achieving high areal density are proposed. Moreover, the modulation technique for amplitude, phase, and polarization distributions is developed and introduced to a recording system. With this system, it is shown that the introduction of a random phase mask is useful for recording multidimensional information of a beam in holographic data storage.

The study presented here shows the significance and the effectiveness of multidimensional information of a beam in holographic data storage. The proposed system with digital holographic techniques opens up the possibility to develop innovative technology for holographic data storage.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 ホログラフィックメモリの研究開発の動向	4
1.3 研究目的	8
1.4 本論文の構成	10
第 2 章 計算機生成参照光パターンを用いたコアキシャルホログラム記録	13
2.1 緒言	13
2.2 コアキシャルホログラフィックメモリの記録・再生原理	14
2.3 計算機生成参照光パターンの設計	17
2.4 光利用効率の比較	21
2.5 参照光の自己相関関数の比較	26
2.6 データ記録・再生シミュレーション	29
2.6.1 シミュレーション方法	29
2.6.2 シミュレーション結果	32
2.7 データ記録・再生実験	35
2.7.1 実験方法	35
2.7.2 実験結果	36
2.8 結言	37
第 3 章 相関が低い計算機生成参照光パターンによるクロストークノイズの低減	39
3.1 緒言	39
3.2 相関が低い計算機生成参照光パターンの設計	40
3.3 データ記録・再生実験	42
3.4 結言	46
第 4 章 可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録	47
4.1 緒言	47
4.2 可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録原理	47
4.3 光軸方向の焦点面シフトの検証	49
4.4 データ記録・再生実験	51

4.5	結言	54
第5章	線形位相符号化法を用いたコアキシャルホログラム記録	57
5.1	緒言	57
5.2	線形位相符号化法の原理	59
5.3	コアキシャル方式への線形位相符号化法の導入	63
5.4	線形位相符号化法による複素振幅変調の検証実験	65
5.5	データ記録・再生実験	68
5.6	結言	69
第6章	デジタルホログラム技術を導入した複素振幅データの多値記録	71
6.1	緒言	71
6.2	デジタルホログラム技術を用いた複素振幅データの記録・再生原理	72
6.2.1	データ記録手順	73
6.2.2	データ再生手順	75
6.3	複素振幅データの記録・再生実験	77
6.4	結言	81
第7章	エルミート性を応用した超解像ホログラフィックメモリ	83
7.1	緒言	83
7.2	超解像ホログラフィックメモリの記録・再生原理	84
7.3	シミュレーションによる回復処理の検証	86
7.4	原理検証実験	89
7.5	結言	93
第8章	コアキシャル偏光ホログラム記録	95
8.1	緒言	95
8.2	位相ホログラムを用いた振幅・位相・偏光分布の変調	97
8.3	データ記録・再生実験	99
8.4	結言	103
第9章	総括	105

謝辞

参考文献

研究業績

第 1 章 序論

1.1 研究背景

情報科学技術の発展に伴ってあらゆる情報がデジタルデータとして蓄積されるようになり、人類が創出するデータ量が爆発的に増大している。米国 International Data Corporation の報告によれば、2020 年には全世界で創出されるデータ量が 44 ZB (Zetta Byte: 10^{21} Byte) に到達すると予測されている [1]。このような情報爆発時代とよばれる背景のもと、膨大な量のデータ、あるいはビッグデータを資源として捉え、商業的な事業に展開することや、社会的な問題の解決に応用することへの関心が高まっている [2,3]。特に、工業・産業分野では、あらゆるモノとインターネットを結びつけることにより、新たな価値やビジネスモデルが生み出されている。ドイツ政府はこのような工業製品と情報科学技術との融合を第 4 次産業革命と位置づけ、Industry 4.0 のプロジェクトを推進している。同様の高度技術戦略プロジェクトは、アメリカや、インド、中国など世界中で始動しており、今後も情報科学技術が人々の生活の中で、重要な役割を果たすことは明らかである。

しかしながら、この爆発的な情報量の増加には負の側面がある。2007 年の時点で世界のデータ量は、製造されているストレージ機器のデータ保存容量を上回っており、年々その差は大きくなっている [4]。この差が示していることは、年々、失われているデータも増加しているとうことであり、長期的な保存が望まれているデータも消失する恐れがある。この問題を解決するためには大容量のストレージの開発が急務であるが、このことに付随して別の問題が顕在化してくる。それはストレージ自体の費用や、管理費用、環境負荷の増大である。現在、一般的に、データセンターやサーバーとして、ハードディスクが用いられている。ハードディスクはデータの記録・再生時だけでなく、待機時にも大量の電力を消費する。また、ハードディスクのデータセンターを運用するためには、広大な敷地と冷却設備を導入し排熱を効率よく取り除く必要がある。さらに、データ保持期間が短いことから、数年の周期で新たな記録媒体へとデータを移行するデータマイグレーションが必要である。これらのことから、ハードディスクは管理費用が膨大となり、環境負荷が高いという問題がある。したがって、大容量だけでなく、低消費電力・長寿命という特徴を有するストレージ技術の開発が求められている。

これらの要求を満たすストレージとして、光メモリが注目されている。光メモリは

ハードディスクと比較して、消費電力が少なく、長寿命という特徴がある [5]. このような特徴から、Facebook やパナソニックでは、光メモリを使ったデータサーバー、cold storage や freeze-ray の開発がおこなわれている。また、長寿命という特徴から、光メモリは国立国会図書館、研究所、病院など、多くの場面で導入され、アーカイブストレージとして利用されている [6–8]. 以上のように、光メモリはデータサーバー・アーカイブとしての役割を担っており、今後もより一層、大容量化が望まれる。

これまでに実用化されてきた光メモリでは、図 1.1 に示すように、Compact Disc (CD), Digital Versatile Disc (DVD), Blu-ray Disc (BD) と着実に大容量化が実現されてきた。図 1 に従来の光メモリの概念図とその記録容量を示す。これら従来の光メモリでは、光源の波長を短くし、レンズの開口数 (NA: Numerical Aperture) を高めることにより、記録媒体に照射されるレーザーのスポット径を縮小し、大容量化を実現してきた。BD では、NA が 0.85 のレンズ、波長が 405 nm の光源が用いられており、BD を超える大容量化を実現するためには、さらなるレンズの高 NA 化、および光源の短波長化が必要である。しかしながら、従来の光メモリでは、NA は 1 を超えること

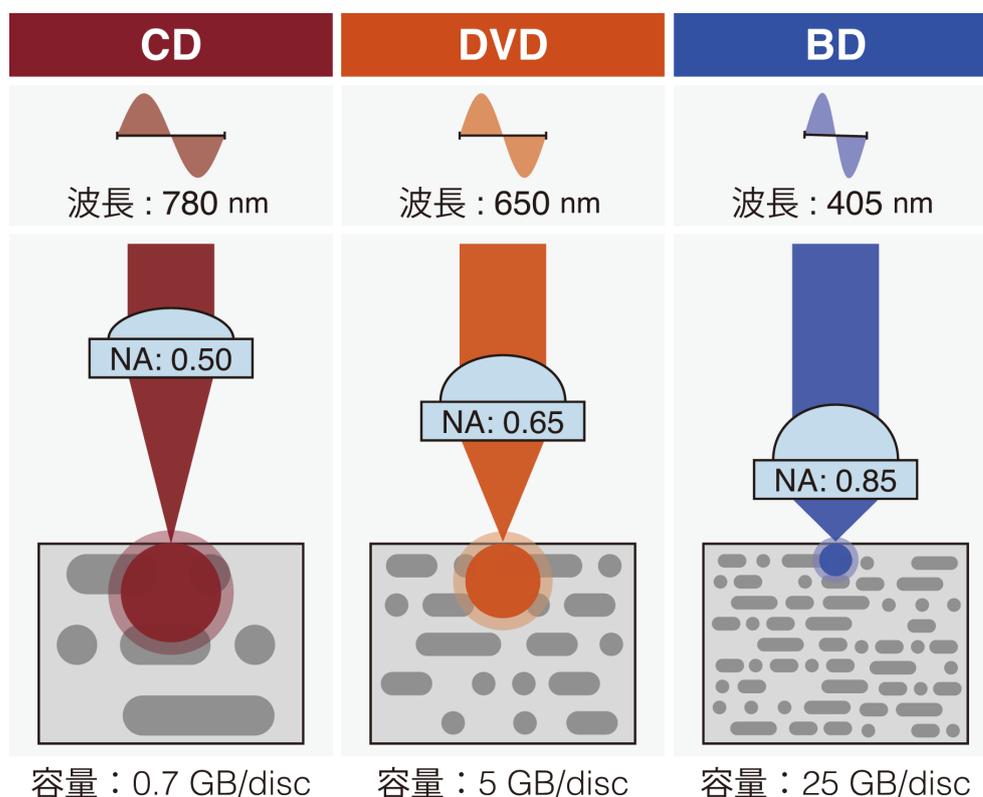


図 1.1 従来の光メモリの大容量化.

ができない。また、波長が 405 nm 以下の実用的な半導体レーザーや、短波長の光波を透過する安価な光学材料が存在しないなどの理由から、さらなる短波長化は技術的に困難である。したがって、BD を超える大容量光メモリを実現するためには、従来の光メモリとは異なる記録・再生方式を検討する必要がある。

次世代型光メモリとして、近接場光、2光子吸収、ホログラフィを応用した光メモリが提案され、活発に研究・開発がおこなわれてきた [9–14]。

近接場を利用した光メモリとして、固体浸レンズを用いる記録方式が提案されている [9,10]。この記録方式では、固体浸レンズの端面と記録媒体間で近接場光を発生させ、これにより生じた微小スポットを用いてデータの記録をおこなう。固体浸レンズの導入により NA が 1 を超えるため、回折限界を超える記録スポットを実現できるが、固体浸レンズと記録媒体間の距離を数十 nm 程度に維持する必要があり、高精度なサーボ技術が要求されるだけでなく、記録媒体の可搬性に課題が残されている。一方、超解像近接場構造と呼ばれる記録方式では、固体浸レンズを用いるのではなく、記録媒体内に近接場光を発生させる仕組みを設ける [11]。この方式では、記録媒体内の Sb などの薄膜に近接場光を発生させることにより、記録層に微小スポットが形成されデータの記録がおこなえる。しかし、再生されるデータの品質、光利用効率が低く、実用化・大容量化を実現するためには技術的な課題が残されている。

2光子吸収あるいは多光子吸収を利用した光メモリでは、パルスレーザーを光源とし、光の集光位置の極近傍でのみ屈折率や吸収率などを変化させるか、突起構造を形成させることにより、データの記録をおこなう [12,13,15,16]。2光子吸収は光強度の 2 乗に比例して生じるため、従来の光メモリと比較して、光軸方向の記録スポットの長さが短くなり、高密度な 3次元のビット配列の形成が可能であるため、大容量化を実現できる。また、フェムト秒レーザーを利用すれば、石英ガラス内部に 3次元的なビット配列やナノグレッシングを形成することができ、半永久的に情報を保存することができる [16–18]。しかし、記録媒体内の 3次元空間にデータを記録するためにパルスレーザーが必要であり、データ記録光学系が高価・大型になる問題がある。

上述の記録方式では、基本的には、ビット毎にデータの記録・再生をおこなう。これらに対して、2次元データ配列であるページデータを一括に記録・再生するホログラフィックメモリ [14] は、並列性に優れ、データ転送速度の高速化が可能という特徴を有している。さらに、記録媒体の同一箇所に複数のページデータを重ねて記録する多重記録が可能であることから、他の光メモリにはない大容量化が期待される。以上の特徴から、本研究では、ホログラフィックメモリが次世代光メモリとして有力な技術と

考え、ホログラフィックメモリの大容量化に向けた研究に取り組んできた。次節では、基本的なホログラフィックメモリのデータ記録・再生手順の概要および研究開発の動向を述べる。

1.2 ホログラフィックメモリの研究開発の動向

ホログラフィックメモリでは、記録するデジタルデータから 図 1.2 に示すページデータを生成し、データの記録・再生をおこなう。ページデータを生成する最も単純な方法は、図 1.2 (a) に示すように、デジタルデータの“0”と“1”をそれぞれ振幅値 0 の OFF セルと振幅値 1 の ON セルにより表現することである。この場合、1セルあたりの情報量である符号化効率は 1 bit である。しかし、以上のページデータの生成方法では、記録するデジタルデータに依存してページデータの光量が異なってしまう。このことが原因で、記録媒体にホログラムを記録する際の干渉縞のコントラストが、ページデータ毎に変動し、再生データの品質劣化を招く恐れがある。さらに、光学素子や記録媒体、撮像素子からのノイズの影響を受けた際に、再生されるページデータの輝度値が空間的に変動し、データ復号時に正しくデータを読み出せない場合がある。以上の問題を解決するために、一般的にページデータを生成する際には変調符号化法が用いられる。例えば、図 1.2 (b) に示す 1:2 コーディング [19] では、2セルの内 1セルを ON セルとし、残りを OFF セルとする。この ON セルの配置の違い

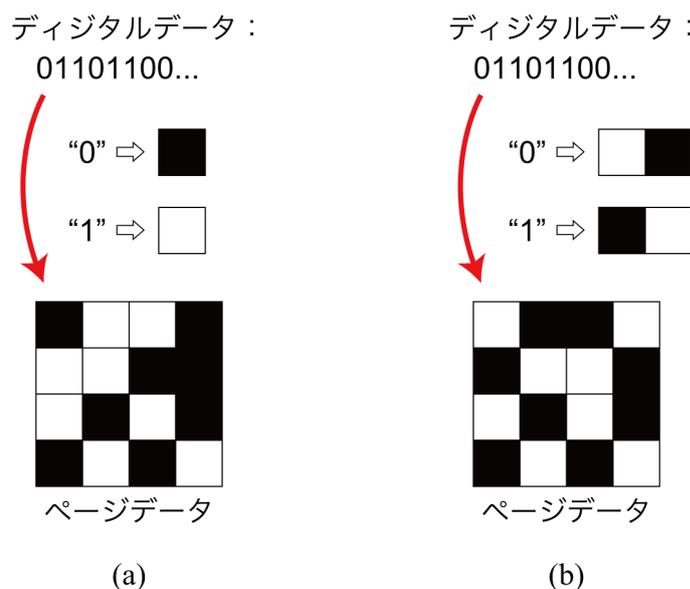


図 1.2 ページデータの生成。(a) 変調符号化法なし。(b) 変調符号化法あり。

によって、“0”と“1”のデジタルデータを表現できる。1:2 コーディングでは、符号化効率が 0.5 bit に低下するが、記録するデジタルデータに依存せずに、ホログラム記録時のページデータの光量を一定に保つことができる。さらに、データ復号時には、再生されるページデータに空間的な輝度値の変動が生じたとしても、2セルの内、輝度の高いセルを ON セルとして同定することにより、ノイズの影響を抑えてデータを読み出すことができる。1:2 コーディングの他にも、変調符号化法として 1:4 コーディング [20]、3:16 コーディング [21]、Run Length Limited コーディング [22, 23] などさまざまな方式が用いられている。

記録するデジタルデータから生成されたページデータは、光学系を用いてホログラムとして記録媒体内に記録される。図 1.3 に一般的なホログラフィックメモリの光学系の概念図を示す。図 1.3 を参照して、ホログラフィックメモリのデータ記録・再生過程の概要を以下に述べる。データ記録時、ページデータに応じて光波の振幅分布を空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) により変調し、信号光を生成する。信号光をレンズによりフーリエ変換し、記録媒体に照射する。このとき、参照光を同時に照射することにより、信号光と参照光が干渉し、記録媒体内で干渉縞を形成する。記録媒体としては、フォトポリマーやフォトリフラクティブ結晶がよく用いられる。干渉縞の 3 次元的な強度分布に応じて、記録媒体内の屈折率分布が変化する。このことにより、信号光と参照光のホログラムが記録媒体内に記録される。データ再生時、参照光を記録媒体中のホログラムに照射することにより、信号光が再生される。この光波を撮像素子を用いて検出し、復号することにより、元のデータを読み出すことができる。上述のような、光波の振幅を信号として用いるホログラフィックメモリが多く提案・研究されているが、光波の位相、あるいは偏光を信号として用いることも可能である [24–27]。光波の位相・偏光を情報とするホログラフィックメモリの研究開発の動向は、第 6 章、第 8 章でそれぞれ述べる。

複数のページデータを記録する際には、多重記録により記録媒体の同一箇所にも複数のホログラムを記録する。多重記録を実現するためには、参照光の位相分布・波長・偏光などの光学パラメータが、記録するページデータ毎に異なっている必要がある。例えば、図 1.3 の参照光の入射角度を変更することにより、角度多重記録 [14, 28] が実現可能である。参照光の位相分布を SLM や拡散板により変調する場合には、位相コード多重記録 [29] やスペckル多重記録 [30] を実現できる。また、波長や偏光を変調すれば、波長多重記録 [31] と偏光多重記録 [26, 32] をそれぞれ実現できる。参照光を直接変調しなくても、記録媒体を移動・回転することにより、記録媒体中のホログ

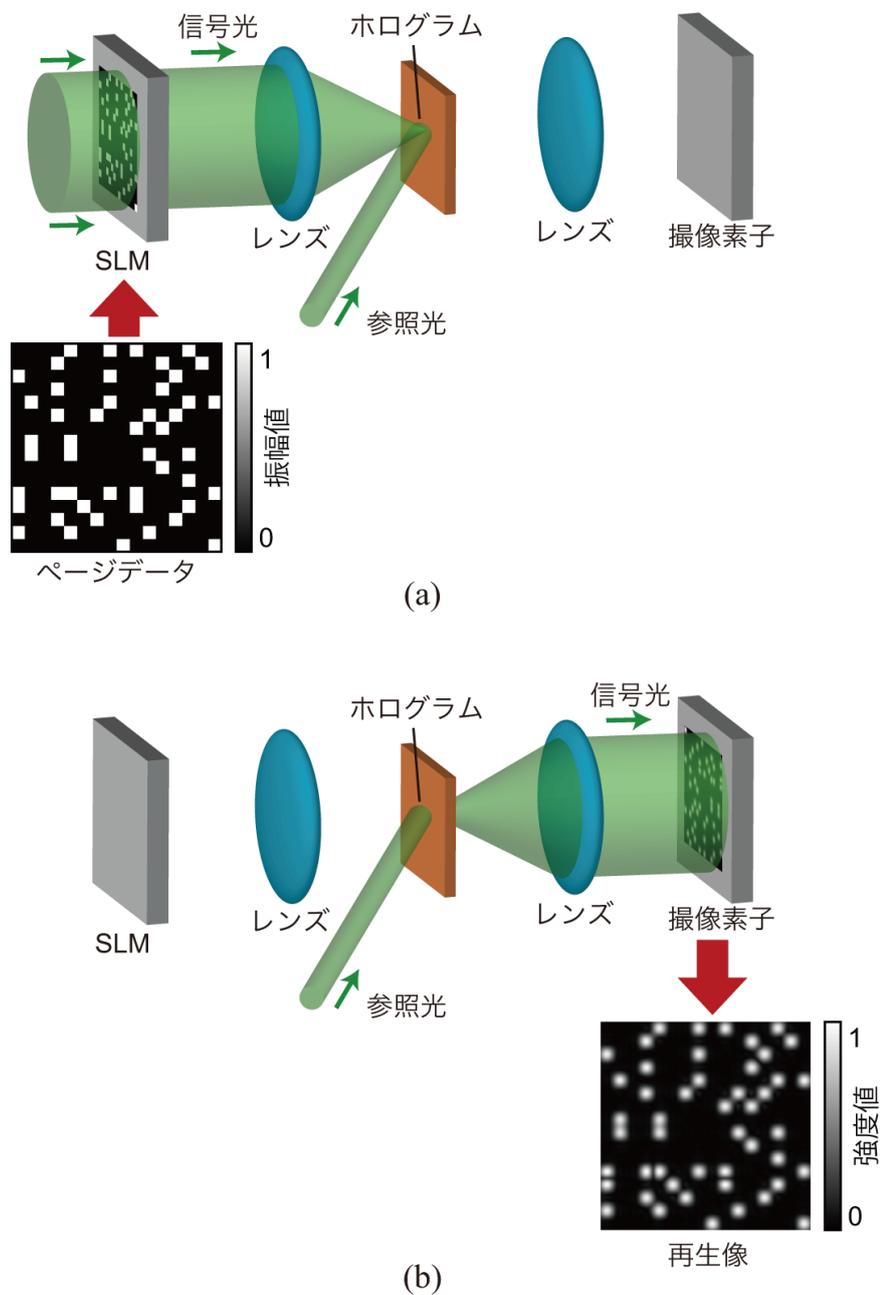


図 1.3 ホログラフィックメモリの概念図. (a) データ記録過程. (b) データ再生過程.

ラムと参照光との間で相対的な差が生じるため、シフト多重記録 [33,34]、ペリストロフィック多重記録 [35] を実現可能である。それぞれの多重記録に必要な参照光の相違度は、ブラッグの選択性や、相関関数により見積もることができる。上述の多重記録法を用いて、いかに高品質なホログラムを複数重ねて記録するかが、大容量ホログラ

フィックメモリを実現するための重要な要因である。それぞれの多重記録法に必要な光学素子、記録媒体に要求される特性・仕様は異なっている。したがって、どの多重記録法を採用するかは、ホログラフィックメモリの記録方式・光学系の仕様により決定される。

ホログラフィックメモリの記録方式・光学系としては、これまでにさまざまなものが提案されている。その中でも、モノキュラー方式 [36] とコアキシャル (あるいは、コリニアとも呼ばれる) 方式 [37, 38] は優れた長所を有し、これまでに実用化に向けた検討がおこなわれている。モノキュラー方式では、信号光と参照光が共通の対物レンズを通して記録媒体上に照射されるため、高 NA の対物レンズを用いた場合でも、参照光の照射角度の自由度が高く、角度多重記録時のホログラムの多重数を多くすることができる。さらに、記録媒体の面内に複数のホログラムを記録・再生する際に問題となるクロストークノイズをポリティックフィルター [28] により除去可能であり、一般的な角度多重記録よりも高密度にホログラムを記録することができる。一方、コアキシャル方式は、モノキュラー方式と異なり、信号光と参照光が一貫して、共通の光路を伝搬する。このことから、参照光用の光路を必要とせず、光学系の小型化が容易であり、従来の光メモリのピックアップ光学系との互換性が高い。さらに、光源に要求される時間的コヒーレンスの条件を緩和し、波長ドリフトや、ディスクの傾き、振動などの外乱に対して高い安定性をもつ [39, 40]。コアキシャル方式の詳細な記録・再生原理は、改めて第 2 章で述べる。以上の記録方式では、ページデータのホログラムを記録・再生するために参照光が不可欠である。これらの記録方式に対して、自己参照型ホログラフィックメモリ [41] や、リターダグラフィ [42] では、ページデータを記録・再生するために参照光を必要としない。したがって、光学系の小型化が容易であるだけでなく、コアキシャル方式とは異なり、SLM 上に参照光を生成するための領域を設ける必要がない。自己参照型ホログラフィックメモリ、リターダグラフィの大容量化を実現するため、データ記録特性の基礎的検討や、多重記録性能の評価が進められている [43–45]。

ホログラフィックメモリの実用化・大容量化を実現するために、上述の多重記録法・光学系の研究開発だけでなく、信号処理技術や、光源、記録媒体、SLM、撮像素子などの開発も着実に進んでいる。最近の報告では、Akonia Holographics 社と日立製作所がそれぞれ 2 Tbit/inch^2 を超える記録密度を実験的に達成している [46–48]。この記録密度は、現在一般的に光メモリで用いられている直径 5 inch のディスクサイズに換算すると 2 TB の記録容量に相当する。

1.3 研究目的

本研究では、従来のホログラフィックメモリの技術的な課題を解決し、新規の記録技術を考案・開発することによりホログラフィックメモリの大容量化を実現することを目的とする。従来のホログラフィックメモリシステム多くでは、光波の振幅分布、位相分布、あるいは偏光分布のどれか一つを情報として扱い、ホログラムの記録・再生をおこなっていた。従来システムに対して、本研究では、光波の振幅分布・位相分布を一括に記録・再生可能なシステムを構築し、情報の符号化の自由度を多次元へと拡張する。このことにより、従来のホログラフィックメモリを超えた多値信号の記録・再生を実現する。さらに、光波の位相情報を活用することにより、従来のホログラフィックメモリにおいて解決が困難であった技術的な課題を克服する。これらのことを実現するためには、光波の振幅・位相分布を自在に生成し、検出する技術が不可欠である。本研究では、これらの要求を満たす技術として、デジタルホログラフィに着目してきた。

デジタルホログラフィは、アナログのホログラフィと異なり、デジタル信号処

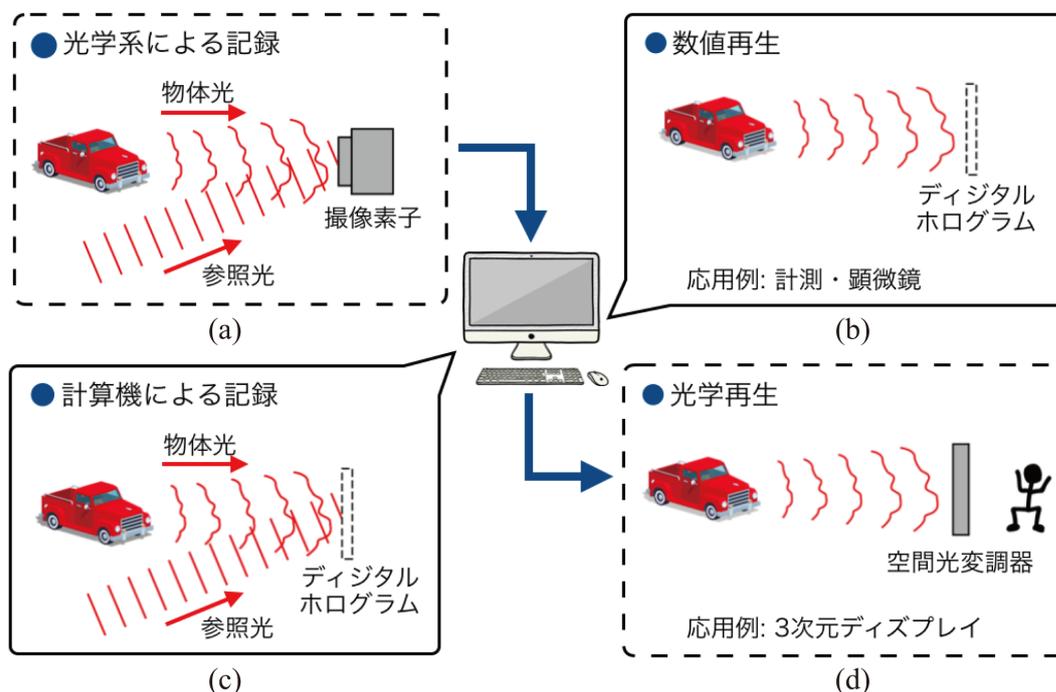


図 1.4 デジタルホログラフィの概念図. (a) 光学系によるホログラムの記録. (b) ホログラムの数値再生. (c) 計算機によるホログラムの記録. (d) ホログラムの光学再生

理を介してホログラムを記録・再生する技術である [49]. 例えばデジタルホログラフィでは, 図 1.4 (a) に示すように, 物体からの回折光である物体光と, 参照光との干渉縞を撮像素子によりデジタルホログラムとして取得する. 取得したデジタルホログラムに対し, コンピューターを用いて数値伝搬の計算を適用することにより, 図 1.4 (b) に示すように, 物体の 3 次元情報を再生することができる. この一連のプロセスは, 計測・顕微鏡に応用されている [50]. また, 図 1.4 (c) に示すように, 光学系を用いなくても, 物体の 3 次元情報があらかじめ与えられている場合には, 任意の物体を再生可能なデジタルホログラムを計算機により設計することができる. この計算機により生成されるデジタルホログラムは, 特に, 計算機合成ホログラム (CGH: Computer-generated hologram) と呼ばれる. 図 1.4 (d) に示すように, 光学系により取得した, あるいはコンピュータにより設計したデジタルホログラムを SLM に入力することにより, 肉眼で観察可能な物体の 3 次元像を再生することができる. この再生のプロセスは, 立体映像やビーム整形, 計測に用いられている [51, 52]. 一般的に, 撮像素子は光波の強度分布, あるいは振幅分布のみしか検出することができず, 光波の位相分布を検出できない. また, 単一の SLM では, 光波の振幅分布, あるいは位相分布のみしか変調することができない. しかし, 上述のように, デジタルホログラフィを利用すれば, 単一の撮像素子と単一の SLM により, 光波の振幅分布・位相分布の両方を検出し, 生成することができる. したがって, デジタルホログラフィは, 既存の電子デバイスを用いて光波の複素振幅分布を生成・検出する技術であると考えることができる.

図 1.3 に示したように, ホログラフィックメモリの光学系では SLM と撮像素子が用いられており, デジタルホログラフィの技術を導入する余地がある. デジタルホログラフィの技術を導入することができれば, ホログラフィックメモリの光学系で, 光波の複素振幅分布の変調・検出が可能となる. さらに, 偏光は直交する 2 つの複素振幅の重ね合わせによりあらわされるため, デジタルホログラフィの技術を拡張することにより, 偏光分布の変調・検出も可能となる. 本研究では, デジタルホログラフィの技術をホログラフィックメモリに導入し, 光波の制御可能な自由度を多次元に拡張することにより, 従来方式のホログラフィックメモリを超えた記録性能を達成するとともに, 技術的な課題を解決可能であることを示す.

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。

第2章では、コアキシャル方式のホログラフィックメモリの光利用効率と再生像の品質の向上を目的とし、計算機生成参照光パターンを提案する。はじめに、コアキシャル方式のデータ記録・再生原理について述べ、従来の再生像の品質の向上手法の課題について言及する。次に、従来手法の課題を解決するための位相ホログラムである計算機生成参照光パターンの設計方法について述べる。その後、シミュレーションと実験により提案手法と従来手法の光利用効率・再生像の品質を比較する。最後に、データ記録・再生シミュレーション、実験により提案手法の有用性を検証する。

第3章では、ホログラムの多重記録・再生時に発生するクロストークノイズ低減を目的とし、相関が低い複数の計算機生成参照光パターンを用いることを提案する。はじめに、クロストークノイズの発生原因について述べ、その低減手法について述べる。次に、相関が低い計算機生成参照光パターンの設計方法について述べる。最後に、提案手法の有用性を実験により検証する。

第4章では、機械的な走査機構が不要な多層記録法を実現することを目的とし、可変焦点レンズの位相ホログラムを応用することを提案する。はじめに、可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録の原理について述べる。次に、提案手法を用いた焦点面の光軸方向の走査を実験により検証する。最後に、提案手法を用いて、ホログラムの多層記録・再生実験をおこなう。

第5章では、光波の複素振幅分布の変調を小型・簡易な光学系で実現するために、線形位相符号化法を用いたコアキシャルホログラフィックメモリを提案する。はじめに、線形位相符号化法による光波の複素振幅分布の変調の原理を述べる。次に、線形位相符号化法を用いたコアキシャルホログラフィックメモリのデータ記録・再生手順を述べる。その後、コアキシャルホログラフィックメモリの光学系で、線形位相符号化法により光波の複素振幅変調が可能かを検証する。最後に、提案手法を用いて、ホログラムのデータ記録・再生実験をおこない、提案手法の有用性を検証する。

第6章では、光波の複素振幅分布をデータとして扱い、多値信号を記録・再生することを目的とし、デジタルホログラム技術を導入したホログラフィックメモリシステムを提案する。はじめに、デジタルホログラム技術を用いた、複素振幅分布のデータ記録・再生原理について述べる。その後、提案システムを用いることにより光波の複素振幅の多値信号の記録・再生実験をおこなう。

第7章では、記録媒体の極小の領域にホログラムを記録することを目的とし、超解像ホログラフィックメモリを提案する。はじめに、超解像ホログラフィックメモリのデータ記録・再生原理を述べる。次に、提案手法の有用性をシミュレーションにより検証した結果を述べる。最後に、提案手法を用いて、ホログラムのデータ記録・再生実験をおこない、提案手法の有用性を検証する。

第8章では、振幅・位相・偏光分布を一括に変調可能なコアキシャルホログラフィックメモリシステムを提案し、偏光ホログラムを記録する際のランダム位相マスクの有用性を検証する。はじめに、位相ホログラムを用いた振幅・位相・偏光分布の変調方法を述べる。次に、提案手法を用いた偏光ホログラムのデータ記録・再生手順を述べる。最後に、提案手法を用いて、偏光ホログラムのデータ記録・再生実験をおこない、ランダム位相マスクの有用性を検証する。

第9章では、本研究の総括を述べる。

第2章 計算機生成参照光パターンを用いたコアキシャルホログラム記録

2.1 緒言

コアキシャル方式のホログラフィックメモリであるコアキシャルホログラフィックメモリは、光学系が小型・簡易であり、外乱に対して強固という特徴がある [37]。これまで、オプトウェアとソニーにより、コアキシャルホログラフィックメモリの実用化に向けた、研究開発がおこなわれてきた [53,54]。2009年の時点で、415 Gbit/inch²の記録密度が達成されている [55]。さらに、コアキシャルホログラフィックメモリの大容量化を実現するために、コヒーレント加算によるノイズ低減手法 [56,57] や、干渉効率の向上を目的とした位相分布の設計技術 [58,59] が提案・開発されている。また、大容量化に向けた研究だけでなく、暗号化技術 [60] や、画像検索・データ照合など光相関器として応用することが提案されている [61,62]。

一般的に、コアキシャルホログラフィックメモリでは、ランダム位相マスク [38,63,64] が用いられ、信号光と参照光の位相分布が変調される。ランダム位相マスクとは、ページデータのセル毎に異なる位相値を付与するマスクで、主に、0と π の2階調のものが用いられる。ランダム位相マスクを導入することにより、記録媒体に照射される光波の強度分布の局在化を防ぐことができるため、記録媒体のダイナミックレンジ内で効率よくホログラムを記録することができる。また、ランダム位相マスクを用いることにより、コアキシャルホログラフィックメモリの点像分布関数が改善し、高品質な再生像を読み出すことができる [65,66]。

コアキシャルホログラフィックメモリの再生像の品質をさらに向上する手法として、ランダム位相マスクの高精細化が提案されている [67]。参照光に適用するランダム位相マスクの各セルの大きさを細かくすることにより、コアキシャルホログラフィックメモリの点像分布関数を改善することができる。しかし、この手法には問題点がある。ランダム位相マスクが細かくなることにより、高周波成分が多くなり、記録媒体に照射される光波が不必要に広がる。この余分に広がった光波は、記録媒体の直前に用いられる開口により除去されるため、光エネルギーの損失が生じる。したがって、ランダム位相マスクの高精細化では、再生像の品質と光利用効率がトレードオフの関係にある。本研究では、このトレードオフを解消し、光利用効率と再生像の品質の両方を

向上することを目的とし、デジタルホログラム技術を応用した位相マスクである計算機生成参照光パターン (CGRP: Computer-Generated Reference Pattern) [68] を提案する。

本章では、CGRP を用いることにより、コアキシャルホログラフィックメモリの再生像の品質および光利用効率の両方を向上可能であることを実証した結果を述べる。2.2 節では、コアキシャルホログラフィックメモリのデータ記録・再生原理を述べ、再生像の品質を決定づける点像分布関数を導出する。2.3 節では、CGRP の設計方法について述べる。2.4 節では、従来手法と提案手法の光利用効率をシミュレーション・実験により検証した結果を述べる。2.5 節では、従来手法と提案手法の点像分布関数を数値的に評価し、比較した結果を述べる。2.6 節では、記録・再生シミュレーションにより、提案手法の有用性を検証した結果を述べる。2.7 節では、データ記録・再生実験により、提案手法を用いることで従来手法のトレードオフを解消可能であることを実証した結果を述べる。2.8 節では、本章の結言を述べる。

2.2 コアキシャルホログラフィックメモリの記録・再生原理

コアキシャルホログラフィックメモリのデータ記録時の光学系の概念図を図 2.1 に示す。データ記録時、振幅変調パターンと位相変調パターンに従い、振幅変調型と位相変調型の空間光変調器により平行光の複素振幅分布を変調し、参照光と信号光を得る。振幅変調パターンの外周部の参照光リングと、位相変調パターンの外周部の位相マスクにより変調された光波を参照光 $r(x, y)$ とする。振幅変調パターンの中心部のページデータと、位相変調パターンの中心部の位相マスクにより変調された光波を信号光 $s(x, y)$ とする。これらの光波をレンズによりフーリエ変換することにより、レンズの焦点距離に配置された記録媒体には、それぞれのフーリエスペクトルの干渉縞

$$\begin{aligned} I(u, v) &= |\mathcal{F}[r(x, y)] + \mathcal{F}[s(x, y)]|^2 \\ &= \{ |R(u, v)|^2 + |S(u, v)|^2 + R(u, v)S^*(u, v) + R^*(u, v)S(u, v) \} \end{aligned} \quad (2.1)$$

が照射される。ここで、 $\mathcal{F}[\dots]$ はフーリエ変換演算子であり、 $R(u, v)$ と $S(u, v)$ はそれぞれ、 $r(x, y)$ と $s(x, y)$ のフーリエスペクトルである。 $*$ は複素共役を示す。記録媒体の直前に配置されている開口は光波の照射領域を制限し、記録密度を向上するために用いられる。開口としては矩形のものが一般的に用いられ、その振幅透過率分布を

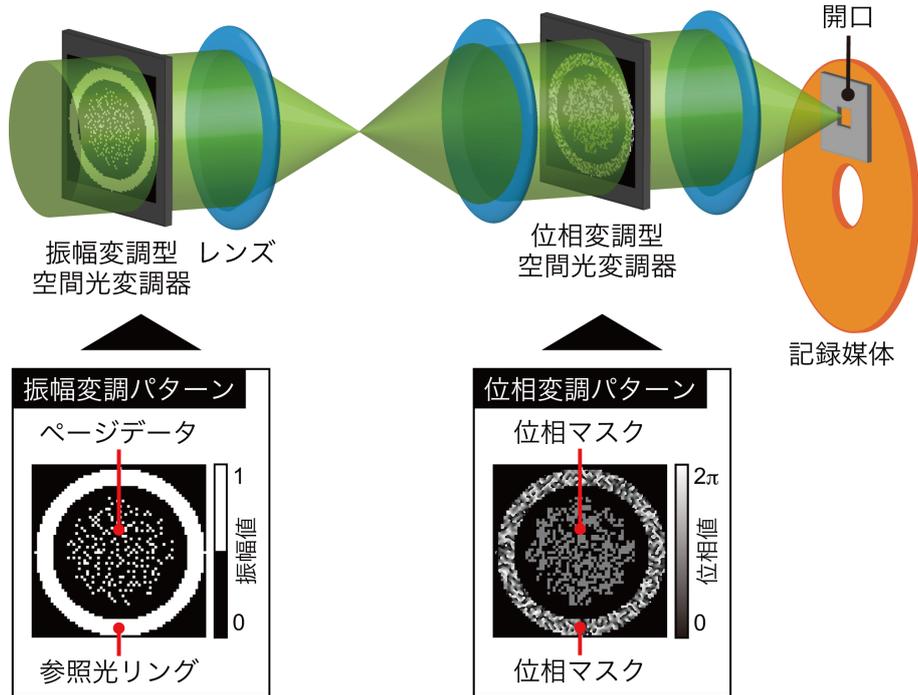


図 2.1 コアキシャルホログラフィックメモリのデータ記録原理

$A(u, v)$ とすると,

$$A(u, v) = \text{rect}\left(\frac{u}{cw}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{cw}\right) \quad (2.2)$$

により与えられる。ここで、 c は正の実数を示し、 w はナイキストサイズである。ナイキストサイズは、ページデータの空間周波数の基本周波数成分の帯域に対応し、

$$w = \frac{f\lambda}{d}, \quad (2.3)$$

により定義される [69,70]。ここで、 f , λ , d はそれぞれ、レンズの焦点距離、光源の波長、ページデータを構成する ON セル・OFF セルの大きさである。 c を小さくすることにより、1 枚のページデータを記録する際の記録密度を高めることができるが、再生像の品質が低下する。ホログラフィックメモリの光学系によって異なるが、一般的に c は、1.1 から 2.0 と設定される。以上の開口 $A(u, v)$ を用いて記録領域を制限する場合、記録媒体には、

$$A(u, v)I(u, v) = A(u, v)\{|R(u, v)|^2 + |S(u, v)|^2 + R(u, v)S^*(u, v) + R^*(u, v)S(u, v)\} \quad (2.4)$$

が体積ホログラムとして記録される。

データ再生時の光学系の概念図を図 2.2 に示す。振幅変調型と位相変調型の空間光変調器により、平行光の複素振幅分布を変調し参照光を得る。これをレンズによりフーリエ変換し、記録媒体に記録されているホログラムに照射する。これにより、回折光

$$D(u, v) = R(u, v)A(u, v)\{ |R(u, v)|^2 + |S(u, v)|^2 + R(u, v)S^*(u, v) + R^*(u, v)S(u, v) \} \quad (2.5)$$

が得られる。第1項と第2項はホログラムの0次光成分であり、参照光のフーリエスペクトルに対して強度変調をおこなったものに相当する。この0次光成分を再びレンズによりフーリエ変換した場合、撮像素子面では記録時と同様なリング状の参照光が得られる。第3項はホログラムの-1次光成分であり、撮像素子面では拡散した光波となる。この-1次光成分は体積ホログラムの性質から、1次光成分である第4項よりも強度が低い。以上から、第1項、第2項、および第3項は、データを読み出す際には不要な成分であり、無視することができる。したがって、第4項のみをレンズによりフーリエ変換し、撮像素子により再生光 s_d の強度分布

$$\begin{aligned} |s_d(x, y)|^2 &= |\mathcal{F}[A(u, v)R(u, v)R^*(u, v)S(u, v)]|^2 \\ &= |\mathcal{F}[A(u, v)] \otimes r(x, y) \oplus r^*(x, y) \otimes s(x, y)|^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

を再生像として取得する。ここで、 \otimes と \oplus はそれぞれ、畳み込み積分演算子、相関演

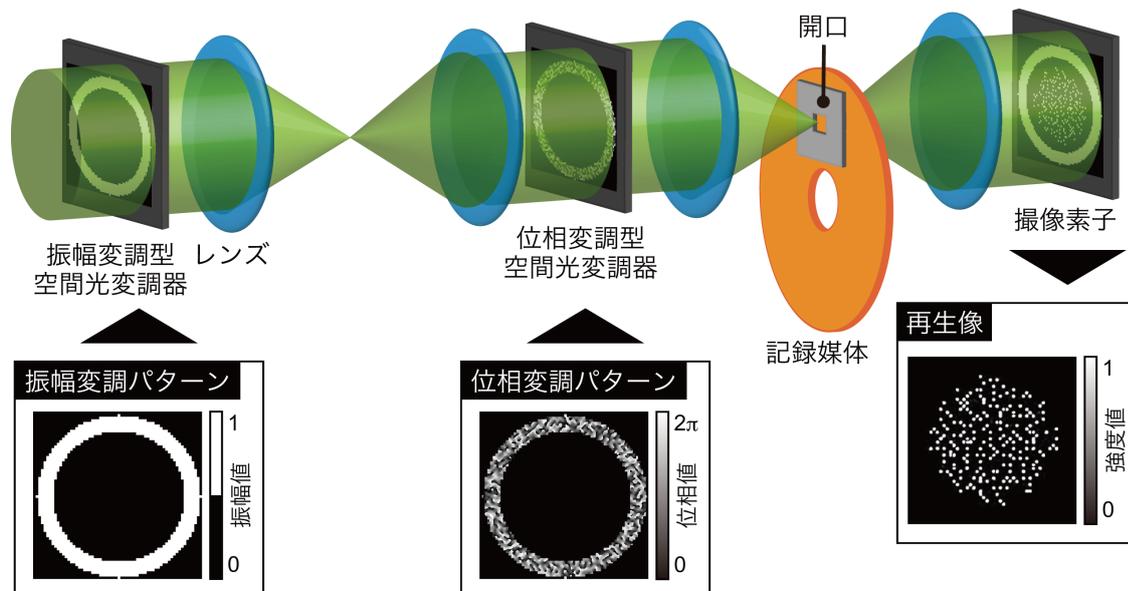


図 2.2 コアキシアルホログラフィックメモリのデータ再生原理

算子をあらわす。式 (2.6) では、フーリエ変換によって生じる座標系の転置を無視している。

式 (2.6) より、再生像は開口関数のフーリエ変換 $\mathcal{F}[A(u, v)]$ と、参照光の自己相関関数 $r(x, y) \oplus r^*(x, y)$ と、信号光 $s(x, y)$ との畳み込み積分によりあらわされることがわかる。開口関数のフーリエ変換と、参照光の自己相関関数がともに、十分にデルタ関数に近いとき、撮像素子により取得した再生像から、記録したデータを読み出すことができる。一方で、式 (2.6) は、開口関数のフーリエ変換と、参照光の自己相関関数のそれぞれがデルタ関数ではなく広がりをもつ場合、再生像にぼけが発生し、品質が劣化することをあらわしている。再生像にぼけが発生することにより、データを読み出す際に誤りが生じてしまう。特に、ホログラフィックメモリでは、開口関数のフーリエ変換に依存して再生像にぼけが生じる現象は、画素間干渉 [71, 72] と呼ばれている。また、参照光の自己相関関数に依存して再生像にぼけが生じる現象は、コアキシャルホログラフィックメモリにおける点像分布関数として解釈されている [65, 66, 73]。式 (2.6) は体積ホログラムの厚みの影響を無視して導出したものであるため、点像分布関数の絶対的な評価には不向きであるが、相対的な評価に用いる場合には有効な式である。本研究では、画素間干渉による再生像の劣化を低減するのではなく、参照光の自己相関関数のピーク幅を狭くすることにより再生像の品質向上を実現する。

2.3 計算機生成参照光パターンの設計

2.2 節で述べたように、従来のコアキシャルホログラフィックメモリでは、開口を用いて光波の照射領域が制限される。このとき、再生像の品質の向上を目的として、参照光に適用するランダム位相マスクを高精細にすると、高周波成分が増加し、光エネルギーの損失が大きくなる。本研究では、参照光の位相分布の細かさに依らず光利用効率を向上することを目的とし、位相変調型の CGH を応用して開口面での光波分布を制御する。位相変調型の CGH は位相ホログラムやキノフォーム [74] と呼ばれ、その設計方法として、反復フーリエ変換法 [75, 76]、最適回転角法 [77]、擬似焼きなまし (SA: Simulated Annealing) 法 [78, 79] や、遺伝的アルゴリズム [80] を用いた手法が提案されている。本研究では、SA 法によりコアキシャルホログラフィックメモリの参照光の位相分布を設計する。以下に、SA 法を用いた位相分布の設計手順を述べる。

はじめに、SA 法の初期値として、リング状のランダム位相マスクを有する参照光を設定する。ランダム位相マスクの位相の階調数を N とし、 $\phi_n = 2\pi n/N$ ($n = 0, \dots, N-1$)

の位相値がランダムに分布している．例として，図 2.3 (a) に 256 階調の位相値を有するリング状のランダム位相マスクを示す．このランダム位相マスクの参照光のフーリエスペクトルの振幅分布を図 2.3 (b) に示す．参照光のフーリエスペクトルの振幅分布が，記録媒体の直前に用いられる開口の形状・大きさと一致するように，リング状の位相分布を設計する．本節では，開口として図 2.4 のものを用いる場合を例に，設計手順を述べる．図 2.3 (a) のランダム位相マスクの 1 画素に注目し，その位相値を ϕ_n の内，どれか一つの別の値に置き換える．位相値を変更した後の参照光をフーリエ変換し，そのフーリエスペクトルと目的の光波分布との類似度を評価関数 E を用いて定量化する．本研究では，目的の光波分布を開口の透過率分布 A とし，評価関数 E を

$$E = \sum_{u, v \in A_s} \{ |\mathcal{F}[r'(x, y)]| - A(u, v) \}^2, \quad (2.7)$$

と定義する．ここで， $r'(x, y)$ は位相値を変更した後の参照光の複素振幅分布である． A_s は開口の透過率分布 A が 0 でない領域を示す．式 (2.7) は， E が小さいほど参照光のフーリエスペクトルが目的の光波分布に近いことを意味している．位相値の変更前

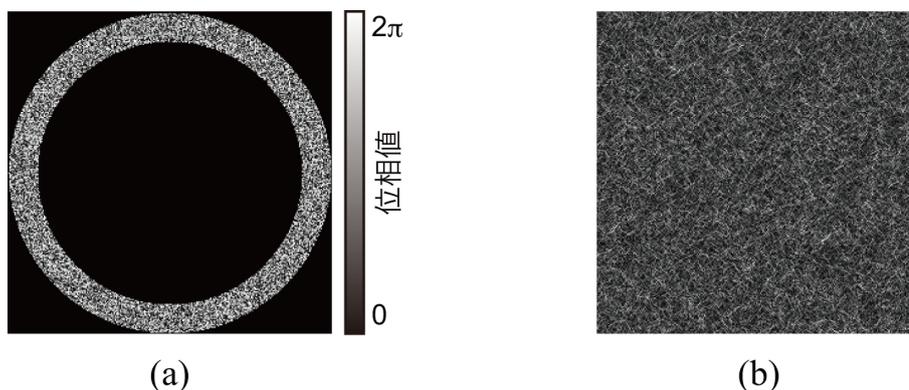


図 2.3 SA 法の初期値．(a) 256 階調の位相値を有するランダム位相マスク．(b) フーリエスペクトルの振幅分布．

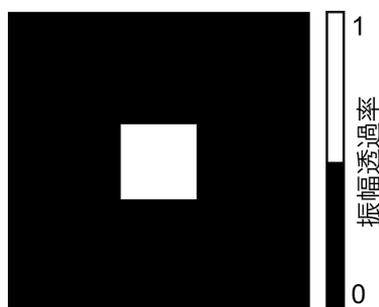


図 2.4 目的のフーリエスペクトルとして設定する開口の透過率分布．

後の E をそれぞれ, E' , E'' とし, $E'' < E'$ の場合には, 位相変化を採用し参照光の位相分布を更新する. 逆に, $E'' \geq E'$ の場合には, 位相変化を採用せず, 元の位相分布に戻す. 局所解に陥ることを防ぐために, $E'' \geq E'$ の場合でも, P の確率で位相変化を採用する. 本研究では, P を

$$P = \frac{1}{j+1}, \quad (2.8)$$

と定義する. ここで, j は SA 法の反復回数である. 上述の過程を $|E'' - E'|$ が十分に小さくなるまで繰り返すことにより, 開口内に光エネルギーを集めることが可能な参照光の位相分布を得ることができる.

図 2.5 に, 図 2.3 のランダム位相マスクを初期値とし, SA 法により設計した場合の評価関数 E の値を示す. また, 反復回数が 10 回, 100 回, および 200 回の場合の位相分布とそれぞれのフーリエスペクトルの振幅分布を図 2.6 に示す. 図 2.5, 図 2.6 からわかるように, 反復回数が増加することにより評価関数 E の値が低下し, 所望の分布に近いフーリエスペクトルが得られている. 図 2.7 に最終的に得られた位相分布とそのフーリエスペクトルを示す. 本研究では, 最適化計算により設計したこの位相分布を, CGH との類似性から, 計算機生成参照光パターン (CGRP: Computer-Generated Reference Pattern) と呼ぶ.

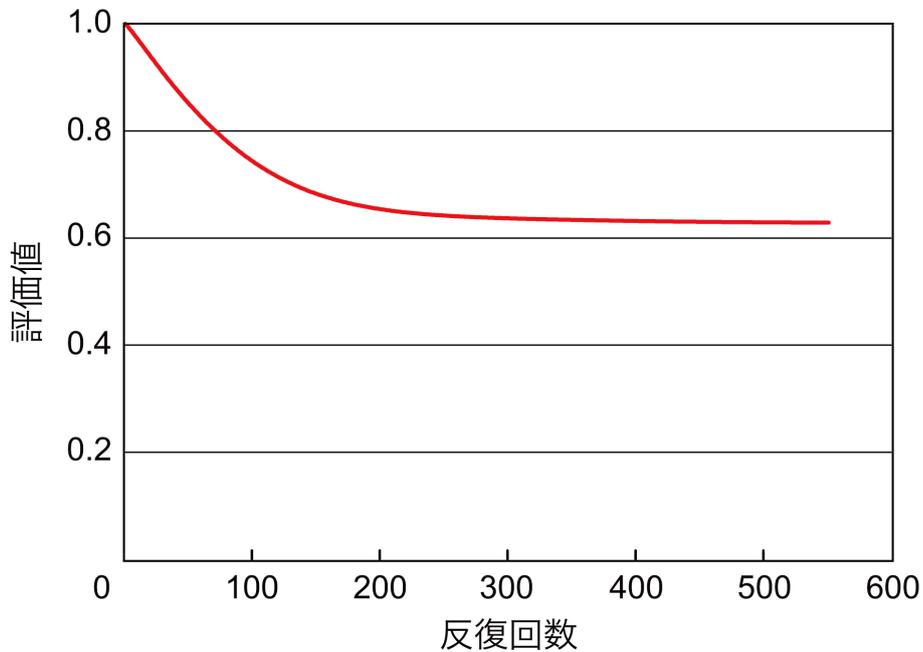


図 2.5 図 2.3 のランダム位相マスクを初期値とした場合の評価関数.

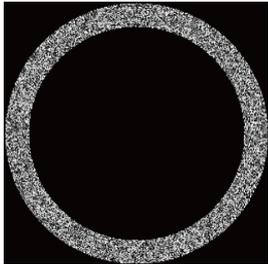
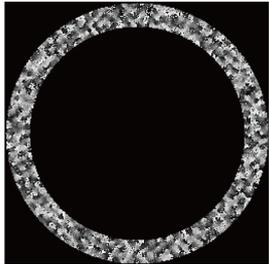
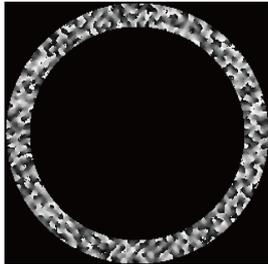
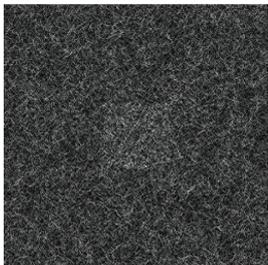
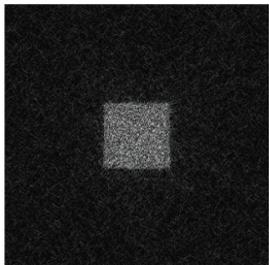
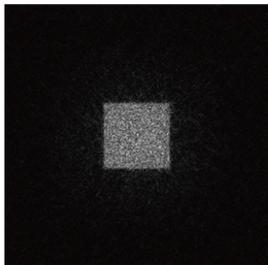
	反復回数		
	10 回	100 回	200 回
位相分布			
フーリエスペクトル			

図 2.6 位相分布の設計過程.

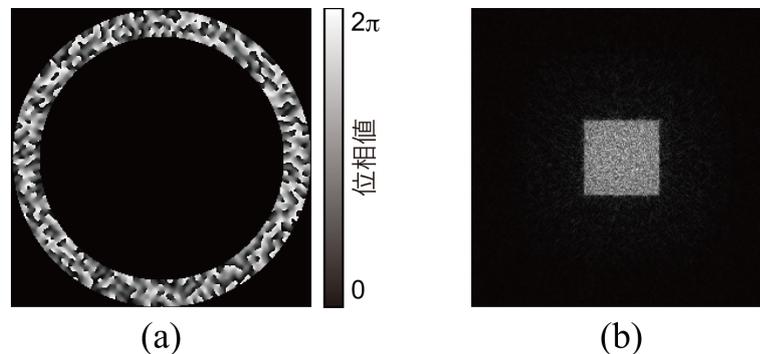


図 2.7 256 階調の位相値を有する CGRP とフーリエスペクトル.

上述の例では、256 階調の位相値を有する CGRP の設計をおこなった。しかし、位相の階調数 N の値が小さな場合にも CGRP の設計は可能である。例として、2 階調の位相値を有するランダム位相マスクを初期値とした場合に、得られた CGRP とそのフーリエスペクトルを図 2.8 に示す。2 階調の場合であっても図 2.7 (b) に示す 256 階調の CGRP のフーリエスペクトルと同等のものが得られていることがわかる。図 2.8 (a) の CGRP を設計した際の評価値の変化を図 2.9 に示す。また、比較のため、図 2.5 の 256 階調の CGRP の評価値も図 2.9 に改めて示している。これらの評価値を比較

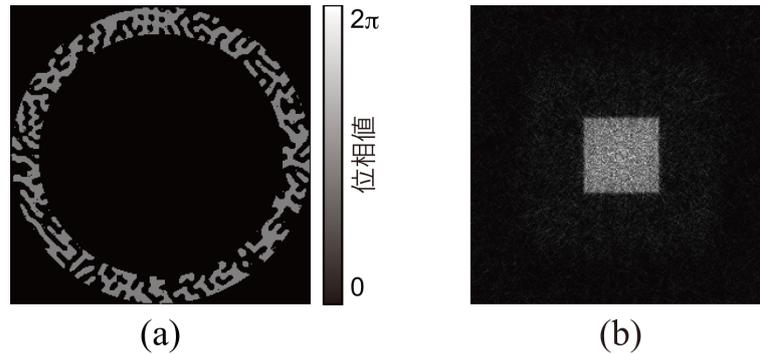


図 2.8 2 階調の位相値を有する CGRP とフーリエスペクトル.

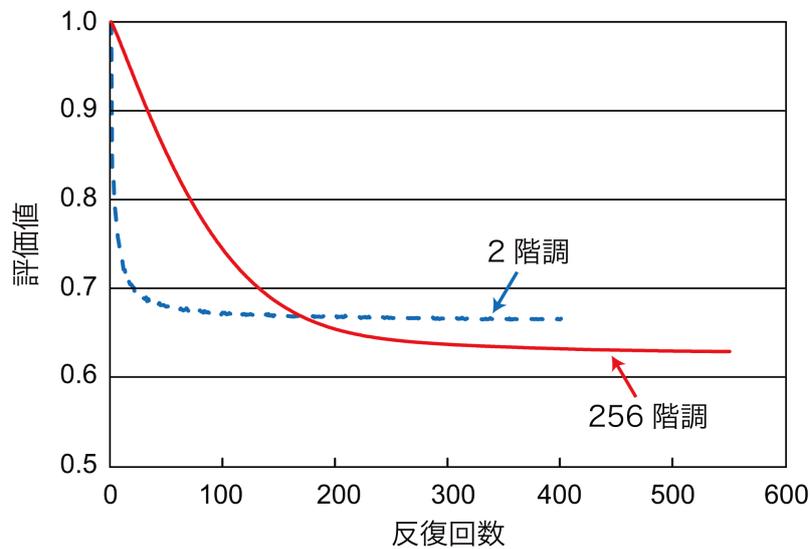


図 2.9 256 階調と 2 階調の CGRP を設計する場合の評価関数の比較.

すると、位相の階調数が高い方が評価値が低く、より目的の分布に近い光波が生成できていることがわかる。これは、一般的な位相ホログラムと同様に、位相の階調数が大きいほど量子化誤差を低減でき、回折効率が向上しているためである [78]。以降の検証では、256 階調の SLM を用いることを想定し、256 階調の CGRP を用いる。次節では、ランダム位相マスクと CGRP それぞれを用いた場合の光利用効率・再生像の品質を評価、比較した結果を述べる。

2.4 光利用効率の比較

本節では、ランダム位相マスクと CGRP それぞれを用いた場合の光利用効率をシミュレーションと実験により評価した結果を述べる。

コアキシャルホログラフィックメモリで一般的に用いられるランダム位相マスクを図 2.10 (a) に示す. $0, \pi$ の 2 階調の位相値がランダムに分布している. このランダム位相マスクのセルサイズは, ページデータのセルサイズと同じである. 図 2.10 (a) のランダム位相マスクを用いる場合の再生像よりも高品質な再生像を得るために, 図 2.10 (b), (c) の高精細なランダム位相マスクを用いることが提案されている. 図 2.10 (b), (c) とともに, $0, \pi$ の 2 階調の位相値がランダムに分布しているが, それぞれのランダム位相マスクのセルサイズは, 図 2.10 (a) のランダム位相マスクに対して $1/2$ 倍, $1/4$ 倍である. これらの高精細なランダム位相マスクを用いることにより, 式 (2.6) の参照光の自己相関関数のピーク幅が狭くなり, 再生像の品質が可能である. 参照光の自己相関関数の評価結果については, 次節に述べる.

以上の高精細なランダム位相マスクに対して, 本研究では CGRP を用いることを提案する. 図 2.10 (d), (e) に, SA 法により設計した CGRP を示す. それぞれの CGRP の位相値の階調数 N は 256 である. それぞれのセルサイズは図 2.10 (a) のランダム位相マスクに対して $1/2$ 倍, $1/4$ 倍である.

シミュレーションにより取得した, それぞれの参照光のフーリエスペクトルを図 2.11 に示す. 破線は図 2.1 の開口として用いられるナイキストアパーチャ [69, 70] を示し, 破線より外側の光波は除去される. 図 2.11 (a), (b), (c) から, ランダム位相マスクを用いる場合, の位相分布の解像度が高くなるにつれて, フーリエスペクトルが広域に分布することがわかる. 一方, CGRP では, 図 2.11 (d), (e) が示すように, 位相分布の解像度に依存せずナイキストアパーチャ内に光エネルギーが集中していることがわかる. ナイキストアパーチャ内の光エネルギーの総和をシミュレーションにより評価した結果を図 2.12 中の左側の棒グラフで示す. 図 2.12 では, 図 2.10 (a) のランダム位相マスクを用いた場合の光エネルギーの総和を 1 として規格化

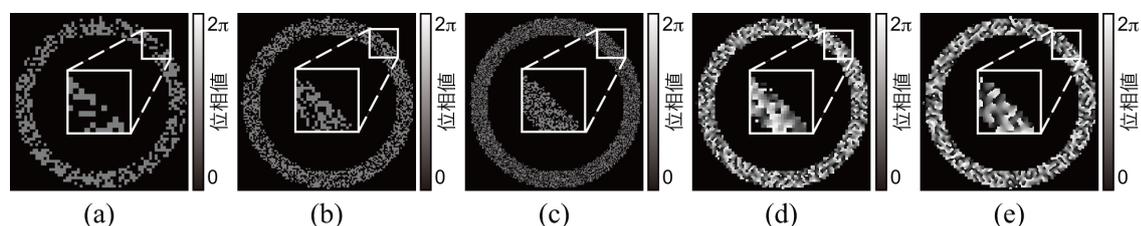


図 2.10 参照光の位相分布その一部拡大図. (a) ページデータのセルサイズと同じ解像度のランダム位相マスク, (b) $1/2$ 倍のセルサイズのランダム位相マスク, (c) $1/4$ 倍のセルサイズのランダム位相マスク, (d) $1/2$ 倍のセルサイズの CGRP, (e) $1/4$ 倍のセルサイズの CGRP.

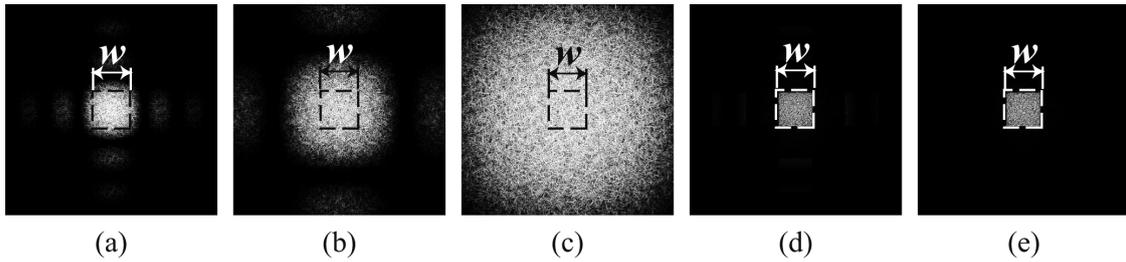


図 2.11 シミュレーションにより取得した参照光のフーリエパワースペクトル。(a) ページデータのセルサイズと同じ解像度のランダム位相マスク, (b) 1/2 倍のセルサイズのランダム位相マスク, (c) 1/4 倍のセルサイズのランダム位相マスク, (d) 1/2 倍のセルサイズの CGRP, (e) 1/4 倍のセルサイズの CGRP.

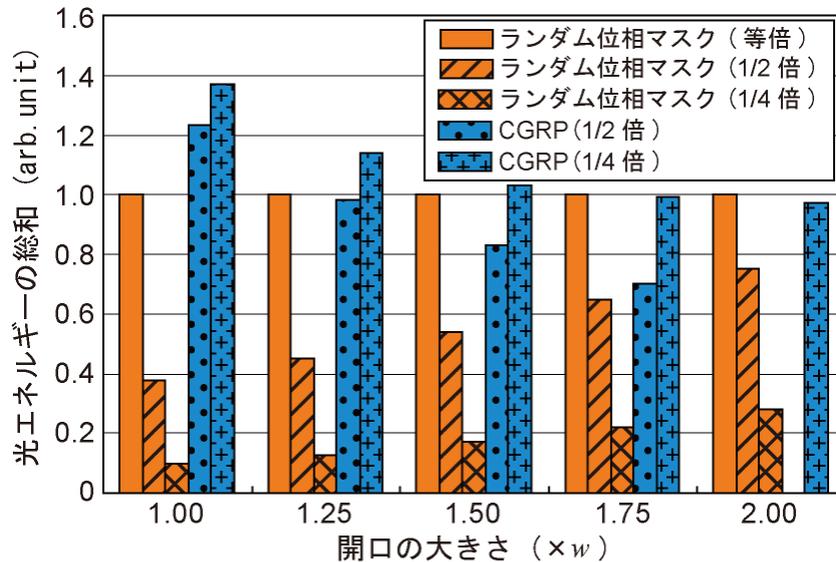


図 2.12 シミュレーションによる開口内の光エネルギーの総和の比較結果

をおこなっている。ランダム位相マスクでは、セルサイズが 1/2 倍、1/4 倍と細かくすると、開口内における光エネルギーの総和は 0.38, 0.10 と低下する。したがって、従来手法であるランダム位相マスクの高精細化では、ホログラム記録・再生時の参照光のエネルギーが低下する問題がある。このことが原因で、記録媒体にホログラムを記録する際のホログラムのコントラストの低下や、再生される信号光の強度が低下する問題が生じる。従来のランダム位相マスクを用いる手法に対して、CGRP を導入することにより、位相分布のセルサイズが 1/2 倍の場合では光エネルギーの総和が、同サイズのランダム位相マスクに対して 3 倍に向上し、位相分布のセルサイズが 1/4 倍の場合では光エネルギーの総和が 14 倍に向上している。

2.1 節で述べたように、ホログラフィックメモリでは一般的に、幅 w から $2w$ の矩形開口が用いられる。 w 以外の大きさの開口を用いる場合の提案手法の有用性を検証するために、以下に $1.25w$, $1.5w$, $1.75w$, $2w$ の開口を用いる場合の光利用効率を評価した結果を示す。 $1.25w$, $1.5w$, $1.75w$, $2w$ の開口を用い、ランダム位相マスクと CGRP のそれぞれを用いた場合の光エネルギーの総和を図 2.12 中のナイキストアパーチャ w を用いた場合の評価結果の右側に示す。 $1.25w$, $1.5w$, $1.75w$, $2w$ の開口を用いる場合には、その開口の大きさに応じて CGRP を新たに設計した。開口の大きさ毎に、図 2.10 (a) のランダム位相マスクの光エネルギーの総和により規格化をおこなった。いずれの開口を用いた場合でも、CGRP を用いることにより、ランダム位相マスクの高精細化と比較して光エネルギーの総和が向上していることがわかる。また、ランダム位相マスクとは異なり、CGRP では位相分布の解像度が高い方が、光エネルギーの総和が向上することがわかる。

図 2.12 において、ページデータのセルサイズと等倍の CGRP の光エネルギーの総和を示していない理由は、CGRP を設計する意義がなく、光エネルギーの総和を評価していないためである。また、開口の大きさが $2w$ 、かつセルサイズが $1/2$ 倍の CGRP も設計する意義がない。もし、上述の場合で CGRP を設計するとランダム位相マスクと同等のものが得られ、光利用効率は改善されない。以降に示す光利用効率の実験的評価の際にも、上述の CGRP の設計はおこなっていない。

次に、光学実験により開口内における光エネルギーの総和を評価した。実験に用いた光学系を図 2.13 に示す。光源には波長 532 nm の半導体レーザーを用いた。振幅変調型空間光変調器 (A-SLM) には画素数 800×600 、画素サイズ $32\ \mu\text{m} \times 32\ \mu\text{m}$ のものを用いた。位相変調型空間光変調器 (P-SLM) には画素数 792×600 、画素サイズ $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ のものを用いた。撮像素子には画素数 1280×960 、画素サイズ $4.65\ \mu\text{m} \times 4.65\ \mu\text{m}$ の CCD カメラを用いた。

A-SLM により、平行光の振幅分布を変調し、参照光の振幅分布を得た。次に、P-SLM によりランダム位相マスク、あるいは CGRP に応じて光波の位相を変調し、参照光を得た。参照光をレンズによりフーリエ変換し、撮像素子により参照光のフーリエパワースペクトルを取得した。それぞれの位相変調パターンを用いた場合のフーリエスペクトルの強度分布を図 2.14 に示す。図 2.11 に示すシミュレーションにより取得したフーリエパワースペクトルと比較して、実験により取得したフーリエパワースペクトルには高強度の 0 次光が存在している。これは、反射型の P-SLM [81] を用いたことにより、P-SLM 表面や、画素間の隙間からの反射光が、不要な 0 次光としてあらわ

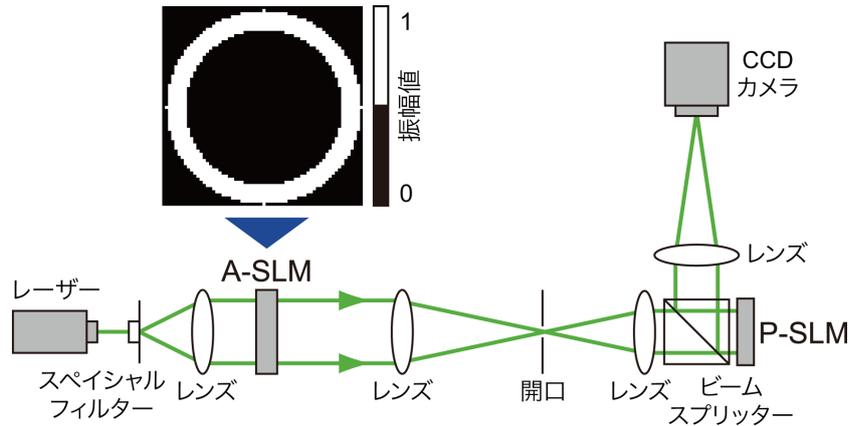


図 2.13 参照光のフーリエパワースペクトルの取得実験に用いた光学系.

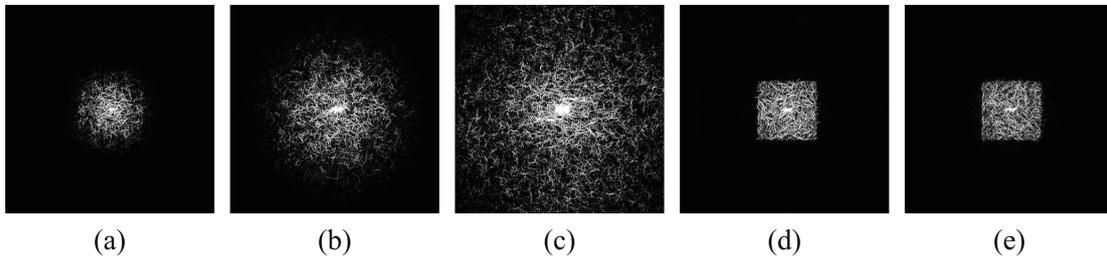


図 2.14 実験により取得した参照光のフーリエパワースペクトル. (a) ページデータのセルサイズと同じ解像度のランダム位相マスク, (b) 1/2 倍のセルサイズのランダム位相マスク, (c) 1/4 倍のセルサイズのランダム位相マスク, (d) 1/2 倍のセルサイズの CGRP, (e) 1/4 倍のセルサイズの CGRP.

れているからである [82]. この不要な 0 次回折光は、ホログラムの多重記録をおこなう際に記録媒体の浪費を引き起こすことが懸念される. しかし、P-SLM の特性を考慮した CGRP の設計、線形位相付加、球面位相付加 [83]、格子状位相付加 [84]、あるいは位相圧縮 [85] などの技術を用いることにより不要な 0 次光の影響を低減することが可能である. 以降の実験では、不要な 0 次回折光によって記録媒体の浪費が生じたとしても、提案手法の原理検証のためには問題とならないため、不要な 0 次光の低減はおこなっていない.

実験により取得した開口内の光エネルギーの総和を評価した結果を図 2.15 に示す. 本実験では、図 2.13 の CCD カメラの直前に開口を配置せずに、図 2.14 の開口の大きさに相当する領域のみの光エネルギーを算出し、評価をおこなった. シミュレーション結果と同様に、CGRP を用いることにより光エネルギーの総和が向上することがわかる. 特に、ナイキストアパーチャーを用いるとき、CGRP を用いることにより、

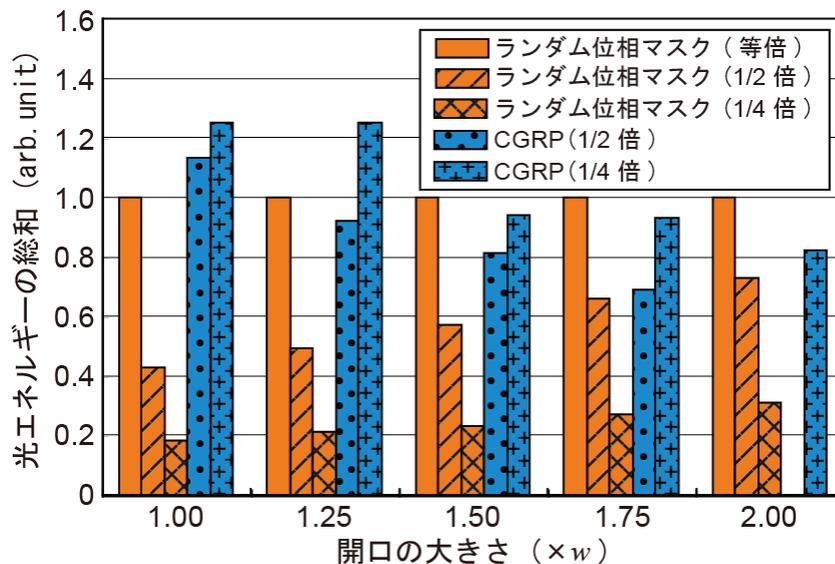


図 2.15 実験による開口内の光エネルギーの総和の比較結果

位相分布のセルサイズが 1/2 倍の場合では、同サイズのランダム位相マスクに対して光エネルギーの総和が 3 倍向上し、セルサイズが 1/4 倍の場合では光エネルギーの総和が 7 倍向上した。

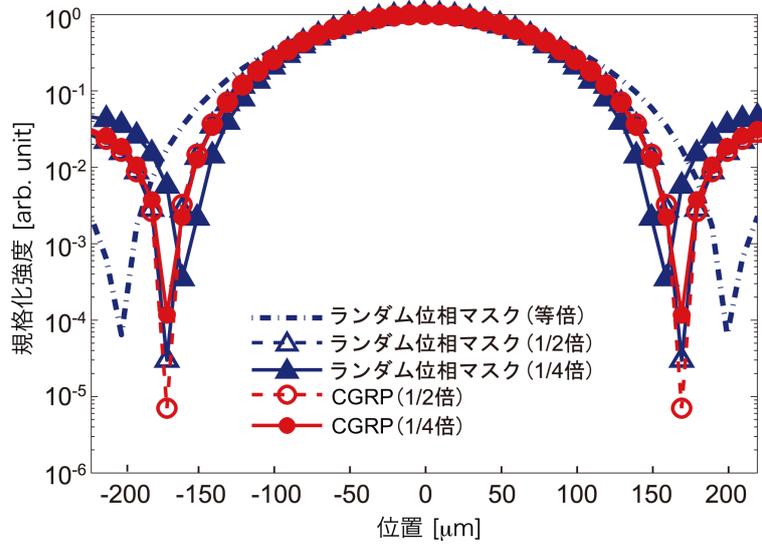
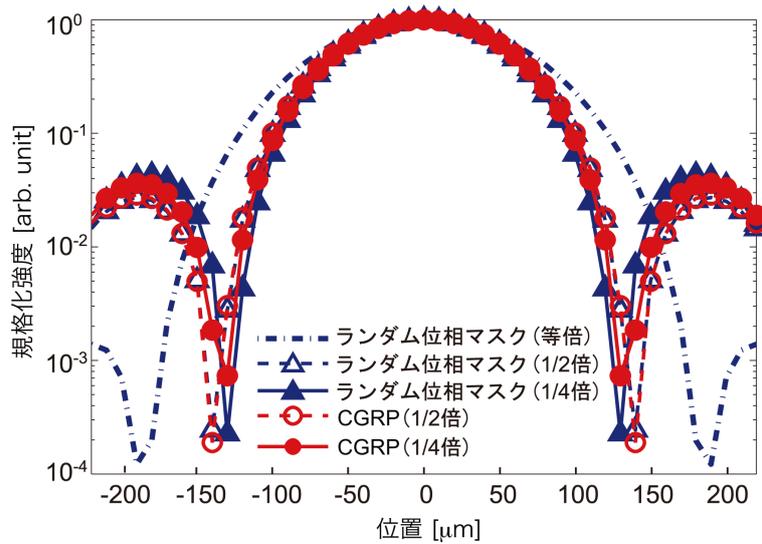
以上の実験結果から、CGRP を用いることにより光利用効率の向上が可能であることが明らかになった。次節以降では、CGRP の導入が再生像の品質にどのような影響を与えるかを検証する。

2.5 参照光の自己相関関数の比較

本節では、再生像の品質の指標となる参照光の自己相関関数をシミュレーションにより取得し、従来手法と提案手法の自己相関関数を比較した結果について述べる。

式 (2.6) からわかるように、再生像の品質は参照光の自己相関関数に応じて変化し、それがデルタ関数に近くなるほど高品質となる。参照光の位相分布としてランダム位相マスクと CGRP のそれぞれを用い、開口として w , $1.25w$, $1.5w$, $1.75w$, $2w$ の矩形開口を用いた場合の参照光の自己相関関数を取得した。シミュレーションにより取得したそれぞれの自己相関関数を図 2.16 から図 2.20 に示す。縦軸は自己相関関数の規格化強度とした。自己相関関数を取得する際、位相変調パターンの画素数は 512×512 、サンプリング間隔を $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 、オーバーサンプリングを 2 倍とした。

自己相関関数のメインローブの幅をピーク幅と定義し、ランダム位相マスクと CGRP

図 2.16 幅 w の開口を用いた場合の自己相関関数の比較.図 2.17 幅 $1.25w$ の開口を用いた場合の自己相関関数の比較.

の比較をおこなった. 図 2.16 は幅 w の開口を用いた場合の自己相関関数を取
 得した結果である. ページデータのセルサイズに対して等倍のランダム位相マ
 スクを用いた場合, ピーク幅は $400\ \mu\text{m}$ であった. これに対して, セルサイズ
 が $1/2$ 倍のランダム位相マスクあるいは CGRP を用いることにより, ピーク
 幅が $340\ \mu\text{m}$ 以下と狭くなること
 がわかる. また, セルサイズが $1/4$ 倍のランダム位相マスクあるいは CGRP
 を用いた場合でも, 等倍のランダム位相マスクに対して, ピーク幅が狭くな
 ることがわかる.

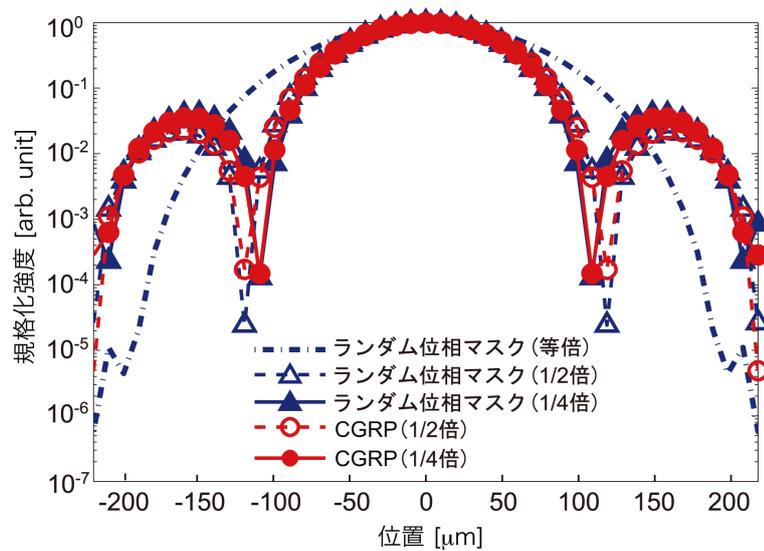


図 2.18 幅 $1.50w$ の開口を用いた場合の自己相関関数の比較.

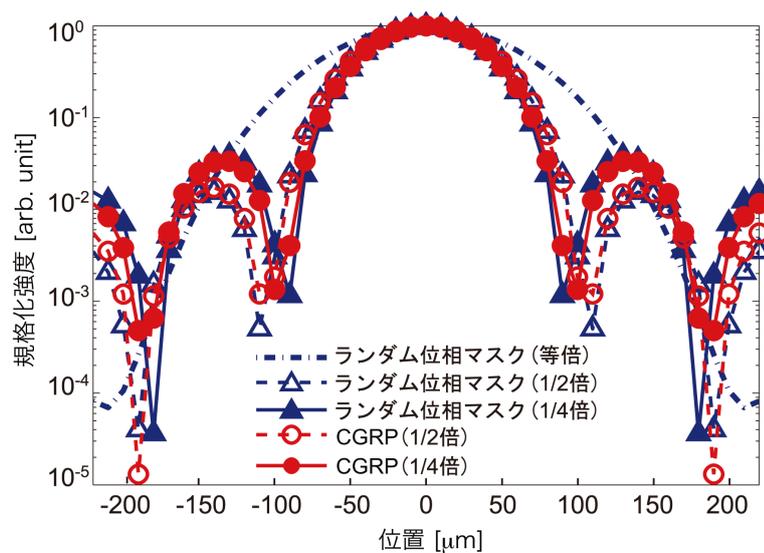


図 2.19 幅 $1.75w$ の開口を用いた場合の自己相関関数の比較.

同様に、他の開口を用いた場合でも、高精細なランダム位相マスクあるいは CGRP を用いることにより、自己相関関数のピーク幅が狭くなる。したがって、ランダム位相マスクの高精細化と同様に、CGRP を用いることにより再生像の品質が向上することが期待される。以上の評価では自己相関関数の第 2 ピークや極小値の大きさの影響は無視している。また、式 (2.6) では記録媒体の厚さの影響を無視しているため、CGRP によって再生像の品質向上が可能かどうかを明らかにするためにはさらなる検証が必

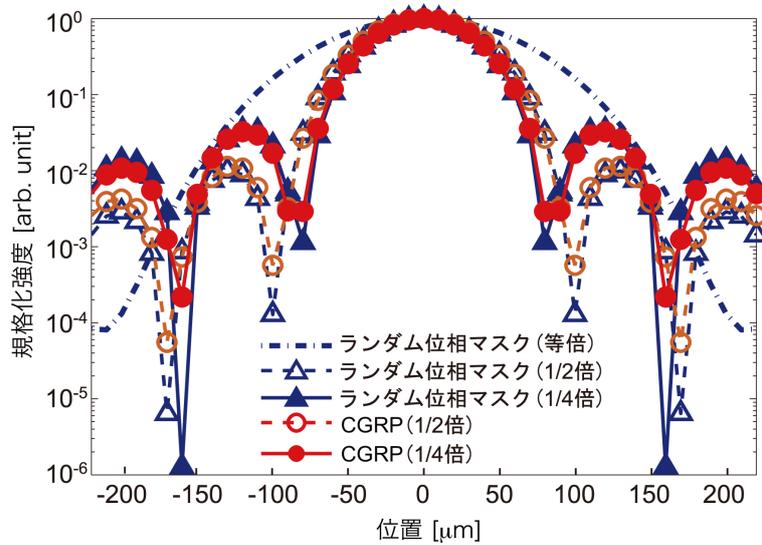


図 2.20 幅 $2.00w$ の開口を用いた場合の自己相関関数の比較.

要である。2.6 節および 2.7 節では、記録・再生シミュレーションおよび光学実験により、CGRP を用いることにより再生像の品質が向上可能かどうかを検証した結果を述べる。

2.6 データ記録・再生シミュレーション

本節では、シミュレーションにより単一のホログラムを記録・再生し、再生像の品質を評価した結果について述べる。はじめに、本研究で用いた体積ホログラムの記録・再生シミュレーション [86–88] の方法を述べる。次に、再生像の評価方法について述べる。最後に、CGRP とランダム位相マスクのそれぞれを用いた場合の再生像の品質を評価し、CGRP を用いることにより再生像の品質を向上可能であり、高密度にデータを記録可能であることを示す。

2.6.1 シミュレーション方法

シミュレーションの概念図を図 2.21 に示す。シミュレーションでは、スカラー回折理論に基づく光波の伝搬計算を用いる。また、記録媒体の 3 次元構造は複数のレイヤーを重ねることにより表現され、各レイヤごとに光波の干渉、伝搬の計算をおこなうことにより、体積ホログラムの記録・再生のシミュレーションをおこなうことができる。ランダム位相マスクを用いた場合を例として、シミュレーションの手順につい

て述べる。

データ記録時，入力面に 図 2.22 に示す参照光と信号光の複素振幅分布を配置する。振幅変調パターンと位相変調パターンの画素数は 512×512 とし，サンプリング間隔は $20 \mu\text{m}$ とした。焦点面 1 には開口が設置されている。入力面の光波の開口による空間周波数フィルタリング後の光波をフーリエ変換し，焦点面 2 における光波の複素振幅分布を算出する。この光波の複素振幅分布から角スペクトル法 [89,90] を用いて伝搬計算をおこなうことにより，各レイヤにおける光波の複素振幅分布を算出する。角スペクトル法とは，光波伝搬の計算技術であり，近似を用いていないため，微小な距離を伝搬する光波の複素振幅分布を算出することができる。各レイヤ毎に光波の干渉を計算し，干渉縞の強度分布に応じた屈折率変化をホログラムとして記録媒体に記録する。露光前の記録媒体の屈折率は 1.5 とした。また，露光後の屈折率の変化は強度に比例するものと仮定し，最大の屈折率変化量は 10^{-4} とした。

データ再生時，入力面に 図 2.23 に示す参照光の複素振幅分布を配置する。データ記録時と同様，空間周波数フィルタリングをおこなった後，角スペクトル法により，記録媒体の各レイヤにおける参照光の複素振幅分布を算出する。各レイヤ毎に，この

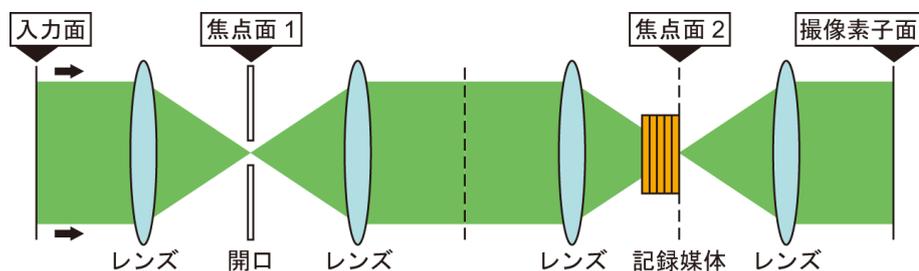


図 2.21 記録・再生シミュレーションの概念図

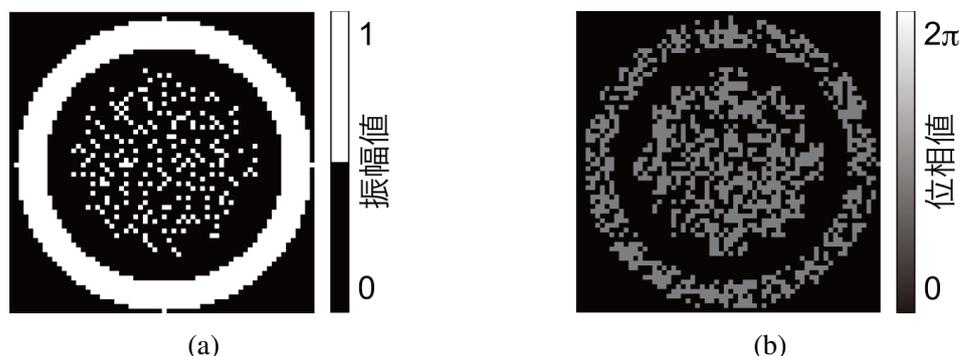


図 2.22 データ記録時に入力面に配置する参照光と信号光の複素振幅分布
(a) 振幅変調パターン， (b) 位相変調パターン)

参照光の複素振幅分布と、記録媒体に記録されている屈折率分布により生じる位相分布との積を計算する。得られた複素振幅分布から、角スペクトル法により焦点面 2 における光波の複素振幅分布を算出する。焦点面 2 において、各レイヤーからの光波の複素振幅分布を足し合わせ、フーリエ変換を計算し撮像素子面における光波の複素振幅分布を算出する。この複素振幅分布の絶対値の 2 乗を算出することにより、再生像が得られる。同様のシミュレーションを高精細なランダム位相マスク、および CGRP を用いた場合にもおこなう。

図 2.22 に示すページデータの変調符号化法としては 3:16 コーディング [21] を用いた。3:16 コーディングでは、16 セル中 3 セルを ON セルとし、これを 1 シンボルとする。ON セルの配置により、560 通りのシンボルを表現することができる。560 通りのシンボルの内、4 近傍で ON セルが連続しているシンボルを取りぞいた 256 通りのシンボルを情報として用いる。したがって、1 シンボルで 8 bit の情報量がある。データ復号時には、強度が高い 3 セルを ON セルとして同定することにより、データを読み出すことができる。シミュレーションに用いたページデータのシンボル数は 68 であり、544 bit の情報量がある。このページデータをランダムに 10 枚用意し、これらそれぞれを単一に記録・再生した。また開口の大きさは w , $1.25w$, $1.5w$, $1.75w$, $2w$ とした。以上のシミュレーションに用いた設定パラメータの詳細を表 2.1 に示す。

再生像の品質を定量的に評価するために、信号対雑音比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio)

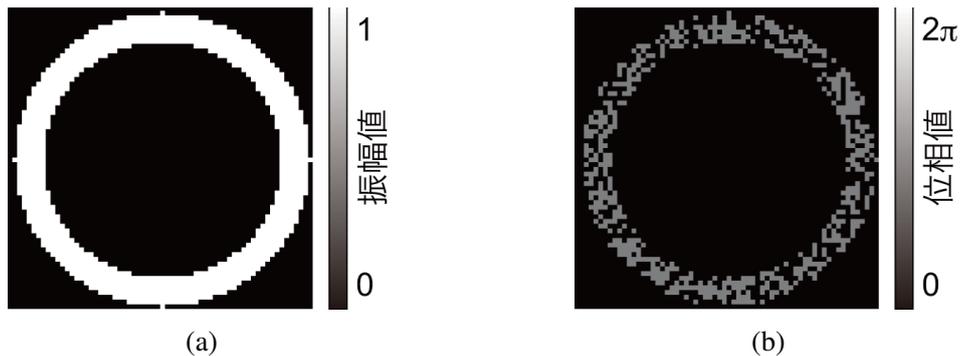


図 2.23 データ再生時に入力面に配置する参照光の複素振幅分布 ((a) 振幅変調パターン, (b) 位相変調パターン)

表 2.1 設定パラメータ

変調パターンの画素数 [pixels]	512×512
ON セルの画素数 [pixels]	8×8
サンプリング間隔 [μm]	20
レンズの焦点距離 [mm]	50
光源の波長 [nm]	532
ナイキストサイズ w [μm]	166.25
記録媒体の厚さ [μm]	500
各レイヤーの厚さ [μm]	50
記録媒体の屈折率	1.5
屈折率の最大変化量	10^{-4}
ページデータのシンボル数	68
ページデータ 1 枚の情報量 [bit]	544

とシンボル誤り率 (SER: Symbol Error Rate) を用いた。SNR は、

$$\text{SNR} = \frac{\mu_{\text{on}} - \mu_{\text{off}}}{\sqrt{\sigma_{\text{on}}^2 + \sigma_{\text{off}}^2}} \quad (2.9)$$

と定義される。ここで、 μ_{on} 、 μ_{off} はそれぞれ ON セルの強度の平均値、OFF セルの強度の平均値をあらわし、 σ_{on} 、 σ_{off} はそれぞれ ON セルの強度の標準偏差、OFF セルの強度の標準偏差をあらわす。SNR が高いほど高品質な再生像である。SER は、

$$\text{SER} = \frac{E_{\text{symbol}}}{N_{\text{symbol}}} \quad (2.10)$$

と定義される。ここで、 N_{symbol} は記録されたページデータの全シンボル数、 E_{symbol} は読み出されたデータの誤りシンボル数である。SER が低いほど、データを正しく読み出すことができる。

2.6.2 シミュレーション結果

シミュレーションにより取得した、幅 $2w$ の開口を用いた場合の再生像の一例を図 2.24 に示す。図 2.24 (a), (b), (c), (d), (e) はそれぞれ、ページデータのセルサ

イズと等倍のランダム位相マスクを用いた場合に得られた再生像，1/2 倍のセルサイズのランダム位相マスク，1/2 倍のセルサイズの CGRP を用いた場合の再生像，1/4 倍のセルサイズのランダム位相マスク，1/4 倍のセルサイズの CGRP を用いた場合の再生像である。ランダム位相マスクの高精細化，あるいは CGRP を用いることより，ページデータのセルサイズと等倍のランダム位相マスクを用いた場合と比較して，ぼけが少ない再生像が得られていることがわかる。再生像の品質を定量的に評価するために，SNR と SER を取得した。セルサイズが 1/2 倍の位相分布，セルサイズが 1/4 倍の位相分布を用いた場合の SNR と SER を図 2.25，図 2.26 にそれぞれ示す。グラフの点は，

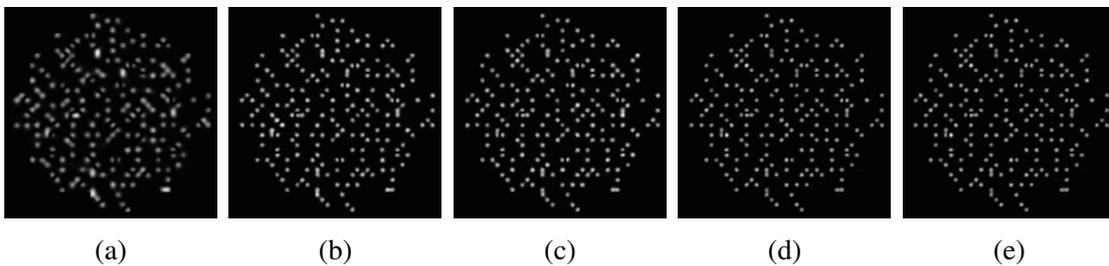


図 2.24 シミュレーションにより取得した開口サイズが $2w$ のときの再生像の一例 (a) ページデータのセルサイズと等倍のランダム位相マスク，セルサイズが 1/2 倍の (b) ランダム位相マスクと (c) CGRP，セルサイズが 1/4 倍の (d) ランダム位相マスクと (e) CGRP)

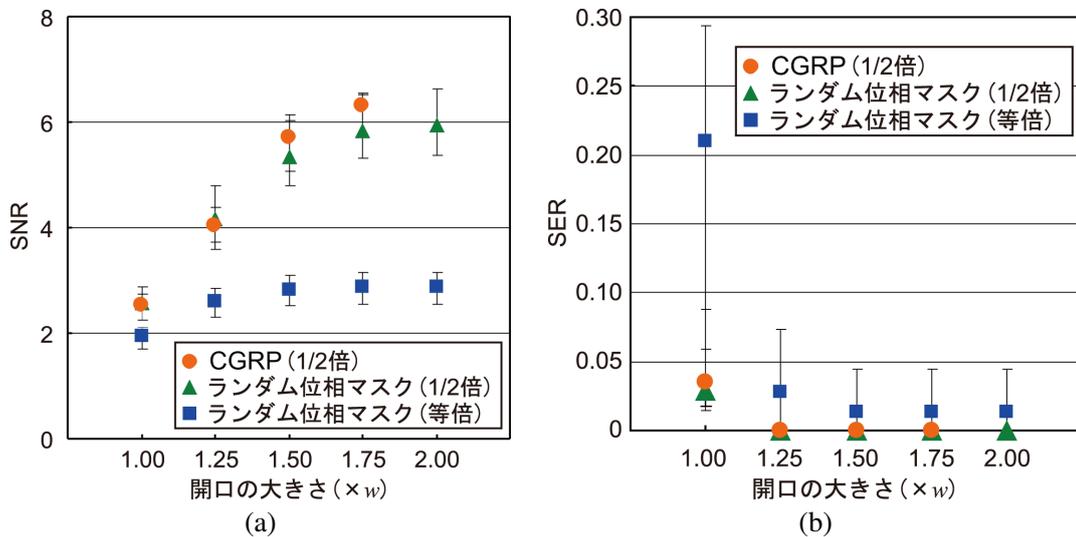


図 2.25 ページデータのセルサイズに対して等倍のランダム位相マスク，1/2 倍のセルサイズのランダム位相マスク，1/2 倍のセルサイズの CGRP を用いた場合の (a) SNR と (b) SER

10枚の再生像のSNRとSERのそれぞれの平均値をあらわし、バーはSNRとSERのそれぞれの最大値と最小値を示している。図2.25において、幅 $2w$ の開口を用いたときのセルサイズが $1/2$ 倍のCGRPのSNRとSERの値がないのは、2.4節で示したようにCGRPを設計する意義がないため、再生像を取得していないからである。

ランダム位相マスクの高精細化の場合とCGRPを用いた場合は、ページデータのセルサイズと等倍のランダム位相マスクを用いた場合と比較して同程度のSNRとSERの改善が可能であることがわかる。

また、いずれの参照光を用いた場合でも、開口の幅が大きくなるほどSNRが向上することがわかる。これは、より開口の幅が大きくなることで画素間干渉の影響が小さくなりSNRが向上するからである。つまり、SNRとデータ記録密度の間にはトレードオフの関係がある。しかし、図2.25(a)から、ページデータのセルサイズに対して等倍のランダム位相マスクを用い、幅 $2w$ の開口を用いた場合のSNRの平均値は、2.87であるのに対して、ランダム位相マスクの高精細化あるいはCGRPを用い、幅 $1.25w$ の開口を用いた場合のSNRの平均値はそれぞれ4.17と4.02である。したがって、ランダム位相マスクの高精細化あるいはCGRPを用いることにより、より高密度にデータを記録し、高品質な再生像を取得可能であることがわかる。

図2.25(a)と図2.26(a)から、セルサイズが $1/2$ 倍の位相分布と、セルサイズが $1/4$

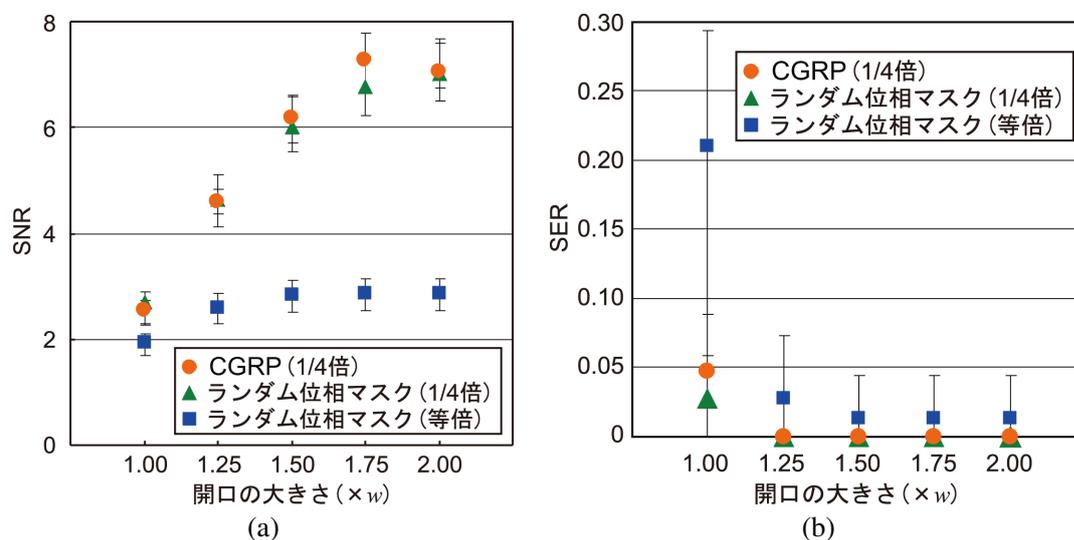


図 2.26 ページデータのセルサイズに対して等倍のランダム位相マスク、 $1/4$ 倍のセルサイズのランダム位相マスク、 $1/4$ 倍のセルサイズのCGRPを用いた場合の(a) SNRと(b) SER

倍の位相分布を用いた場合の SNR を比較すると、セルサイズが 1/4 倍の位相分布を用いた方が SNR が高い値が得られたことを示している。これは、2.5 節で示したようにセルサイズが細かい方が参照光の自己相関関数のピーク幅が狭くなるためである。

2.7 データ記録・再生実験

本節では、光学実験により単一のホログラムを記録・再生し、再生像を評価した結果について述べる。2.5 節の参照光の自己相関関数の評価結果と、2.6 節の記録・再生シミュレーションの結果からランダム位相マスクの高精細化、あるいは CGRP を用いる場合に、ランダム位相マスクを用いた場合と比較して同等の再生像の品質向上が可能であることを示した。このことを光学実験により検証する。はじめに、実験方法について述べ、次に、実験結果について述べる。

2.7.1 実験方法

実験に用いた光学系を図 2.27 に示す。光源には波長 532 nm の半導体レーザーを用いた。A-SLM には画素数 800×600 、画素サイズ $32 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ のものを用いた。P-SLM には画素数 792×600 、画素サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ のものを用いた。撮像素子には画素数 1280×960 、画素サイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ のものを用いた。記録媒体には厚さ $18 \mu\text{m}$ のフォトポリマーを用いた。図 2.26 (a) から、幅 $2w$ の開口を用い、ランダム位相マスクの高精細化、あるいは CGRP を用いることにより同程度の SNR の

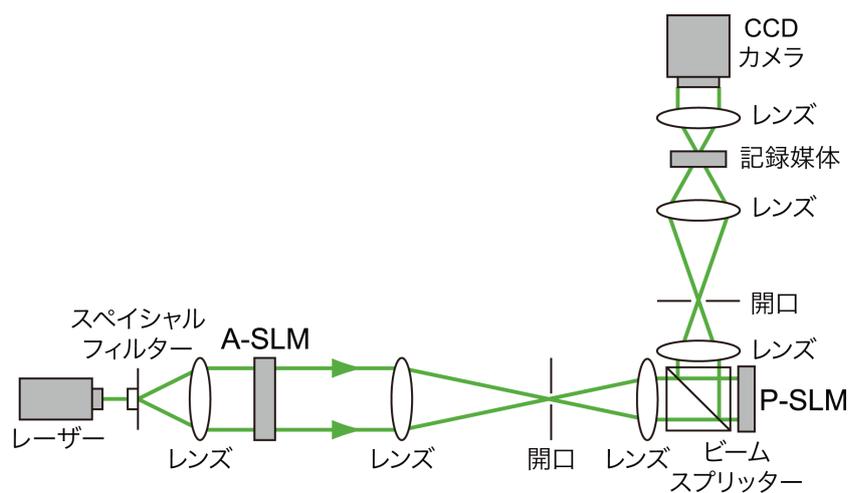


図 2.27 実験光学系

向上が可能であり、かつ最も SNR が向上するため、実験に用いる開口の幅を $2w$ とした。

ランダム位相マスクを用いた場合を例として、実験手順について述べる。データ記録時、図 2.28 に示す振幅変調パターンと位相変調パターンに従い、A-SLM と P-SLM により光波の複素振幅分布を変調して参照光と信号光を得た。図 2.28 (a) の中心部分に配置されているページデータのシンボル数は 64 であり、512 bit の情報量がある。参照光と信号光をレンズによりフーリエ変換し、記録媒体内において参照光と信号光のホログラムを記録した。

データ再生時、A-SLM と P-SLM により光波の複素振幅分布を変調し、参照光を得た。参照光を記録媒体に照射することにより、記録媒体から信号光を再生した。信号光の強度分布を撮像素子により再生像として取得した。同様の実験を図 2.29 に示すセルサイズが $1/4$ 倍のランダム位相マスク、セルサイズが $1/4$ 倍の CGRP を用いた場合についてもおこなった。

2.7.2 実験結果

ページデータのセルサイズに対して等倍のランダム位相マスク、セルサイズが $1/4$ 倍のランダム位相マスク、セルサイズが $1/4$ 倍の CGRP を用いた場合の再生像、SNR、および SER を図 2.30 に示す。ページデータのセルサイズに対して等倍のランダム位相マスクを用いた場合の SNR は 1.27 であるのに対して、ランダム位相マスクの高精細化、あるいは CGRP を用いることにより SNR がそれぞれ 2.73, 2.81 であり、2 倍以上の SNR の向上が可能であることがわかる。また、ランダム位相マスクの高精細化、あるいは CGRP を用いることにより、SER の低減にも成功している。実験によ

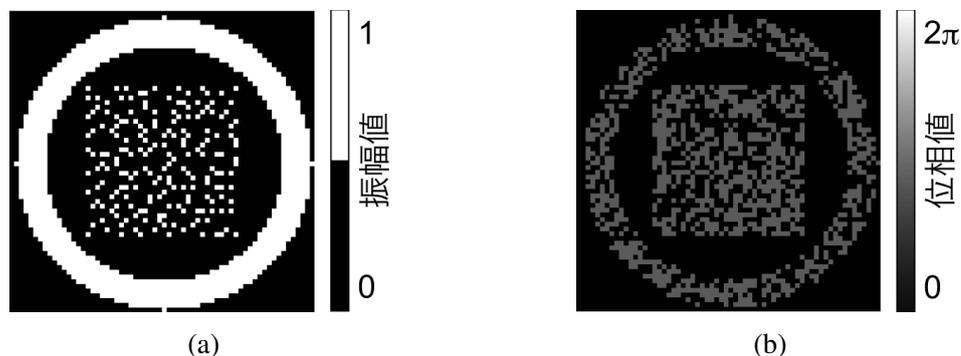


図 2.28 実験に用いた変調パターン ((a) 振幅変調パターン, (b) 位相変調パターン)

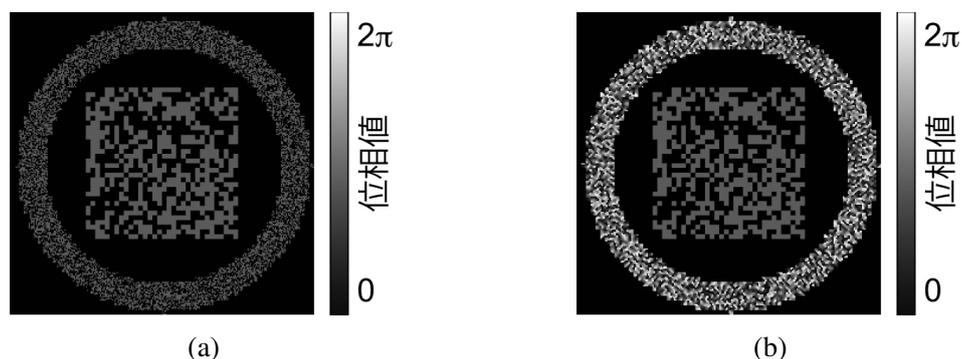


図 2.29 実験に用いた位相変調パターン ((a) セルサイズが 1/4 倍のランダム位相マスク, (b) セルサイズが 1/4 倍の CGRP)

り, CGRP を用いることにより, ランダム位相マスクの高精細化と同等の再生像の品質向上が可能であることを示した. 2.4 節の光利用効率の評価結果から, ランダム位相マスクの高精細化による再生像の品質の向上手法では, 光利用効率が低下してしまうという問題があったが, CGRP を用いた再生像の品質の向上手法では, 光利用効率の向上が可能である.

2.8 結言

本章では, コアキシャルホログラフィックメモリに用いられるランダム位相マスクのトレードオフの問題に言及し, その問題解決のために CGRP を提案した. CGRP を用いることにより, 光利用効率と再生像の品質の両方を向上可能であることをシミュレーションと実験により実証した. また, セルサイズが細かいほど再生像の品質と光

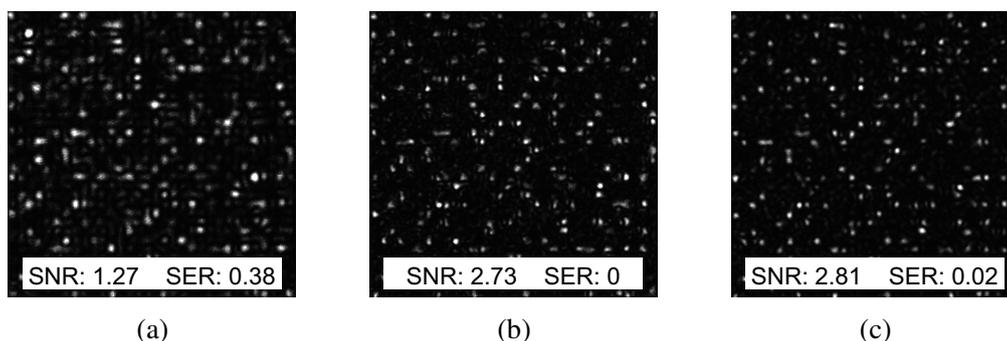


図 2.30 実験により取得した再生像 ((a) ページデータのセルサイズに対して等倍のランダム位相マスク, (b) セルサイズが 1/4 倍のランダム位相マスク, (c) セルサイズが 1/4 倍の CGRP)

利用効率の両方が向上することを明らかにした。再生像の品質を向上可能であることから、従来のコアキシャルホログラフィックメモリを超える記録密度の実現が期待される。また、参照光の光利用効率の向上が可能であることから、記録媒体にホログラムを記録する際に、位相分布の解像度に依存せず、ホログラムのコントラストを高く維持することができる。さらに、データ再生時には、ホログラムに照射される参照光の光エネルギーが高いため、記録媒体から再生される信号光の強度が高くなり、撮像素子のシャッタースピードを短く設定することができる。以上から、提案手法を用いることにより、再生像の品質を向上すると同時に、データ転送速度の向上、低出力レーザーを用いた記録システムの構築が可能となることが期待される。

第3章 相関が低い計算機生成参照光パターンによるクロストークノイズの低減

3.1 緒言

コアキシャルホログラフィックメモリでは、ホログラムの多重記録法としてシフト多重記録法が一般的に用いられる。シフト多重記録法とは、記録媒体をシフトしながら複数のホログラムを重ねて記録する方法である。このとき、記録媒体のシフト量が小さいほど、より多くのホログラムを記録媒体に記録することができる。しかしながら、記録媒体のシフト量が小さくなるほど隣接するホログラムからのクロストークノイズが増大する。したがって、高密度にホログラムを記録し、大容量化を実現するためにはクロストークノイズを低減する必要がある。

これまでに、クロストークノイズを低減するため、共焦点系を導入することが提案されている [91]。この手法では、データ記録時にナイキストアパーチャによる空間周波数フィルタリングをおこなうだけでなく、記録媒体から再生される信号光に対しても記録時と同じアパーチャによる空間周波数フィルタリングをおこなう。このことにより、シフト多重記録をおこなう際にクロストークノイズが低減し、大容量化が達成可能であることがシミュレーションにより実証されている [91]。しかし、本手法ではアパーチャ内に含まれているクロストークノイズを除去することができない。このアパーチャ内のクロストークノイズの一部は、二重ランダム位相暗号化 [92] を応用することにより低減することができる [93, 94]。データ記録時、信号光の複素振幅分布を拡散板により変調し、記録媒体にホログラムを記録する。データ再生時、ホログラムから再生された光波に対して、記録時と同じ拡散板を用いて位相変調を再度おこなうことによりクロストークノイズが拡散し、高品質な再生像が得られる。しかし、この手法では、記録媒体に照射される光波が広がり、記録媒体を浪費するため、記録密度が低下する。上述の手法に対して、参照光の直交性あるいは相関に基づいたクロストークノイズの低減手法 [95–97] は、記録密度の低下を引き起こすことなく、大部分のクロストークノイズを低減することができる。この手法をコアキシャルホログラフィックメモリに適用する場合の原理を以下に述べる。式 (2.6) から、コアキシャルホログラフィックメモリの再生像は、開口の影響を無視すると、 $|r_1(x, y) \oplus r_2^*(x, y) \otimes s(x, y)|^2$ とあらわされる。ここで、 r_1 、 r_2 はそれぞれデータ記録・再生時の参照光の複素振幅分

布を示す。この式から、データ記録時とデータ再生時の参照光の相互相関がデルタ関数に近いときには再生像が得られ、相互相関が一様な分布となる場合には再生像が得られない。これまで、上述の相関に基づくクロストークノイズの低減法がコアキシャルホログラフィックメモリで実現されてきた [98,99]。しかし、これらの手法では、参照光の位相分布を変調するためにランダム位相マスクが用いられている。第1章で示したように、ランダム位相マスクには光利用効率と再生像の品質との間にトレードオフの関係がある。本研究では、ランダム位相マスクのトレードオフを解消すると同時に、クロストークノイズを低減するために、相関が低い複数の CGRP を用いることを提案する [100]。

本章では、相関が低い CGRP を用いることにより、クロストークノイズの低減が可能であることを実証した結果について述べる。3.2 節では、相関が低い CGRP の設計方法について述べる。3.3 節では、相関が低い CGRP を用いたホログラムの多重記録・再生結果を示す。3.4 節では、本章の結言を述べる。

3.2 相関が低い計算機生成参照光パターンの設計

2 枚の CGRP を設計する場合を例として、相関が低い CGRP の設計方法を述べる。相関が低い CGRP を複数設計する場合、必要な CGRP の枚数に合わせてランダム位相マスクを生成する。このとき、ランダム位相マスク同士の相互相関が十分に低くなるランダムパターンを計算機を用いてランダムに生成する。図 3.1 に、2 枚のランダム位相マスクを示す。2 枚のランダム位相マスクの相互相関値は、それぞれの自己相関値を 1 として規格化すると、0.0004 である。この値が小さいほど相関が低いパターンといえる。従来の相関に基づいたクロストークノイズの低減手法では、これらのランダム位相マスクが用いられ、その有用性が実証されている [98,99]。本研究では、これらのランダム位相マスクを初期値として、2.3 節で述べた手順により SA 法を用いて CGRP をそれぞれ独立に設計する。図 3.2 に設計した 2 枚の CGRP を示す。それぞれの CGRP のセルサイズは、ランダム位相マスクのセルサイズの 1/4 倍である。これらの CGRP の相互相関値は、0.0014 である。この値は、ランダム位相マスクの相互相関値 0.0004 よりも大きく、CGRP を設計することにより、相関値が高くなることを示している。しかし、ランダム位相マスクを用いた場合でも、データ記録・再生時のアパーチャーを用いた空間周波数フィルタリングを適用することにより、相互相関値は 0.0014 となる。したがって、以上で示す、ランダム位相マスクと CGRP の相互相関値の差は、

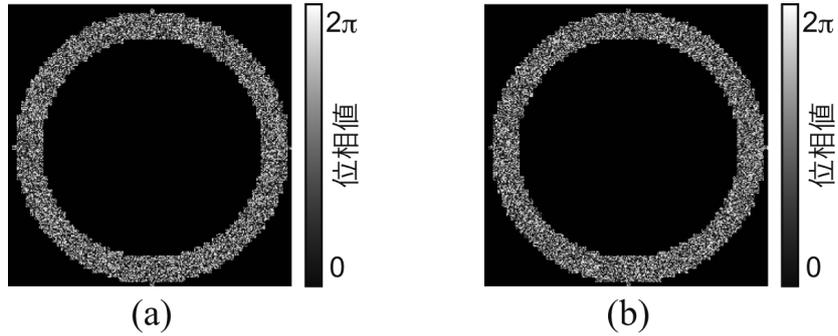


図 3.1 相関が低いランダム位相マスク. (a) ランダム位相マスク 1, (b) ランダム位相マスク 2.

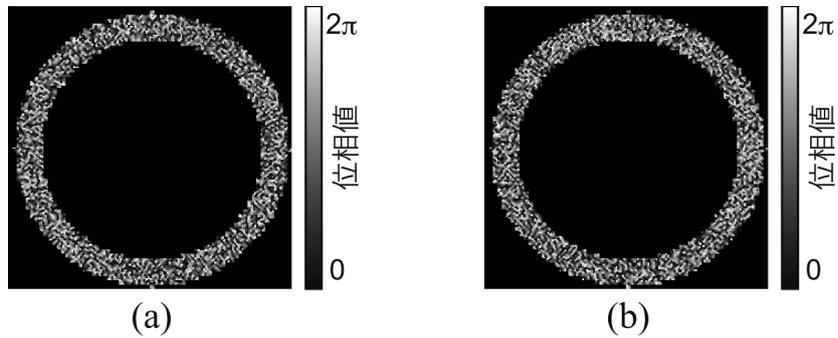


図 3.2 相関が低い CGRP. (a) CGRP1, (b) CGRP2.

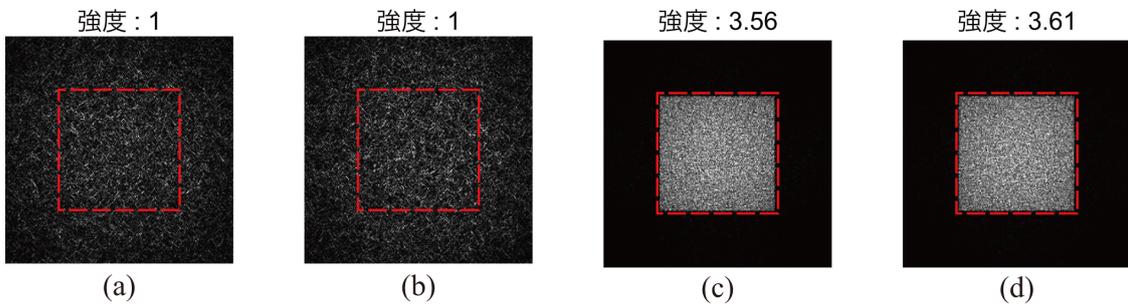


図 3.3 フーリエスペクトルの比較. (a) ランダム位相マスク 1, (b) ランダム位相マスク 2, (c) CGRP1, (d) CGRP2.

本設計手法の欠点ではない。次節では、相互相関値が 0.0014 の 2 枚の CGRP がクロストークノイズの低減に有効であることを実験により実証した結果を示す。図 3.1, 図 3.2 それぞれの参照光を用いた場合のフーリエスペクトルを図 3.3 に示す。図 3.3 中の破線は、データ記録・再生時に用いる 2 倍のナイキストアパーチャを示している。破線内の光強度を図 3.3 の上部に示す。CGRP を用いることにより、ランダム位相マスクよりも 3.5 倍以上に光エネルギーが向上している。

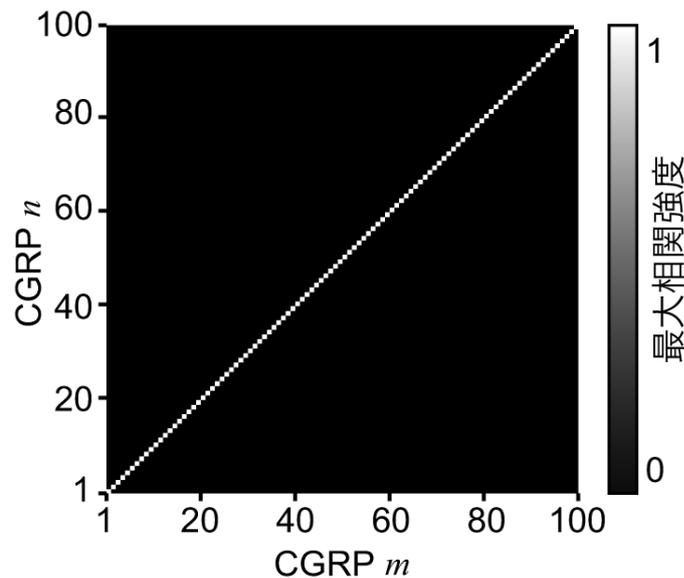


図 3.4 100 枚の CGRP の相関値

以上の設計手順により相関が低い複数の CGRP を設計可能かを検証するため、100 枚の相関が低い CGRP を設計し、それらの相関値を評価した。100 枚の CGRP の自己相関値と相互相関値を取得した結果を図 3.4 に示す。ここで、グレイスケールは相関強度の最大値を示している。 $m = n$ のときは自己相関値を、 $m \neq n$ は相互相関値をそれぞれ示している。図 3.4 から、相互相関値の最大値は 0.0027 であった。以上の数値的評価から、少なくとも 100 枚の相関が低い CGRP を設計可能であることが明らかになった。また、100 枚の CGRP を設計する場合には、上述の前提および設計方法が有効であることを明らかにした。厳密に CGRP の設計枚数の限度を精査するためには、ランダム関数、最適化計算の過程を考慮した検証・考察が必要となる。本論文では、CGRP の設計枚数の限界の調査はおこなわず、相関が低い CGRP のクロストークノイズの低減の効果を検証する。次節では、図 3.2 の 2 枚の CGRP を用いて、ホログラムの記録・再生実験をおこない、提案手法の有用性を検証する。

3.3 データ記録・再生実験

相関が低い CGRP を用いてクロストークノイズの低減が可能かどうかを検証するために、データ記録・再生実験をおこなった。実験に用いた光学系を図 3.5 に示す。光源には波長 532 nm の半導体レーザーを用いた。A-SLM には画素数 800×600 、画素サイズ $32 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ のものを用いた。P-SLM には画素数 792×600 、画素サイズ 20

$\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ のものを用いた。撮像素子には画素数 1280×960 、画素サイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ のものを用いた。記録媒体には厚さ $400 \mu\text{m}$ のフォトポリマーを用いた。

ホログラムの多重記録・再生実験をおこなう前に、図 3.5 の光学系を用いてシフト選択性の評価をおこなった。シフト選択性とは、記録媒体のシフト量と、再生像の強度変化の関係をあらわすもので、シフト多重記録をおこなう際のデータ記録間隔を決定する際の指標となる [101, 102]。シフト選択性の取得手順を以下に述べる。CGRP1 の参照光を用いて、単一のホログラムを記録媒体内に記録する。このホログラムに CGRP1 の参照光を照射し、再生像の ON セルの強度値を CCD カメラにより検出する。このとき、記録媒体を光軸に対して垂直な方向にシフトし、再生像の ON セルの強度の変化を取得する。同様の実験を CGRP1 の参照光により記録したホログラムに対して、CGRP2 の参照光を照射した場合でもおこなう。

実験により取得したシフト選択性を図 3.6 (a) に示す。図 3.6 (a) の●, □はそれぞれ、データ再生時に CGRP1, CGRP2 の参照光を用いた場合のシフト選択性である。図 3.6 (b) から 図 3.6 (i) は、記録媒体のシフト量が $0 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$, $8 \mu\text{m}$, $12 \mu\text{m}$ のとき、

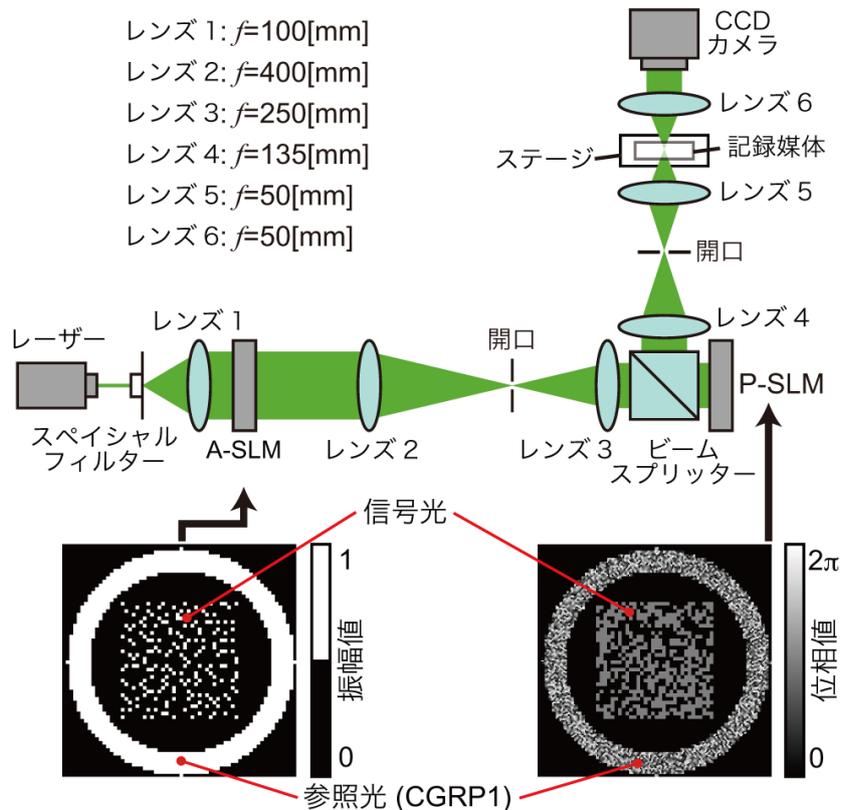


図 3.5 実験光学系

CGRP1 と CGRP2 それぞれで読み出した再生像を示す。CGRP1 を用いた場合には、クロストークノイズを低減するために、記録媒体を最低でも $2\mu\text{m}$ シフトする必要がある。一方、CGRP2 の参照光を用いた場合には、記録媒体のシフト量に依らず、再生像が抑制されていることがわかる。これは、相関が低い CGRP を用いることにより、記録媒体をシフトすることなくクロストークノイズを低減できることを示している。

次に、ホログラムの多重記録の実験をおこなった。図 3.7 に実験により記録した 2

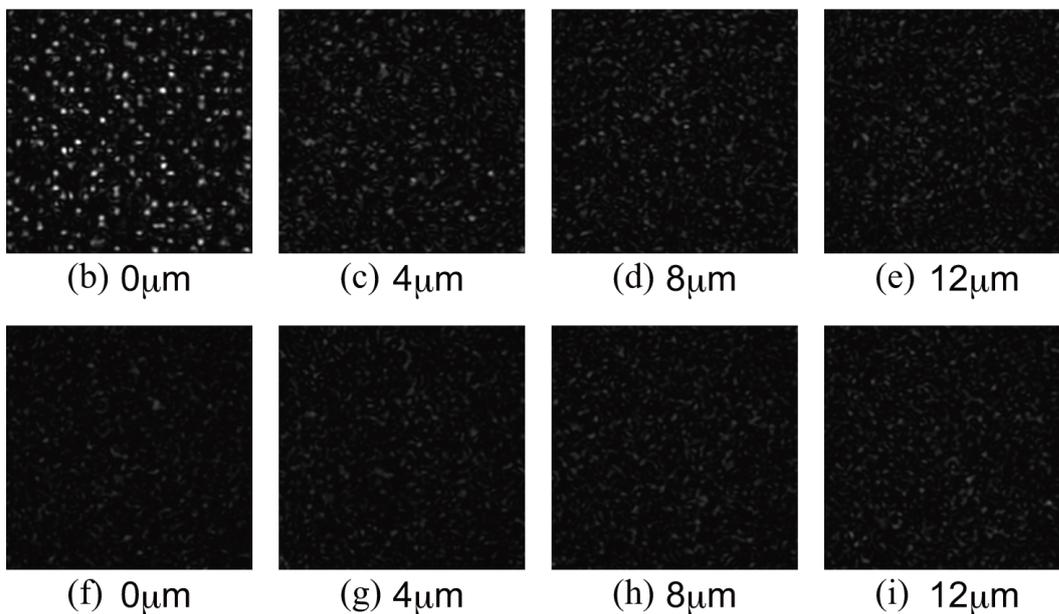
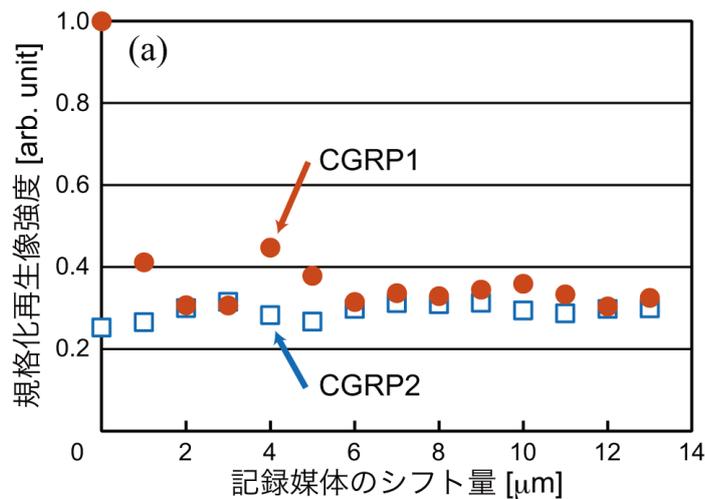


図 3.6 CGRP1 の参照光により記録したホログラムに対して CGRP1, 2 それぞれの参照光を用いて取得した (a) シフト選択性とその (b)–(i) 再生像。

枚のページデータを示す。実験の手順を以下に述べる。ページデータ 1 のホログラムを CGRP1 の参照光を用いて記録媒体内に記録する。記録媒体はシフトすることなく、ページデータ 1 のホログラムと同一箇所にも、ページデータ 2 のホログラムを CGRP2 の参照光を用いて記録する。データ再生時、それぞれの CGRP の参照光を用いて記録媒体に照射し、撮像素子により再生像を取得する。また、比較のために、ページデータ 1, 2 のホログラムを CGRP1 の参照光のみを用いて記録媒体の同一箇所に記録・再生した。

図 3.8 に実験により取得した再生像を示す。図 3.8 (a) は、提案手法を用いずに、CGRP1 のみでページデータ 1, 2 を記録・再生した場合の再生像である。この再生像では、ページデータ 1, 2 が同時に読み出されている。この再生像をページデータ 1, 2 としてそれぞれ読み出した場合の SNR と SER を図 3.8 (a) の上部に示す。それぞれの SER は 47%, 98% であり、クロストークノイズの影響によりデータ誤りが生じている。提案手法を用いた場合の再生像を図 3.8 (b), (c) に示す。それぞれの再生像

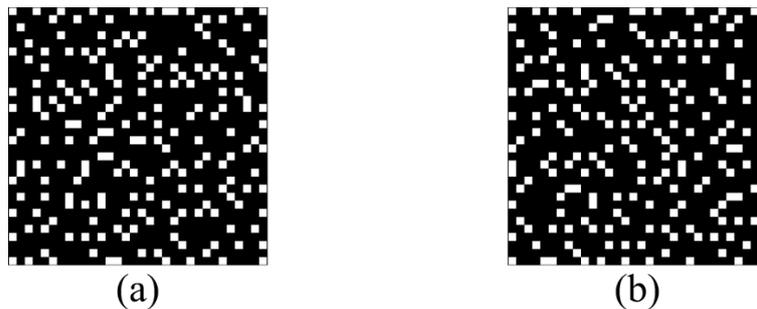


図 3.7 記録したページデータ。(a) ページデータ 1, (b) ページデータ 2.

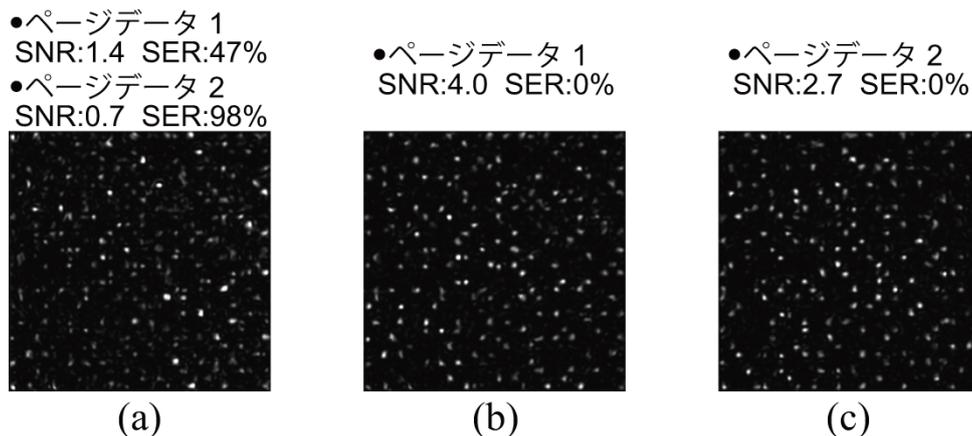


図 3.8 実験により取得した再生像。(a) 提案手法を用いない場合の再生像。提案手法を用いた場合の (b) ページデータ 1, (c) ページデータ 2 の再生像。

の SNR は, 4.0, 2.7 であり, SER はともに 0% であった. 図 3.8 (b), (c) の再生像に SNR の差が生じているが, 提案手法の原理検証をおこなう際には問題とならない. この SNR の差は記録条件を最適化することにより小さくすることができる [103, 104]. 図 3.8 の実験結果から, 提案手法を用いることにより, クロストークノイズを低減して高品質な再生像を取得することができ, 誤りなくデータを読み出すことに成功した. 以上から, 相関が低い CGRP を用いることによりクロストークノイズを低減可能であることを実証した.

3.4 結言

本章では, クロストークノイズを低減し, 高密度なホログラムの多重記録を実現するために, 相関が低い CGRP を用いることを提案した. 本手法により, 記録媒体をシフトすることなくクロストークノイズを低減することができる. したがって, 記録媒体の同一箇所にも, 記録媒体内のダイナミックレンジの範囲内で複数のホログラムを記録することができる. データ再生時には, データ記録時に用いた CGRP を記録媒体に照射することにより, 選択的にデータを読み出すことができる. また, 提案手法では, 従来のランダム位相マスクを用いる手法とは異なり, クロストークノイズを低減すると同時に, 再生像の品質とホログラム記録・再生時の光利用効率の両方を向上することができる. 以上から, 提案手法はホログラフィックメモリの大容量化, 転送速度の高速化に貢献することが期待される. さらに, 提案手法のホログラムの選択性に基づいて CGRP を暗号鍵として用いることにより, 秘匿性の高い情報の記録・再生が可能となり, 暗号化機能を有するホログラフィックメモリ [105–108] を実現できる.

第4章 可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録

4.1 緒言

ホログラフィックメモリの大容量化を達成する方法の一つに、多層記録法が有望視されている。多層記録法とは、記録媒体の光軸方向に複数のホログラムを重ねて記録する方法のことで、記録媒体の面内のシフト多重記録とあわせて3次元シフト多重記録とも呼ばれる。これまで、さまざまなホログラフィックメモリの光学系に多層記録法を導入することが提案され、大容量化が実現されてきた [98, 109–115]。しかしながら、従来の多層記録法では、記録媒体あるいはレンズを光軸方向に走査するためのアクチュエータを光学系に導入する必要がある。このことが原因で光学系が大型、複雑、高価となる。さらに、光軸方向の機械的走査に起因する振動によりデータ誤りが生じることが懸念される。本研究では、機械的な走査機構を導入することなく、小型・簡易な光学系により安定した多層記録法を実現することを目的とし、可変焦点レンズの位相ホログラムを応用した多層記録法を提案する [116]。

本章では、可変焦点レンズの位相ホログラムを用いることにより、機械的な走査機構を導入することなく多層記録を実現可能であることを実証した結果を述べる。4.2節では、可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録法の原理を述べる。4.3節では、コアキシャルホログラフィックメモリの光学系で提案手法を用いることにより焦点面の走査が可能であることを実証した結果を示す。4.4節では、データ記録・再生実験により、機械的走査が不要な多層記録が実現可能であることを実証した結果を述べる。4.5節では、本章の結言を述べる。

4.2 可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録原理

図 4.1 に可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録法の概念図を示す。データ記録時、A-SLM と P-SLM を用いて光波の複素振幅分布を変調し、信号光と参照光を生成する。このとき、P-SLM に焦点距離 f_{slm} のレンズの位相ホログラムを表示すると、P-SLM と、焦点距離 f のレンズ 3 を組み合わせレンズとみなすことができ

る. P-SLM は, レンズ 3 の前側焦点距離の位置に配置され, 記録媒体はレンズ 3 の後側焦点距離の位置に配置されている. ここで, P-SLM とレンズ 3 の組み合わせレンズの焦点距離は, f_{slm} の値にかかわらず, 常に f である. しかし, 後側の主平面の位置が f_{slm} に応じて変化する. 主平面は $-f^2 f_{\text{slm}}^{-1}$ により与えられ, 図 4.1 の焦点面のシフト量 z に対応する. したがって, P-SLM に表示するレンズの焦点距離 f_{slm} と, 焦点面のシフト量 z には,

$$f_{\text{slm}} = \frac{-f^2}{z}, \quad (4.1)$$

という関係がある. f_{slm} の焦点距離のレンズは, P-SLM に

$$\begin{aligned} \phi_z &= \frac{-\pi}{\lambda f_{\text{slm}}}(x^2 + y^2) \\ &= \frac{\pi z}{\lambda f^2}(x^2 + y^2) \end{aligned} \quad (4.2)$$

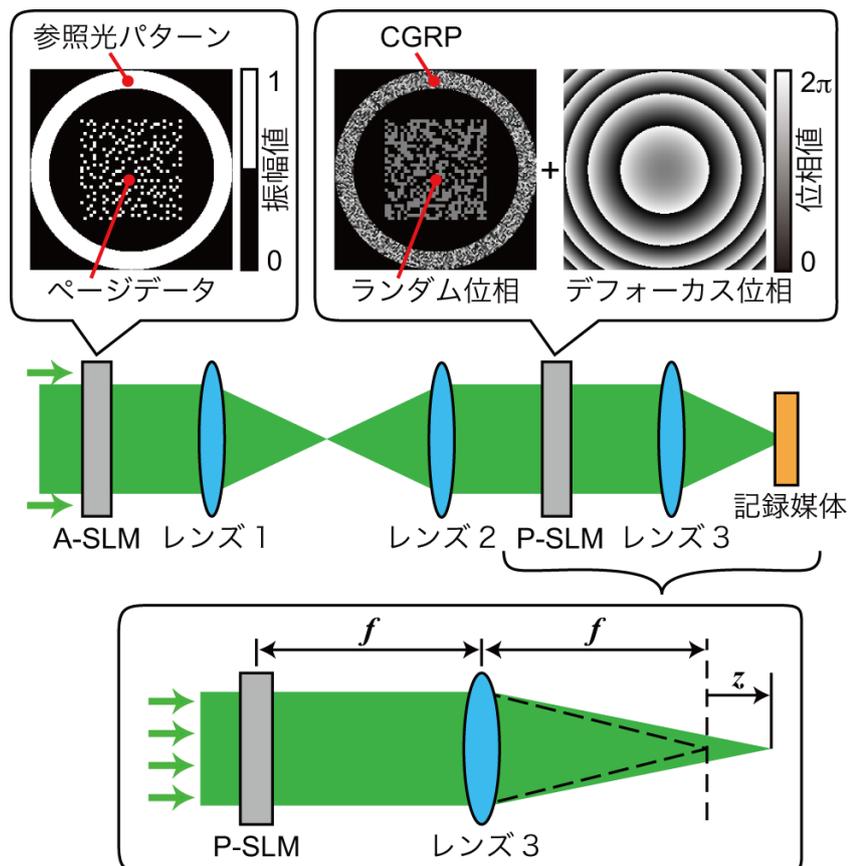


図 4.1 可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録法の概念図

の位相分布を表示することにより実現することができる。ここで、 λ は真空中の光源の波長である。 ϕ_z はP-SLMのリフレッシュレートで変更することができ、エイリアシングが生じない範囲で焦点面を光軸方向に任意の量シフトすることができるため、P-SLMにより可変焦点レンズの機能を実現可能である。式(4.2)は、近軸近似に基づいているため、低NAのレンズを用いる場合にのみ有効である。高NAのレンズを用いる場合には、式(4.2)を放物状の位相分布から、球面状の位相分布に変更する必要がある。提案手法では、図4.1に示すようにデフォーカス位相 ϕ_z をランダム位相マスクとCGRPに重ね合わせた位相ホログラムを用いることにより光波の位相分布を変調する。このことにより、信号光と参照光のフーリエスペクトルが得られる焦点面を光軸方向にシフトすることができ、機械的走査が不要な多層記録を実現することができる。データ再生時には、データ記録時の参照光を記録媒体中のホログラムに照射することによりデータを読み出すことができる。

4.3 光軸方向の焦点面シフトの検証

式(4.2)のデフォーカス位相は、レーザー加工[117]や、光ピンセット[118–120]、位相イメージング[121–124]にこれまで応用されており、それぞれの光学系でその有用性が示されている。本節では、デフォーカス位相を導入することにより、コアキシャルホログラフィックメモリの光学系で焦点面のシフトが可能かどうかを実験により検証する。実験に用いた光学系を図4.2に示す。この光学系は、これまでコアキシャルホログラフィックメモリの記録・再生実験をおこなう際に用いていたものに相当しているが、ここでは撮像素子を記録媒体面に配置している。光源には波長532 nmの半導体レーザーを用いた。A-SLMには画素数 800×600 、画素サイズ $32 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ のものを用いた。P-SLMには画素数 792×600 、画素サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ のものを用いた。撮像素子には画素数 1280×960 、画素サイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ のものを用いた。

A-SLMとP-SLMにより平面波の複素振幅分布を変調し、参照光を生成する。このとき、P-SLMにはCGRPを表示し、レンズ6の後ろ側焦点面で2倍のナイキストアパーチャーと同じ矩形のフーリエスペクトルが得られるように位相分布を設計している。撮像素子により取得した参照光のフーリエパワースペクトルを図4.3(a)に示す。SA法により設計した通り、矩形のスペクトルが得られている。このとき、P-SLMのCGRPに $z = 800 [\mu\text{m}]$ のデフォーカス位相 ϕ_z を重ね合わせると、図4.3(b)に示す強度分布が得られる。デフォーカス位相の影響により、ぼけた矩形の像が得られてい

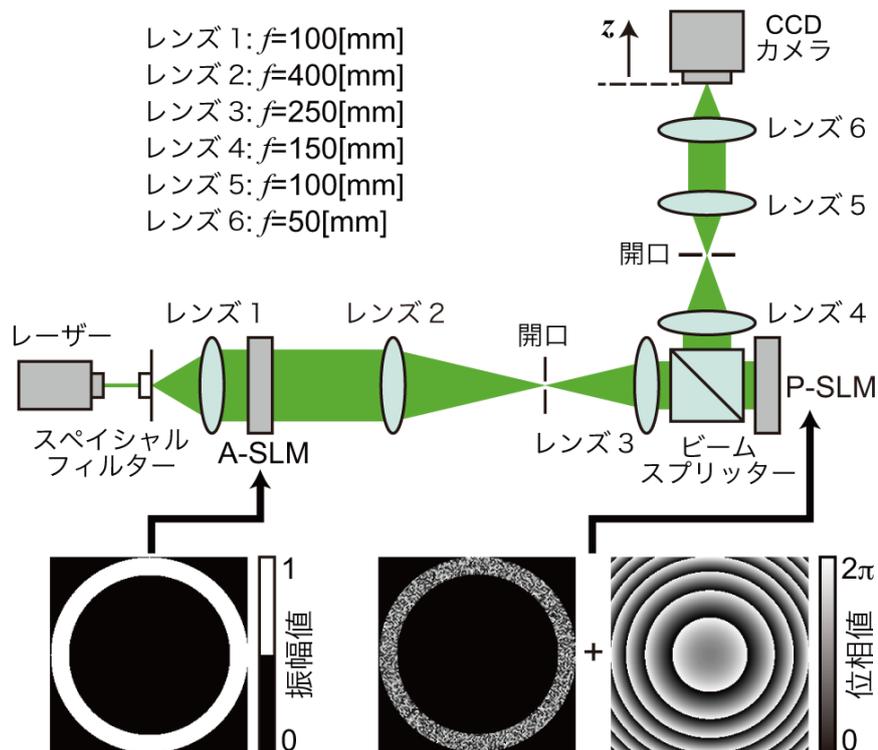


図 4.2 光軸方向の焦点面シフトの検証のための光学系

ることがわかる。次に、撮像素子を $+z$ の方向に $800\ \mu\text{m}$ シフトし、参照光の強度分布を検出した。デフォーカス位相を適用しない場合と適用する場合、それぞれの参照光の強度分布を図 4.3 (c), (d) に示す。デフォーカス位相を適用しない場合はぼけた像が得られ、デフォーカス位相を適用する場合には SA 法により設計した矩形の強度分布が得られていることがわかる。ここで、図 4.3 (a), (b) では、強度分布の中央部に、明るい輝点があらわれている。これは、2.4 節で述べた P-SLM の不完全性による不要な 0 次光成分である [82]。撮像素子を $800\ \mu\text{m}$ シフトした際には 0 次光成分は発散するため、図 4.3 (c), (d) で示すように 0 次光はあらわれていない。以上の検証実験から、提案手法を用いることにより、コアキシアルホログラフィックメモリの光学系で焦点面のシフトが可能であることを実証した。次節では、提案手法によりホログラムの記録・再生実験をおこなう。

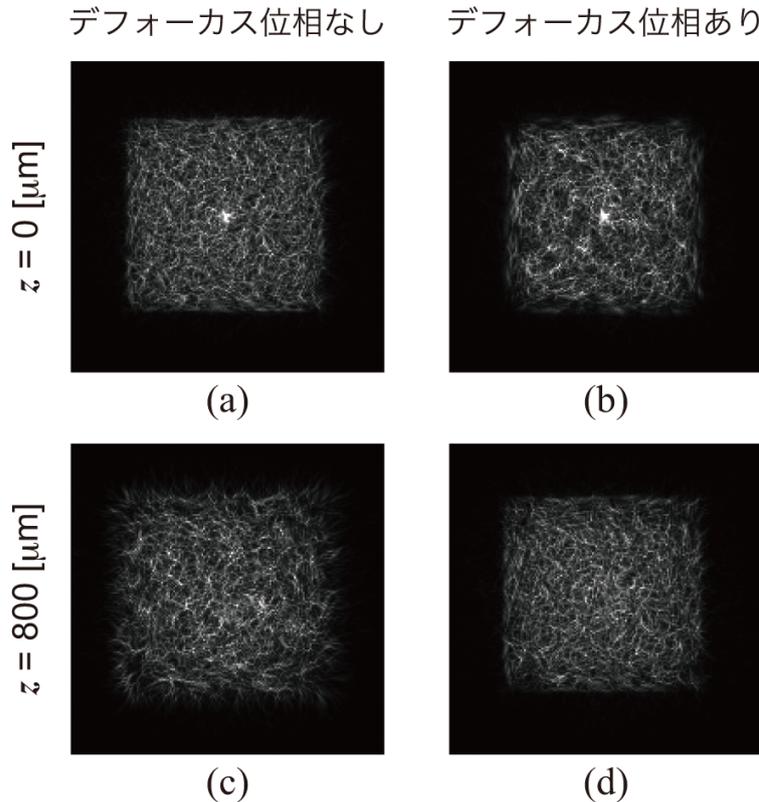


図 4.3 参照光のフーリエパワースペクトル。撮像素子が $z = 0 [\mu\text{m}]$ に配置され (a) デフォーカス位相なしと (b) デフォーカス位相を付加した場合の強度分布。撮像素子が $z = 800 [\mu\text{m}]$ に配置され (c) デフォーカス位相なしと (d) デフォーカス位相を付加した場合の強度分布。

4.4 データ記録・再生実験

提案手法により、機械的な走査機構が不要な多層記録の実現が可能かどうかを検証するために、データ記録・再生実験をおこなった。実験に用いた光学系を図 4.4 に示す。本光学系では、図 4.2 の光学系に記録媒体とフーリエ変換レンズを追加している。記録媒体には、厚さ $400 \mu\text{m}$ のフォトポリマーを用いた。

多層記録の検証をおこなう前に、図 4.4 の光学系を用いて光軸方向のシフト選択性を評価し、多層記録時の適切な層間隔を明らかにした。光軸方向のシフト選択性の取得手順を以下に述べる。図 4.5 の複素振幅分布の信号光と参照光を生成して、記録媒体内でホログラムを記録した。このとき、記録媒体は、信号光と参照光のフーリエスペクトルが記録媒体の表面に照射されるように配置した。データ再生時、その記録媒体中のホログラムに参照光を照射し、撮像素子により再生像を取得した。さらに、

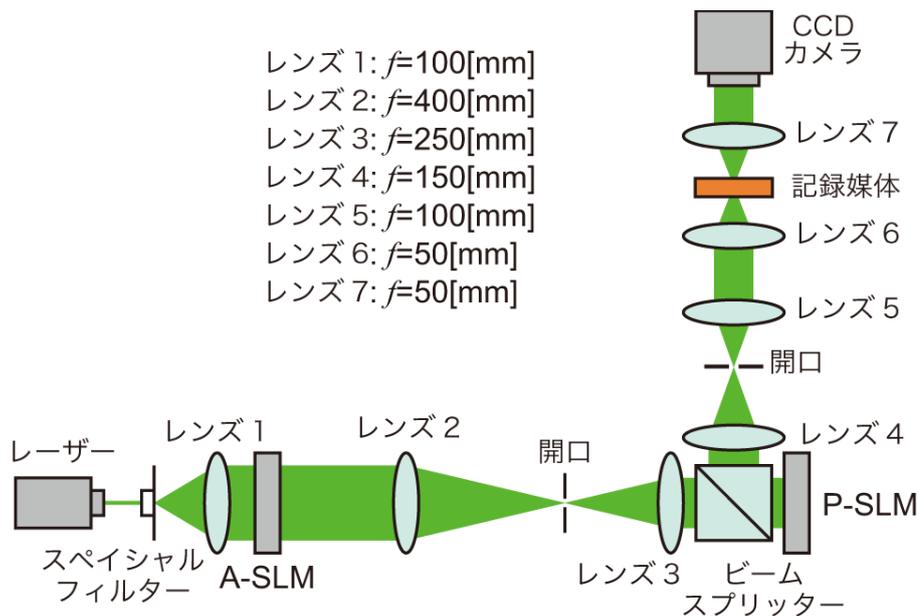


図 4.4 多層記録・再生実験に用いた光学系

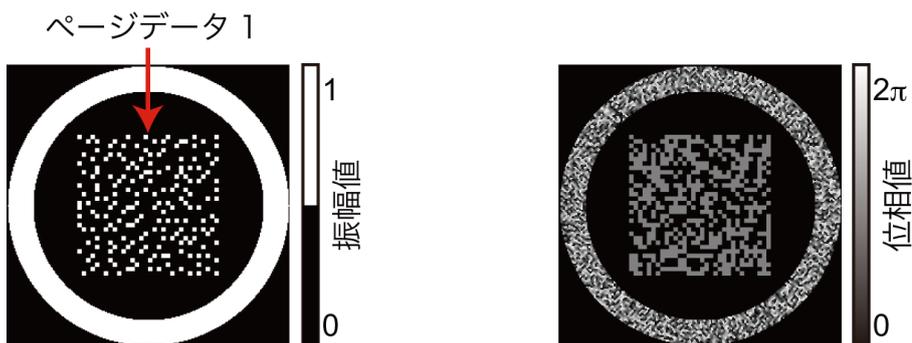


図 4.5 ページデータ 1 を記録するための信号光と参照光の複素振幅分布

CGRP に z が 0 から $800 \mu\text{m}$ のデフォーカス位相をそれぞれ付加し、その都度、再生像を取得し、ONセルの強度の変化を評価した。実験により取得した光軸方向のシフト選択性を図 4.6 に示す。焦点面のシフト量が $0 \mu\text{m}$ のときの強度値で規格化をおこなっている。ここで、 $z = 100 [\mu\text{m}]$ のときに再生像の強度が最大値となっている。これは、記録媒体の収縮が生じ、記録媒体中のホログラムが変形したことによるものであると考えられる。図 4.6 から、焦点面を 600 から $800 \mu\text{m}$ シフトすることにより、再生像の強度を十分に抑制可能あることが明らかになった。

多層記録時の層間隔を $800 \mu\text{m}$ とし、図 4.5 と図 4.7 の 2 枚のページデータの記録・再生実験をおこなった。上述の手順により、ページデータ 1 のホログラムを記録

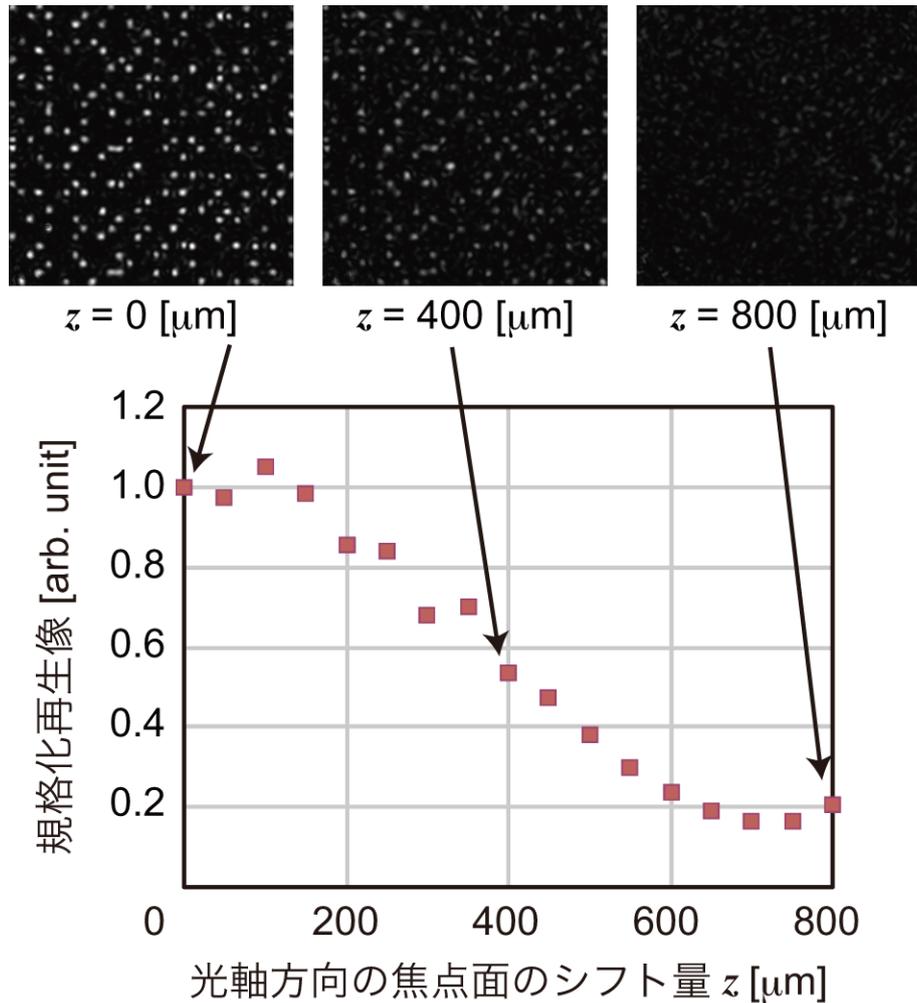


図 4.6 実験により取得した光軸方向のシフト選択性

媒体に記録した後，提案手法によりページデータ 2 のホログラムを記録した．ページデータ 2 を記録する際には，図 4.7 に示すように， $z = 800$ [μm] のデフォーカス位相を図 4.5 の位相分布に付加している．このとき，記録媒体の厚さは 400 μm であり， $z = 800$ [μm] のデフォーカス位相の付加により，焦点面が記録媒体の外側に存在する．多層記録法による大容量化を実現するためには，記録媒体を厚くするか，光軸方向のシフト選択性のピーク幅をより狭くし，光学系を改良して実験をおこなう必要がある．しかし，焦点面が記録媒体の外側に存在している場合でも，信号光と参照光の干渉領域が記録媒体内に存在すれば提案手法の原理検証がおこなえるため，本光学系により検証実験をおこなった．データ再生時，記録時に用いた参照光を記録媒体中のホログラムに照射し，撮像素子により再生像を取得した．実験により取得したページデータ

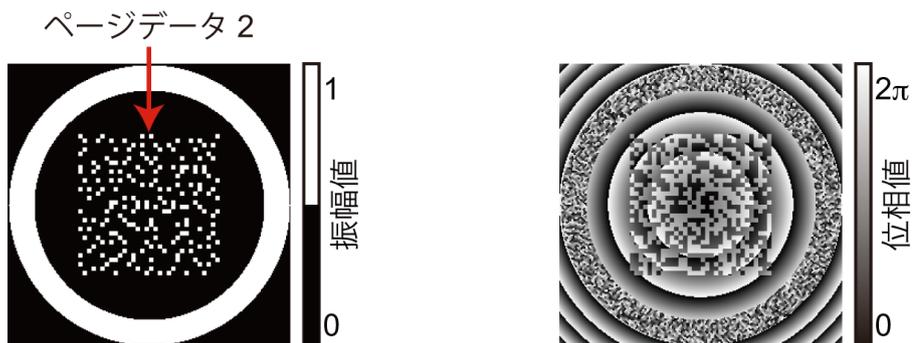


図 4.7 ページデータ 2 を記録するための信号光と参照光の複素振幅分布

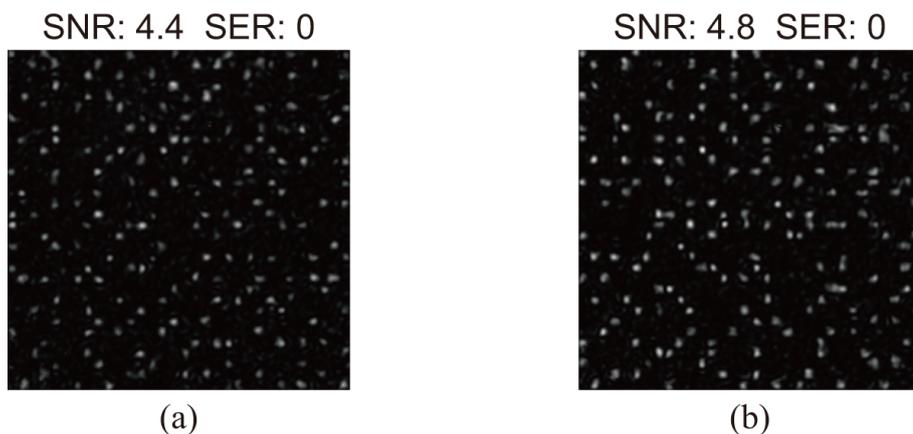


図 4.8 多層記録・再生結果. (a) ページデータ 1, (b) ページデータ 2

1, 2 の再生像を図 4.8 に示す. それぞれを SNR と SER により評価した結果, 高品質な再生像が得られ, 誤りなくデータを読み出すことに成功した. 以上の実験結果から, 提案手法を用いることにより, 機械的な走査機構を導入することなく多層記録を実現可能であることを実証した.

4.5 結言

本章では, 機械的な走査が不要な多層記録を実現するために, 可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録法を提案した. データ記録・再生実験により, 提案手法を用いることで小型・簡易な光学系で多層記録が実現可能であることを実証した.

本実験では, 多層記録時の層間隔が $800 \mu\text{m}$ であり, 層の数は 2 層とした. 多層記録時の層の数を向上するためには, クロストークノイズ量が最初に極小値となるシフト量を短くする必要がある. このことを実現するためには, 光源の波長を短くするか,

レンズの NA を大きくする必要がある [110]. または, 第 3 章で述べた相関が低い位相分布の参照光を用いることにより, 焦点面の光軸方向のシフト量に依存せず, クロストークノイズを低減することができる [98,100]. 今後, 短波長の光源, 高 NA のレンズを用いて, 提案手法を適用することにより, 大容量な多層記録ホログラフィックメモリの実現が期待される.

第5章 線形位相符号化法を用いたコアキシャル ホログラム記録

5.1 緒言

ホログラフィックメモリの光学系の多くでは、高品質なデータを記録・再生するために、ランダム位相マスクが用いられる [63,64]。ランダム位相マスクを用いて信号光の位相分布を変調することにより、フーリエスペクトルの直流成分を抑制することができ、高品質なホログラムを記録することができる。第2章から第4章で示したように、光波の位相変調技術を積極的に活用することにより、光利用効率と再生像の品質の両方の向上、クロストークの低減、機械的な走査機構が不要な多層記録が可能となる。さらに、光波の振幅だけでなく、位相も情報として扱うことができれば、データ符号化の自由度が拡張され、多値信号を記録・再生することができる。以上のことから、ホログラフィックメモリの大容量化のためには、光波の振幅分布と位相分布の両方、すなわち複素振幅分布を変調する技術が不可欠である。

一般に、現在入手可能な SLM では、光波の振幅分布、または位相分布のどちらか一方しか変調することができない。したがって、光波の複素振幅分布を任意に変調するためには、これまでの章で示してきたように、2台の SLM を組み合わせて使用する必要がある [125–130]。しかし、2台の SLM を用いる場合、光学系を構築する際に高精度なアライメント技術が要求されるだけでなく、光学系が複雑・大型となる。一方、ランダム位相マスクが埋め込まれた SLM [64]、あるいは偏光素子と Twisted Nematic 液晶を組み合わせた SLM [131] を用いることにより、小型な光学系でページデータの振幅分布とランダム位相マスクの位相分布を一括に生成することができる。しかし、これらの SLM では、生成可能な複素振幅値が制限されてしまう。

2台の SLM を用いる代わりに、回折格子 [132,133]、アレイ状の偏光素子 [134]、あるいは拡散板 [135,136] などの付加的な光学素子を導入すれば、単一の SLM で光波の複素振幅分布を変調することができる。しかしながら、これらの方法でも高精度なアライメント技術が必要である。実用的な観点からも、ホログラフィックメモリの光学系を構成する光学素子の数は少ない方が望ましい。

以上の光波の複素振幅分布の変調技術に対して、CGH の技術を用いれば、付加的な光学素子を導入することなく単一の SLM により複素振幅分布の変調が可能である。

振幅変調型の CGH [137–141] を用いる場合、単一の A-SLM により光波の複素振幅分布を変調することができる。しかし、振幅変調型の CGH では光利用効率が低いという問題がある。振幅変調型の CGH を記録媒体に投影してデータを記録するホログラフィックメモリシステム [142, 143] では、振幅変調型の CGH の光利用効率を改善できるが、ホログラムの多重記録が困難となる問題がある。一方、位相変調型の CGH、あるいは位相ホログラムを用いれば、単一の P-SLM により高い光利用効率で光波の複素振幅分布を変調することができる。これまでも、位相ホログラムの一つとして知られる Double-Phase Hologram [144–146] を用いたホログラフィックメモリシステムが提案されている [147, 148]。これらのシステムでは、P-SLM からの不要な 0 次光 [81, 82] が発生する。このことが原因で、生成される光波の品質が劣化するだけでなく、記録媒体のダイナミックレンジを浪費することが懸念される。この不要な 0 次光は、ランダム位相を用いたページデータの符号化法 [149] により取り除くことができる。この手法では、必要な光波のスペクトルがランダム位相により拡散されており、ハイパスフィルタリングを適用することにより不要な 0 次光を取り除くと同時に、光波分布の変調を実現している。しかし、ランダム位相によりスペクトルを拡散しているため、記録面積が不必要に広がり、記録密度が低下する問題がある。

本研究では、不要な 0 次光の影響を取り除き、単一の SLM を用いて高い光利用効率で光波の複素振幅分布の変調をすると同時に、小型・簡易なホログラフィックメモリシステムを実現することを目的とし、線形位相符号化法 [150] を提案する。本手法は、線形位相を用いた位相ホログラム技術 [151–154] に基づいているため、単一の P-SLM により高い光利用効率で光波の複素振幅分布を変調できる。さらに、P-SLM からの不要な 0 次光はバンドパスフィルタリングにより取り除かれ、ランダム位相を用いたページデータの符号化法における記録密度の低下の問題を解消することができる。本研究では、特に、コアキシャルホログラフィックメモリに線形位相符号化法を導入することを検討する。第2章から第4章で示したように、コアキシャルホログラフィックメモリの光学系においても、光波の複素振幅分布を任意に変調するためには2台の SLM が必要であった。したがって、線形位相符号化法を導入することにより、これまで本研究で用いてきたコアキシャルホログラフィックメモリの光学系を小型・簡略にすることが可能となる。

本章では、線形位相符号化法をコアキシャルホログラフィックメモリに導入し、簡易・小型な光学系により光波の複素振幅分布を変調すると同時に、データの記録・再生が可能であることを実証した結果を述べる。5.2 節では、線形位相符号化法の原理を

述べ、位相ホログラムにより所望の信号光を生成する手順を述べる。5.3 節では、線形位相符号化法を導入したコアキシャルホログラフィックメモリのデータ記録・再生手順を述べる。5.4 節では、線形位相符号化法を用いた光波の複素振幅変調の実験をおこない、ホログラフィックメモリに用いる信号光の生成が可能であることを述べる。5.5 節では、線形位相符号化法を導入したコアキシャルホログラフィックメモリの光学系を構築し、データ記録・再生実験をおこなった結果を述べる。5.6 節では、本章の結言を述べる。

5.2 線形位相符号化法の原理

線形位相符号化法による位相ホログラムの生成方法を述べる。生成すべき信号光の複素振幅分布を

$$s(x, y) = a_s(x, y) \exp\{i\phi_s(x, y)\}, \quad (5.1)$$

とする。ここで、 $a_s(x, y)$ 、 $\phi_s(x, y)$ はそれぞれ、信号光の振幅分布と位相分布をあらわす。この信号光を生成するための位相ホログラムは

$$\psi(x, y) = \theta(x, y)\{\Phi(x, y) + \phi_l(x, y)\} \quad (5.2)$$

により与えられる。ここで、 $\theta(x, y)$ と $\Phi(x, y)$ はそれぞれ、振幅分布 $a_s(x, y)$ と位相分布 $\phi_s(x, y)$ を決定づける関数である。 ϕ_l は線形位相であり、

$$\phi_l(x, y) = 2\pi(f_x x + f_y y) \quad (5.3)$$

により与えられる。ここで、 f_x と f_y はそれぞれ、 x 方向と y 方向のキャリア空間周波数をあらわす。この線形位相 $\phi_l(x, y)$ は、後述するように、位相ホログラムから生じる不要な回折光成分を除去するために必要である。位相ホログラム $\psi(x, y)$ への平面波入射により、

$$h(x, y) = \exp\{i\psi(x, y)\} \quad (5.4)$$

の光波が得られる。これをフーリエ級数展開することにより、

$$h(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_n(x, y) \exp\{in\phi_l(x, y)\} \quad (5.5)$$

$$h_n(x, y) = \frac{\sin[\pi\{n - \theta(x, y)\}]}{\pi\{n - \theta(x, y)\}} \exp[in\Phi(x, y) - i\pi\{n - \theta(x, y)\}] \quad (5.6)$$

が得られる。したがって、式 (5.4) のフーリエ変換は、

$$H(u, v) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_n(u - nf_x, v - nf_y) \quad (5.7)$$

となる。ここで、 $H_n(u, v)$ は $h_n(x, y)$ のフーリエ変換である。式 (5.7) より、 $H_n(u, v)$ が、線形位相のキャリア空間周波数 f_x , f_y の影響により、周波数領域の異なる位置にあらわれる。ここで、 H_1 のみをバンドパスフィルタリングにより取り出し、再度フーリエ変換をおこなうことにより、

$$h_1(x, y) = \frac{\sin[\pi\{1 - \theta(x, y)\}]}{\pi\{1 - \theta(x, y)\}} \exp[i\Phi(x, y) - i\pi\{1 - \theta(x, y)\}] \quad (5.8)$$

の光波が得られる。ここで、フーリエ変換の演算による座標系の転置は無視している。式 (5.8) の指数関数の係数は振幅分布に相当し、

$$\begin{aligned} a_s(x, y) &= \frac{\sin[\pi\{1 - \theta(x, y)\}]}{\pi\{1 - \theta(x, y)\}} \\ \theta(x, y) &= 1 - \text{sinc}^{-1}\{a_s(x, y)\} \end{aligned} \quad (5.9)$$

の関係がある。ここで sinc^{-1} は sinc 関数の逆関数である。同様にして、式 (5.8) の指数関数は光波の位相分布に相当し、

$$\begin{aligned} \phi_s(x, y) &= \Phi(x, y) - \pi\{1 - \theta(x, y)\} \\ \Phi(x, y) &= \phi_s(x, y) + \pi\{1 - \theta(x, y)\} \end{aligned} \quad (5.10)$$

の関係がある。以上から、式 (5.9)、式 (5.10) に従い $\theta(x, y)$, $\Phi(x, y)$ を適切に設定した位相ホログラム $\psi(x, y)$ により、所望の複素振幅分布を有する信号光 $s(x, y)$ を生成することができる。他の $\psi(x, y)$ の関数や数学的な詳細な記述は、文献 [151–153] に記述されている。

理論的には本手法により生成可能な複素振幅値に制限はないが、 $\psi(x, y)$ を P-SLM により実現する際には P-SLM の画素構造、非線形な応答や位相の階調数が制限となる [155–157]。さらに、本手法では線形位相の導入とバンドパスフィルタリングの操作を経て光波を生成するため、キャリア空間周波数と開口の大きさに応じて、生成される光波の品質が変化する [153, 158, 159]。キャリア空間周波数、開口の大きさは、 H_1 が他の回折光成分 H_n と重ならないよう、適切に設定する必要がある。以上のことから、本手法により生成可能な光波の空間帯域幅積 (SBP: Space-Bandwidth Product) [160] は、位相ホログラムを入力する P-SLM の SBP よりも低くなる。このことは、ホログ

ラフィックメモリの光学系において、SLM で生成するページデータのセルサイズが、SLM のピクセルサイズよりも大きくなり、一度の露光で記録可能な情報量が低下することを意味する。また、式 (2.3) のナイキストサイズの定義からもわかるように、ページデータのセルサイズが大きくなることにより、記録媒体に照射される光波の面積は縮小される。したがって、本手法をホログラフィックメモリに導入する場合には、2 台の SLM を用いて光波の複素振幅分布を変調する場合と比較して、データ転送速度が低下するが、単一のホログラムを記録する際のデータ記録密度は同等と考えられる。本手法をホログラフィックメモリに導入する意義は、光学系の小型化・簡易化が可能となり、2 台の SLM のアライメント誤差によって生じる再生データの品質劣化が存在しないことである。

本章以降の光学実験では、本手法を用いて振幅分布が 0 と 1 の 2 階調の信号光の生成をおこなう。このことを踏まえ、式 (5.2)、式 (5.9)、式 (5.10) の簡略化をおこなう。振幅値が 0 と 1 の 2 階調の場合、式 (5.9)、式 (5.10) はそれぞれ、

$$\theta(x, y) = a_s(x, y), \quad (5.11)$$

$$\Phi(x, y) = \phi_s(x, y) \quad (5.12)$$

と書き改めることができる。したがって、式 (5.2) は、

$$\psi(x, y) = a_s(x, y)\{\phi_s(x, y) + \phi_l(x, y)\} \quad (5.13)$$

となる。

以上の線形位相符号化法を用いた信号光の生成の例として、図 5.1 に示す複素振幅分布の生成過程を以下に述べる。図 5.1 の振幅分布は、3:16 コーディングにより得られたページデータであり、0 と 1 の 2 階調の振幅値により構成されている。一方、図 5.1 の位相分布は、2 階調のランダム位相マスクに相当し、この例では位相値を $\pi/2$, $3\pi/2$ としている。図 5.1 の信号光から、式 (5.13) に基づき図 5.2 (a) の位相

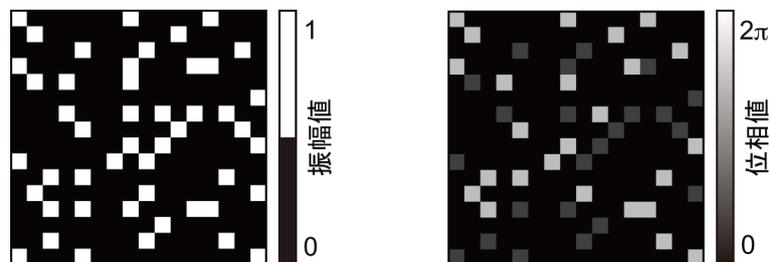


図 5.1 信号光の複素振幅分布

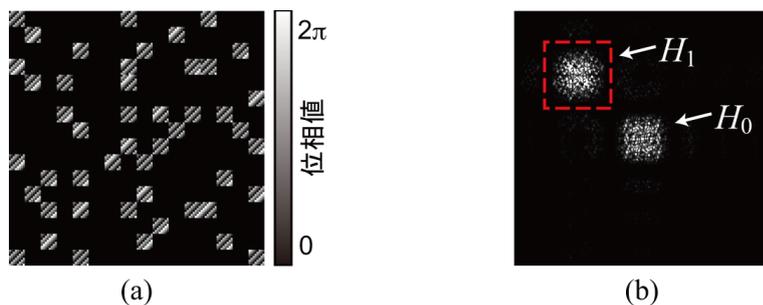


図 5.2 線形位相符号化法により生成した (a) 位相ホログラムとその (b) フーリエスペクトル.

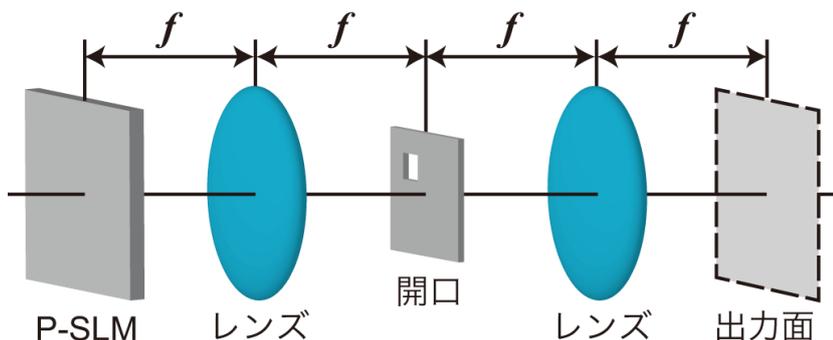


図 5.3 光波の複素振幅分布の変調のために用いる光学系.

ホログラムを得る. 図 5.1 の振幅値が 1 に対応する位相分布に線形位相を付加することにより, 図 5.2 (a) の位相ホログラムが得られる. この位相ホログラムを図 5.3 に示す光学系の P-SLM に入力する. P-SLM により, 位相ホログラムに従い平面波の位相分布を変調する. 位相を変調した光波に, レンズによるフーリエ変換をおこなうと, フーリエ面では図 5.2 (b) のフーリエスペクトルが得られる. 中心部分のフーリエスペクトルが不要な回折光成分 H_0 であり, 図 5.2 (a) の位相値が 0 の箇所から得られるフーリエスペクトルの成分に対応している. 高周波領域にあらわれているフーリエスペクトルが, 所望の回折光成分 H_1 であり, 図 5.1 のフーリエスペクトルに対応している. このフーリエスペクトルに対して, 図 5.3 に示す開口によりバンドパスフィルタリングをおこない, H_1 のみを取り出す. この過程により, SLM からの不要な 0 次光 [82] が, 開口により除去され, Double Phase Hologram よりも高品質な光波の生成が可能である. 開口を通過した光波に, 再度レンズによるフーリエ変換をおこなうと, 図 5.4 の複素振幅分布の光波が得られる. 本来, 図 5.4 の位相分布には, 線形位相 $\phi_l(x, y)$ があらわれるが, 図 5.4 ではその線形位相を取り除いている. この線形位相は, ホログラフィックメモリシステムで, 光波の振幅分布のみを情報として扱う場合

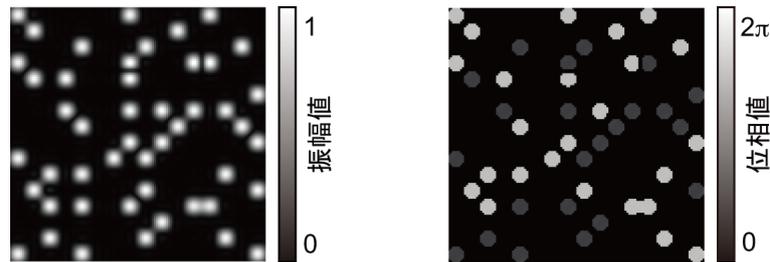


図 5.4 線形位相符号化法により生成した光波の複素振幅分布。

には問題とならない。光波の位相分布も情報として扱う場合には、線形位相 $\phi_l(x, y)$ は既知の情報であるため、データ再生過程および復号過程で取り除くことができる。位相分布を情報として扱う際に、線形位相を取り除く具体的な方法に関しては 6.2 節で述べる。図 5.1 に示す所望の複素振幅分布と、図 5.4 に示す生成された複素振幅分布を比較すると、生成された複素振幅分布では、高周波成分が欠落していることがわかる。この欠落は、図 5.3 に示す開口による空間周波数フィルタリングが原因で生じている。ホログラフィックメモリシステムにおいて、この高周波成分の欠落は、記録領域を制限するために用いる開口を用いて生じるものと同様であり、ページデータを記録・再生する際には問題とならない。

次節では、線形位相符号化法をコアキシャルホログラフィックメモリに導入し、データの記録・再生方法を述べる。

5.3 コアキシャル方式への線形位相符号化法の導入

線形位相符号化法を用いたコアキシャルホログラフィックメモリのデータ記録時の概念図を図 5.5 に示す。データ記録時、記録するデジタルデータに応じて、ON セルと OFF セルにより構成されるページデータを生成する。このページデータの振幅分布から、式 (5.13) に基づき位相ホログラムを生成する。コアキシャルホログラフィックメモリでは、SLM から信号光と参照光を同軸上に生成し、これらの光波を記録媒体内で干渉させる必要がある。図 5.2 (b) に示すように、線形位相符号化法により生成した信号光のフーリエスペクトルは、フーリエ面上で光軸から離れた位置にあらわれる。このことを踏まえ、本研究では、参照光のフーリエスペクトルの生成位置と、信号光のフーリエスペクトルの生成位置とを一致させると同時に、光利用効率を向上するために CGRP を用いる。図 5.6 に線形位相符号化法を導入したコアキシャルホログラフィックメモリに用いる CGRP とそのフーリエスペクトルを示す。図 5.6 (b) から

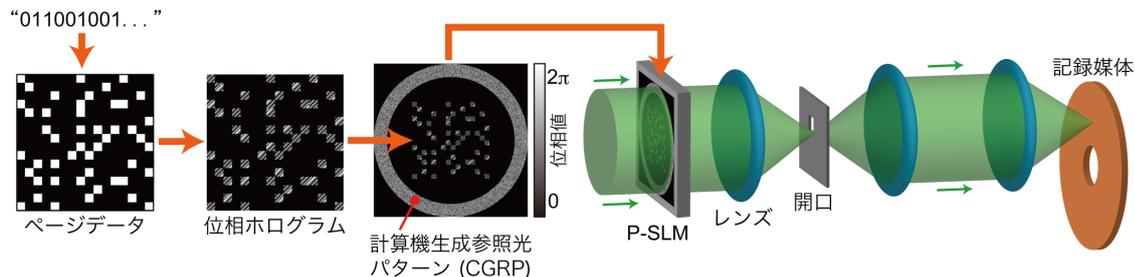


図 5.5 線形位相符号化法を用いたコアキシャルホログラフィックメモリのデータ記録手順。

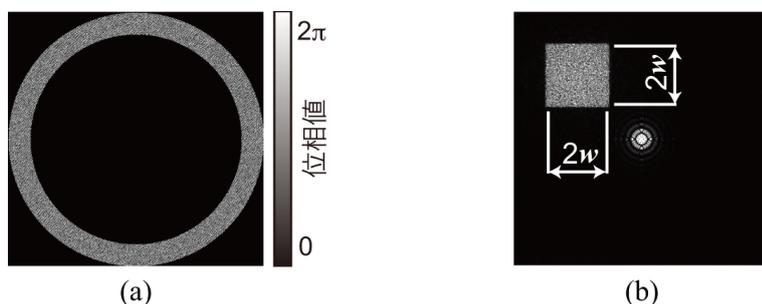


図 5.6 線形位相符号化法を導入したコアキシャルホログラフィックメモリで用いる (a) CGRP とその (b) フーリエスペクトル。

わかるように、矩形状のフーリエスペクトルが図 5.2 (b) の信号光のフーリエスペクトルと同じ位置にあらわれていることがわかる。図 5.6 では、幅 $2w$ の開口を用いることを想定し、CGRP の設計をおこなっているが、開口の大きさが変わる場合には、その大きさに応じて CGRP を設計する。図 5.6 (b) の中心に存在する光波は、図 5.6 (a) の位相値が 0 の箇所のフーリエスペクトルに対応した不要な成分であり、開口により除去される。以上の信号光を生成する位相ホログラムと CGRP を重ね合わせ、P-SLM に入力する。P-SLM により平面波の位相分布のみを変調し、信号光と参照光を得る。位相ホログラムと CGRP から生じる不要な回折光成分を除去すると同時に、ホログラムの記録領域を制限するために、開口によるフィルタリングをおこなう。開口を通過した光波は $4f$ 光学系を介して、記録媒体に照射される。このことにより、記録媒体内で信号光と参照光のホログラムが記録される。

データ再生時の概念図を図 5.7 に示す。図 5.6 (a) の CGRP のみを P-SLM に入力し、参照光のみを生成する。記録媒体内のホログラムに参照光を照射することにより、信号光が再生される。撮像素子により、再生された信号光の強度分布を検出する。5.2 節で述べたように再生される信号光には線形位相が付加されているが、撮像素子では

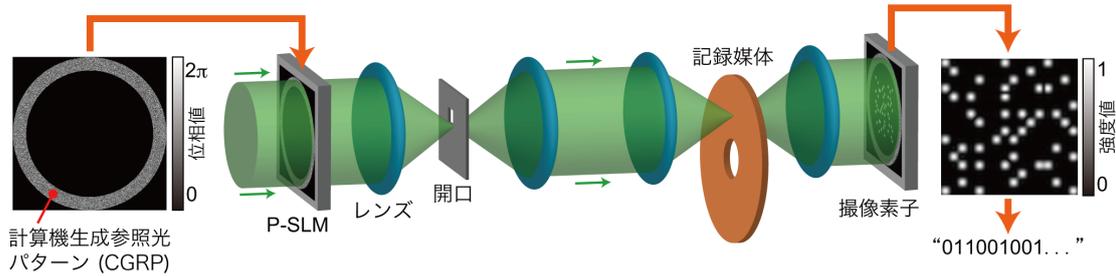


図 5.7 線形位相符号化法を用いたコアキシナルホログラフィックメモリのデータ再生手順.

光波の位相情報が失われ、振幅情報であるページデータを読み出す際には問題とならない。撮像素子により取得した信号光の強度分布を復号することにより、記録したデジタルデータを読み出すことができる。

5.4 線形位相符号化法による複素振幅変調の検証実験

5.2 節で述べたように、P-SLM による制限や、線形位相の導入とバンドパスフィルタリングの操作により、生成される光波の品質が変化する [153, 158, 159]。本節では、線形位相符号化法により、ホログラフィックメモリに必要な信号光の生成が可能であることを実験的に検証する。線形位相符号化法により生成する信号光の複素振幅分布を図 5.8 に示す。図 5.1 の複素振幅分布と同様に、振幅分布は 3:16 コーディングにより得たページデータに相当し、位相分布は 2 階調のランダム位相マスクに相当している。図 5.1 は 32×32 セルにより構成されている。本実験に用いた光学系を図 5.9 に示す。光源には波長 532 nm の半導体レーザーを用いた。P-SLM には画素数 792×600 、画素サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ のものを用いた。撮像素子には画素数 1280×960 、画素サイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ のものを用いた。

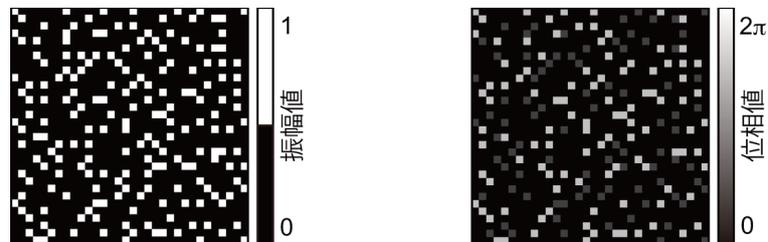


図 5.8 検証実験に用いた信号光の複素振幅分布.

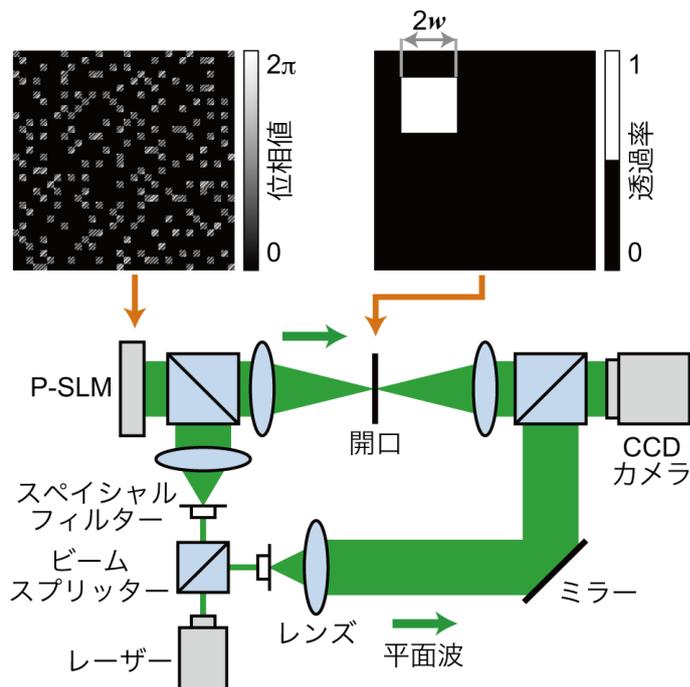


図 5.9 線形位相符号化法による信号光の生成実験.

図 5.8 の複素振幅分布から，線形位相符号化法により位相ホログラムを生成し，P-SLM に入力した．P-SLM を用いて，位相ホログラムに従い平面波の位相分布のみを変調した．位相を変調した光波をレンズによりフーリエ変換し，図 5.9 の開口によりバンドパスフィルタリングをおこなった．本実験では，開口の大きさを $2w$ とした．開口を通過した光波は，再度レンズによりフーリエ変換され，撮像素子に入射した．生成された光波の複素振幅分布を検出するために，別の光路を設置し，平面波を生成した．この平面波と生成された光波の干渉縞を CCD カメラにより取得した．この干渉縞にフーリエ縞解析 [161] を適用することにより，生成された光波の複素振幅分布を取得した．実験により得られた複素振幅分布を図 5.10 に示す．定性的にみて，高周波成分が失われているが図 5.8 と同様の複素振幅分布が得られていることがわかる．図 5.10 を 32×32 セルの領域に分割し，それぞれの領域で複素振幅値の平均値を算出した．これら 32×32 の複素振幅値を複素平面にプロットしたものを図 5.11 に示す．○は生成した光波の複素振幅値の平均値を示している．■は図 5.8 の生成すべき光波の複素振幅値を示している．生成した光波の複素振幅値にばらつきが生じているが，所望の 3 通りの複素振幅値 $\exp(i\pi/2) = i$ ， 0 ， $\exp(i3\pi/2) = -i$ ，が得られていることがわかる．この複素振幅値のばらつきは，バンドパスフィルタリングによる高周波成分

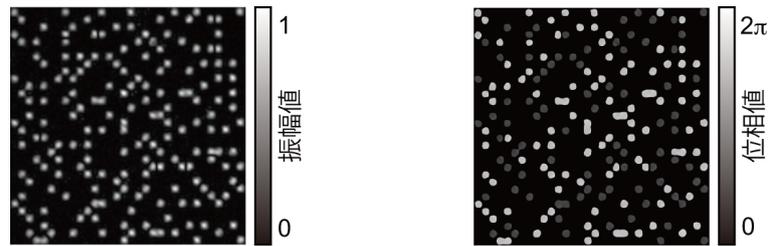


図 5.10 実験により生成した信号光の複素振幅分布.

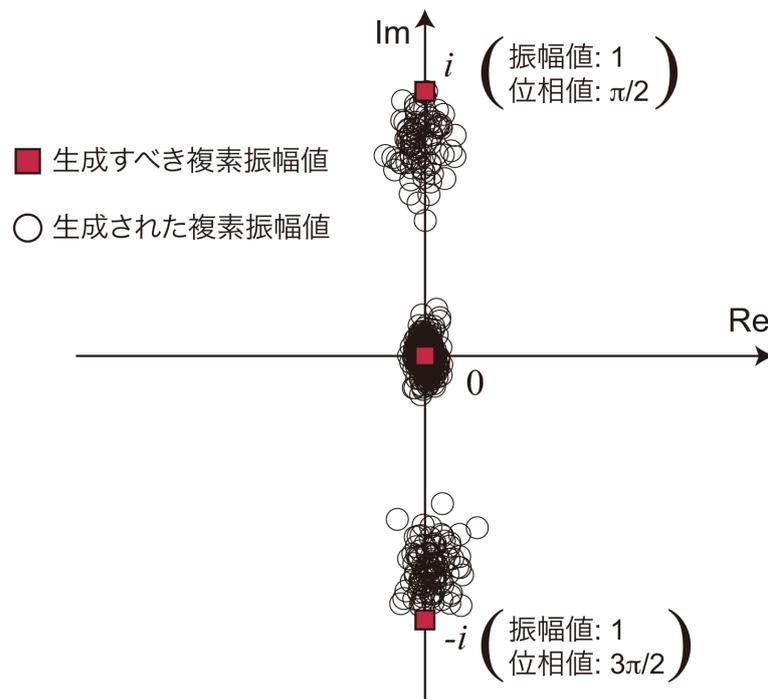


図 5.11 複素平面上での生成した光波の複素振幅値.

の欠落, P-SLM による制限, フーリエ縞解析による位相計測の誤差が含まれていると考えられる.

以上の実験結果から, 線形位相符号化法により, ホログラフィックメモリに必要な信号光を生成可能であることを実証した. 次節では, 線形位相符号化法をコアキシャルホログラフィックメモリの光学系を構築し, データの記録・再生実験により, 線形位相符号化法の有用性を実証した結果を述べる.

5.5 データ記録・再生実験

図 5.12 に線形位相符号化法を用いたコアキシャルホログラフィックメモリの光学系を示す。本光学系は、第 2 章から第 4 章で用いてきた光学系と異なり、単一の P-SLM により光学系が構成されている。光源には波長 532 nm の半導体レーザーを用いた。P-SLM には画素数 792×600 、画素サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ のものを用いた。撮像素子には画素数 1280×960 、画素サイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ のものを用いた。記録媒体には厚さ $400 \mu\text{m}$ のフォトポリマーを用いた。

線形位相符号化法を用いたコアキシャルホログラフィックメモリにおいて、データの記録・再生が可能かを検証するために、図 5.13 (a) のページデータを記録・再生した。図 5.13 (a) のページデータは、3:16 コーディングにより得られたものである。図 5.13 (a) のページデータを生成する位相ホログラムを図 5.13 (b) に示す。この位相ホログラムを図 5.6 (a) の CGRP の中心部に配置し、P-SLM に入力した。P-SLM により平面波の位相分布を変調し、信号光と参照光を生成した。これらの光波のバンドパスフィルタリングをおこない、記録媒体内で信号光と参照光のホログラムを記録した。データ再生時には、このホログラムに参照光を照射することにより、信号光を再

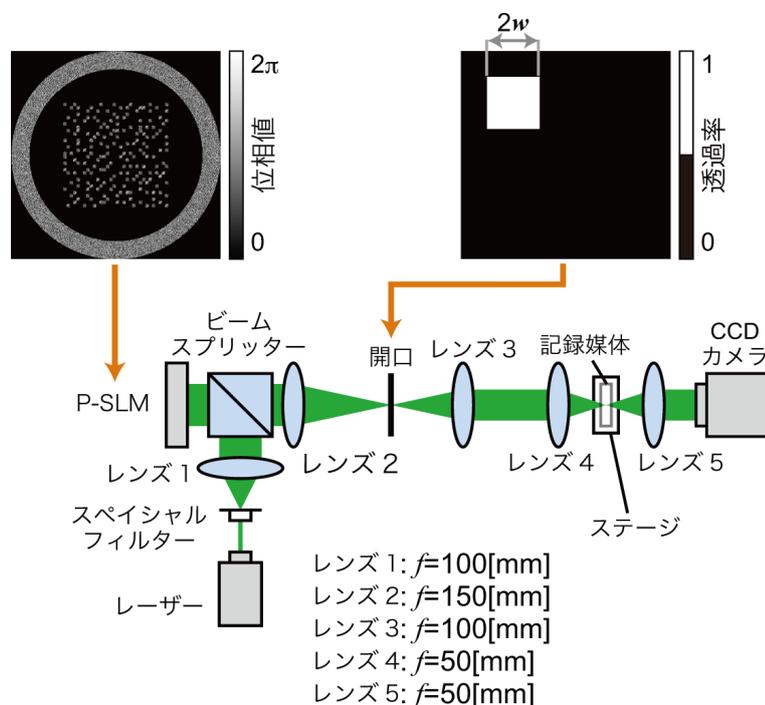


図 5.12 線形位相符号化法を用いたコアキシャルホログラフィックメモリの実験光学系。

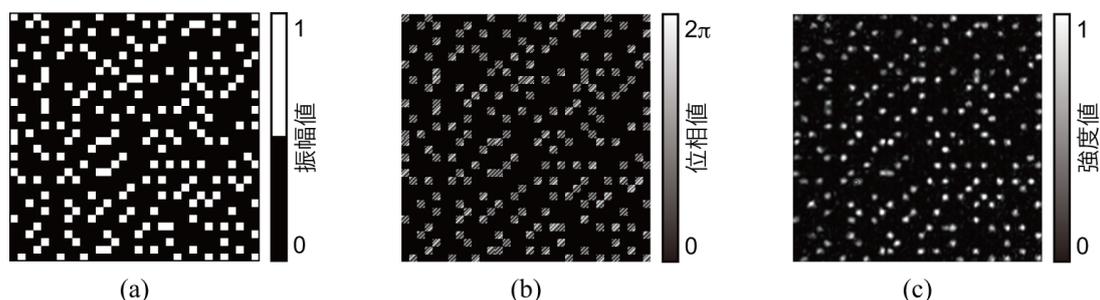


図 5.13 実験により記録・再生したページデータ. (a) 記録したページデータ. (b) 位相ホログラム. (c) 再生像.

生した. CCD カメラにより, 再生された信号光の強度分布を再生像として取得した. 実験により得られた再生像を図 5.13 (c) に示す. この再生像にしきい値処理をおこない, データを復号した結果, 誤りなくデータを読み出すことに成功した. 本実験結果から, 線形位相符号化法を用いたコアキシャルホログラフィックメモリにより, データの記録・再生が可能であることを実証した.

5.6 結言

本章では, 単一の SLM により光波の複素振幅分布を変調し, 簡易・小型なホログラフィックメモリシステムを構築することを目的とし, 線形位相符号化を導入することを提案した. 線形位相符号化法は, 他の CGH と技術と異なり, 高い光利用効率で高品質な光波の分布を生成することが可能である. 線形位相符号化法を用いた検証実験の結果から, 所望の複素振幅分布を有する信号光を生成可能であることを実証した. さらに, 線形位相符号化法をコアキシャルホログラフィックメモリシステムに導入し, データの記録・再生が可能であることを実験的に実証した.

従来のコアキシャルホログラフィックメモリは, 単一の A-SLM により光学系が構築されている [37]. したがって, この従来システムでは, 光波の振幅分布しか変調することができず, 光波の複素振幅分布を変調するためには付加的な光学素子の導入が不可欠であった. 一方, P-SLM と位相ホログラムの技術を導入した提案システムを用いることにより, 従来システムと同等の大きさの光学系で, 光波の複素振幅分布を変調することができる. このことにより, 第 2 章および第 4 章で述べてきた, ランダム位相マスクや CGRP の導入, 多重記録法や多層記録法を小型・簡易な光学系により実現できる. さらに, 次章で述べる位相情報を活用した多値記録を実現することができ

る。しかし、提案システムでは、5.2節で述べたように、ページデータの各セルを SLM の複数の画素により表現する必要がある。このことが原因で、一度に生成可能なページデータのセル数が、SLM の画素数よりも少なくなり、提案システムは従来システムと比較してデータ転送速度が低くなる。一方、各セルを SLM の複数の画素により表現することは、データ記録容量に影響を与えず、従来システムと同等になると考えられる。このことは、記録媒体にホログラムを記録する際、提案システムによりページデータのセルサイズが大きくなったとしても、それに応じてデータ記録面積が縮小し、記録密度が変化しないためである。

以上から、提案システムでは、データ転送速度が低下するが、小型・簡易な光学系により光波の変調可能なパラメータの自由度を拡張することができる。このことから、線形位相符号化法はホログラフィックメモリの大容量化・実用化に貢献することが期待される。

第6章 デジタルホログラム技術を導入した複素振幅データの多値記録

6.1 緒言

これまでに提案・開発されてきたホログラフィックメモリの多くでは、光波の振幅値0と1によりデジタルデータを符号化し、記録・再生をおこなってきた。振幅値の0と1だけでなく、それらの中間値も情報として扱うことにより、多値信号を記録・再生することができ、大容量化が可能となる。しかし、振幅多値記録では多値度の向上にともないSNRが低下するため、振幅3値の記録・再生が限界であるということが見積もられている [162]。

さらなる多値度の向上を実現するために、位相情報を活用することが注目されている [163–167]。本来、ホログラフィの技術では、記録媒体に光波の振幅情報だけでなく、位相情報も記録・再生することができる。この観点から、ホログラフィックメモリでは、光波の振幅だけでなく位相も情報として扱うことができる。しかし、これまでに提案されてきたホログラフィックメモリの多くでは、光波の振幅分布のみを変調・検出しているため、位相分布を情報として扱うことができない。したがって、光波の位相情報を情報として扱うためには、従来の光学系にとらわれることなく、光波の複素振幅分布を変調・検出するための技術を新たに検討し、開発する必要がある。

5.1節で述べたように、光波の複素振幅分布の変調技術が多く提案されており、これらをホログラフィックメモリの光学系に導入することにより、光波の複素振幅を用いたデータ符号化が可能である。一方、ホログラフィックメモリにおける光波の複素振幅分布の検出技術に関しては、さまざまな手法が提案されている。記録媒体から再生される信号光に対して、同軸に伝搬する平面波を干渉させることにより、光波の位相情報を強度情報に変換することができ、信号光の位相分布の検出が可能となる [24, 163]。複屈折性媒質 [25]、回折格子 [168] を用いるシェアリング干渉系では、新たに平面波を用意することなく、記録媒体から再生される信号光の自己干渉により、信号光の位相分布を検出する。また、マイクロレンズアレイを用いる手法 [169] では、ページデータのシンボル毎にセルの位相の積分値をマイクロレンズで取得することにより、位相分布を検出することができる。しかしながら、これらの手法では検出可能な複素振幅値が制限されており、多値度の向上が困難である。これらに対して、干渉系を導入す

ることが提案されている [170, 171]. 理論上, 検出可能な複素振幅値に制限はなく, 多値度の向上が可能となるが, 光学系が大型・複雑となり, 振動などの外乱により, データ誤りが生じる恐れがある.

本研究では, 小型・簡易な光学系により, 光波の複素振幅分布の変調・検出が可能なホログラフィックメモリシステムを構築するために, デジタルホログラム技術の導入を提案する [172]. デジタルホログラム技術は, 既存の SLM, 撮像素子を用いて, 光波の複素振幅分布を変調・検出する技術である. 特に, 提案システムでは, 線形位相を用いた位相ホログラム技術 [151–153] を用いることにより, 高い光利用効率で, 不要な 0 次光の影響を受けることなく, 任意の複素振幅分布の光波を生成することができる. さらに, コモンパス干渉系にもとづく光学系により, 単一の光路と単一の撮像素子により, 記録媒体から再生される光波の複素振幅分布を検出する. このことにより, 理論上, 変調・検出可能な複素振幅値に制限はなく, 光波の複素振幅値を情報として扱うことができる.

本章では, デジタルホログラム技術を用いたホログラフィックメモリシステムにより, 小型・簡易な光学系を用いて光波の複素振幅分布の多値信号の記録・再生が可能であることを述べる. 6.2 節では, デジタルホログラム技術を用いたホログラフィックメモリシステムのデータ記録・再生原理を述べる. 6.3 節では, 実験により多値信号を記録・再生した結果を述べる. 6.4 節では, 本章の結言を述べる.

6.2 デジタルホログラム技術を用いた複素振幅データの記録・再生原理

本節では, デジタルホログラム技術を用いた位相多値記録ホログラフィックメモリシステムのデータ記録・再生手順を述べる. 提案システムでは, 光波の複素振幅分布にデジタルデータが符号化され, ホログラムの記録・再生をおこなう. 本論文では, 光波の複素振幅分布を符号化することにより得られるページデータを複素振幅データと呼ぶ. また, そのページデータの振幅分布と位相分布をそれぞれ, 振幅データ・位相データと呼ぶ.

6.2.1 データ記録手順

提案システムのデータ記録時の概念図を図 6.1 に示す。データ記録時、平面波の位相分布を P-SLM により変調する。P-SLM には、信号光と参照光をそれぞれ生成するために、図 6.2 に示す信号光の位相ホログラムと CGRP が表示されている。信号光の位相ホログラムは図 6.3 に示すように複数の位相分布の重ね合わせにより得られる。以下に信号光の位相ホログラムの設計手順を述べる。本手法では、生成すべき信号光の複素振幅分布を

$$s(x, y) = a_d(x, y) \exp\{i(\phi_d(x, y) + \phi_{\text{rand}}(x, y))\} \quad (6.1)$$

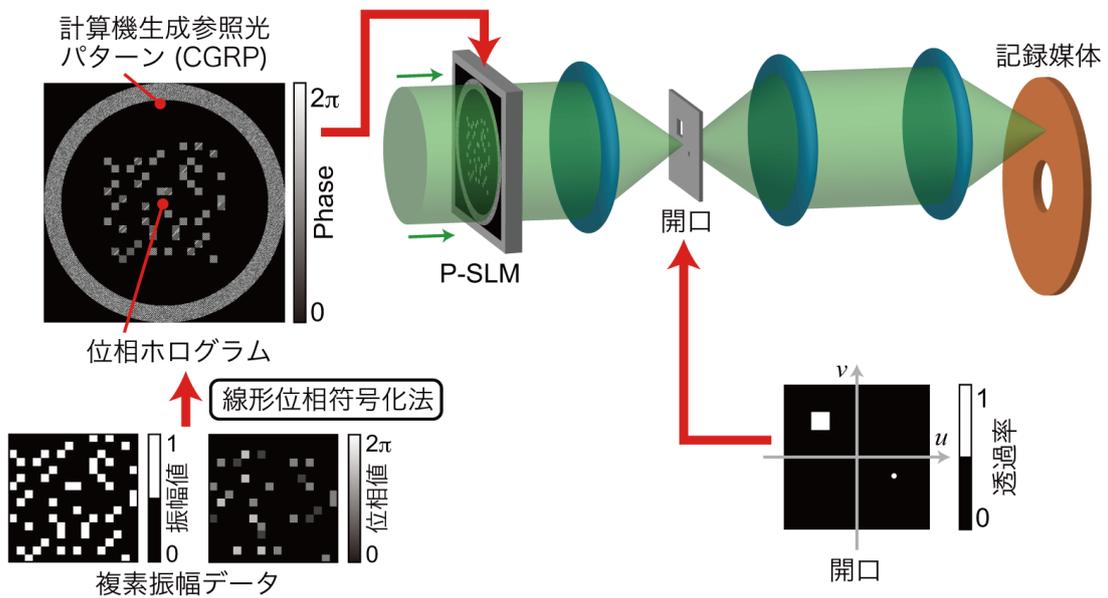


図 6.1 データ記録時の概念図

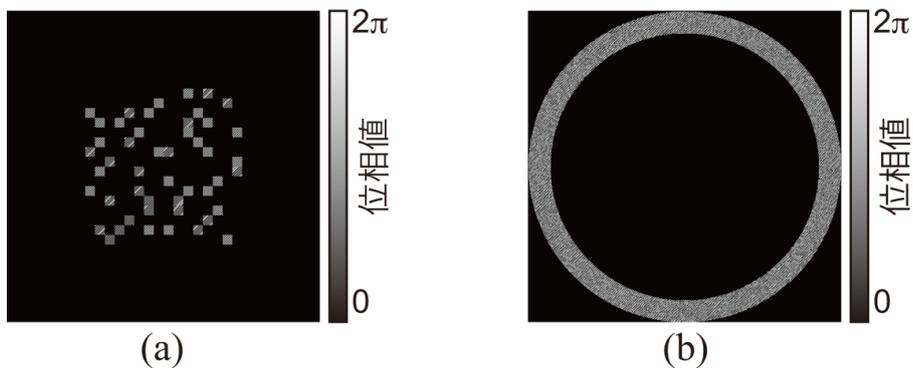


図 6.2 信号光と参照光を生成するための (a) 位相ホログラムと (b) CGRP.

と定義する．ここで， $a_d(x, y)$ を $\phi_d(x, y)$ はそれぞれ，振幅データと位相データである． ϕ_{rand} はランダム位相マスクを示す． ϕ_{rand} を用いない場合，位相データの分布に応じて，信号光のフーリエスペクトル分布が局在化し，記録媒体のダイナミックレンジを浪費する恐れがある．しかし，位相データ $\phi_d(x, y)$ の位相の階調数よりも高い階調数のランダム位相マスク ϕ_{rand} を用いることにより，位相データの分布にかかわらず信号光のフーリエスペクトル分布の局在化を防ぎ，より一様な分布にすることができる．式 (5.13) の線形位相符号化法を用いることにより， $s(x, y)$ を生成する位相ホログラムは

$$\psi_d(x, y) = a_d\{\phi_d(x, y) + \phi_{rand}(x, y) + \phi_{linear1}(x, y)\}, \quad (6.2)$$

とあらわされる．ここで $\phi_{linear1}$ は，不要な回折光成分を空間周波数フィルタリングにより取り除くために必要な線形位相であり，

$$\phi_{linear1} = 2\pi(f_{x1}x + f_{y1}y), \quad (6.3)$$

f_{x1} と f_{y1} はそれぞれキャリア空間周波数を示す．図 6.4 (a) に信号光の位相ホログラムのフーリエスペクトルを示す．線形位相 $\phi_{linear1}$ によって，所望の複素振幅分布 $a_d(x, y) \exp\{i(\phi_d(x, y) + \phi_{rand}(x, y))\}$ のフーリエスペクトルが高周波領域で得られる．低

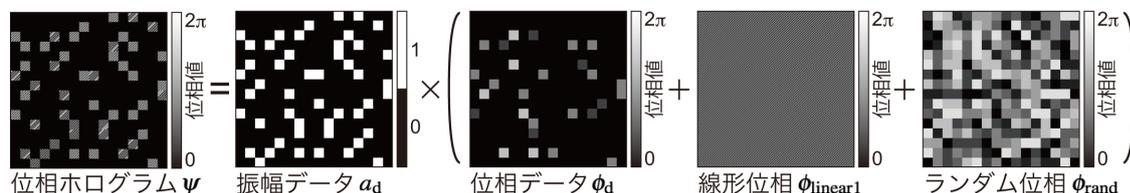


図 6.3 信号光を生成する位相ホログラム

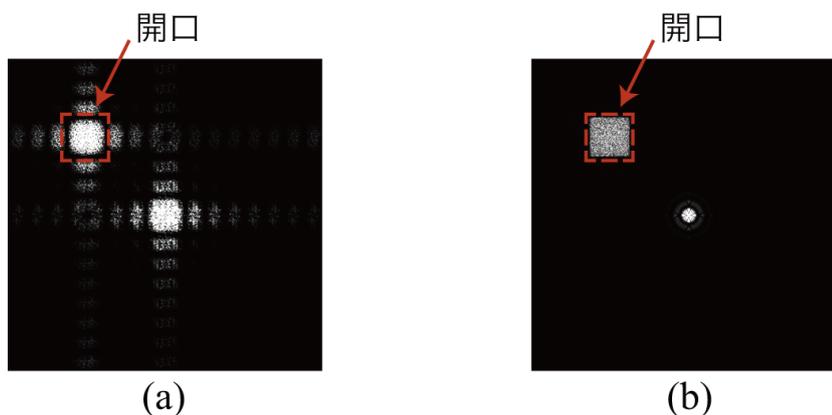


図 6.4 (a) 信号光の位相ホログラムと (b) CGRP のフーリエスペクトル

周波領域にあらわれている成分は、図 6.2 (a) 内の位相分布が一様な箇所のフーリエスペクトルに相当している。図 6.1 のフーリエ面に配置された開口により、図 6.4 (a) の破線外の光波を除去する。開口を通過した光波は、信号光として記録媒体に照射される。CGRP の位相分布は、図 6.4 (a) の破線の領域に一致するように SA 法により設計する。設計した CGRP のフーリエスペクトルを図 6.4 (b) に示す。CGRP のフーリエスペクトルも開口により、空間周波数フィルタリングがおこなわれる。この開口を通過した光波は、参照光として記録媒体に照射され、信号光と干渉する。このことにより、信号光と参照光とのホログラムが記録媒体内に記録される。

6.2.2 データ再生手順

提案システムのデータ再生時の概念図を図 6.5 に示す。データ再生時、P-SLM に CGRP と図 6.6 (a) に示す線形位相 ϕ_{linear2}

$$\phi_{\text{linear2}}(x, y) = \exp\{i2\pi(f_{x2}x + f_{y2}y)\}, \quad (6.4)$$

を入力する。ここで f_{x2} , f_{y2} はキャリア空間周波数をあらわす。位相シフト光のフーリエスペクトルを図 6.6 (b) に示す。キャリア空間周波数に応じて、デルタ関数に相当

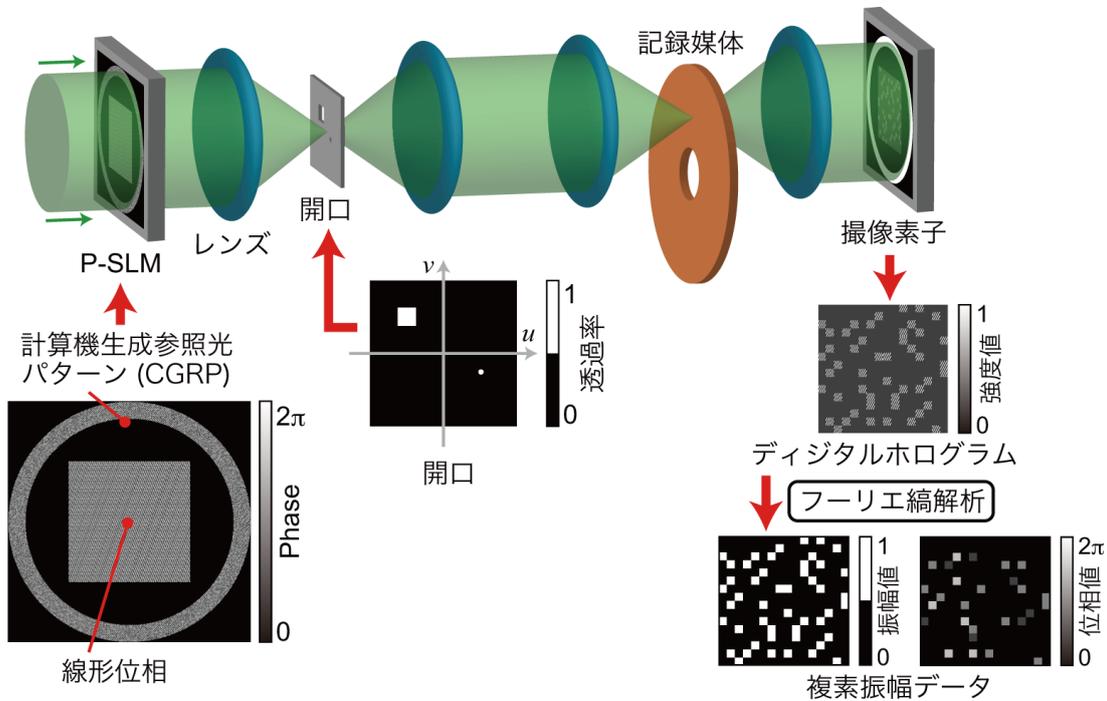


図 6.5 データ再生時の概念図

するスペクトルが高周波領域で得られる。CGRP から生成された参照光は、記録媒体内のホログラムに照射され、線形位相を含む信号光 $s(x, y) \exp\{i\phi_{\text{linear1}}(x, y)\}$ が再生される。これと同時に、線形位相 ϕ_{linear2} から生成された位相シフト光は、開口上のピンホールと記録媒体を通過し、撮像素子に入射する。このことにより、位相シフト光と、記録媒体から再生された光波の干渉縞をデジタルホログラム

$$\begin{aligned} I_d(x, y) &= |s(x, y) \exp\{i\phi_{\text{linear1}}(x, y)\} + \exp\{i\phi_{\text{linear2}}(x, y)\}|^2 \\ &= B(x, y) + s(x, y) \exp[i2\pi\{f_{xs}x + f_{ys}y\}] \\ &\quad + s^*(x, y) \exp[-i2\pi\{f_{xs}x + f_{ys}y\}], \end{aligned} \quad (6.5)$$

として取得することができる。ここで、 $B(x, y)$ は 0 次光をあらわす。 f_{xs} , f_{ys} はそれぞれ

$$f_{xs} = f_{x1} - f_{x2} \quad (6.6)$$

$$f_{ys} = f_{y1} - f_{y2}, \quad (6.7)$$

である。このデジタルホログラムに対して、フーリエ縞解析 [161]、あるいは位相シフト法 [173–176] を適用することにより、記録媒体から再生された信号光の複素振幅分布 $a_d(x, y) \exp\{i(\phi_d(x, y) + \phi_{\text{rand}})\}$ が得られる。以下では、フーリエ縞解析により複素振幅分布を取得する過程を述べる。 $I_d(x, y)$ のフーリエ変換をコンピューター内で計算し、

$$\mathcal{F}[I_d(x, y)] = \mathcal{F}[B(x, y)] + S(u - f_{xs}, v - f_{ys}) + S^*(-u - f_{xs}, -v - f_{ys}), \quad (6.8)$$

を得る。ここで、 $S(u, v)$ は信号光の複素振幅分布である。 $S(u, v)$ の最大空間周波数が $\sqrt{f_{xs}^2 + f_{ys}^2}/2$ よりも小さい場合、式 (6.8) の各周波数成分は異なる領域にあらわれ、

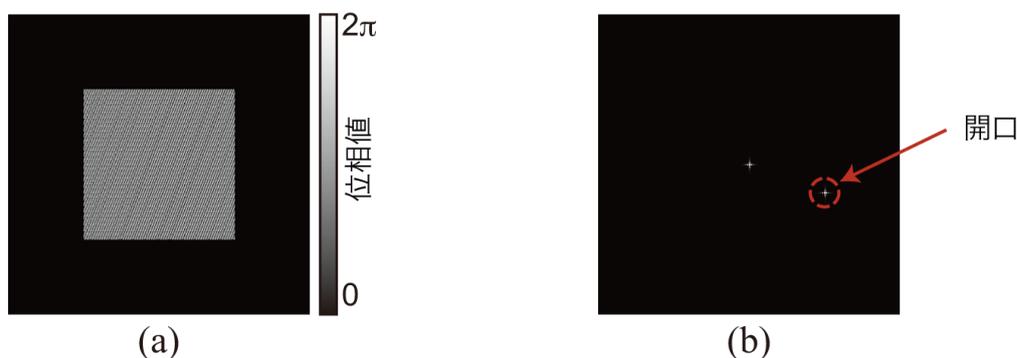


図 6.6 位相シフト光の (a) 位相分布とその (b) フーリエスペクトル

それぞれを分離することができる。これらの周波数成分の内、 $S(u - f_{xs}, v - f_{ys})$ をフィルタリングにより抽出し、キャリア空間周波数 f_{xs} , f_{ys} を取り除くことで、信号光のフーリエスペクトル $S(u, v)$ が得られる。これを逆フーリエ変換することにより、 $a_d(x, y) \exp\{i(\phi_d(x, y) + \phi_{\text{rand}})\}$ が得られる。 $\phi_{\text{rand}}(x, y)$ は、データ記録時に与えたランダム位相マスクであり、既知の位相分布である。ランダム位相マスクを信号光の複素振幅分布から取り除くことにより、複素振幅データ $a_d(x, y) \exp\{i\phi_d(x, y)\}$ が得られ、元のデータを読み出すことができる。

6.3 複素振幅データの記録・再生実験

提案システムにより複素振幅データの記録・再生が可能かどうかを検証するために実験をおこなった。実験に用いた光学系を図 6.7 に示す。光源には波長 532 nm の半導体レーザーを用いた。P-SLM には画素数 792×600 、画素サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ のものを用いた。撮像素子には画素数 1280×960 、画素サイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ のものを用いた。記録媒体には厚さ $400 \mu\text{m}$ のフォトポリマーを用いた。

実験により、記録した複素振幅データを図 6.8 に示す。振幅データは 0 か 1 の 2 値であり、位相データは、 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の 4 値である。ランダム位相マスクには、図 6.8 (c) 示す 8 値のものを用いた。図 6.8 の複素振幅データとランダム位相マスクから、位相ホログラムを生成し、CGRP とともに P-SLM に表示した。

データ記録時、平面波の位相分布を P-SLM により変調し、信号光と参照光を生成した。これらの光波に対して開口を用いて空間周波数フィルタリングをおこない、記録媒体にホログラムを記録した。データ再生時、参照光を記録媒体に照射し、信号光を再生した。撮像素子により、信号光と位相シフト光とのデジタルホログラムを取得

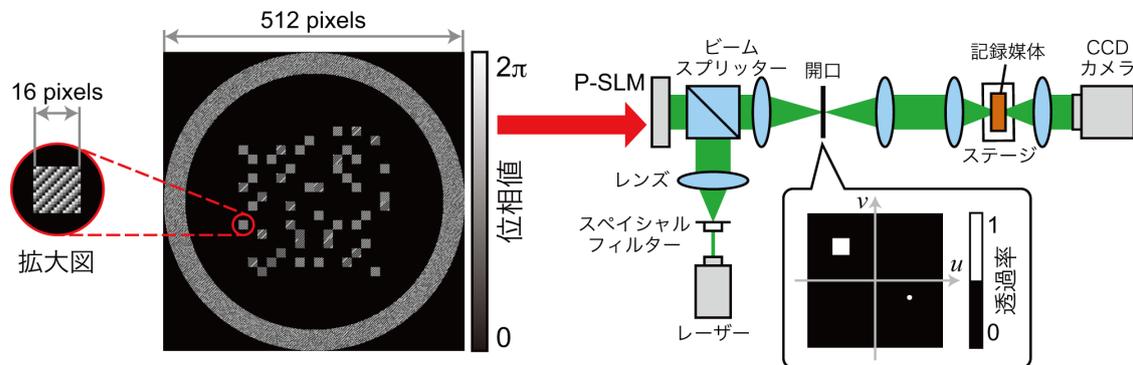


図 6.7 実験光学系

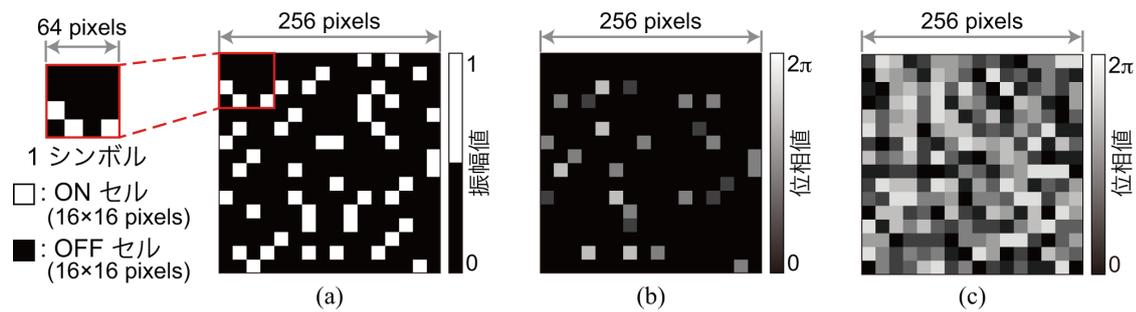


図 6.8 実験により記録した (a) 振幅データと (b) 位相データ. (c) ランダム位相マスク

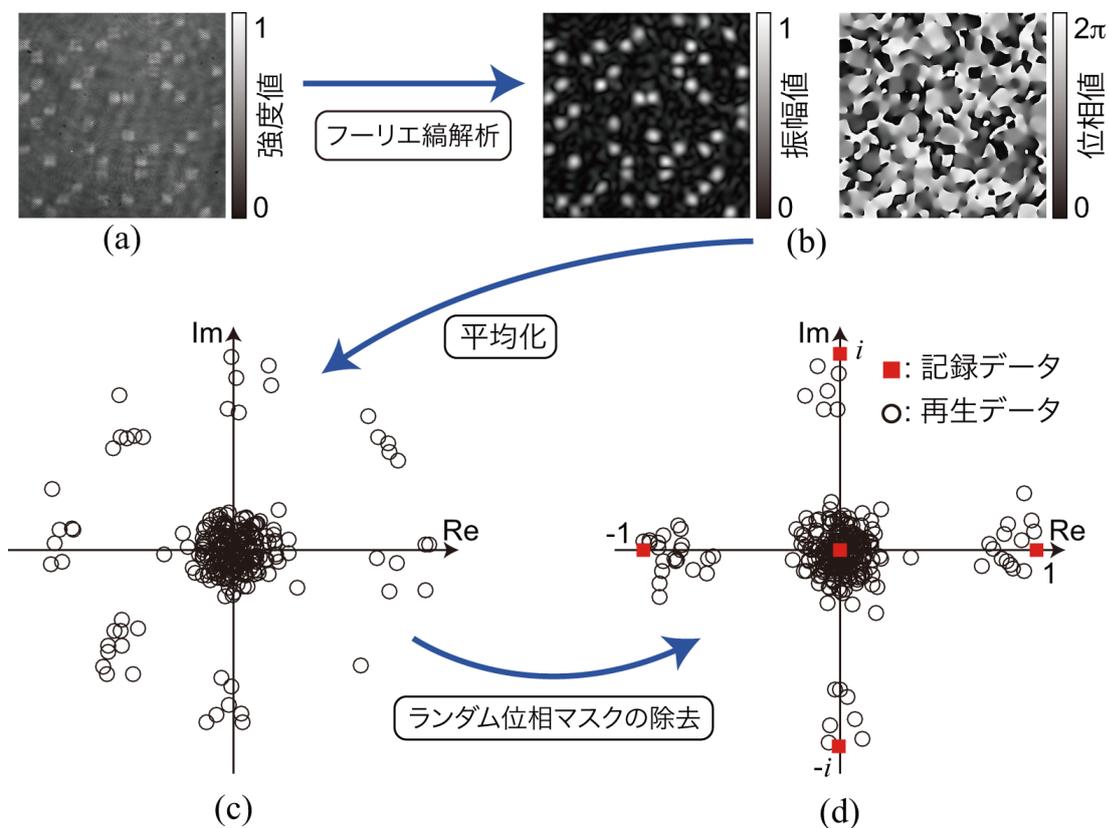


図 6.9 実験結果と複素振幅データの復号過程. (a) デジタルホログラム, (b) 信号光の複素振幅分布, (c) 複素平面上での信号光の複素振幅値, (d) ランダム位相マスクを除去した複素振幅データの複素振幅値.

した. 実験により取得したデジタルホログラムを図 6.9 (a) に示す. デジタルホログラムにフーリエ縞解析を適用し, 取得した信号光の複素振幅分布を図 6.9 (b) に示す. この複素振幅分布を 16×16 セルの領域に分割し, それぞれの領域で複素振幅値の平均値を算出する. これら 16×16 の複素振幅値を複素平面にプロットしたもの

を図 6.9 (c) に示す。図 6.9 (c) から、ランダム位相マスクの位相値を取り除いたものを図 6.9 (d) に示す。■は記録データの複素振幅値を示し、○は再生データの複素振幅値を示している。複素平面上で、再生データの複素振幅値が、どの記録データの複素振幅値に近いかを判定することによりデータを復号する。以上の手順により、図 6.9 (d) の複素振幅データを復号した結果、誤りなくデータを読み出すことに成功した。本実験結果から、提案システムにより単一の複素振幅データを記録・再生可能であることを実証した。

次に、提案システムにより複素振幅データのシフト多重記録を実現するために、シフト選択性を調査した。図 6.7 の光学系を用いて図 6.10 (a) に示す複素振幅データを記録媒体内にホログラムとして記録した。このホログラムに参照光を照射し、信号光を再生した。このとき、位相シフト光の生成はおこなわず、撮像素子により信号光の強度分布を取得した。参照光を照射しながら、記録媒体を $1\ \mu\text{m}$ 毎シフトし、その都度、信号光の強度分布の変化を取得した。以上の手順により取得したシフト選択性と取得した再生像の一部を図 6.11 に示す。本実験結果から、記録媒体をシフトするにつれて、再生像の強度が低下していることがわかる。また、記録媒体を $4\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$, あるいは $12\ \mu\text{m}$ シフトすることにより、クロストークノイズを 20% から 30% 程度に低減できることが明らかになった。図 6.11 は図 6.10 (a) の複素振幅データを記録した場合のシフト選択性であるが、図 6.10 (b) の複素振幅データを記録する場合にも同様のシフト選択性が得られると考えられる。なぜなら、シフト選択性は参照光の複素振幅分布に大きく依存し、本システムではページデータに依らず同じ参照光を用いるためである [101, 102]。

最後に、図 6.10 の 2 枚の複素振幅データのシフト多重記録の実験をおこなった。2 枚の複素振幅データの記録間隔は、図 6.11 のシフト選択性の評価から、 $12\ \mu\text{m}$ とした。データ記録時、はじめに、図 6.10 (a) の複素振幅データのホログラムを記録媒体

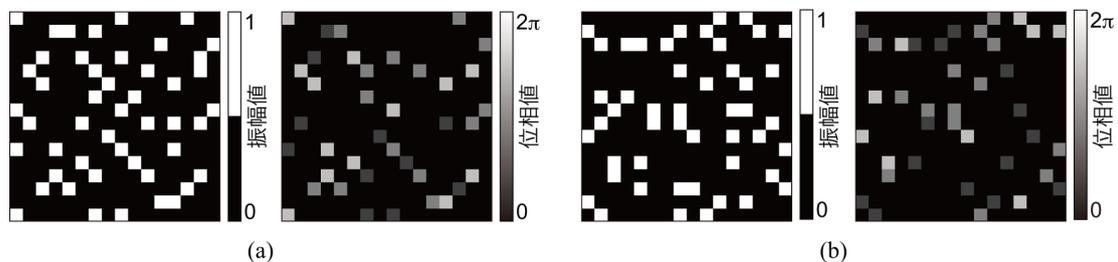


図 6.10 シフト多重記録の検証に用いた複素振幅データ。(a) 複素振幅データ 1, (b) 複素振幅データ 2.

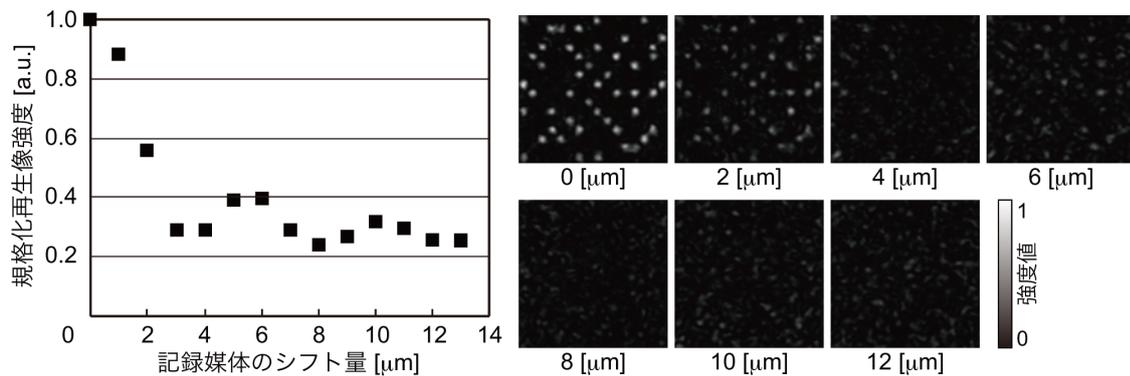


図 6.11 複素振幅データ 1 のシフト選択性

に記録した。次に、走査ステージに配置された記録媒体を $12\ \mu\text{m}$ シフトし、図 6.10 (b) の複素振幅データのホログラムを記録媒体に記録した。データ再生時、記録媒体中のそれぞれのホログラムに参照光を照射し、信号光を再生した。フーリエ縞解析により取得したそれぞれの信号光の複素振幅分布を図 6.12 (a), (b) に示す。それぞれの複素振幅分布を 16×16 の領域に分割し、それぞれの領域で複素振幅値の平均値を取得

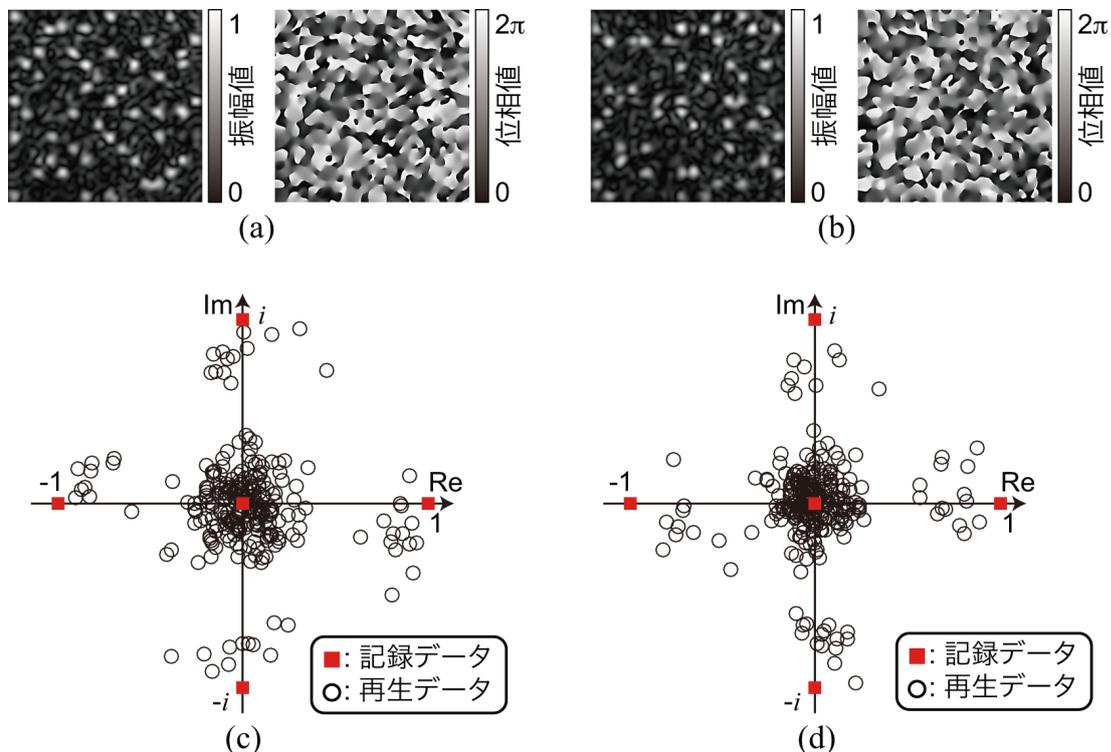


図 6.12 シフト多重記録・再生結果

した。その平均値から、ランダム位相マスクの位相値を除去した複素振幅値を複素平面にプロットしたものを図 6.12 (c), (d) に示す。これらの複素振幅値を記録データに復号した結果、誤りなくデータを読み出すことに成功した。以上の実験結果から、提案システムにより、複素振幅データのシフト多重記録が可能であることを実証した。

6.4 結言

本章では、小型・簡易な光学系により、複素振幅データの記録・再生が可能なホログラフィックメモリシステムを構築するために、デジタルホログラム技術を応用することを提案した。提案システムでは、位相ホログラムの技術と単一の P-SLM を用いることにより、高い光利用効率で、不要な 0 次光の影響を受けることなく高品質な光波の生成が可能である。また、コモンパス干渉系に基づいた光学系であることから、単一の光路で記録媒体へのホログラムの記録・再生、光波の複素振幅分布の検出が可能である。データ記録・再生実験により、振幅 2 値、位相 4 値の複素振幅データの記録・再生が可能であることを実証した。提案システムは、振幅分布のみを情報として扱うホログラフィックメモリに対して、位相分布を情報として扱うことが可能である。したがって、光波の符号化の次元を多次元に拡張でき、多値の信号の記録が可能となる。さらに、これまでの章で提案してきた、クロストークノイズの低減手法 [100]、機械的走査が不要な多層記録法 [116] を一括に実現可能性を秘めている。

本論文では、振幅データ・位相データを独立に符号化していたが、空間直交振幅変調の符号化法を用いることにより複素振幅データ 1 枚あたりの情報量を向上することができる。今後、画素間干渉や、多重記録時のクロストークノイズの影響を考慮し、ホログラフィックメモリの大容量化を実現可能な複素振幅データの符号化法を検討することが肝要である。

第7章 エルミート性を応用した超解像ホログラフィックメモリ

7.1 緒言

ホログラフィックメモリの大容量化を実現する方法の一つに、記録面積を縮小することがあげられる。これまでの章でも示してきたように、ホログラフィックメモリでは不要な感光による記録媒体の消費を抑えるために、開口を用いて光波の照射領域が制限される。この開口を小さくすることにより、1枚のページデータを記録する際の記録面積を縮小でき、記録密度が向上する。ホログラフィックメモリにおいて、記録領域を制限するという事は、ページデータに対してローパスフィルタリングを適用することに相当している。したがって、開口を小さくすることにより、ページデータの空間周波数の高周波成分が失われ、再生像の品質が低下する [71,72]。もし、この開口の大きさがナイキストサイズよりも小さくなる場合には、ページデータの基本周波数成分が失われ、サンプリング定理の観点から必ずデータ誤り生じる。このことから、2.2節でも述べたように、ホログラフィックメモリではナイキストサイズよりも大きい開口が用いられている。つまり、従来のホログラフィックメモリでは、ナイキストサイズよりも小さな領域にホログラムを記録することができず、記録面積の縮小に限界がある。

本研究では、従来のホログラフィックメモリにおける記録面積の縮小の限界を打破することを目的とし、超解像ホログラフィックメモリを提案する [177]。本手法では、デジタルホログラフィを用いた複素振幅分布に基づく信号処理と、フーリエ変換の対称性を活用することにより、従来のホログラフィックメモリよりも小さな領域にホログラムを記録・再生することができる。

本章では、超解像ホログラフィックメモリを用いることにより、従来のホログラフィックメモリの限界を超えて、ナイキストサイズ以下の領域にデータを記録・再生可能であることを実証した結果について述べる。7.2節では、超解像ホログラフィックメモリのデータ記録・再生原理について述べる。7.3節では、数値シミュレーションにより、スペクトルの回復処理の有用性を検証した結果を述べる。7.4節では、光学実験により提案手法の有用性を実証した結果を述べる。7.5節では、本章の結言を述べる。

7.2 超解像ホログラフィックメモリの記録・再生原理

超解像ホログラフィックメモリのデータ記録過程の概念図を図7.1に示す。データ記録時、ページデータとランダム位相マスクにしたがい、信号光を生成する。ページデータを a_{page} 、ランダム位相マスクを ϕ_{rand} とすると、信号光の複素振幅分布は

$$s(x, y) = a_{\text{page}}(x, y) \exp\{i\phi_{\text{rand}}(x, y)\}, \quad (7.1)$$

とあらわされる。ページデータは2値の振幅0と1により構成されている。ランダム位相マスクはフーリエスペクトルの0次成分を低減するために用いられ、2値の位相0と π により構成されている。したがって、信号光 $s(x, y)$ は、3値の複素振幅 -1 , 0 , および 1 により構成されているため、2次元の実関数である。信号光はレンズによりフーリエ変換され、レンズの焦点面に配置された開口により、フィルタリング処理を受ける。一般的なホログラフィックメモリでは、大きさ $cw \times cw$ の開口が用いられているが、本手法では、 $cw/2 \times cw$ の開口を用いる。したがって、本手法で用いる開口の透過率分布は、

$$A_h(u, v) = \text{rect}\left(\frac{2(u - cw/4)}{cw}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{cw}\right), \quad (7.2)$$

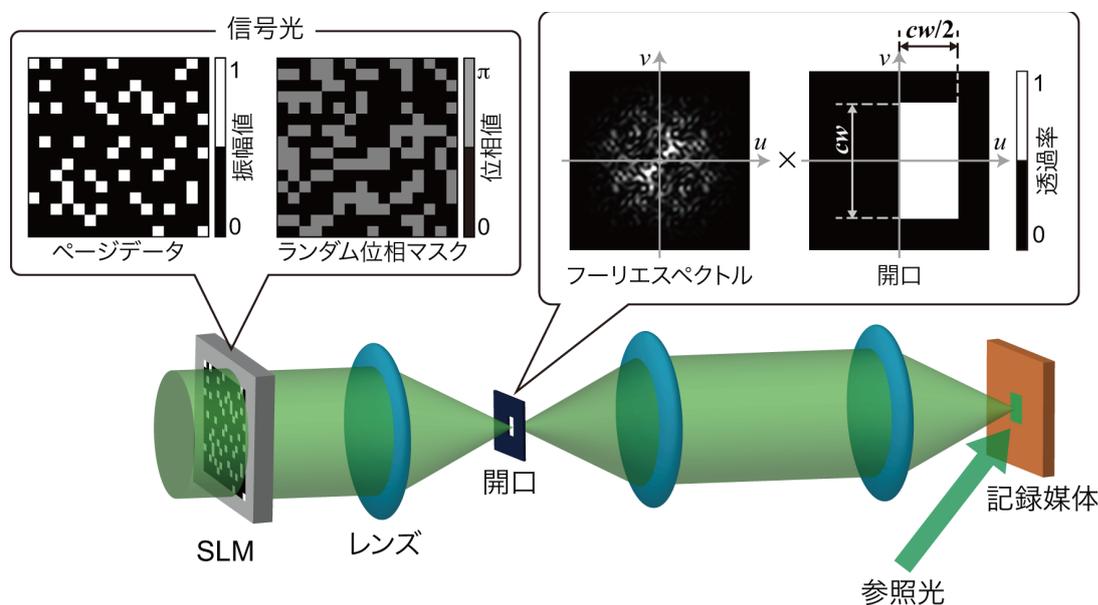


図 7.1 超解像ホログラフィックメモリのデータ記録過程

とあらわされる。この開口により信号光のフーリエスペクトルの左半分は除去され、開口を通過するフーリエスペクトルを、

$$S_h(u, v) = S(u, v)A_h(u, v) \quad (7.3)$$

と定義する。信号光は2次元の実関数であるため、そのフーリエスペクトル $S(u, v)$ は

$$S(u, v) = S^*(-u, -v) \quad (7.4)$$

に従い、原点を中心とした対称な性質がある。この実関数のフーリエ変換の対称性は、エルミート性と呼ばれる [178]。以下で述べるように、本手法ではこのエルミート性を応用した信号処理により、開口により失われた左半分のフーリエスペクトルを回復することができる。開口を通過したフーリエスペクトル $S_h(u, v)$ は、 $4f$ 光学系を介して記録媒体に照射される。これと同時に、参照光を記録媒体に照射することにより、記録媒体内でホログラムが記録される。

超解像ホログラフィックメモリのデータ再生過程の概念図を図 7.2 に示す。データ再生時、記録媒体に記録されたホログラムに参照光を照射する。このことにより、記録媒体から $S_h(u, v)$ が再生される。これをレンズによりフーリエ変換すると、撮像素子面には複素振幅分布

$$\begin{aligned} s_h(x, y) &= \mathcal{F}[S(u, v)A_h(u, v)] \\ &= s(x, y) \otimes \mathcal{F}[A_h(u, v)], \end{aligned} \quad (7.5)$$

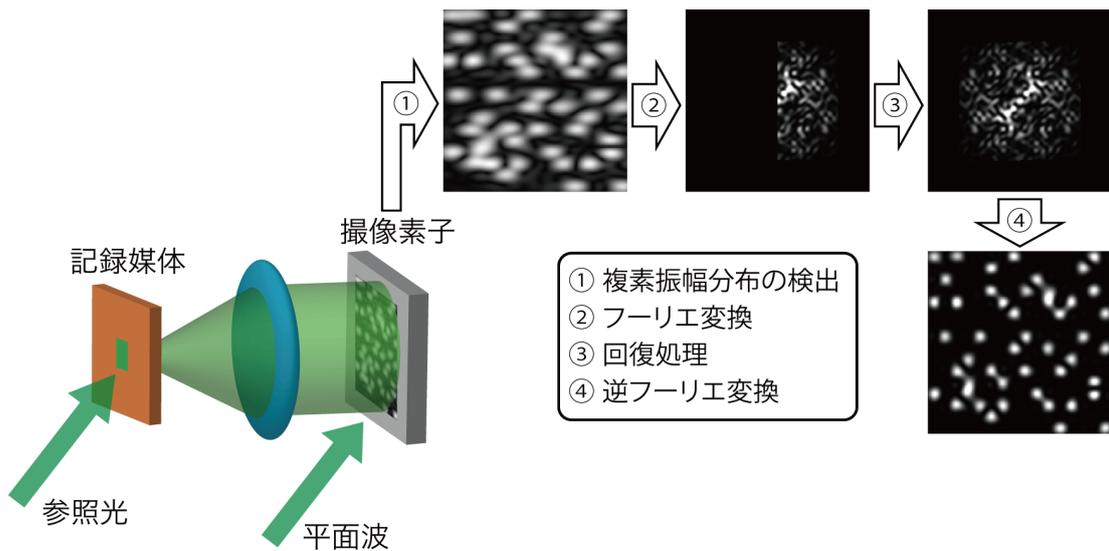


図 7.2 超解像ホログラフィックメモリのデータ再生過程

の光波が入射する。ここで、フーリエ変換の演算による座標系の転置は無視している。本手法では、従来のホログラフィックメモリと異なり、記録媒体から再生される光波の複素振幅分布を検出する必要がある。以下では、干渉、あるいはデジタルホログラフィを用いた、光波の複素振幅分布の検出過程を述べる。撮像素子面で、 $s_h(x,y)$ と平面波を干渉させる。このことにより、 $s_h(x,y)$ のデジタルホログラムを取得する。フーリエ縞解析 [161]、あるいは位相シフト法 [173–175] を用いてデジタルホログラムを解析することにより、 $s_h(x,y)$ の複素振幅分布が得られる。この複素振幅分布に信号処理を適用することにより、開口により失われたフーリエスペクトルを回復し、データを読み出す。その信号処理の手順を以下に述べる。まず、コンピュータ上で $s_h(x,y)$ のフーリエ変換を計算し、 $S_h(u,v)$ を得る。次に、このスペクトル $S_h(u,v)$ と、その座標を転置した複素共役 $S_h^*(-u,-v)$ を足し合わせることで、

$$\begin{aligned} O(u,v) &= S(u,v)A_h(u,v) + S^*(-u,-v)A_h(-u,-v) \\ &= S(u,v)\{A_h(u,v) + A_h(-u,-v)\} \\ &= S(u,v)\left\{\text{rect}\left(\frac{u}{cw}\right)\text{rect}\left(\frac{v}{cw}\right)\right\}. \end{aligned} \quad (7.6)$$

が得られ、開口により除去された左半分のスペクトルを回復することができる。最後に、得られたスペクトル $O(u,v)$ にフーリエ変換の計算をおこない、強度分布を算出することにより、

$$\begin{aligned} |o(x,y)|^2 &= |\mathcal{F}[O(u,v)]|^2 \\ &= \left|s(x,y) \otimes \mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{u}{cw}\right)\text{rect}\left(\frac{v}{cw}\right)\right]\right|^2. \end{aligned} \quad (7.7)$$

が得られる。開口関数のフーリエ変換との畳み込み積分により、元のページデータと比較してぼけた再生像が得られる。 c が 1 より大きく、ノイズの影響が十分に低い場合、強度分布 $|o(x,y)|^2$ にしきい値処理をおこなうことにより、元のページデータ a_{page} を読み出すことができる。

7.3 シミュレーションによる回復処理の検証

エルミート性に基づく回復処理がホログラフィックメモリのページデータに有効かを検証するために、シミュレーションをおこなった。シミュレーションの概念図を図 7.3 に示す。本シミュレーションは、開口による信号光の空間周波数フィルタリングの計算をおこなうことにより再生像を取得し、記録媒体や参照光の影響を考慮し

ない。図 7.4 (a), (b) に、シミュレーションで用いた信号光の振幅分布と位相分布をそれぞれ示す。振幅分布は 3:16 コーディング [21] により生成したページデータに相当し、2 値の振幅 0 と 1 により構成されている。ON セルと OFF セルはそれぞれ、 8×8 ピクセルであり、ページデータは 4×4 シンボルで構成されている。したがって、ページデータは 128×128 ピクセルで表現されている。位相分布はランダム位相マスクに相当し、2 値の位相 0 と π により構成されている。この信号光を図 7.3 の入力面に配置し、レンズによるフーリエ変換を計算した。図 7.4 (c) に信号光のフーリエスペクトルを示す。このフーリエスペクトル分布は、 $2w \times 2w$ の領域に相当している。図 7.5 (a) の開口を用いて、図 7.4 (c) のフーリエスペクトルの左半分を除去した。本シミュレーションでは、記録面積を縮小すると同時に、耐ノイズ性能を向上するために、開口の大きさを決定するパラメータ c を 1.3 とした。したがって、提案手法で用いる開口の大きさは $0.65w \times 1.3w$ である。この開口の面積は $0.845w^2$ であり、ナイキストアパーチャ w^2 よりも小さいため、この開口を用いることにより、従来のホログラフィックメモリの記録面積の縮小の限界を打破できることを検証できる。開口を通過したスペクトルに対して、逆フーリエ変換をおこない、出力面での強度分布を取得

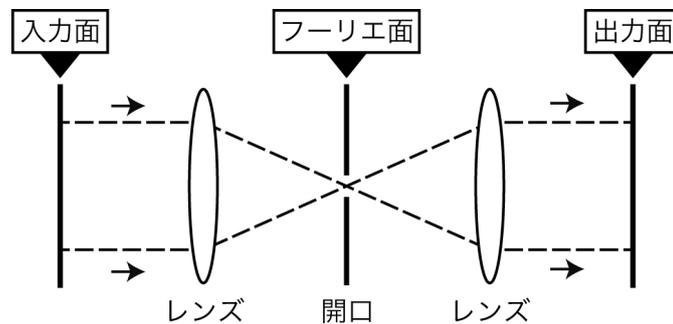


図 7.3 シミュレーションの概念図

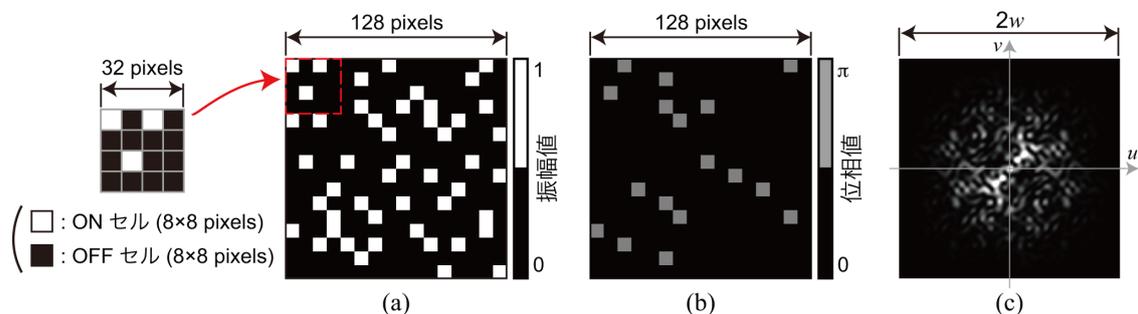


図 7.4 シミュレーションに用いた信号光の (a) 振幅分布と (b) 位相分布. (c) 信号光のフーリエスペクトル.

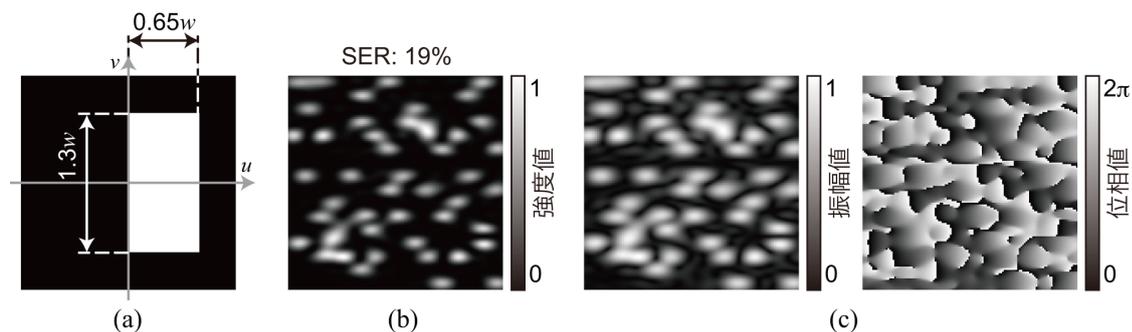


図 7.5 回復処理を適用しない場合のシミュレーション結果. (a) 空間周波数フィルタリングに用いた開口. 空間周波数フィルタリング後の信号光の (b) 強度分布と (c) 複素振幅分布.

した結果を図 7.5 (b) に示す. この強度分布にしきい値処理をおこない, データを復号した結果, SER は 19% であった. エルミート性に基づく回復処理を適用しない場合には, 開口により左半分のスペクトル情報が失われているため元のデータを読み出すことができない.

エルミート性に基づく回復処理を適用するために, 開口を通過した信号光の複素振幅分布を取得した. 出力面での信号光の複素振幅分布を図 7.5 (c) に示す. この複素振幅分布から, 式 (7.6) に基づき, スペクトルを回復する. この回復処理後に得られたフーリエスペクトルを図 7.6 (a) に示す. 図 7.4 (c) と同等のスペクトルが得られていることがわかる. 回復処理を適用したスペクトルに対して, 逆フーリエ変換をおこない, 出力面での強度分布を算出した結果を図 7.6 (b) に示す. この強度分布からデータを復号した結果, SER は 0% であり, 誤りなくデータを読み出すことに成功した.

従来のホログラフィックメモリと本手法を比較するため, 図 7.7 (a) の開口を用いた

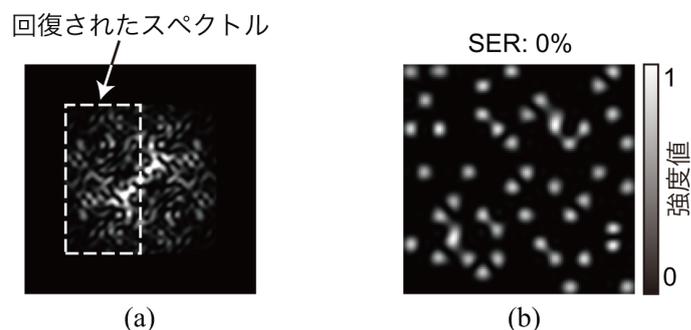


図 7.6 回復処理を適用した場合のシミュレーション結果. (a) 回復処理後の信号光のスペクトル. (b) 出力面における信号光の強度分布.

場合のシミュレーションをおこなった。従来のホログラフィックメモリでは、図 7.7 (a) に示すように、開口の中心と光軸が一致するように、開口が配置される。開口の大きさは、図 7.5 (a) と同じ、 $0.65w \times 1.3w$ とした。図 7.7 (b) に、空間周波数フィルタリング後の信号光の強度分布を示す。横方向にぼけた再生像が得られていることがわかる。この強度分布からデータを復号した結果、SER は 25% であった。このデータ誤りは、 u 方向の開口の幅がナイキストサイズよりも小さく、ページデータの u 方向の基本周波数成分が失われていることが原因である。

以上のシミュレーション結果から、エルミート性に基づく回復処理により、フーリエスペクトルの情報が半分に欠落した場合でも元のページデータを取得できることを明らかにした。次節では、記録媒体を用いたデータ記録・再生実験により、提案手法の有用性を検証する。

7.4 原理検証実験

提案手法の原理検証をおこなうために用いた実験光学系を図 7.8 に示す。本光学系では、デジタルホログラム技術を導入しているため、 $-1, 0, 1$ の複素振幅値の信号光の生成、光波の複素振幅分布の検出が可能である。光源には波長 532 nm の半導体レーザーを用いた。P-SLM には画素数 792×600 、画素サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ のものを用いた。撮像素子には画素数 1280×960 、画素サイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ の CCD カメラを用いた。記録媒体には厚さ $400 \mu\text{m}$ のフォトポリマーを用いた。

本光学系により、図 7.4 (a) のページデータの記録・再生をおこなう。データ記録

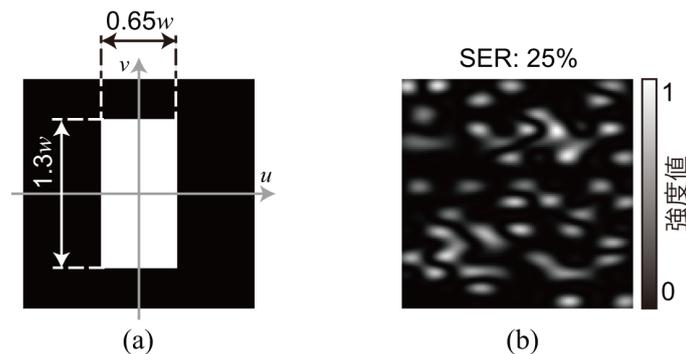


図 7.7 従来手法のホログラフィックメモリのシミュレーション結果。(a) 空間周波数フィルタリングに用いた開口。(b) 空間周波数フィルタリング後の信号光の強度分布。

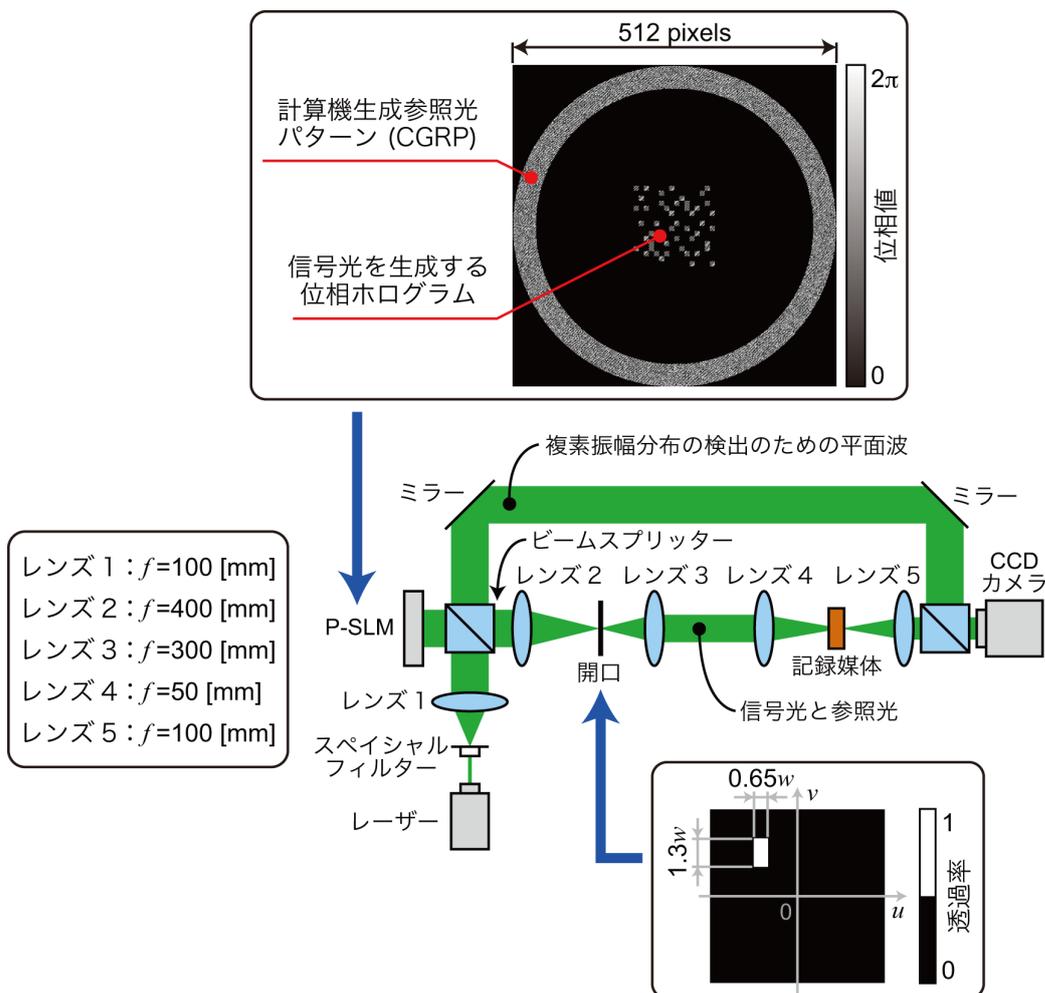


図 7.8 超解像ホログラフィックメモリの実験光学系

時，図 7.4 (a), (b) の複素振幅分布の信号光と参照光を生成するために図 7.9 (a), (b) に示す位相ホログラムを P-SLM に入力した。図 7.9 (a) の位相ホログラムの生成には線形位相符号化法を用いた。図 7.9 (a) の位相分布の光波をレンズによりフーリエ変換することにより，図 7.10 (a) に示すフーリエスペクトルが得られる。これまでの章で述べたように，位相ホログラム由来の不要な回折光成分が低周波領域にあらわれている。一方，高周波領域には，信号光のフーリエスペクトルが得られている。このフーリエスペクトルは，図 7.4 (c) のフーリエスペクトルと同等であり，単一の P-SLM から目的の信号光の複素振幅分布が得られていることがわかる。図 7.8 に示す開口により，この信号光のフーリエスペクトルに対してフィルタリング処理をおこない，左半分の成分を除去した。開口の大きさは，シミュレーションの開口と同じにするため，

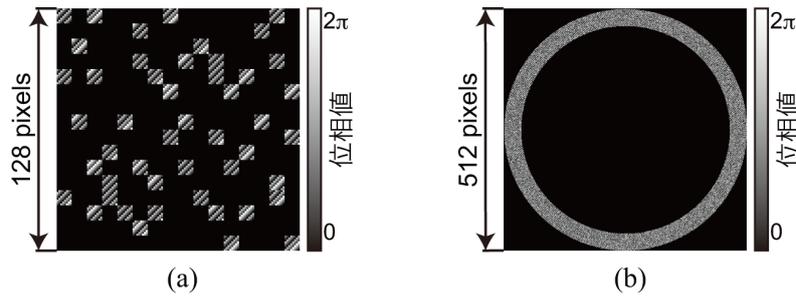


図 7.9 実験に用いた位相ホログラム. (a) 信号光を生成する位相ホログラム. (b) 参照光を生成する CGRP.

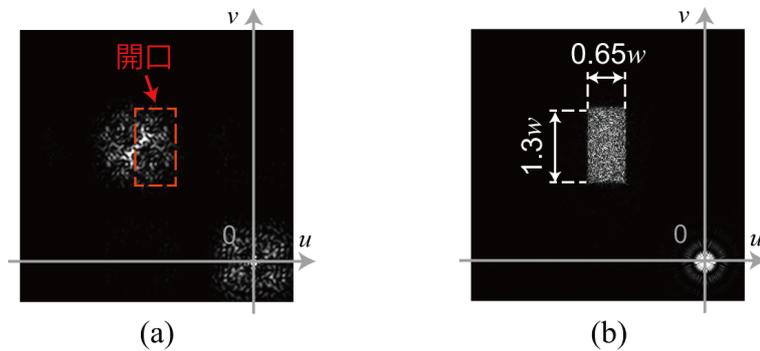


図 7.10 位相ホログラムにより生成された (a) 信号光と (b) 参照光のフーリエスペクトル.

$0.65w \times 1.3w$ とした. 本光学系における w の値は $222 \mu\text{m}$ である. 開口を通過した信号光は, $4f$ 光学系を介して, 記録媒体に照射される. 本実験光学系では, 開口の配置ずれや大きさのずれにより, 意図しない信号光のフーリエスペクトル成分が, 開口を通過していることが考えられる. より確実に, $0.65w \times 1.3w$ の領域のフーリエスペクトルを選択的に記録媒体内に記録するために, 図 7.9 (b) の CGRP を SA 法により設計した. CGRP のフーリエスペクトルを図 7.10 (b) に示す. 参照光のフーリエスペクトル分布が $0.65w \times 1.3w$ の開口の大きさに一致していることがわかる. この参照光のフーリエスペクトルは, 信号光のフーリエスペクトルと同様に図 7.8 に示す開口を通過し, 記録媒体に照射される. このことにより, 記録媒体内で信号光と参照光のホログラムが記録される.

データ再生時, スペシャルフィルターからの平面波をビームスプリッターにより分割した. 一方の平面波は P-SLM に入射し, 参照光を生成する. この参照光は, 記録媒体内のホログラムに照射され, 信号光が再生される. 再生された信号光の強度分布を図 7.11 (a) に示す. この強度分布の SER を評価した結果, 31% であった. シミュレーションで示した通り, 信号光のフーリエスペクトルの左半分が失われているため,

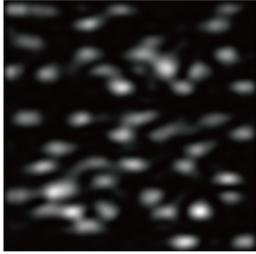
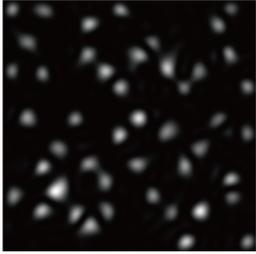
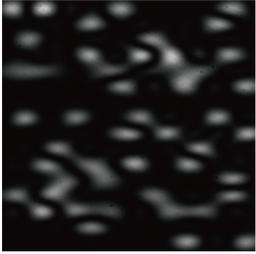
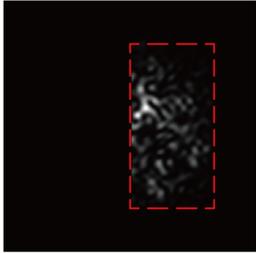
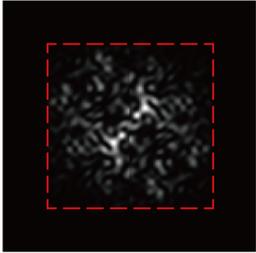
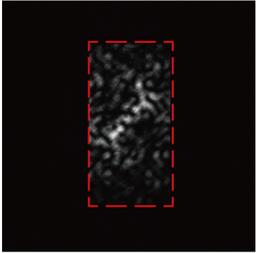
	提案手法		従来手法
	回復処理なし	回復処理あり	
再生像	SER: 31%  (a)	SER: 0%  (c)	SER: 19%  (e)
フーリエスペクトル	 (b)	 (d)	 (f)

図 7.11 実験結果. $0.65w \times 1.3w$ の開口を用いた場合の (a) 再生像とその (b) フーリエスペクトル. 回復処理を適用することにより取得した (c) 再生像とその (d) フーリエスペクトル. 従来のホログラフィックメモリで $0.65w \times 1.3w$ の開口を用いた場合の (e) 再生像とその (f) フーリエスペクトル.

元のページデータを読み出すことができない. 本実験結果の SER は, 図 7.5 (b) に示すシミュレーションにより取得した SER と異なっている. これは, 記録媒体の非線形性や, 開口の配置ずれに起因するものと考えられる.

次に, 回復処理による再生像の取得をおこなった. ビームスプリッターにより分割されたもう一方の平面波は, 信号光とは別の光路を通り, 撮像素子面に入射する. これにより, 記録媒体から再生された信号光と平面波の干渉縞をデジタルホログラムとして取得した. デジタルホログラムに対してフーリエ縞解析 [161] を適用することにより, 信号光の複素振幅分布を取得した. コンピュータ内で, 取得した信号光の複素振幅分布に対してフーリエ変換の計算をおこない, 図 7.11 (b) のフーリエスペクトルを取得した. 定性的にみて, 図 7.4 (c) に示す信号光のフーリエスペクトルの右半分が得られていることがわかる. このスペクトルから, 式 (7.6) に基づき回復処理を適用したスペクトルを図 7.11 (d) に示す. 図 7.11 (c) に, 図 7.11 (d) のフーリエスペク

トルにフーリエ変換の計算をおこなうことにより得られる再生像を示す。この再生像の SER を評価した結果、0% であった。提案する回復処理により、誤りなくデータを読み出せることを実証した。

最後に、従来のホログラフィックメモリの再生像の SER を評価した。従来手法の実験のために、信号光のフーリエスペクトルの中心と、 $0.65w \times 1.3w$ の開口の中心が一致するように開口を配置した。開口を通過した信号光のフーリエスペクトルを観察するために、図 7.8 の記録媒体面に撮像素子を配置した。撮像素子により取得したフーリエスペクトルを図 7.11 (f) に示す。開口により、横方向の周波数成分の大部分が取り除かれていることがわかる。撮像素子を図 7.8 に示す位置に戻し、記録媒体を取り除いた。開口を通過した信号光の強度分布を図 7.11 (e) に示す。図 7.7 (b) のシミュレーション結果と同様に、横方向にぼけた再生像が得られていることがわかる。図 7.11 (e) の SER を評価した結果、19% の誤りが生じていた。従来手法の実験では記録媒体を用いていないため、記録媒体に由来するノイズが存在しないにもかかわらず、データ誤りが生じている。このデータ誤りは、シミュレーション結果と同様に、 u 方向の空間周波数がナイキストサイズよりも小さく、基本周波数成分が失われていることが原因である。図 7.11 (e) の SER は、図 7.7 (b) のシミュレーション結果よりも大きい。この原因は、開口の配置ずれ、あるいは、 $0.65w \times 1.3w$ よりも開口の大きさが大きくなっていたことが考えられる。

以上の実験結果から、提案手法を用いることにより、従来のホログラフィックメモリよりも小さな領域へのホログラムの記録・再生が可能であることを実証した。従来のホログラフィックメモリでは信号光のフーリエスペクトルの中心部分を記録・再生していたが、信号光が実関数の場合にはフーリエスペクトルの半分を記録するだけで、元のページデータを読み出すことができることが明らかになった。さらに、提案手法で用いる開口の大きさは、ナイキストアパーチャ w^2 よりも小さくすることができるため、従来のホログラフィックメモリにおける記録面積の縮小の限界を打破することができる。本手法により、従来のホログラフィックメモリを超えた大容量ホログラフィックメモリの実現が期待される。

7.5 結言

本章では、ホログラムの記録面積の縮小による大容量化を実現するために、超解像ホログラフィックメモリを提案した。本手法では、フーリエ変換のエルミート性を応

用することにより、従来のホログラフィックメモリに対して、ページデータの空間周波数情報を2倍に拡大し、記録密度を高めることができる。さらに、従来のホログラフィックメモリの記録面積の縮小限界を打破し、ナイキストサイズよりも小さな領域にホログラムを記録・再生することができる。以上の特徴から、従来のホログラフィックメモリと区別するために、本手法を超解像ホログラフィックメモリと名付けた。ホログラフィックメモリの大容量化手法として、多重記録法や多値記録技術の研究が多くおこなわれている。これらに対して、超解像ホログラフィックメモリは記録面積の縮小というホログラフィックメモリの大容量化の新たな方向性を示した。

本手法では、記録面積を半分にまでしか縮小することができず、本手法においても記録面積の縮小の限界が存在する。また、本手法を用いるためには、信号光が実関数である必要があり、位相分布が多値となるとエルミート性による回復処理を適用することができない。以上の課題を解決するためには、既存のデジタル超解像技術 [179–181] を応用することが有効であると考えられる。一般に、既存のデジタル超解像技術では、複数の低解像画像を取得するか、画像の視野を犠牲にするか、あるいは、ある拘束条件下で不良設定逆問題を解く必要がある。これらすべての技術が、ホログラフィックメモリにおいてデータ転送速度を招くことが懸念されるが、データ転送速度を犠牲にすることで、大容量化を実現できる可能性がある。今後、ホログラフィックメモリのデータ記録・再生過程やノイズ特性を考慮した、デジタル超解像技術の開発が期待される。

第 8 章 コアキシャル偏光ホログラム記録

8.1 緒言

一般的なホログラフィでは、記録すべき光波と参照光を干渉させ、これによって生じる干渉縞の強度分布を記録媒体内に記録している。したがって一般的なホログラフィでは、干渉縞を形成するために、記録すべき光波と参照光の偏光状態は同一である必要がある。例えば、図 8.1 (a) に示すような偏光状態が同一の 2 光波の干渉を考える場合、2 光波の位相差あるいは交差角度に応じた干渉縞が形成される。この干渉縞の周期が光波の位相情報を、干渉縞の大きさ・コントラストが振幅情報をそれぞれ反映しており、複素振幅分布の記録が可能である。もし、図 8.1 (b) に示すように、2 光波の偏光状態が直交している場合には、強度の干渉縞が形成されない。したがって、光の強度にしか応答を示さない記録媒体では、ホログラムを記録することは不可能である。しかし、記録媒体が偏光感受性を有する場合、偏光状態が直交する 2 光波のホログラムを記録することができる。図 8.1 (b) に示すように、2 光波の偏光状態が直交している場合には、強度の干渉縞は形成されないが、偏光状態が空間的に変化する。偏光感受性を有する記録媒体は、この偏光状態の空間的な変化を記録媒体内で光学的異方性

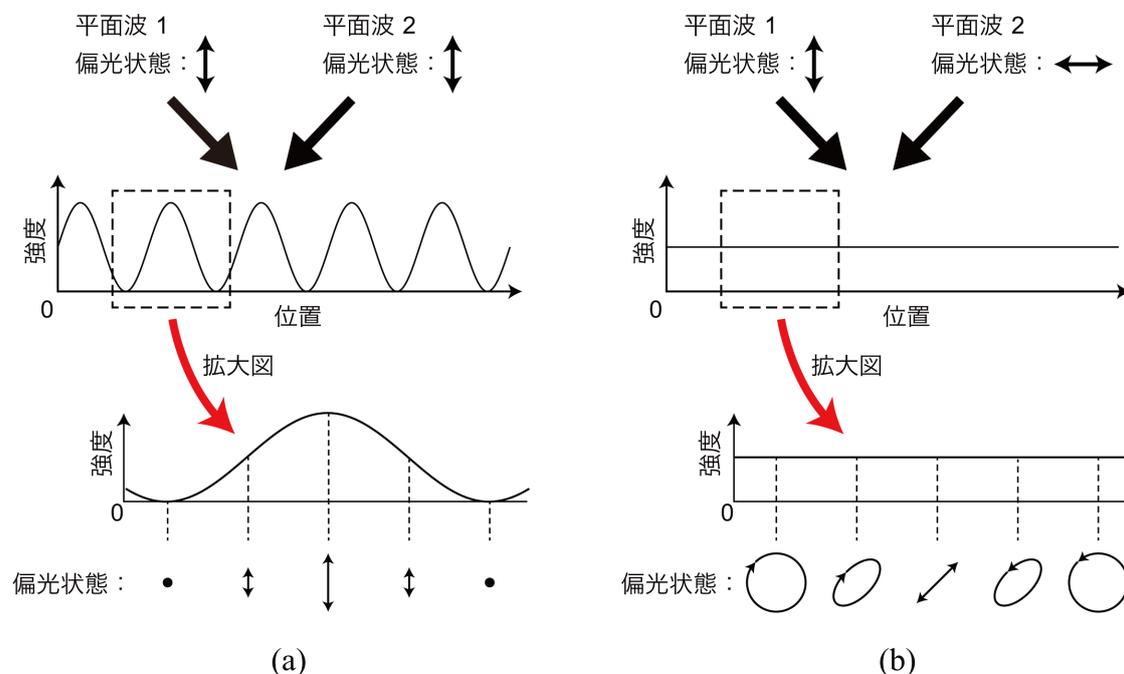


図 8.1 2 光波の干渉。(a) 偏光状態が同一の場合。(b) 偏光状態が直交する場合。

として記録することができる。このホログラフィの技術は、一般的なホログラフィと区別するために、偏光ホログラフィ [182,183] と呼ばれる。

偏光ホログラフィでは、光波の複素振幅分布だけでなく、偏光状態も記録・再生することが可能である。さらに、偏光ホログラフィの特筆すべき性質として、体積ホログラムではなく、薄いホログラムであっても記録条件を適切に設定することにより、理論的な回折効率が 100% に到達することが挙げられる [182,184,185]。以上の偏光ホログラフィの特徴を生かした、回折光学素子 [186–188] や、光情報処理技術 [189,190] が提案されている。

ホログラフィックメモリにおいても、偏光ホログラフィの技術を導入することが提案されている。ホログラフィックメモリでは、偏光感受性を有する記録媒体として、アゾベンゼンポリマー [26] やフェナントレンキノンを添加したポリメタクリル酸メチル (PQ-PMMA) [191,192] がよく用いられている。これらの記録媒体に光波の偏光状態を記録・再生することができるため、光波の振幅や位相ではなく、偏光状態を情報として扱うページデータを用いることができる [26,27]。さらに、偏光ページデータを用いたノイズ低減手法 [27] や、偏光多重記録 [32,193,194] が実現され、記録容量・データ転送速度の向上が期待される。以上のことから、偏光ホログラフィはホログラフィックメモリの大容量化・データ転送速度の高速化を実現するためには有望な技術の一つであると考えられる。しかし、従来の偏光ホログラフィックメモリシステムは、2 光束の光学系に基づくものであり、光学系の小型化が困難であるだけでなく、振動の影響を受けやすく再生データの品質が低下する課題が残されている。

ところで、本研究では、ホログラフィックメモリ、特にコアキシャルホログラフィックメモリの光学系にデジタルホログラフィの技術を導入し、光波の複素振幅分布の変調を実現してきた。本システムに、偏光ホログラフィの技術を導入することができれば、光波の符号化の自由度をさらに拡張することができ、振幅・位相・偏光分布を情報として扱うことができる。しかし、これまでの章で示してきた光学系では、偏光分布の変調が不可能であり、偏光ホログラムの記録・再生をおこなうことができない。

本研究では、以上の課題を解決するために、位相ホログラムを用いた振幅・位相・偏光分布の変調技術を提案し、その技術を用いたコアキシャル偏光ホログラフィックメモリシステムを構築する [195]。さらに、本システムを用いて、偏光ホログラムを記録する際のランダム位相マスクの有用性を検証する。2 光束の偏光ホログラフィックメモリでは、ランダム位相マスクの有用性が定性的に示されているが [196]、コアキシャル偏光ホログラフィックメモリにおけるランダム位相マスクの有用性は未だ明らかに

されていない。従来のコアキシャルホログラフィックメモリでランダム位相マスクが有効であるように、コアキシャル偏光ホログラフィックメモリにおいても、ランダム位相マスクを導入することにより、再生像の品質が向上する可能性がある。

本章では、振幅・位相・偏光分布の変調が可能なコアキシャル偏光ホログラフィックメモリシステムにより、安定した光学系を用いて偏光ホログラムの記録・再生が可能であることを述べ、偏光ホログラムを記録する際のランダム位相マスクの有用性を実験的に実証した結果を述べる。8.2節では、位相ホログラムを用いた振幅・位相・偏光分布の変調原理について述べる。8.3節では、コアキシャル偏光ホログラフィックメモリの光学系を示し、偏光ホログラムの記録・再生が可能であることを示す。さらに、ランダム位相マスクの有用性を検証した結果を示す。8.4節では、本章の結言を述べる。

8.2 位相ホログラムを用いた振幅・位相・偏光分布の変調

任意の振幅・位相・偏光分布を有するコヒーレントな光波は、ジョーンズベクトルを用いて、偏光が直交する2つのスカラー波 E_x , E_y の重ね合わせ、

$$\begin{pmatrix} E_x(x, y) \\ E_y(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x(x, y) \exp\{i\phi_x(x, y)\} \\ a_y(x, y) \exp\{i\phi_y(x, y)\} \end{pmatrix} \quad (8.1)$$

により与えられる。ここで、 $a_x(x, y)$, $\phi_x(x, y)$ はそれぞれ、水平直線偏光の振幅分布と位相分布をあらわし、 $a_y(x, y)$, $\phi_y(x, y)$ はそれぞれ、垂直直線偏光の振幅分布と位相分布をあらわす。一般的に、任意の振幅・位相・偏光分布を有するベクトル波を生成するためには、4台のSLMが必要である[197]。しかし、4台のSLMを用いる場合、光学系が大型・複雑・高価となるだけでなく、高精度なアライメント技術が必要である。4台のSLMに配置ずれがある場合には、生成される光波の品質が低下する。SLMの削減には、SLMの領域を分割することや、CGHを用いることが有効である[197–203]。これらの技術では、生成可能な光波のSBPが、SLMのSBPよりも低下するが、比較的廉価で、小型な光学系により光波の生成が可能である。以上の技術とは異なり、CGHの多重化することにより、単一のSLMを用いて任意のベクトル波の生成が可能である[204–206]。

本研究では、高い光利用効率で、高品質なベクトル波を生成する技術がホログラフィックメモリに適していると考え、5.2節で述べた線形位相符号化法の位相ホログラムを用いたベクトル波の生成技術を提案する。本手法の原理は文献[200]に記載され

ているものと類似している。文献 [200] に示されている，2 台の透過型 P-SLM を用いる場合とは異なり，本研究では，2 台の反射型 P-SLM により構成される光学系を用いる場合の原理を述べる。本手法では，任意の振幅・位相・偏光分布を有するベクトル波を生成するために，式 (8.1) のスカラー波 $E_x(x, y)$, $E_y(x, y)$ を 5.2 節で述べた線形位相符号化法により生成する。生成した $E_x(x, y)$, $E_y(x, y)$ を合波することにより，所望の振幅・位相・偏光分布の光波を生成可能である。

以上の生成過程を実現する光学系を 図 8.2 に示す。45 度の直線偏光をビームスプリッターにより 2 つの光波に分波し，それぞれ光波の位相分布を P-SLM により変調する。各 P-SLM には， $E_x(x, y)$, $E_y(x, y)$ を生成する位相ホログラム

$$\psi_x(x, y) = a_x(x, y)\{\phi_x(x, y) + \phi_l(x, y)\}, \quad (8.2)$$

$$\psi_y(x, y) = a_y(x, y)\{\phi_y(x, y) + \phi_l(x, y)\} \quad (8.3)$$

がそれぞれ入力される。ここで，式 (8.2)，式 (8.3) は式 (5.13) と同様に，振幅値が 0 か 1 の 2 階調の光波を生成する場合にのみ有効である。多階調の振幅値を生成するためには，それぞれの位相ホログラムを式 (5.2) とする必要がある。2 台の P-SLM は液晶分子の配向方向が互いに直交するように配置されているため，P-SLM により変調された光波 $\vec{h}_x(x, y)$, $\vec{h}_y(x, y)$ は，それぞれ

$$\vec{h}_x(x, y) = \begin{pmatrix} \exp\{i\psi_x(x, y)\} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (8.4)$$

$$\vec{h}_y(x, y) = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp\{i\psi_y(x, y)\} \end{pmatrix} \quad (8.5)$$

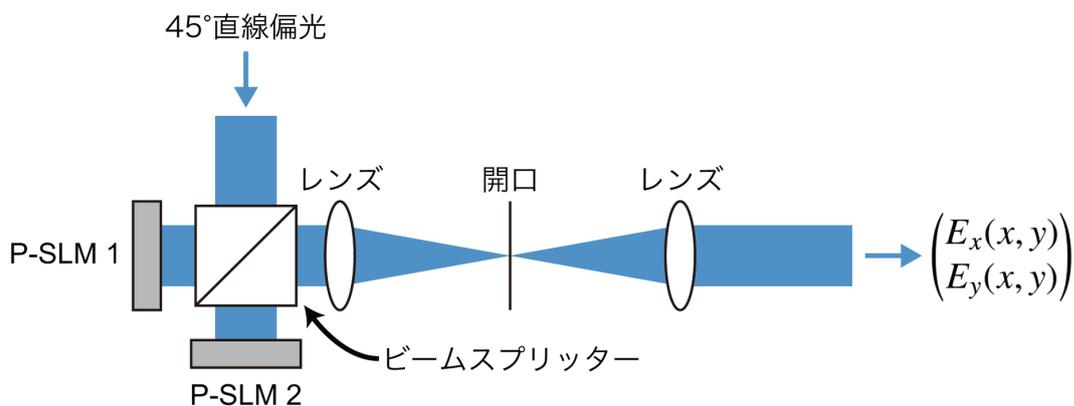


図 8.2 振幅・位相・偏光分布の変調光学系

により与えられる。これらの光波はビームスプリッターにより合波され、

$$\begin{aligned}\vec{h}(x, y) &= \vec{h}_x(x, y) + \vec{h}_y(x, y) \\ &= \begin{pmatrix} \exp\{i\psi_x(x, y)\} + 1 \\ \exp\{i\psi_y(x, y)\} + 1 \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (8.6)$$

が得られる。このベクトル波をレンズによりフーリエ変換すると、

$$\vec{H}(u, v) = \begin{pmatrix} \vec{H}_x(u, v) + \delta(u, v) \\ \vec{H}_y(u, v) + \delta(u, v) \end{pmatrix}\quad (8.7)$$

となる。ここで、 $\vec{H}_x(u, v)$, $\vec{H}_y(u, v)$ はそれぞれ、 $\exp\{i\psi_x(x, y)\}$, $\exp\{i\psi_y(x, y)\}$ のフーリエ変換である。 $\delta(u, v)$ はデルタ関数を示す。式 (8.7) に対して、図 8.2 の開口によりバンドパスフィルタリングをおこない、 $\vec{H}_x(u, v)$ と $\vec{H}_y(u, v)$ の 1 次回折光の成分を取り出すことにより、位相ホログラムからの不要な回折光と $\delta(u, v)$ を取り除くことができる。バンドパスフィルタリング後の光波を再度フーリエ変換することにより、

$$\vec{h}_1(x, y) = \begin{pmatrix} a_x(x, y) \exp\{i\phi_x(x, y)\} \\ a_y(x, y) \exp\{i\phi_y(x, y)\} \end{pmatrix}\quad (8.8)$$

が得られる。ここで、フーリエ変換による座標の転置は無視している。以上に示したそれぞれの位相ホログラムのフーリエ変換とバンドパスフィルタリングの詳細な数学的な記述は 5.2 節に示している通りである。式 (8.8) より、2 枚の位相ホログラムを用いることにより、任意の振幅・位相・偏光分布の光波を生成可能であることがわかる。この光波の変調技術をコアキシャルホログラフィックメモリに応用し、偏光ホログラムの記録・再生をおこなう。

8.3 データ記録・再生実験

任意の振幅・位相・偏光分布の光波を生成可能なコアキシャル偏光ホログラフィックメモリの光学系を図 8.3 に示す。光源には波長 405 nm の半導体レーザーを用いた。P-SLM 1, P-SLM 2 には画素数 792×600 、画素サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ のものを用いた。撮像素子には画素数 2592×1944 、画素サイズ $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ の CMOS カメラを用いた。記録媒体には芳香族ケトン誘導体 AK1 を有する偏光感受性材料を用いた [207, 208]。この偏光感受性材料では、照射される光波の偏光状態に応じた線複屈折が誘起される。記録媒体の厚さは $500 \mu\text{m}$ である。

本光学系を用いて、偏光ホログラムの記録・再生実験をおこない、ランダム位相マスクの有用性を検証した。1/2 波長板とにより、レーザーからの光波の偏光状態を 45 度直線偏光とした。そのコリメート光をビームスプリッターにより分波し、2 台の P-SLM を用いて光波の振幅・位相・偏光分布を変調し、信号光と参照光を生成した。本実験で用いた信号光と参照光の振幅・位相・偏光分布を図 8.4, 図 8.5 に示す。信号光は水平直線偏光成分と垂直直線偏光成分を有し、それぞれ偏光成分の振幅分布がページデータに相当している。ページデータの生成には、3:16 コーディングを用いた。また、信号光の各偏光成分の位相分布を 2 階調のランダム位相マスクとした。一方、参照光は水平直線偏光成分のみを有し、参照光の位相分布をランダム位相マスクとした。2 台の P-SLM と位相ホログラムの技術を用いて、信号光と参照光を生成し、記録媒体に照射した。このことにより、記録媒体内で信号光と参照光の偏光ホログラムが記録される。データ再生時には、データ記録時に用いた参照光を記録媒体内の偏光ホログラムに照射することにより信号光が再生される。この強度分布を CMOS カメラにより検出した。

再生された信号光の強度分布を図 8.6 (a) に示す。比較のため、ランダム位相マスクを用いずに信号光と参照光の位相分布を一定とした場合に再生された信号光の強度分布を図 8.6 (b) に示す。定性的に見て、ランダム位相マスクを用いることにより、ぼけの少ない再生像が得られていることがわかる。図 8.6 の再生像には、水平直線偏光

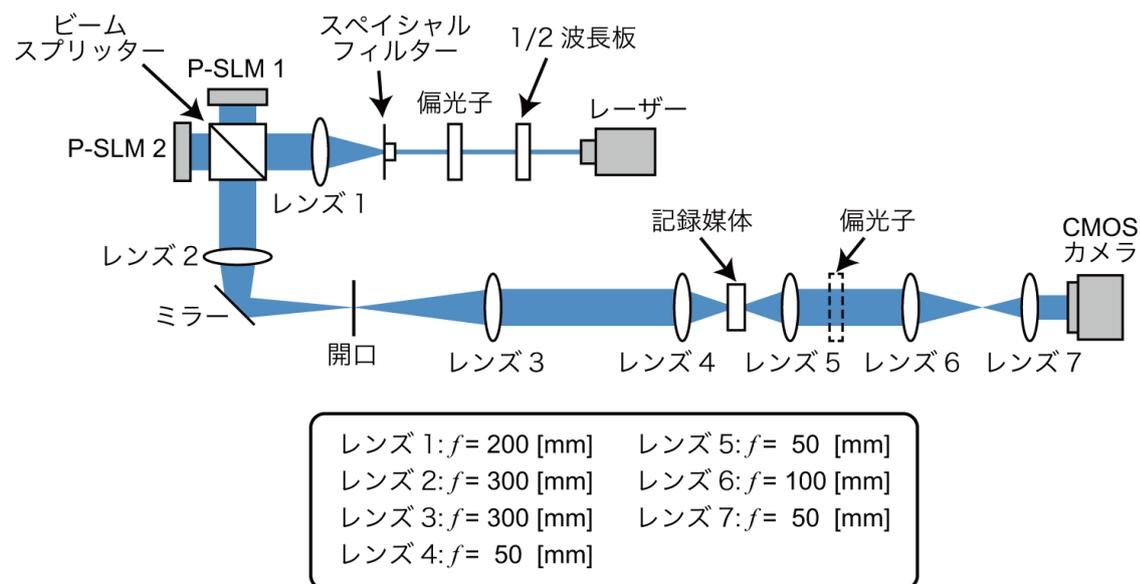


図 8.3 コアキシャル偏光ホログラフィックメモリの光学系

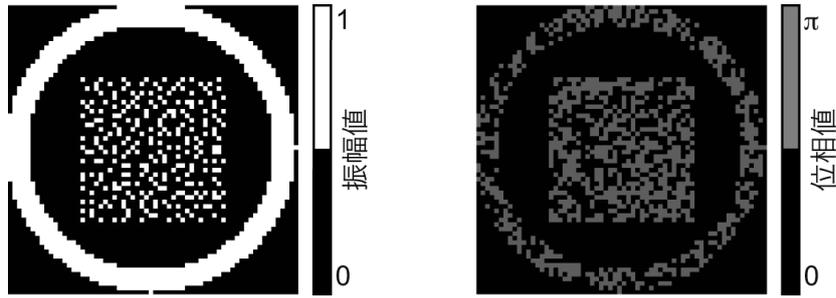


図 8.4 偏光ホログラム記録時の信号光と参照光の水平直線偏光成分.

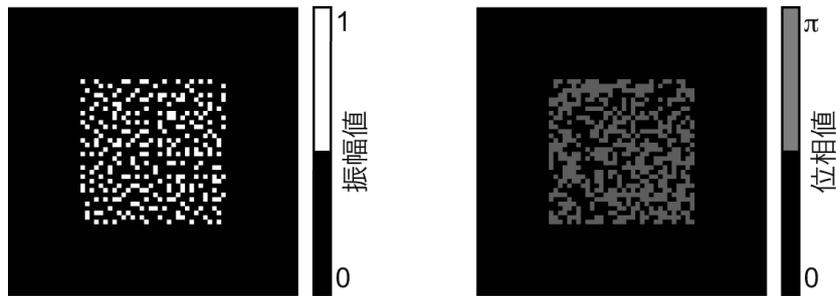


図 8.5 偏光ホログラム記録時の信号光と参照光の垂直直線偏光成分.

成分と垂直直線偏光成分の光波が両方含まれている。各偏光成分の強度分布を取得するためにレンズ5とレンズ6の間に偏光子を配置した。偏光子を透過し、得られた水平直線偏光成分の再生像を図8.7に示す。図8.7(a), (b)はそれぞれ、ランダム位相マスクを用いた場合と、用いない場合の再生像を示している。それぞれの再生像の品質をSNRとSERにより評価した。SNRとSERを各再生像の上部に示す。ランダム位相マスクを用いることにより、SNRが0.76から2.38に向上していることがわかる。さらに、ランダム位相マスクを用いない場合のSERは20%であり、データ誤りが生じているが、ランダム位相マスクを用いることにより、SERを0%に低減することに成功している。次に、偏光子を90度回転し、垂直直線偏光成分の再生像を取得した結果を図8.8に示す。ランダム位相マスクを用いた場合の再生像と、用いない場合の再生像の品質をSNRとSERにより評価した。ランダム位相マスクを用いることにより、SNRは1.07から2.43に向上し、SERは11%から0%に低減することに成功している。各偏光成分でSNRとSERが改善した理由として、強度ホログラムを記録する場合と同様に、ランダム位相マスクによりフーリエスペクトルの直流成分が抑制され、信号光と参照光の干渉効率が向上していることが考えられる。さらに、ランダム位相マスクの導入により、コアキシャル偏光ホログラフィックメモリの点像分布関数が改善したことが考えられる。今後、コアキシャル偏光ホログラフィックメモリの点像

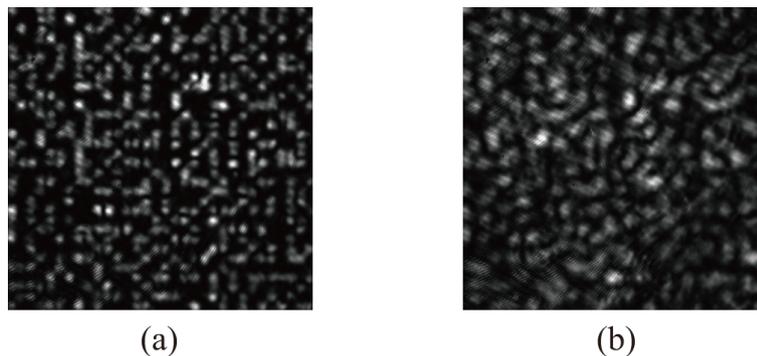


図 8.6 再生された信号光の強度分布. (a) ランダム位相マスクを用いた場合の強度分布. (b) ランダム位相マスクを用いない場合の強度分布.

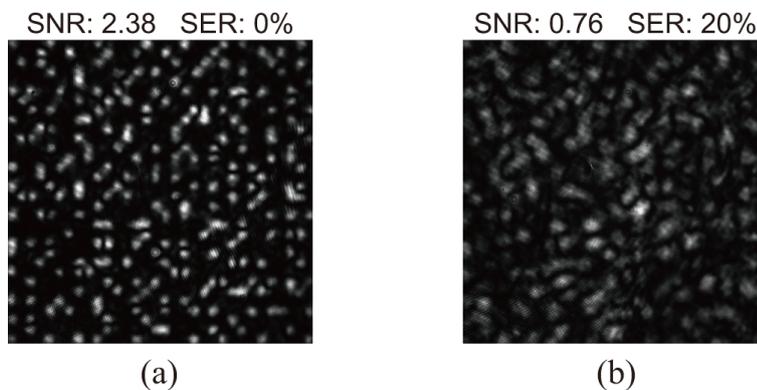


図 8.7 再生された信号光の水平直線偏光成分. (a) ランダム位相マスクを用いた場合の強度分布. (b) ランダム位相マスクを用いない場合の強度分布.

分布関数を導出し，理論的な側面からこのことを検証する必要がある。

図 8.7 と 図 8.8 それぞれの SNR を比較すると，図 8.8 の SNR の方が高い。一般に，コアキシャルホログラフィックメモリでは，データ再生時の参照光が記録媒体や記録媒体内のホログラムにより散乱し，信号の品質が低下する問題がある。本実験での参照光の偏光状態は水平直線偏光であるため，図 8.8 では散乱光が偏光子により取り除かれ，図 8.8 の方が高品質な再生像が得られていると考えられる。

以上の実験結果から，提案するコアキシャル偏光ホログラフィックメモリシステムにより，偏光ホログラムの記録・再生が可能であることを実証した。さらに，強度ホログラムを記録する場合と同様に，偏光ホログラムを記録する場合にもランダム位相マスクの導入が有効であることを実験的に実証した。

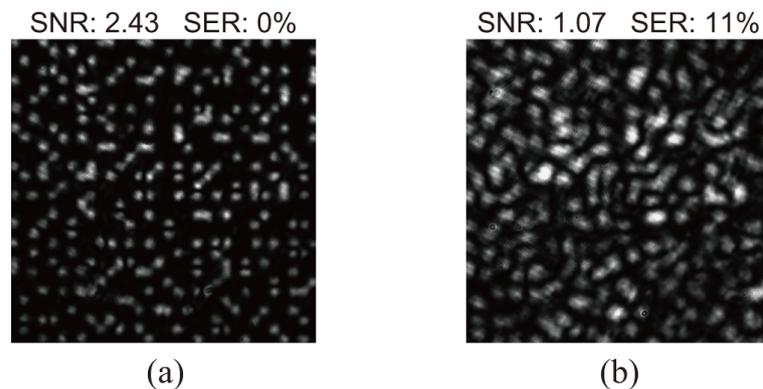


図 8.8 再生された信号光の垂直直線偏光成分. (a) ランダム位相マスクを用いた場合の強度分布. (b) ランダム位相マスクを用いない場合の強度分布.

8.4 結言

本章では、位相ホログラムを用いた振幅・位相・偏光分布の変調技術を提案し、その技術を導入したコアキシャル偏光ホログラフィックメモリシステムを構築した。本システムを用いることにより、コアキシャル方式の光学系により、偏光ホログラムの記録・再生が可能であることを実証した。さらに、偏光ホログラムを記録する際のランダム位相マスクの有用性を実証した。

本システムでは、光波の振幅・位相・偏光分布の変調が可能であるため、光波の複素振幅だけでなく、偏光状態も情報として扱うことが可能である。したがって、多値度の向上が可能となり、大容量化が期待される。

第9章 総括

ホログラフィックメモリは、記録媒体の同一箇所複数のデータを記録する多重記録と、2次元データパターンであるページデータによる並列的な記録・再生過程により、大容量と高転送速度の両方を実現する光メモリ技術として期待が寄せられている。本論文では、デジタルホログラムによる光波の複素振幅分布の変調・検出技術に着眼し、ホログラフィックメモリに応用することを提案してきた。以下に各章毎の概要と本研究により得られた研究成果を示す。

第2章では、コアキシャルホログラフィックメモリの光利用効率と再生像の品質の向上を目的とし、CGRPを提案した。はじめに、コアキシャルホログラフィックメモリの再生像の品質を決定づける点像分布関数を導出した。次に、従来の再生像の品質向上手法であるランダム位相マスクについて述べ、その問題点である光利用効率と再生像の品質のトレードオフについて言及した。さらに、CGRPの設計方法を述べ、その有用性をシミュレーションと実験により明らかにした。最後に、データ記録・再生実験をおこない、CGRPを用いることによりコアキシャルホログラフィックメモリにおける光利用効率と再生像の品質の両方を向上可能であることを実証した。

第3章では、ホログラムの多重記録・再生時に発生するクロストークノイズの低減をするために、相関が低いCGRPを提案した。はじめに、クロストークノイズが発生する原因を述べ、それを低減するための相関が低いCGRPの設計方法を示した。次に、相関が低いCGRPを用いた場合のシフト選択性を実験により取得し、提案手法を用いることによりクロストークノイズの低減が可能であることを明らかにした。最後に、提案手法を用いてホログラムの多重記録・再生実験をおこない、高品質なデータの記録・再生が可能であることを実証した。

第4章では、機械的な走査機構を用いずに多層記録を実現するために、可変焦点レンズの位相ホログラムを応用することを提案した。はじめに、可変焦点レンズの位相ホログラムを用いた多層記録法の原理を述べた。次に、コアキシャルホログラフィックメモリの光学系で、提案手法を用いることにより光軸方向の焦点面のシフトが可能であることを明らかにした。最後に、提案手法を用いることにより、機械的な走査機構を必要とせずに多層記録が実現可能であることを実験により実証した。

第5章では、小型・簡易なホログラフィックメモリシステムにより、光波の複素振幅分布を変調することを目的とし、線形位相符号化法を提案した。はじめに、線形位相符号化法を原理を述べ、線形位相符号化法による信号光の生成過程を示した。次に、

線形位相符号化法をコアキシャルホログラフィックメモリに導入し、そのデータ記録・再生手順について述べた。最後に、線形位相符号化法を用いることにより、任意の複素振幅分布を有する信号光の生成が可能であるだけでなく、小型・簡易な光学系によりデータの記録・再生が可能であることを実験により実証した。

第6章では、複素振幅データの記録・再生を小型・簡易な光学系により実現することを目的とし、デジタルホログラム技術を導入したホログラフィックメモリシステムを提案した。はじめに、提案システムのデータ記録手順を述べた。次に、提案システムのデータ再生手順を述べた。最後に、提案システムを用いて振幅2値、位相4値の複素振幅データを実験により記録・再生することに成功し、提案手法の有用性を実証した。

第7章では、従来のホログラフィックメモリにおける記録面積の縮小の限界を打破し、高密度にデータを記録することを目的として、超解像ホログラフィックメモリを提案した。はじめに、超解像ホログラフィックメモリのデータ記録・再生原理を述べた。次に、数値シミュレーションにより、エルミート性を応用することにより、信号光のスペクトル情報の回復が可能であることを示した。最後に、提案手法の有用性を実験により実証した。

第8章では、位相ホログラムを用いた振幅・位相・偏光分布の変調技術を提案し、これを応用してコアキシャル偏光ホログラフィックメモリシステムを構築した。はじめに、位相ホログラムを用いた振幅・位相・偏光分布の変調原理を述べた。次に、振幅・位相・偏光分布の変調技術をコアキシャルホログラフィックメモリに導入した。最後に、提案するコアキシャル偏光ホログラフィックメモリの光学系により、偏光ホログラムの記録・再生が可能であることを実証し、ランダム位相マスクの有用性を実証した。

以上で提案する記録技術の多くでは、位相ホログラムを入力するための P-SLM が不可欠である。一般に、P-SLM はホログラフィックメモリで用いられる A-SLM と比較してリフレッシュレートが低い。このことが原因で、提案する記録技術を導入したホログラフィックメモリでは、データ転送速度の向上が困難となる。さらに、現行の P-SLM は A-SLM よりも高価である。本研究で提案する記録技術を用いてホログラフィックメモリの実用化を推進するためには、P-SLM の応答速度の向上、低価格化が望まれる。

デジタルホログラフィとホログラフィックメモリとともに、Gabor が発明したホログラフィ [209] に端を発し、それぞれ異なる目的のために発展・開発されてきた技術

である。本研究では、これらデジタルのホログラフィと、アナログのホログラフィであるホログラフィックメモリとの融合を図ることにより、新規の価値を創出することに成功した。本研究により、ホログラフィックメモリにおいて、光波の多次元情報を活用することの重要性が明らかとなった。以上から、デジタルホログラムを用いた提案システムは、革新的な高密度記録技術の開発を可能とし、ホログラフィックメモリの大容量化・実用化に貢献するものと期待される。

謝辞

本研究は、和歌山大学大学院システム工学研究科において、野村孝徳 教授のご指導のもとにおこなったものである。本研究の遂行から本論文の執筆はもちろん、終始、私の考えや意思を尊重しながら、丁寧かつ親切なご指導とご鞭撻を賜りました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御礼申し上げます。

和歌山大学システム工学部の最田裕介 助教には、計算機生成参照光パターンの作成のための計算機・プログラミングに関して技術的なご指導を賜りました。また、日頃からの議論を通して有益で親身なご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

和歌山大学システム工学部の沼田卓久 元教授には、研究報告会を通じていつもの的確なご指導、ご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

産業技術総合研究所主任研究員の福田隆史 博士には、偏光ホログラフィの研究遂行のための実験環境を提供していただき、化学分野そして物理分野それぞれの研究者としての立場からの的確なご助言を賜りました。また、研究発表の資料作成、論文の執筆に関して有益で親身なご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

北京理工大学の譚小地 教授には、在外研究を受け入れていただき、短期間の滞在であったにもかかわらず、北京での生活環境や、研究・実験環境をご用意いただきました。また、コアキシャルホログラフィックメモリの開発者という立場から、研究に関して実用的観点からの有益な御助言を賜りました。在外研究後にも、国際会議でお会いした際には親身なご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

University College Dublin の John T. Sheridan 教授には、体調が優れないにもかかわらず在外研究を受け入れていただき、日々の研究議論を通して的確なご助言を賜りました。また、ホログラフィックメモリの記録媒体の特性や数値解析手法・シミュレーション技術に関して有益なご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

宇都宮大学大学院工学研究科の茨田大輔 准教授には、偏光ホログラフィの理論、実験方法に関して的確なご助言を賜りました。また、研究議論や学会でお会いした際には、私の質問に対していつも丁寧なご回答を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

本論文の審査に際し、ご多忙にもかかわらず副査として査読することをご承諾いただき、御意見、御指導を賜りました和歌山大学システム工学部の土谷茂樹 教授、ならびに松本正行 教授に深く感謝いたします。

研究室の先輩である和歌山大学大学院システム工学研究科博士後期課程の井邊真俊

氏（現、産業技術総合研究所）には、位相シフトデジタルホログラフィに関して的確かつ有益なご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

研究室の同期である和歌山大学大学院システム工学研究科博士後期課程の渡辺果歩氏とは研究室生活を6年間ともに過ごし、日々の議論はもちろん、困難な状況に直面した際には的確かつ丁寧な助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

和歌山大学大学院システム工学研究科博士前期課程の森本峻行氏（現、株式会社日本データコントロール）には、数学的手法に関して多大な助言を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

和歌山大学大学院システム工学研究科博士前期課程の小室幸士氏には、日頃から光技術に関する勉強、論文紹介をともにおこない、研究の議論をおこなった際には的確な助言を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

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ンクス研究室の皆様に深く感謝いたします。

研究遂行、研究発表、滞在研究のために助成してくださった、独立行政法人日本学術振興会、一般社団法人丸文財団、公益財団法人立石科学技術振興財団、公益財団法人アイコム電子通信工学振興財団、公益財団法人電気通信普及財団、公益財団法人村田学術振興財団、公益財団法人NEC C&C財団、公益財団法人コニカミノルタ科学技術振興財団に深く感謝いたします。

最後に、これまで私の選択してきた道を尊重し、温かく見守るとともに、不自由なく学業・研究活動に邁進できるよう支援してくださった両親に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] V. Turner, J. F. Gantz, D. Reinsel, S. Minton, “The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things,” IDC White paper, sponsored by EMC Corporation (2014). <http://www.emc.com/leadership/digital-universe/index.htm> (accessed April 16, 2016).
- [2] V. Mayer-Schönberger and K. Cukier (著), 斎藤栄一朗 (訳), ビッグデータの正体 情報の産業革命が世界のすべてを変える, 講談社, 2013.
- [3] 海部美和, ビッグデータの覇者たち, 講談社, 2013.
- [4] J. F. Gantz, C. Chute, A. Manfrediz, S. Minton, D. Reinsel, W. Schlichting, and A. Toncheva, “The Diverse and Exploding Digital Universe: An Updated Forecast of Worldwide Information Growth Through 2011,” IDC White paper, sponsored by EMC corporation (2008). <http://www.emc.com/collateral/analyst-reports/diverse-exploding-digital-universe.pdf> (accessed April 16, 2016).
- [5] M. Gu, X. Li, and Y. Cao, “Optical storage arrays: a perspective for future big data storage,” *Light: Sci. Appl.* **3**, e177 (2014).
- [6] 本田伸彰, “国立国会図書館における電子情報の長期保存,” *電子情報通信学会誌*, **98**, 1043–1047 (2015).
- [7] 中西秀哉, “光ストレージの事例 – 核融合プラズマ実験のデータ保存 –,” *O plus E*, **32**, 422–425 (2010).
- [8] 長田雅和, “医用画像保管通信システムにおける大容量光記録媒体の応用事例,” *O plus E*, **32**, 418–421 (2010).
- [9] S. M. Mansfield, W. R. Studenmund, G. S. Kino, and K. Osato, “High-numerical-aperture lens system for optical storage,” *Opt. Lett.* **18**, 305–307 (1993).
- [10] D. Koide, T. Kajiyama, R. Sato, H. Tokumaru, Y. Takano, and K. Ohishi, “Near-field optical recording using solid immersion lens for high-density flexible optical disks,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LG01 (2013).
- [11] J. Tominaga, T. Nakano, and N. Atoda, “An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film,” *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2078 (1998).
- [12] J. H. Strickler and W. W. Webb, “Three-dimensional optical data storage in refractive media by two-photon point excitation,” *Opt. Lett.* **16**, 1780–1782 (1991).
- [13] T. Sasaki, H. Mochizuki, T. Mikami, T. Kitahama, H. Tsuyama, and K. Inoue, “A

- feasibility study of 25 GB/layer dynamic recording using two-photon material and heat-mode bump formation method,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LB01 (2013).
- [14] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, “Holographic data storage systems,” *Proc. IEEE* **92**, 1231–1280 (2004).
- [15] X. Li, Y. Cao, and M. Gu, “Superresolution-focal-volume induced 3.0 Tbytes/disk capacity by focusing a radially polarized beam,” *Opt. Lett.* **36**, 2510–2512 (2011).
- [16] E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang, R. J. Finlay, T.-H. Her, J. P. Callan, and E. Mazur, “Three-dimensional optical storage inside transparent materials,” *Opt. Lett.* **21**, 2023–2025 (1996).
- [17] M. Shiozawa, T. Watanabe, E. Tatsu, M. Umeda, T. Mine, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, M. Nakabayashi, K. Miura, and K. Watanabe, “Simultaneous multi-bit recording in fused silica for permanent storage,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LA01 (2013).
- [18] J. Zhang, M. Gecevičius, M. Beresna, and P. G. Kazansky, “Seemingly unlimited lifetime data storage in nanostructured glass,” *Phys. Rev. Lett.* **112**, 033901 (2014).
- [19] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, “Volume holographic storage and retrieval of digital data,” *Science* **265**, 749–752 (1994).
- [20] K. Nishimoto, F. Naito, and M. Yamamoto, “Soft-decision Viterbi decoding for 2/4 modulation code in holographic memory,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 4102–4106 (2006).
- [21] B. M. King and M. A. Neifeld, “Sparse modulation coding for increased capacity in volume holographic storage,” *Appl. Opt.* **39**, 6681–6688 (2000).
- [22] Y. Nakamura, K. Shimada, T. Ishii, H. Ishihara, M. Hosaka, and T. Hoshizawa, “High-density recording method with RLL coding for holographic memory system,” in *Nonlinear Optics*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper OMB5.
- [23] S. Yoshida, Y. Takahata, S. Horiuchi, and M. Yamamoto, “Spatial run-length limited code for reduction of hologram size in holographic data storage,” *Opt. Commun.* **358**, 103–107 (2016).
- [24] J. Joseph and D. A. Waldman, “Homogenized Fourier transform holographic data storage using phase spatial light modulators and methods for recovery of data from the phase image,” *Appl. Opt.* **45**, 6374–6380 (2006).
- [25] P. Koppa, “Phase-to-amplitude data page conversion for holographic storage and

- optical encryption,” *Appl. Opt.* **46**, 3561–3571 (2007).
- [26] K. Kawano, T. Ishii, J. Minabe, T. Niitsu, Y. Nishikata, and K. Bada, “Holographic recording and retrieval of polarized light by use of polyester containing cyanoazobenzene units in the side chain,” *Opt. Lett.* **24**, 1269–1271 (1999).
- [27] K. Kawano, J. Minabe, T. Ishii, T. Maruyama, and S. Yasuda, “Polarization encoding for digital holographic storage,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 1855–1859 (2002).
- [28] K. Anderson and K. Curtis, “Polytopic multiplexing,” *Opt. Lett.* **29**, 1402–1404 (2004).
- [29] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, “Recall of linear combinations of stored data pages based on phase-code multiplexing in volume holography,” *Opt. Lett.* **19**, 1079–1081 (1994).
- [30] C. C. Sun and W. C. Su, “Three-dimensional shifting selectivity of random phase encoding in volume holograms,” *Appl. Opt.* **40**, 1253–1260 (2001).
- [31] G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, “Optical data storage by using orthonal wavelength-multiplexed volume holograms,” *Opt. Lett.* **17**, 1471–1473 (1992).
- [32] T. Ochiai, D. Barada, T. Fukuda, Y. Hayasaki, K. Kuroda, and T. Yatagai, “Angular multiplex recording of data pages by dual-channel polarization holography,” *Opt. Lett.* **38**, 748–750 (2013).
- [33] G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, “Shift multiplexing with spherical reference waves,” *Appl. Opt.* **35**, 2403–2417 (1996).
- [34] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, “Volume hologram scheme using optical fiber for spatial multiplexing,” *Opt. Lett.* **22**, 739–741 (1997).
- [35] K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, “Method for holographic storage using peristrophic multiplexing,” *Opt. Lett.* **19**, 993–994 (1996).
- [36] A. Hoskins, B. Ihas, K. Anderson, and K. Curtis, “Monocular architecture,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 5912–5914 (2008).
- [37] H. Horimai, X. Tan, and J. Li, “Collinear holography,” *Appl. Opt.* **44**, 2575–2579 (2005).
- [38] K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto, and K. Watanabe, “Improved performance in coaxial holographic data recording,” *Opt. Express* **15**, 16196–16209 (2007).
- [39] H. Horimai, X. Tan, J. Li, and K. Suzuki, “Wavelength margin analysis in advanced

- collinear holography,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 3493–3494 (2005).
- [40] X. Tan, H. Horimai, T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, and K. Kuroda, “Collinear technology for holographic versatile disc (HVDTM) system,” *Proc. SPIE* **6343**, 63432W (2006).
- [41] M. Takabayashi and A. Okamoto, “Self-referential holography and its applications to data storage and phase-to-intensity conversion,” *Opt. Express* **21**, 3669–3681 (2013).
- [42] D. Barada, K. Tamura, T. Fukuda, M. Itoh, and T. Yatagai, “Retardagraphy: a technique for optical recording of the retardance pattern of an optical anisotropic object on a polarization-sensitive film using a single beam,” *Opt. Lett.* **33**, 3007–3009 (2008).
- [43] M. Takabayashi, A. Okamoto, T. Eto, and T. Okamoto, “Shift-multiplexed self-referential holographic data storage,” *Appl. Opt.* **53**, 4375–4381 (2014).
- [44] M. Takabayashi, A. Okamoto, T. Eto, and T. Okamoto, “Recording procedures for high-quality signal readout in self-referential holographic data storage,” *Appl. Opt.* **54**, 5167–5174 (2015).
- [45] D. Barada, H. Sekiguchi, T. Fukuda, S. Kawata, and T. Yatagai, “Shift multiplex recording of four-valued phase data pages by volume retardagraphy,” *Appl. Sci.* **4**, 158–170 (2014).
- [46] T. Hoshizawa, Y. Tada, and N. Nakai, “Holographic data storage system with terabyte capacity and gigabit transfer rate,” in *International Symposium on Optical Memory 2015*, Technical Digest, Mo-B-01 (2015).
- [47] M. R. Ayres, K. Anderson, F. Askham, B. Sissom, A. C. Urness, “Multi-terabit/in² holographic data storage demonstration,” *Proc. SPIE* **9587**, 958702 (2015).
- [48] T. Hoshizawa and Y. Tada, “Holographic data storage system enabling 2.4 Tbit/in.² recording,” in *International Workshop on Holography and Related Technologies 2016 (IWH2016)*, Technical Digest, Mo-B-01 (2016).
- [49] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, “Digital image formation from electronically detected holograms,” *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77–79 (1967).
- [50] 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 [Invited],” *Appl. Opt.* **53**, G44–G63 (2014).

- [51] J. Geng, “Three-dimensional display technologies,” *Adv. Opt. Photon.* **5**, 456–535 (2013).
- [52] A. Forbes, A. Dudley, and M. McLaren, “Creation and detection of optical modes with spatial light modulators,” *Adv. Opt. Photon.* **8**, 200–227 (2016).
- [53] H. Horimai and X. Tan, “Holographic information storage system: today and future,” *IEEE Transaction on Magnetics*, **43**, 943–947 (2007).
- [54] X. Tan, X. Lin, A. Wu, and J. Zang, “High density collinear holographic data storage system,” *Front. Optoelectron.* **7**, 443–449 (2014).
- [55] K. Tanaka, M. Haram K. Tokuyama, K. Hirooka, Y. Okamoto, H. Mori, A. Fukumoto, and K. Okada, “415 Gbit/in.² recording in coaxial holographic storage using low-density parity-check codes,” *Optical Data Storage Topical Meeting 2009*, 70–72 (2009).
- [56] M. Hara, K. Tanaka, K. Tokuyama, M. Toishi, K. Hirooka, A. Fukumoto, and K. Watanabe, “Linear reproduction of a holographic storage channel using coherent addition of optical DC components,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 5885–5890 (2008).
- [57] S. Yasuda Y. Ogasawara, J. Minabe, K. Kawano, M. Furuki, K. Hayashi, K. Haga, and H. Yoshizawa, “Optical noise reduction by reconstructing positive and negative images from Fourier holograms in coaxial holographic storage systems,” *Opt. Lett.* **31**, 1639–1641 (2006).
- [58] Y. Saita, T. Nomura, E. Nitandai, and T. Numata, “Design of reference pattern and input phase mask for coaxial holographic memory,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 09ME03 (2011).
- [59] T. Nobukawa and T. Nomura, “Coaxial holographic memory with designed reference pattern on the basis of Nyquist aperture for high density recording,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LD09 (2013).
- [60] M. Toishi, M. Hara, K. Tanaka, T. Tanaka, and K. Watanabe, “Novel encryption method using multi reference patterns in coaxial holographic data storage,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 3775–3781 (2007).
- [61] E. Watanabe and K. Kodate, “Optical correlator for face recognition using collinear holographic system,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 6759–6761 (2006).
- [62] K. Ikeda and E. Watanabe, “High-speed image matching with coaxial holographic optical correlator,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 09SC01 (2016).

- [63] C. B. Burckhardt, "Use of a random phase mask for the recording of Fourier transform holograms of data masks," *Appl. Opt.* **9**, 695–700 (1970).
- [64] M. J. O’Callaghan, J. R. McNeil, C. Walker, and M. Handschy, "Spatial light modulators with integrated phase masks for holographic data storage," *Proc. SPIE* **6282**, 628208 (2006).
- [65] T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, K. Kuroda, X. Tan, and H. Horimai, "Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function," *Opt. Lett.* **31**, 1208–1210 (2006).
- [66] C. C. Sun, Y. W. Yu, S. C. Hsieh, T. C. Teng, and M. F. Tsai, "Point spread function of a collinear holographic storage system," *Opt. Express* **15**, 18111–18118 (2007).
- [67] Y. W. Yu, C. Y. Cheng, S. C. Hsieh, T. C. Teng, and C. C. Sun, "Point spread function by random phase reference in collinear holographic storage," *Opt. Eng.* **48**, 020501 (2009).
- [68] T. Nobukawa and T. Nomura, "Design of high-resolution and multilevel reference pattern for improvement of both light utilization efficiency and signal-to-noise ratio in coaxial holographic data storage," *Appl. Opt.* **53**, 3773–3781 (2014).
- [69] V. Vadde, B. V. Kumar, G. W. Burr, H. J. Coufal, J. A. Hoffnagle, and C. M. Jefferson, "A figure of merit for the optical aperture used in digital volume holographic data storage," *Proc. SPIE* **3401**, 194–200 (1998).
- [70] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, *Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems* (Wiley, 2010).
- [71] J. Hong, I. McMichael, and J. Ma, "Influence of phase masks on cross talk in holographic memory," *Opt. Lett.* **21**, 1694–1696 (1996).
- [72] M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, E. Oesterschulze, R. M. Shelby, G. T. Sincerbox, and M. Quintanilla, "Effects of multilevel phase masks on interpixel cross talk in digital holographic storage," *Appl. Opt.* **36**, 3107–3115 (1997).
- [73] Y. W. Yu, C. Y. Chen, and C. C. Sun, "Increase of signal-to-noise ratio of a collinear holographic storage system with reference modulated by a ring lens array," *Opt. Lett.* **35**, 1130–1132 (2010).
- [74] L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan, Jr., "The kinoform: a new wavefront reconstruction device," *IBM J. Res. Dev.* **13**, 150–155 (1969).

- [75] 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).
- [76] F. Wyrowski and O. Bryngdahl, "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography," *J. Opt. Soc. Am. A* **5**, 1058–1065 (1988).
- [77] J. Bengtsson, "Kinoform design with an optimal-rotation-angle method," *Appl. Opt.* **33**, 6879–6884 (1994).
- [78] N. Yoshikawa and T. Yatagai, "Phase optimization of a kinoform by simulated annealing," *Appl. Opt.* **33**, 863–868 (1994).
- [79] J. Carpenter and T. D. Wilkinson, "Graphics processing unit-accelerated holography by simulated annealing," *Opt. Eng.* **49**, 095801 (2010).
- [80] N. Yoshikawa, M. Itoh, and T. Yatagai, "Quantized phase optimization of two-dimensional Fourier kinoforms by a genetic algorithm," *Opt. Lett.* **20**, 752–754 (1995).
- [81] T. Inoue, H. Tanaka, N. Fukuchi, M. Takumi, N. Matsumoto, T. Hara, N. Yoshida, Y. Igasaki, and Y. Kobayashi, "LCOS spatial light modulator controlled by 12-bit signals for optical phase-only modulation," *Proc. SPIE* **6487**, 64870Y (2007).
- [82] D. Palima and V. R. Daria, "Holographic projection of arbitrary light patterns with a suppressed zero-order beam," *Appl. Opt.* **46**, 4197–4201 (2007).
- [83] H. Zhang, J. Xie, J. Liu, and Y. Wang, "Elimination of a zero-order beam induced by a pixelated spatial light modulator for holographic projection," *Appl. Opt.* **48**, 5834–5841 (2009).
- [84] D. W. K. Wong and G. Chen, "Redistribution of the zero order by the use of a phase checkerboard pattern in computer generated holograms," *Appl. Opt.* **47**, 602–610 (2008).
- [85] J. Liang, S. Y. Wu, F. K. Fatemi, and M. F. Becker, "Suppression of the zero-order diffracted beam from a pixelated spatial light modulator by phase compression," *Appl. Opt.* **51**, 3294–3304 (2012).
- [86] S. R. Lambourdiere, A. Fukumoto, K. Tanaka, and K. Watanabe, "Simulation of holographic data storage for the optical collinear system," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 1246–1252 (2006).
- [87] Y. Yonetani, K. Nitta, and O. Matoba, "Numerical evaluation of angular multiplexing in reflection-type holographic data storage in photopolymer with shrinkage," *Appl.*

- Opt. **49**, 694–700 (2010).
- [88] J. Tanaka, A. Okamoto, and M. Kitano, “Development of image-based simulation for holographic data storage system by fast Fourier transform beam-propagation method,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, 03A028 (2009).
- [89] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed. (McGraw-Hill, 1996).
- [90] K. Matsushima and T. Shimobaba, “Band-limited angular spectrum spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields,” *Opt. Express* **17**, 19662–19673 (2009).
- [91] O. Matoba, Y. Yonetani, and K. Nitta, “Improvement of storage capacity using confocal scheme in reflection-type holographic memory system with speckle shift multiplexing,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 09ME08 (2011).
- [92] P. Refregier and B. Javidi, “Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding,” *Opt. Lett.* **20**, 767–769 (1995).
- [93] X. Tan, O. Matoba, T. Shimura, and K. Kuroda, “Improvement in holographic storage capacity by use of double-random phase encryption,” *Appl. Opt.* **40**, 4721–4727 (2001).
- [94] A. Shibukawa, A. Okamoto, Y. Wakayama, A. Tomita, H. Funakoshi, and K. Sato, “Digital image diffusion technique for suppressing interpage crosstalk in holographic data storage,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LD03 (2013).
- [95] C. Denz, G. Pauliat, and G. Roosen, “Volume hologram multiplexing using a deterministic phase,” *Opt. Commun.* **85**, 171–176 (1991).
- [96] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, “Volume hologram scheme using optical fiber for spatial multiplexing,” *Opt. Lett.* **22**, 739–741 (1997).
- [97] J. Li, L. Cao, H. Gu, X. Tan, Q. He, and G. Jin, “Orthogonal-reference-pattern-modulated shift multiplexing for collinear holographic data storage,” *Opt. Lett.* **37**, 936–938 (2012).
- [98] A. Shibukawa, A. Okamoto, A. Tomita, M. Takabayashi, and K. Sato, “Multilayer collinear holographic memory with movable random phase mask,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 09ME10 (2011).
- [99] L. Cao, J. Liu, J. Li, Q. He, and G. Jin, “Orthogonal reference pattern multiplexing for collinear holographic data storage,” *Appl. Opt.* **53**, 1–8 (2014).
- [100] T. Nobukawa, Y. Wani, and T. Nomura, “Multiplexed recording with uncorrelated

- computer-generated reference patterns in coaxial holographic data storage,” *Opt. Lett.* **40**, 2161–2164 (2015).
- [101] T. Shimura, S. Ichimura, Y. Ashizuka, R. Fujimura, K. Kuroda, X. Tan, and H. Horimai, “Shift selectivity of the collinear holographic storage system,” *Proc. SPIE* **6282**, 62820S (2006).
- [102] Y. W. Yu, T. C. Teng, S. C. Hsieh, C. Y. Cheng, and C. C. Sun, “Shifting selectivity of collinear volume holographic storage,” *Opt. Commun.* **283**, 3895–3900 (2010).
- [103] M. Hosaka, T. Ishii, A. Tanaka, S. Koga, and T. Hoshizawa, “1 Tbit/inch² recording in angular-multiplexing holographic memory with constant signal-to-scatter ratio schedule,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LD01 (2013).
- [104] J. T. Sheridan, M. G. Gleeson, J. V. Kelly, and F. T. O’Neill, “Nonlocal polymerization-driven diffusion-model-based examination of the scaling law for holographic data storage,” *Opt. Lett.* **30**, 239–241 (2005).
- [105] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, “Encrypted holographic data storage based on orthogonal-phase-code multiplexing,” *Appl. Opt.* **34**, 6012–6015 (1995).
- [106] X. Tan, O. Matoba, T. Shimura, K. Kuroda, and B. Javidi, “Secure optical storage that uses fully phase encryption,” *Appl. Opt.* **39**, 6689–6694 (2000).
- [107] T. Nomura, S. Mikan, Y. Morimoto, and B. Javidi, “Secure optical data storage with random phase key codes by use of a configuration of a joint transform correlator,” *Appl. Opt.* **42**, 1508–1514 (2003).
- [108] T. Sarkadi and P. Koppa, “Improved data pages for an interference-based cryptosystem,” *Appl. Opt.* **53**, 798–805 (2014).
- [109] V. Markov, J. Millerd, J. Trolinger, M. Norrie, J. Downie, and D. Timucin, “Multilayer volume holographic optical memory,” *Opt. Lett.* **24**, 265–267 (1999).
- [110] H. Yamatsu, S. Baba, and N. Kihara, “Shift selectivity and hologram playback margin dependence on the average speckle size of a randomly phase encoded reference beam,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 4949–4953 (2004).
- [111] J. Minabe, Y. Ogasawara, S. Yasuda, K. Kawano, K. Hayashi, H. Yoshizawa, K. Haga, and M. Furuki, “Multilayer holographic storage using coaxial optical systems,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 5968–5970 (2008).
- [112] S. Yoshida, H. Kurata, S. Ozawa, K. Okubo, S. Horiuchi, Z. Ushiyama, M. Yamamoto, S. Koga, and A. Tanaka, “High-density holographic data storage

- using three-dimensional shift multiplexing with spherical reference wave,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LD07 (2013).
- [113] T. Nishizaki, O. Matoba, and K. Nitta, “Available number of multiplexed holograms based on signal-to-noise ratio analysis in reflection-type holographic memory using three-dimensional speckle-shift multiplexing,” *Appl. Opt.* **53**, 5733–5739 (2014).
- [114] T. Eto, M. Takabayashi, A. Okamoto, M. Bunsen, and T. Okamoto, “Numerical simulations on inter-page crosstalk characteristics in three-dimensional shift multiplexed self-referential holographic data storage,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 08RD01 (2016).
- [115] M. Takabayashi, T. Eto, T. Okamoto, “Numerical simulations on the focus-shift multiplexing technique for self-referential holographic data storage,” *Opt. Rev.* **23**, 1–10 (2016).
- [116] T. Nobukawa and T. Nomura, “Multilayer recording holographic data storage using a varifocal lens generated with a kinoform,” *Opt. Lett.* **40**, 5419–5422 (2015).
- [117] N. J. Jenness, K. D. Wulff, M. S. Johannes, M. J. Padgett, D. G. Cole, and R. L. Clark, “Three-dimensional parallel holographic micropatterning using a spatial light modulator,” *Opt. Express* **16**, 15942–15948 (2008).
- [118] J. E. Curtis, B. A. Koss, D. G. Grier, “Dynamic holographic optical tweezers,” *Opt. Commun.* **207**, 169–175 (2002).
- [119] A. Jesacher, S. Fürhapter, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, “Diffractive optical tweezers in the Fresnel regime,” *Opt. Express* **12**, 2243–2250 (2004).
- [120] G. Pesce, G. Volpe, O. M. Maragó, P. H. Jones, S. Gigan, A. Sasso, and G. Volpe, “Step-by-step guide to the realization of advanced optical tweezers,” *J. Opt. Soc. Am. B* **32**, B84–B98 (2015).
- [121] C. Falldorf, M. Agour, C. v. Kopylow, and R. B. Bergmann, “Phase retrieval by means of a spatial light modulator in the Fourier domain of an imaging system,” *Appl. Opt.* **49**, 1826–1830 (2010).
- [122] C. Zuo, Q. Chen, W. Qu, and A. Asundi, “Noninterferometric single-shot quantitative phase microscopy,” *Opt. Lett.* **38**, 3538–3541 (2013).
- [123] T. Nguyen, G. Nehmetallah, D. Tran, A. Darudi, and P. Soltani, “Fully automated, high speed, tomographic phase object reconstruction using the transport of intensity

- equation in transmission and reflection configurations,” *Appl. Opt.* **54**, 10443–10453 (2015).
- [124] C. Lingel, T. Haist, and W. Osten, “Spatial-light-modulator-based adaptive optical system for the use of multiple phase retrieval methods,” *Appl. Opt.* **55**, 10329–10334 (2016).
- [125] D. A. Gregory, J. C. Kirsch, and E. C. Tam, “Full complex modulation using liquid-crystal televisions,” *Appl. Opt.* **31**, 163–165 (1992).
- [126] L. G. Neto, D. Roberge, and Y. Sheng, “Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled-mode liquid-crystal televisions,” *Appl. Opt.* **35**, 4567–4576 (1996).
- [127] R. Tudela, E. Martín-Badosa, I. Labastida, S. Vallmitjana, I. Juvells, and A. Carnicer, “Full complex Fresnel holograms displayed on liquid crystal devices,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **5**, S189–S194 (2003).
- [128] M. L. Hsieh, M. L. Chen, and C. J. Cheng, “Improvement of the complex modulated characteristic of cascaded liquid crystal spatial light modulators by using a novel amplitude compensated technique,” *Opt. Eng.* **46**, 070501 (2007).
- [129] A. Shibukawa, A. Okamoto, Y. Goto, A. Honma, and A. Tomita, “Digital phase conjugate mirror by parallel arrangement of two phase-only spatial light modulator,” *Opt. Express* **22**, 11918–11929 (2014).
- [130] L. Wu, S. Cheng, and S. Tao, “Simultaneous shaping of amplitude and phase of light in the entire output plane with a phase-only hologram,” *Sci. Rep* **5**, 15426 (2015).
- [131] J. S. Jang and D. H. Shin, “Optical representation of binary data based on both intensity and phase modulation with a twisted-nematic liquid-crystal display for holographic digital data storage,” *Opt. Lett.* **26**, 1797–1799 (2001).
- [132] J. P. Liu, W. Y. Hsieh, T. C. Poon, and P. Tsang, “Complex Fresnel hologram display using a single SLM,” *Appl. Opt.* **50**, H128–H135 (2011).
- [133] H. Song, G. Sung, S. Choi, K. Won, H. S. Lee, and H. Kim, “Optimal synthesis of double-phase computer generated holograms using a phase-only spatial light modulator with grating filter,” *Opt. Express* **20**, 29844–29853 (2012).
- [134] S. Reichelt, R. Häussler, G. Futterer, N. Leister, H. Kato, N. Usukura, and Y. Kanbayashi, “Full-range, complex spatial light modulator for real-time holography,”

- Opt. Lett. **37**, 1955–1957 (2012).
- [135] A. Jesacher, C. Maurer, A. Schwaighofer, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, “Near-perfect hologram reconstruction with a spatial light modulator,” Opt. Express **16**, 2597–2603 (2008).
- [136] A. Shibukawa, A. Okamoto, M. Takabayashi, and A. Tomita, “Spatial cross modulation method using a random diffuser and phase-only spatial light modulator for constructing arbitrary complex fields,” Opt. Express **22**, 3968–3982 (2014).
- [137] A. W. Lohmann and D. P. Paris, “Binary Fraunhofer holograms, generated by computer,” Appl. Opt. **6**, 1739–1748 (1967).
- [138] W. H. Lee, “Sampled Fourier transform hologram generated by computer,” Appl. Opt. **9**, 639–644 (1970).
- [139] C. B. Burckhardt, “A simplification of Lee’s method of generating holograms by computer,” Appl. Opt. **9**, 1949 (1970).
- [140] V. Arrizón, G. Méndez and D. Sánchez-de-La-Llave, “Accurate encoding of arbitrary complex fields with amplitude-only liquid crystal spatial light modulators,” Opt. Express **13**, 7913–7927 (2005).
- [141] E. G. van Putten, I. M. Vellekoop, and A. P. Mosk, “Spatial amplitude and phase modulation using commercial twisted nematic LCDs,” Appl. Opt. **47**, 2076–2081 (2008).
- [142] A. Yu. Betin, V. I. Bobrinev, S. B. Odinokov, N. N. Evtikhiev, R. S. Starikov, S. N. Starikov, and E. Y. Zlokazov, “Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms,” Appl. Opt. **52**, 8142–8145 (2013).
- [143] T. Nobukawa and T. Nomura, “Shift multiplexing with a spherical wave in holographic data storage based on a computer-generated hologram,” Appl. Opt. **56**, F31–F36 (2017).
- [144] V. Arrizón, “Improved double-phase computer-generated holograms implemented with phase-modulation devices,” Opt. Lett. **27**, 595–597 (2002).
- [145] T. Sarkadi, Á. Kettinger, and P. Koppa, “Spatial filters for complex wavefront modulation,” Appl. Opt. **52**, 5449–5454 (2013).
- [146] O. Mendoza-Yero, G. Mínguez-Vega, and J. Lancis, “Encoding complex fields by using a phase-only optical element,” Opt. Lett. **39**, 1740–1743 (2014).
- [147] Z. Göröcs, G. Erdei, T. Sarkadi, F. Ujhelyi, J. Remeónyi, P. Koppa, and E. Lőrincz,

- “Hybrid multinary modulation using a phase modulating spatial light modulator and a low-pass spatial filter,” *Opt. Lett.* **32**, 2336–2338 (2007).
- [148] B. Das, J. Joseph, and K. Singh, “Phase-image-based sparse-gray-level data pages for holographic data storage,” *Appl. Opt.* **48**, 5240–5250 (2009).
- [149] W. Jia, Z. Chen, F. J. Wen, C. Zhou, Y. T. Chow, and P. S. Chung, “Coaxial holographic encoding based on pure phase modulation,” *Appl. Opt.* **50**, H10–H15 (2011).
- [150] T. Nobukawa and T. Nomura, “Linear phase encoding for holographic data storage with a single phase-only spatial light modulator,” *Appl. Opt.* **55**, 2565–2573 (2016).
- [151] J. P. Kirk and A. L. Jones, “Phase-only complex-valued spatial filter,” *J. Opt. Soc. Am.* **61**, 1023–1028 (1971).
- [152] J. A. Davis, D. M. Cottrell, J. Campos, M. J. Yzuel, and I. Moreno, “Encoding amplitude information onto phase-only filters,” *Appl. Opt.* **38**, 5004–5013 (1999).
- [153] V. Arrizón, U. Ruiz, R. Carrada, and L. A. González, “Pixelated phase computer holograms for the accurate encoding of scalar complex fields,” *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 3500–3507 (2007).
- [154] E. Bolduc, N. Bent, E. Santamato, E. Karimi, and R. W. Boyd, “Exact solution to simultaneous intensity and phase encryption with a single phase-only hologram,” *Opt. Lett.* **38**, 3546–3549 (2013).
- [155] X. Wang, B. Wang, P. J. Bos, J. E. Anderson, J. J. Pouch, and F. A. Miranda, “Finite-difference time-domain simulation of a liquid-crystal optical phased array,” *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 346–354 (2005).
- [156] C. Kohler, T. Haist, X. Schwab, and W. Osten, “Hologram optimization for SLM-based reconstruction with regard to polarization effects,” *Opt. Express* **16**, 14853–14861 (2008).
- [157] M. Agour, C. Falldorf, and C. von Kopylow, “Digital pre-filtering approach to improve optically reconstructed wavefields in opto-electronic holography,” *J. Opt.* **12**, 055401 (2010).
- [158] T. Ando, Y. Ohtake, N. Matsumoto, T. Inoue, and N. Fukuchi, “Mode purities of Laguerre-Gaussian beams generated via complex-amplitude modulation using phase-only spatial light modulators,” *Opt. Lett.* **34**, 34–36 (2009).
- [159] T. W. Clark, R. F. Offer, S. Franke-Arnold, A. S. Arnold, and N. Radwell, “Comparison of beam generation techniques using a phase only spatial light modulator,”

- Opt. Express **24**, 6249–6264 (2016).
- [160] A. W. Lohmann, R. G. Dorsch, D. Mendlovic, C. Ferreira, and Z. Zalevsky, “Space-bandwidth product of optical signals and systems,” J. Opt. Soc. Am. A **13**, 470–473 (1996).
- [161] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” J. Opt. Soc. Am. **72**, 156–160 (1982).
- [162] G. W. Burr, G. Barking, H. Coufal, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, and M. A. Neifeld, “Gray-scale data pages for digital holographic data storage,” Opt. Lett. **23**, 1218–1220 (1998).
- [163] 井上光輝, “光フェーズロック方式コリニアホログラフィー –次世代コリニアホログラムメモリの実現を目指して–,” オプトロニクス **27**, 76–80 (2008).
- [164] H. Kato, H. Horimai, P. B. Lim, K. Watanabe, M. Inoue, R. Arai, N. Morishita, and J. Ikeda, “Multi-level phase recording by collinear phase-lock holography,” Proceedings of International Workshop on Holographic Memories & Display, 79–80 (2009).
- [165] G. Berger, M. Dietz, and C. Denz, “Hybrid multinary modulation codes for page-oriented holographic data storage,” J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **10**, 115305 (2008).
- [166] A. Okamoto, K. Kunori, M. Takabayashi, A. Tomita, and K. Sato, “Holographic diversity interferometry for optical storage,” Opt. Express **19**, 13436–13444 (2011).
- [167] T. Sato, K. Kanno, and M. Bunsen, “Complex linear minimum mean-squared-error equalization of spatially quadrature-amplitude-modulated signals in holographic data storage,” Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 09SA08 (2016).
- [168] Y. W. Yu, S. Xiao, C. Y. Cheng, and C. C. Sun, “One-shot and aberration-tolerable homodyne detection for holographic storage readout through double-frequency grating-based lateral shearing interferometry,” Opt. Express **24**, 10412–10423 (2016).
- [169] R. Hiramatsu, M. Shigaki, K. Nitta, and O. Matoba, “Multiresolution coding using amplitude and phase modulations for holographic data storage,” Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 09ME04 (2011).
- [170] M. He, L. Cao, Q. Tan, Q. He, and G. Jin, “Novel phase detection method for a holographic data storage system using two interferograms,” J. Opt. A: pure Appl.

- Opt. **11**, 065705 (2009).
- [171] M. Bunsen, S. Umetsu, M. Takabayashi, and A. Okamoto, “Method of phase and amplitude modulation/demodulation using datapages with embedded phase-shift for holographic data storage,” Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 09LD04 (2013).
- [172] T. Nobukawa and T. Nomura, “Multilevel recording of complex amplitude data pages in a holographic data storage system using digital holography,” Optics Express, **24**, 21001–21011 (2016).
- [173] 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).
- [174] T. Tahara, K. Ito, M. Fujii, T. Kakue, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Experimental demonstration of parallel two-step phase-shifting digital holography,” Opt. Express **18**, 18975–18980 (2010).
- [175] S. K. Debnath and Y. Park, “Real-time quantitative phase imaging with a spatial phase-shifting algorithm,” Opt. Lett. **36**, 4677–4679 (2011).
- [176] M. Imbe and T. Nomura, “Selective calculation for the improvement of reconstructed images in single-exposure generalized phase-shifting digital holography,” Opt. Eng. **53**, 044102–044108 (2014).
- [177] T. Nobukawa and T. Nomura, “Digital super-resolution holographic data storage based on Hermitian symmetry for achieving high areal density,” Optics Express, **25**, 1326–1338 (2017).
- [178] R. B. Bracewell, *The Fourier Transform and Its Applications* (McGraw-Hill, 1986).
- [179] C. Liu, Z. Liu, F. Bo, Y. Wang, and J. Zhu, “Super-resolution digital holographic imaging method,” Appl. Phys. Lett. **81**, 3143–3145 (2002).
- [180] S. C. Park, M. K. Park, and M. G. Kang, “Super-resolution image reconstruction: a technical overview,” IEEE Signal Process. Mag. **20**, 21–36 (2003).
- [181] J. P. Wilde, J. W. Goodman, Y. C. Eldar, and Y. Takashima, “Coherent superresolution imaging via grating-based illumination,” Appl. Opt. **56**, A79–A88 (2017).
- [182] L. Nikolova and P. S. Ramanujam, *Polarization Holography* (Cambridge University, 2009).
- [183] K. Kuroda, Y. Matsuhashi, R. Fujimura, and T. Shimura, “Theory of polarization holography,” Opt. Rev. **18**, 374–382 (2011).

- [184] C. Provenzano, P. Pagliusi, and G. Cipparrone, “Highly efficient liquid crystal based diffraction grating induced by polarization holograms at the aligning surfaces,” *Appl. Phys. Lett.* **89**, 121105 (2006).
- [185] U. Ruiz, P. Pagliusi, C. Provenzano, and G. Cipparrone, “Highly efficient generation of vector beams through polarization holograms,” *Appl. Phys. Lett.* **102**, 161104 (2013).
- [186] F. Xu, J. E. Ford, and Y. Fainman, “Polarization-selective computer-generated holograms: design, fabrication, and applications,” *Appl. Opt.* **34**, 256–266 (1995).
- [187] G. Martinez-Ponce, T. Petrova, N. Tomova, V. Dragostinova, T. Todorov, and L. Nikolova, “Bifocal-polarization holographic lens,” *Opt. Lett.* **29**, 1001–1003 (2004).
- [188] U. Ruiz, P. Pagliusi, C. Provenzano, E. Lepera, and G. Cipparrone, “Liquid crystal microlens arrays recorded by polarization holography,” *Appl. Opt.* **54**, 3303–3307 (2015).
- [189] K. Kawano, J. Minabe, T. Niitsu, T. Ishii, Y. Nishikata, and K. Baba, “Optical computing by a vector holographic memory system,” *Opt. Lett.* **25**, 1077–1079 (2000).
- [190] Y. Li, J. Kim, and M. J. Escuti, “Orbital angular momentum generation and mode transformation with high efficiency using forked polarization gratings,” *Appl. Opt.* **51**, 8236–8245 (2012).
- [191] S. H. Lin, P. L. Chen, C. I. Chuang, Y. F. Chao and K. Y. Hsu, “Volume polarization holographic recording in thick phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer,” *Opt. Lett.* **36**, 3039–3041 (2011).
- [192] Y. Liu, Z. Li, J. Zang, A. Wu, J. Wang, X. Lin, X. Tan, D. Barada, T. Shimura, and K. Kuroda, “The optical polarization properties of phenanthrenequinone-doped Poly(methyl methacrylate) photopolymer materials for volume holographic storage,” *Opt. Rev.* **22**, 837–840 (2015).
- [193] C. Li, L. Cao, Z. Wang, and G. Jin, “Hybrid polarization-angle multiplexing for volume holography in gold nanoparticle-doped photopolymer,” *Opt. Lett.* **39**, 6891–6894 (2014).
- [194] S. H. Lin, S. L. Cho, S. F. Chou, J. H. Lin, C. M. Lin, S. Chi, and K. Y. Hsu, “Volume polarization holographic recording in thick photopolymer for optical memory,” *Opt. Express* **22**, 14944–14957 (2014).
- [195] T. Nobukawa, T. Fukuda, D. Barada, and T. Nomura, “Coaxial polarization holo-

- graphic data recording on a polarization-sensitive medium,” *Optics Letters*, **41**, 4919–4922 (2016).
- [196] P. Várhegyi, Á. Kerekes, S. Sajti, F. Ujhelyi, P. Koppa, G. Szarvas, and E. Lőrincz, “Saturation effect in azobenzene polymers used for polarization holography,” *Appl. Phys. B* **76**, 397–402 (2003).
- [197] W. Han, Y. Yang, W. Cheng, and Q. Zhan, “Vectorial optical field generator for the creation of arbitrarily complex fields,” *Opt. Express* **21**, 20692–20706 (2013).
- [198] D. Maluenda, I. Juvells, R. Martínez-Herrero, and A. Carnicer, “Reconfigurable beams with arbitrary polarization and shape distributions at a given plane,” *Opt. Express* **21**, 5424–5431 (2013).
- [199] Z. Y. Rong, Y. J. Han, S. Z. Wang, and C. S. Guo, “Generation of arbitrary vector beams with cascaded liquid crystal spatial light modulators,” *Opt. Express* **22**, 1636–1644 (2014).
- [200] I. Moreno, J. A. Davis, T. M. Hernandez, D. M. Cottrell, and D. Sand, “Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator,” *Opt. Express* **20**, 364–376 (2012).
- [201] C. Maurer, A. Jesacher, S. Fürhapter, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, “Tailoring of arbitrary optical vector beams,” *New J. Phys.* **9**, 78 (2007).
- [202] E. H. Waller and G. von Freymann, “Independent spatial intensity, phase and polarization distributions,” *Opt. Express* **21**, 28167–28174 (2013).
- [203] J. H. Clegg and M. A. A. Neil, “Double pass, common path method for arbitrary polarization control using a ferroelectric liquid crystal spatial light modulator,” *Opt. Lett.* **38**, 1043–1045 (2013).
- [204] C. S. Guo, Z.-Y. Rong, and S.-Z. Wang, “Double-channel vector spatial light modulator for generation of arbitrary complex vector beam,” *Opt. Lett.* **39**, 386–389 (2014).
- [205] S. Liu, P. Li, T. Peng, and J. Zhao, “Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer,” *Opt. Express* **20**, 21715–21721 (2012).
- [206] M. A. A. Neil, F. Massoumian, R. Juskaitis, and T. Wilson, “Method for the generation of arbitrary complex vector wave fronts,” *Opt. Lett.* **27**, 1929–1931 (2002).
- [207] T. Fukuda, E. Uchida, K. Masaki, T. Ando, T. Shimizu, D. Barada, and T. Yatagai,

- “An investigation on polarization-sensitive materials,” in *Proceedings of IEEE 2011 ICO Conference on Information Photonics* (IEEE, 2011), 21–22.
- [208] T. Ando, K. Masaki, and T. Shimizu, “Page data multiplexing for vector wave memories having polarization recording material doped with aromatic ketone derivative,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LD15 (2013).
- [209] D. Gabor, “A new microscope principle,” *Nature* **161**, 777-778 (1948).

研究業績

学術論文

[筆頭]

- 1) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Coaxial holographic memory with designed reference pattern on the basis of Nyquist aperture for high density recording,” Japanese Journal of Applied Physics, **52**, 09LD09 (2013).
- 2) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Design of high-resolution and multilevel reference pattern for improvement of both light utilization efficiency and signal-to-noise ratio in coaxial holographic data storage,” Applied Optics, **53**, 3773–3781 (2014).
- 3) Teruyoshi Nobukawa, Yotaro Wani, and Takanori Nomura, “Multiplexed recording with uncorrelated computer-generated reference patterns in coaxial holographic data storage,” Optics Letters, **40**, 2161–2164 (2015).
- 4) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Multilayer recording holographic data storage using a varifocal lens generated with a kinoform,” Optics Letters, **40**, 5419–5422 (2015).
- 5) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Linear phase encoding for holographic data storage with a single phase-only spatial light modulator,” Applied Optics, **55**, 2565–2573 (2016).
- 6) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Multilevel recording of complex amplitude data pages in a holographic data storage system using digital holography,” Optics Express, **24**, 21001–21011 (2016).
- 7) Teruyoshi Nobukawa, Takashi Fukuda, Daisuke Barada, and Takanori Nomura, “Coaxial polarization holographic data recording on a polarization-sensitive medium,” Optics Letters, **41**, 4919–4922 (2016).
- 8) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Digital super-resolution holographic data storage based on Hermitian symmetry for achieving high areal density,” Optics Express, **25**, 1326–1338 (2017).
- 9) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Shift multiplexing with a spherical

wave in holographic data storage based on a computer-generated hologram,” *Applied Optics*, **56**, F31–F36 (2017).

学術講演（国際会議）

[筆頭]

- 1) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Numerical evaluation of shift multiplexing in coaxial holographic memory using spatial phase-modulated light-waves,” International Symposium on Optical Memory 2012, Technical Digest, Tu-I-27 (2012).
- 2) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Coaxial holographic memory with designed multi-level reference pattern on the basis of Nyquist aperture for improvement of light-utilization efficiency and signal to noise ratio,” International Symposium on Optical Memory 2013, Technical Digest, Tu-I-28 (2013).
- 3) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Complex amplitude-modulated data page recording in coaxial holographic data storage with phase-shifting digital holography,” *Imaging and Applied Optics 2014*, OSA Technical Digest (online), JTu4A11 (2014).
- 4) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Shift multiplexing with uncorrelated computer-generated reference patterns in coaxial holographic storage,” International Symposium on Optical Memory 2014, Technical Digest, Tu-E-03 (2014).
- 5) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Super-resolution holographic data storage without recording a zero-order beam,” International Symposium on Optical Memory 2014, Technical Digest, We-J-29 (2014).
- 6) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Complex wavefront coding for high light efficiency in super-resolution holographic data storage,” *The Fourth Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics*, P03 (2014).
- 7) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Recording a phase data page in super-resolution holographic data storage for high light efficiency,” *14th Workshop on Information Optics*, Th-03 (2015).
- 8) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Numerical evaluation of multilayer holographic data storage with a varifocal lens generated with a spatial light modu-

- lator,” SPIE Optics + Photonics 2015, 958703 (2015).
- 9) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Experimental demonstration of super-resolution holographic data storage,” International Workshop on Holography and Related Technologies 2015, Tu3-3 (2015).
 - 10) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Holographic storage system based on digital holography for recording a phase data page in a compact optical setup,” SPIE Photonics West 2016, 9771-14 (2016).
 - 11) Teruyoshi Nobukawa, Xiao Lin, An’an Wu, Jinliang Zang, Yong Huang, Takanori Nomura, and Xiaodi Tan, “Multiplexed multilevel computer-generated hologram for generating a vector wave,” 10th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication, 1S2-10 (2016).
 - 12) Teruyoshi Nobukawa, Takashi Fukuda, and Takanori Nomura, “Numerical evaluation of inter pixel crosstalk in polarization holographic data storage,” 8th International Conference on Information Optics and Photonics, CIOP2016-2016-1462 (2016).
 - 13) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Numerical evaluation of shift multiplexing using a spherical wave in a holographic memory based on a computer-generated hologram,” SPIE Optics + Photonics 2016, 9959-11 (2016).
 - 14) Teruyoshi Nobukawa, Takashi Fukuda, and Takanori Nomura, “Numerical evaluation of inter-pixel crosstalk with various sizes of apertures in polarization holographic data storage using a polarization-encoded data page,” International Workshop on Photonics Polymer for Innovation, P-23 (2016).
 - 15) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Recording multilevel phase data in a holographic data storage system based on digital holography,” International Symposium on Optical Memory 2016, Mo-B-03 (2016).
 - 16) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Inverse encoding in double-phase hologram generated by a phase-only spatial light modulator,” OSJ-OSA Joint Symposia, 31aOD9 (2016).
 - 17) Teruyoshi Nobukawa and Takanori Nomura, “Shift multiplexed recording in holographic data storage based on a computer-generated hologram with a conical wave,” International Workshop on Holography and Related Technologies 2016, Poster 43 (2016).

[共著]

- 1) Toshiyuki Morimoto, Teruyoshi Nobukawa, and Takanori Nomura, “Angular multiplexing using holographically-generated page data and reference beams for holographic memory,” International Symposium on Optical Memory 2015, Tu-I-22 (2015).
- 2) Takanori Nomura, Toshiyuki Morimoto, and Teruyoshi Nobukawa, “Angular multiplexing holographic memory with the help of computer-generated hologram,” International Workshop on Holography and Related Technologies 2015, We1-2 (2015). [invited]
- 3) Masahiro Karaike, Teruyoshi Nobukawa, and Takanori Nomura, “Evaluation of depth selectivity in multilayer recording coaxial holographic memory with varifocal kinoform lens,” International Symposium on Optical Memory 2016, Tu-J-11 (2016).
- 4) Takanori Nomura and Teruyoshi Nobukawa, “Holographic data storage by use of computer generated hologram,” Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2016 & The 9th International Photonics and OptoElectronics Meeting, ATH2J.2 (2016). [invited]

学術講演（国内会議）

[筆頭]

- 1) 信川輝吉, 野村孝徳, “コアキシヤルホログラフィックメモリのシフト選択性を考慮した参照光,” 第 13 回情報フォトンクス研究グループ研究会講演予稿集, p. 52 (2012).
- 2) 信川輝吉, 野村孝徳, “空間位相変調光波を用いたコアキシヤルホログラフィックメモリにおける複素振幅データの記録・再生,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013 講演予稿集, 14aE4 (2013).
- 3) 信川輝吉, 野村孝徳, “参照光パターンの高精細化によるコアキシヤルホログラフィックメモリにおける光利用効率と再生像の品質の向上,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-F9-8 (2014).
- 4) 信川輝吉, 野村孝徳, “単一の位相変調型空間光変調器を用いたホログラフィックメモリのための線形位相符号化法,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会,

- 18-PG1-4 (2014).
- 5) 信川輝吉, 野村孝徳, “超解像ホログラフィックメモリ,” 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 18p-PA2-2 (2014).
 - 6) 信川輝吉, 野村孝徳, “複素振幅データ記録ホログラフィックメモリの記録密度向上のためのシフト多重記録法,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014 講演予稿集, 7pE8 (2014).
 - 7) 信川輝吉, 野村孝徳, “Shift multiplexing with uncorrelated computer-generated reference patterns in coaxial holographic storage, ISOM’14 Workshop (2014). [招待講演]
 - 8) 信川輝吉, 野村孝徳, “線形位相符号化法を用いたコアキシアルホログラフィックメモリのシフト多重記録,” 磁気記録・情報ストレージ研究会 (電子情報通信学会), MR2014-44 (2015).
 - 9) 信川輝吉, 野村孝徳, “キノフォーム可変焦点レンズを用いた多層記録ホログラフィックメモリ,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-P4-6 (2015).
 - 10) 信川輝吉, 野村孝徳, “2 次元位相格子を用いたホログラフィックメモリのための複素振幅変調技術,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 14a-A11-10 (2015).
 - 11) 信川輝吉, 野村孝徳, “計算機合成ホログラムを用いたホログラフィックメモリの球面波シフト多重記録法,” 2016 年電子情報通信総合大会, エレクトロニクスソサイエティ, C-7-8 (2016).
 - 12) 信川輝吉, 野村孝徳, “デジタルホログラム技術を用いた多層記録ホログラフィックメモリ,” 第 23 回ボリュームホログラフィックメモリ技術研究会, (2016). [招待講演]
 - 13) 信川輝吉, 野村孝徳, “デジタルホログラム技術を導入したホログラフィックメモリによる位相多値情報の多層記録,” 第 41 回応用物理学会秋季学術講演会, 15a-C42-4 (2016).
 - 14) 信川輝吉, James P. Ryle, Changliang Guo, John T. Sheridan, 野村孝徳, “二波長強度輸送方程式によるインラインデジタルホログラフィの共役像の低減,” 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-P2-2 (2016).
 - 15) 信川輝吉, 野村孝徳, “超解像ホログラフィックメモリの多値信号記録,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2016 講演予稿集, 2aE4 (2016).
 - 16) 信川輝吉, 野村孝徳, “コニカル位相参照光の計算機合成ホログラムを用いたホログラフィックメモリシステム,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics

Japan 2016 講演予稿集, 2pP20 (2016).

- 17) 信川輝吉, 野村孝徳, “デジタルホログラム技術を用いた複素振幅データ記録ホログラフィックメモリ,” 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 14p-F205-1 (2017).

[共著]

- 1) 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予稿集, pp. 27–28 (2014).
- 2) 森本峻行, 信川輝吉, 野村孝徳, “計算機合成ホログラムを用いたホログラフィックメモリのための角度多重記録法,” ISOM'14 Workshop, pp. 27–28 (2014).
- 3) 野村孝徳, 最田裕介, 信川輝吉, “位相多値記録ホログラフィックメモリの再生データ検出技術,” 第 22 回ポリュームホログラフィックメモリー技術研究会 (2015). [招待講演]
- 4) 柄池正大, 信川輝吉, 野村孝徳, “キノフォーム可変焦点レンズを用いた多層記録コアキシャルホログラフィックメモリにおける軸方向記録間隔・位置の検討,” 第 14 回関西学生研究論文講演会予稿集, pp. 45–46 (2016).
- 5) 柄池正大, 最田裕介, 信川輝吉, 野村孝徳, “線形位相符号化法を用いたホログラフィックメモリにおけるページデータ同時再生手法,” 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-P2-1 (2016).
- 6) 米田成, 最田裕介, 信川輝吉, 野村孝徳, “計算機合成ホログラムを用いたホログラフィックメモリの高密度角度多重記録法,” 第 15 回関西学生研究論文講演会予稿集, pp. 41–42 (2017).

受賞

- 1) International Symposium on Optical Memory 2014 The Best Student Paper Award (2014).
- 2) 磁気記録研究専門委員長賞 (2015).
- 3) コニカミノルタ光みらい奨励金 (2015).
- 4) 和歌山大学 システム工学研究科長表彰 (2015).
- 5) 和歌山大学 学生表彰 (2016).
- 6) International Symposium on Optical Memory 2016 The Program Chair Award

(2016).

7) 第 41 回 (2016 年秋季) 応用物理学会講演奨励賞 (2016).

8) 第 2 回 OPJ 優秀講演賞 (2016).