



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	光複素振幅制御技術を用いた超高密度ホログラフィックメモリに関する研究
Author(s)	渋川, 敦史
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11294号
Issue Date	2014-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11294
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55462
Type	doctoral thesis
File Information	Atsushi_Shibukawa.pdf



博士論文

光複素振幅制御技術を用いた
超高密度ホログラフィックメモリに関する研究

*Study on Ultra-High Density Holographic Memory
Using Optical Complex-Amplitude Control Technique*

北海道大学大学院情報科学研究科
情報エレクトロニクス専攻
先端エレクトロニクス講座
光エレクトロニクス研究室
渋谷 敦史

第 1 章	序章	1
第 2 章	ホログラフィックメモリ	7
2.1	基本動作・特長	8
2.2	多重記録方式	10
2.3	性能パラメータ	17
2.4	ノイズの低減方式	19
2.4.1	逆フィルタ	19
2.4.2	共焦点ピンホール	20
	参考文献	21
第 3 章	光複素振幅制御技術	23
3.1	二つの SLM による光複素振幅生成	25
3.2	計算機合成ホログラムによる光複素振幅生成	27
3.2.1	バイナリー迂回位相ホログラム	27
3.2.2	Lee による迂回位相ホログラム	30
3.2.3	軸外ホログラム	33
3.2.4	二重位相ホログラム	35
3.2.5	キノフォーム	37
3.3	位相シフトデジタルホログラフィによる光複素振幅検出	38
3.3.1	時間位相シフト法	38
3.3.2	空間位相シフト法	39
3.3.3	ホログラフィックダイバーシティ干渉法	44
3.4	光複素振幅制御技術を用いたデジタル位相共役	46
	参考文献	49
第 4 章	多層化コリニアホログラフィックメモリ	51
4.1	基本動作・特長	52
4.2	数値シミュレーション	54
4.2.1	シミュレーションモデル	54
4.2.2	面内方向シフト選択性の媒質厚さ依存性	61
4.2.3	媒質深さ方向シフト選択性	62
4.2.4	層間クロストークの低減	64
4.2.5	記録密度の改善	67
4.3	実験	71
4.3.1	実験光学系	71
4.3.2	実験方法	73

4.3.3	媒質厚さ方向シフト選択性	74
4.3.4	層間クロストーク低減効果	76
4.4	まとめと今後の課題	78
	参考文献	80
第5章	デジタル画像拡散技術	81
5.1	基本動作・特長	83
5.2	数値シミュレーション	87
5.2.1	シミュレーションモデル	87
5.2.2	量子化誤差の影響	91
5.2.3	ページ間クロストーク低減効果	92
5.3	実験	97
5.3.1	実験光学系	97
5.3.2	実験方法	99
5.3.3	デジタル位相共役再生	101
5.3.4	ページ間クロストーク低減効果	104
5.4	まとめと今後の課題	105
	参考文献	106
第6章	空間クロスモジュレーション法	107
6.1	基本動作・特長	109
6.2	数値シミュレーション	111
6.2.1	シミュレーションモデル	111
6.2.2	動作確認	116
6.2.3	ランダムディフューザの拡散率依存性	118
6.2.4	空間解像度及び回折効率の比較	120
6.3	ホログラフィックメモリへの応用	123
6.3.1	基本動作	123
6.3.2	実験光学系・実験方法	125
6.3.3	空間直交振幅変調信号の再生	128
6.4	まとめと今後の課題	129
	参考文献	130
第7章	まとめと今後の課題	131
謝辞		133
研究業績		134

第一章

序論

CD や DVD 等の光ストレージ装置は、高い記録密度と高いデータ転送速度に加えて低消費電力性と長寿命性を兼ね備えていることから、公的機関や医療機関等におけるアーカイブ装置として長年重宝されてきた[1]。しかしながら、様々な物やサービスがデジタル化される現代社会において、アーカイブすべきデジタル情報はこれまで以上に急増している。例えば、国立国会図書館において、デジタル化された所蔵物の情報量は保存用だけで約 10PB に達する[2]。また、発展著しいゲノム研究の分野では、次世代シーケンサーによって 1 年間に生成される解析情報量は PB オーダーに及ぶ[3]。このように現在のデジタル情報は以前とは桁違いの情報量を有しており、今後もデジタル情報の情報量は加速的に増大していくと考えられている。従って、現行光ストレージの最上位である Blu-ray disc(BD)でさえも将来的なアーカイブ装置として十分な役割を果たさないことは明らかであり、TB/disc オーダーの記録密度と Gbps オーダーのデータ転送速度を併せ持った次世代光ストレージ技術の開発が必要不可欠である。

これまで光ストレージ技術の進化は、レーザの短波長化と対物レンズの高 NA(開口数)化によって成し遂げられてきた。しかしながら、レーザの波長を BD の 405nm からさらに短くすると、記録媒質による光吸収は大きく増大する。また、対物レンズの NA 値は、周囲が空気で満たされている限り 1.0 を超えることが原理的に不可能であるため、BD で用いられる 0.85 は実質的な限界である。従って、BD から次世代光ストレージ技術への進化は、従来のような光学素子の高性能化に頼らない新たなブレイクスルーが必要になる。そこで、光の回折限界を超える微小な集光スポットを用いて情報を記録する近接場光記録技術[4]、情報を記録媒質の三次元空間に記録する二光子吸収多層メモリ[5]や多層 BD 技術[6]等がそれぞれ提案・検討されている。現在までに、富士フィルムは、20 層 500GB/disc の記録密度を実現する二光子吸収多層メモリの開発に成功し、その成果を 2012 年に開催された ISOM'12 で発表している[7]。また、TDK は、16 層 512GB/disc の記録密度を達成可能とする多層 BD 技術を開発し、これを 2011 年の CEATEC JAPAN で発表している[8]。このように次世代光ストレージ技術の研究開発は着実に進展しており、従来の記録技術からの脱却によって光ストレージの記録密度は飛躍的に向上している。しかしながら、これらの次世代光ストレージ技術において、反射光の有無によって情報の読み書きを行う根本的な原理は変化していないため、飛躍的に向上する記録密度と比べてデータ転送速度は伸び悩んでいるのが現状である。

このような状況の中、ホログラフィックメモリ(HDS: Holographic data storage)は、TB/disc オーダーの記録密度と Gbps オーダーのデータ転送速度の同時実現を可能とすることから、次世代光ストレージ技術の本命として大きく期待されている[9,10]。HDS で

は、空間光変調器(SLM: Spatial light modulator)[11]によって二次元ページデータが変調された信号光を、参照光との干渉によって記録媒質にホログラムとして記録する。この時、記録媒質への参照光の入射条件(角度、波長、偏光、波面分布)を変えることで、異なる複数のページデータを記録媒質の同一箇所にもホログラムとして多重記録することができる。所望のページデータを再生したい場合は、それを記録した時と同一の入射条件で参照光を記録媒質に照射すれば良い。このように、異なるページデータを記録媒質の同一箇所にも多重記録できる特長とページデータを一括で記録再生できる特長は、高記録密度と高データ転送速度の同時実現を可能にする。アメリカの Inphase 社による HDS 装置の試作品はそれぞれ 1.6TB/disc と 1Gb/s の記録密度と転送速度を有しており[12]、これは他の次世代光ストレージ技術の性能を遥かに凌駕している。しかしながら、一般的なホログラフィック記録媒質の理論的な三次元記録密度限界はおよそ 500TB/disc であることから[13]、現行 HDS の記録媒質の利用効率は極めて低く、記録密度拡大の余地はまだ多く残されている事が分かる。

記録媒質の利用効率が低い主な要因として、まず、三次元的な記録空間にホログラムが均一に記録されていない点が挙げられる。従来の HDS では、集光スポットの位置を媒質の面方向に沿って微小変位させることでホログラムの多重記録を行っているため、媒質の深さ方向に対する多重化ホログラムの均一性が不十分である。この点に対する解決策として、反射型三次元スペックルシフト多重方式が提案されているが[14]、この方式は二光束光学系を用いるため、機械的な振動や空気のゆらぎに弱く安定した干渉縞の形成が困難である。

媒質の利用効率が低いもう一つの要因として、非再生ホログラムからのクロストークノイズ(ページ間クロストーク)も挙げられる[15]。ホログラムを多重する間隔の理論限界は $1\mu\text{m}$ 以下であるにも関わらず、実際の多重間隔はページ間クロストークを抑制するために $20\mu\text{m}$ 程度に設定されており[16]、これは HDS の潜在的な多重化能力が約 1/400 に減殺されることを意味する。再生信号の空間周波数面にピンホールを設置することでページ間クロストークの低減を図る方法がこれまでに提案されているが[17]、この方法は再生信号成分と等価な空間周波数帯域を持つページ間クロストーク成分を除去することが難しい。

さらに、媒質の利用効率に影響を与える重要な要素として、信号変調方式も挙げられる。最近、一つのホログラムにより多くの情報を変調できる、多値振幅変調と多値位相変調を組み合わせた空間直交振幅変調(SQAM)方式が提案され[18]、これによる記録密度と転送速度の改善が検討されている。しかしながら、SQAM 信号等の光複素振幅を生成するためには、一般的に振幅を変調する SLM と位相を変調する SLM が必要になり[19]、これは HDS システムの大型化・複雑化を招いてしまう。また、二つの SLM を波長レベルの精度で正確に調整しなければならない。これに対して、計算機合成ホログラム(CGH)は一つの SLM のみで任意の光複素振幅を生成可能にする[20,21]。しかしながら、従来の CGH は一つの正確な光複素振幅値を生成するために SLM のおよそ 100 ピクセルを消費してしまう。また、従来の CGH によって実現可能な光複素振幅の回折効率は 20%程度でしかない。それゆえ、従

来の CGH によって生成される SQAM 信号を用いることは、逆に HDS の記録密度と転送速度を低下させる恐れがある。

以上を踏まえて、本論文は、「記録媒質の均一な活用、ページ間クロストークの低減、高性能な光複素振幅生成技術の開発を通して、現状の HDS の記録密度を飛躍的に向上させること」を目的とする。そこで、まずは、記録媒質の均一な利用を可能にする多層化コリニアホログラフィックメモリを提案・検討する。多層化コリニアホログラフィックメモリは、物理的な層構造を有する多層記録媒質を用意することなく、媒質深さ方向に沿う集光スポットの位置制御によって純光学的な多層化を可能とする。同技術は、コリニアホログラフィックメモリに多層化技術を融合したものであるため、安定した干渉縞の形成を可能にする。本論文では、数値シミュレーションを用いて、多層化コリニアホログラフィックメモリによって達成可能な多層数を示すと共に、多層数と記録密度の関係を明らかにする。基礎実験により、純光学的なホログラムの多層化が可能であることを確認する。次に、ページ間クロストークの低減を可能にするデジタル画像拡散技術を提案・検討する。デジタル画像拡散技術は、ランダムディフューザと位相共役光の性質を巧みに活用することでページ間クロストーク低減を可能とする。また、本技術では、光複素振幅生成技術[22]と光複素振幅検出[23]に基づいたデジタル位相共役再生法を用いることで、付加的な光学素子も不要になる。本論文では、数値シミュレーションを用いて、本技術によって得られるホログラム多重間隔の縮小率ならびに記録密度の拡大率を示す。基礎実験によりページ間クロストークの低減効果を確認する。最後に、SQAM 信号等の任意の光複素振幅を生成可能にする空間クロスモジュレーション法を提案・検討する。空間クロスモジュレーション法は、光波における位相の重要性に着目したものであり[24]、ランダムディフューザによって生成される散乱位相波面から任意の光複素振幅分布を再生する。本論文では、本方式が高輝度かつ高空間分解能を併せ持った光複素振幅分布を生成可能であることを明らかにすると共に、本方式によって達成可能な SQAM 信号の多値数を求める。

以下に各章の要旨を示す。

第 2 章では、まず、HDS の基本構成や記録再生原理を述べた後、これまでに提案されてきた多重記録方式を紹介する。また、HDS のシステムノイズとページ間クロストークを低減可能とする従来方法について述べる。

第 3 章では、まず従来の光複素振幅生成技術や検出技術を紹介し、その動作原理を示す。また、従来技術の特長や問題点等についても述べる。

第 4 章では、まず、多層化コリニアホログラフィックメモリを提案し、その基本動作や特長を説明する。次に、数値シミュレーションによって約 100 層のホログラム多層化が原理的に可能であることを明らかにする。さらに、深さ方向への多層記録と面方向への多重記録を組み合わせた時、層数を 2 層に設定した場合に最も高い媒質利用効率を得られることを示す。

第 5 章では、まず、デジタル画像拡散技術を提案し、その基本動作や特長を述べた。ま

た，数値シミュレーションによって，本技術は従来の HDS における多重間隔や記録密度を約 5 倍改善できることを示す．さらに，5 枚のデータページを用いた多重記録再生実験を行い，本技術によるページ間クロストーク低減の効果を実験的に実証する．

第 6 章では，まず，光複素振幅生成のための空間クロスモジュレーション法を提案し，その基本動作や特長について述べる．また，数値シミュレーションにより，従来の CGH と比べて，本方式がより高い空間解像度と高い回折効率を有する光複素振幅を生成可能であることを示す．さらに，HDS への応用に向けた基礎実験として，本方式による 8 値 SQAM 信号の生成を行う．

第 7 章では，本論文の総括と今後の研究指針について述べる．

参考文献

- [1] 今中良一他, “医療用ストレージと光ディスク,” OPJ2010 講演予稿集CD-ROM, 9pAS5, (2010).
- [2] 村上浩介, “国立国会図書館のデジタルアーカイブ,” OPJ2010 講演予稿集CD-ROM, 9pAS4, (2010).
- [3] Web[<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2011/09/0927b.html>].
- [4] J. Tominaga *et al.*, “The Characteristics and the Potential of Super Resolution Near-Field Structure,” Jpn. J. Appl. Phys., **39**, pp. 957-961 (2000).
- [5] M. S. Akselrod *et al.*, “Bit-Wise Volumetric Optical Memory Utilizing Two-Photon Absorption in Aluminum Oxide Medium,” Jpn. J. Appl. Phys., **43**, pp. 4908-4911 (2004).
- [6] J. Hellmig *et al.*, “Dual-layer Blu-ray Disc Based on Fast-Growth Phase-Change Materials,” Jpn. J. Appl. Phys., **42**, pp. 848-851 (2003).
- [7] T. Mikami *et al.*, “20-layer optical disc fabricated with web coating and laminating process,” Tech. Dig. of ISOM2012, Th-M-01 (2012).
- [8] Web[http://www.ceatec.com/2011/ja/news/webmagazine_detail.html?mag_vol=083&mag_type=].
- [9] E. N. Leith *et al.*, “Holographic data storage in three-dimensional media,” Appl. Opt., **5**, pp. 1303-1311 (1966).
- [10] M. Takabayashi *et al.*, “Self-referential holography and its applications to data storage and phase-to-intensity conversion,” Opt. Express, **21**, pp. 3669-3681 (2013).
- [11] T. Inoue *et al.*, “LCOS spatial light modulator controlled by 12-bit signals for optical phase-only modulation,” Proc. SPIE, **6487**, 64870Y(1-11) (2007).
- [12] Web[<http://www.inphase-tech.com/downloads/pdf/products/2007TapestryProductBrochure.pdf>].
- [13] L. Hesselink *et al.*, Proc. IEEE, “Holographic data storage systems,” **92**, pp. 1231-1280 (2004).
- [14] M. Miura *et al.*, “Numerical estimation of storage capacity in reflection-type holographic disk memory with three-dimensional speckle-shift multiplexing,” J. Opt. Soc. Am. A, **26**, pp. 2269-2274 (2009).
- [15] M. A. Neifeld *et al.*, “Technique for controlling cross-talk noise in volume holography,” Opt. Lett., **21**, pp. 1298-1300 (1996).
- [16] K. Tanaka *et al.*, “Improved performance in coaxial holographic data recording,” Opt. Express, **15**, pp. 16196-16209 (2007).
- [17] O. Matoba *et al.*, “Improvement of Storage Capacity Using Confocal Scheme in Reflection-Type Holographic Memory System with Speckle Shift Multiplexing,” Jpn. J.

- Appl. Phys., **50**, 09ME08(1-5) (2011).
- [18] K. Zukeran *et al.*, “Double-referential holography and spatial quadrature amplitude modulation,” Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 09LD13(1-9) (2013).
 - [19] L. G. Neto *et al.*, “Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled-mode liquid-crystal televisions,” Appl. Phys., **35**, pp. 4567-4576 (1996).
 - [20] A. W. Lohmann *et al.*, “Binary Fraunhofer holograms, generated by computer,” Appl. Opt., **6**, pp. 1739- 1748 (1967).
 - [21] A. J. MacGovern *et al.*, “Computer generated holograms for testing optical elements,” Appl. Opt. **10**, pp. 619-624 (1971).
 - [22] V. Arrizon *et al.*, “Accurate encoding of arbitrary complex fields with amplitude-only liquid crystal spatial light modulators,” Opt. Express, **13**, pp. 7913-7927 (2005).
 - [23] Y. Awatsuji *et al.*, “Parallel three-step phase-shifting digital holography,” Appl. Opt., **45**, pp. 2995- 3002 (2006).
 - [24] A. V. Oppenheim *et al.*, “The importance of phase in signals,” Proc. IEEE, **69**, pp. 529-541 (1981).

第2章

ホログラフィックメモリ

ホログラフィックメモリ(HDS: Holographic data storage)は、2次元のページデータを参照光との干渉によってホログラムとして記録媒質に記録する次世代の光メモリである。ホログラフィックディスプレイの分野では、3次元物体をホログラムとして記録媒質中に記録するが、HDSの場合は、2次元物体であるページデータを記録媒質中に多重記録する。

HDSは、従来の面記録ではなく体積記録を行うため、BDの数十倍の記録密度を達成できる。しかしながら、近年の磁気記録や半導体メモリの高密度化によって、かつてのように記録密度の点における圧倒的優位を主張できる状況ではなくなっている。むしろ、特筆すべき点は2次元ページデータの一括処理による圧倒的なデータ読出し速度にある[1]。また、従来のビット記録方式では、一つのビットに対して一つの記憶領域が対応しているが、HDSでは、一つのビットは記録媒質の全記録領域に分散して記録されているため、記録媒質の一部破損によるデータ損失を避ける事が出来る。その他にも、従来の光メモリと同様に、長期保存性や省電力性、ランダムアクセス性といった特長を有している。

2.1節では、HDSの基本構成と記録・再生原理について述べる。2.2節では、これまでに提案されている代表的な多重方式について述べる。2.3節では、HDSの性能を評価する上で重要となるいくつかのパラメータについて述べる。2.4節では、これまでに提案されているHDSのノイズ低減技術を述べる。

2.1 基本動作・特長

HDS の代表的な記録方式は、大別すると二つに分けられる。一つは、異なる光軸に用意された信号光と参照光を記録媒質中で干渉させる二光束方式[2]である。もう一つは、同軸上に配置されているが空間的に独立している信号光と参照光を記録媒質中で干渉させるコリニア方式[3,4]である。さらに、最近は一つのパログラムを一つのビット情報として扱うマイクロパログラム記録方式[5,6]の研究も活発化している。これらの方式にはそれぞれ良い点と悪い点が共存している。二光束方式は、二つの光路を用意する必要があるため、光学系の大型化・複雑化を招く。また、光学系の振動がある場合、二つの光路は異なる影響を受けるため、記録されるパログラムの品質低下を招く。一方、対物レンズの NA(開口数)全てを信号光のために用いることができる点はコリニア方式に対する利点と言える。コリニア方式は、信号光と参照光が同軸上に用意されるため、従来の光メモリ(CD や DVD)と同様の簡素な光学系を維持することができ、かつ、従来光メモリで培われたサーボ技術を流用することも可能になる。また、同様の理由から光学系の振動に対する耐性も強い。しかし、コリニア方式における信号光と参照光は同一の対物レンズを通過するため、対物レンズの開口数を信号光と参照光で分割することになる。すなわち、コリニア方式における達成可能な記録密度は二光束方式におけるその約 1/2 になる。マイクロパログラム方式は、従来の光メモリとほぼ同じ光学系を使用するため、従来光メモリで培われた信号処理技術やサーボ技術等をそのまま流用することができる。また、多層化記録も容易に実現できるため、ページ単位の HDS と同程度の記録密度を達成できる。一方で、マイクロパログラム方式は、従来光メモリと同様にデータ処理はビット単位で行なわれるため、データ転送速度は従来光メモリとほぼ変わらない。記録密度が向上すると共に転送速度も向上しなければ、データストレージとしての役割は不十分であるため、この点がマイクロパログラム方式の最大の問題点として挙げられる。

以下では、二光束方式を用いた HDS の記録・読出し動作について述べる。まずは、図 2.1(a)に示す記録過程について述べる。光源から出射されるレーザ光は、ビームスプリッタによって二つの光波に分割される。ビームスプリッタを透過する光波は、空間光変調器(SLM : Spatial Light Modulator)やデジタルマイクロミラー(DMD : Digital Micro-mirror Device)によって 1000×1000 程度のピクセルを持つ 2 次元ページデータを変調され、信号光となる。一般的なデータ変調方式は、バイナリ強度変調であるが、位相変調[7]や偏光変調[8]を用いることも可能である。ただし、位相変調や偏光変調方式を適用する場合、通常の CCD の代わりに位相検出器や偏光検出器を導入する必要がある。ページデータが変調された信号光は、対物レンズを透過することで、記録媒質中に集光される。一方、ビームスプリッタを反射した光波は、参照光として記録媒質に照射され、信号光との干渉縞を形成する。ここで、記録媒質としてフォトリソグロム[9]やフォトリフレクティブ結晶[10]を用いた場合、形成された干渉縞分布に対応した屈折率分

布が記録媒質中に誘起される．この屈折率分布はページデータを蓄積するホログラムとして機能する．参照光の入射条件等を変えることでホログラムの多重記録を行うこともできるが，詳しい説明は省略する．次に，図 2.1(b)に示す読出し過程について説明する．一般的には記録時と同一の入射条件を備えた参照光を再び記録媒質中のホログラムに照射する．この時，ブラッグ条件を満たした回折光がホログラムから出射し，その回折光が電荷結合素子(CCD : Charge Coupled Device)や相補型金属酸化膜半導体(CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor Sensor)等の像面上において検出される．ここで，データページに位相変調を付加している場合は，撮像素子等で直接検出できないため，位相検出技術を用いる必要がある．位相検出技術に関しては 3.3 節で述べている．

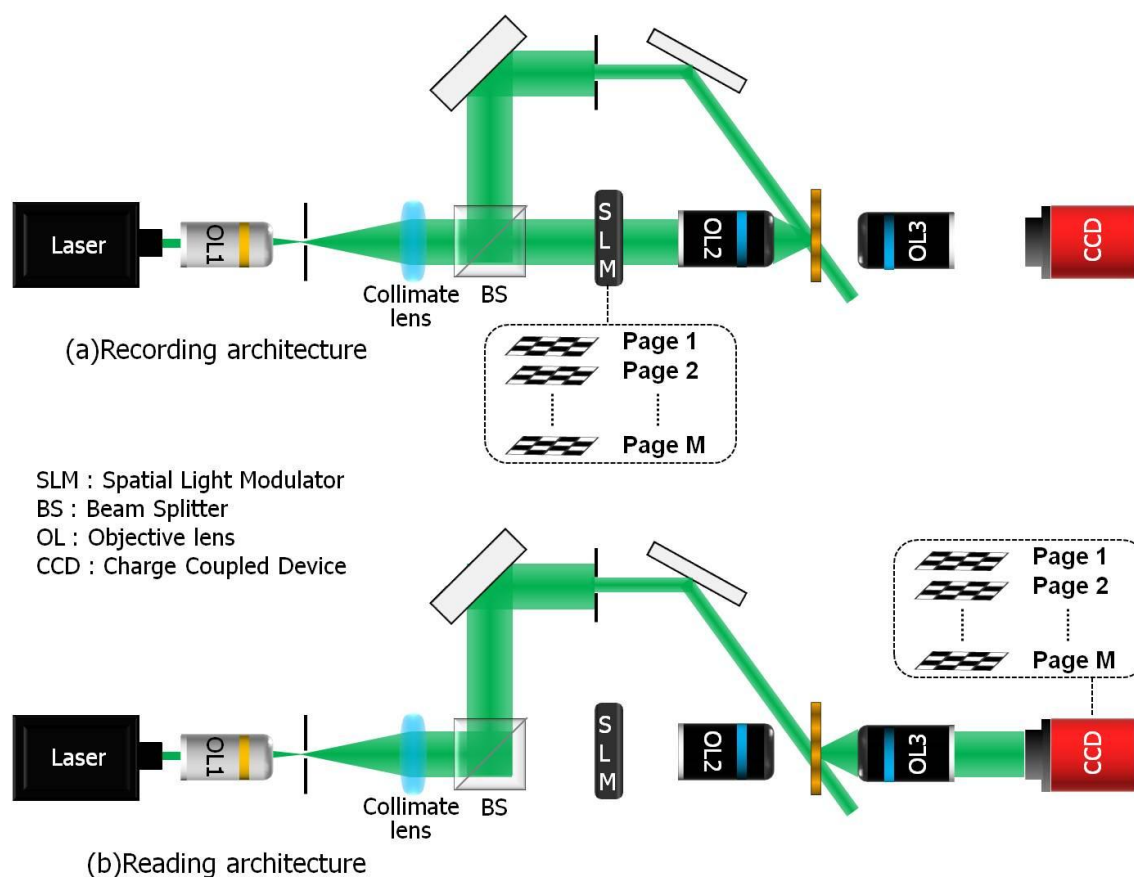


Fig. 2.1. Off-axis architecture for holographic memory.

2.2 多重記録方式

記録媒質の同じ場所に多数のページを書き込むことができる多重方式は大別すると、ブラッグ選択性を利用するものと参照光の位相相関を利用するものがある。ブラッグ選択型の代表的な多重方式としては、角度多重方式、波長多重方式、球面波シフト多重方式、回転多重方式[11]、ポリトピック多重方式が挙げられる。一方、位相相関型の多重方式としては、位相多重方式、スペックルシフト多重方式、コリニア式シフト多重方式等が挙げられる。以下では、代表的な多重方式に関して記述する。

2.2.1 ブラッグ選択型多重方式

角度多重

角度多重記録は、HDS が提案されて以来、最も良く用いられてきた多重記録方式である[12]。図 2.2 に角度多重記録の模式図を示す。この方式では、はじめにある角度 θ_0 で一枚目のホログラムを記録した後、参照光の角度を微小角 $\Delta\theta$ だけ変化させて二番目のホログラムを記録し、次はさらに角度を $\Delta\theta$ だけ変化させて三番目のホログラムを記録する、という操作を繰り返し、順次ホログラムを多重記録していく。多重ホログラムから選択的にデータを再生するには、厚いホログラムのブラッグ回折条件に由来する角度選択性を利用する。Kogelnik の結合波動理論によると、透過型ホログラムの回折効率 η は角度変化量 $\Delta\theta$ に対して sinc 関数の二乗の形で表される。

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi\Delta n L}{\lambda \cos\theta_0}\right) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\pi L \sin\theta_0}{\lambda \cos\theta_0} \Delta\theta\right) \quad (2.1)$$

ここで、 λ は波長、 Δn は屈折率変調量、 L はホログラムの厚さである。この式から、一定間隔以上角度をずらして多重記録しておくことで、読出し参照光の入射角に対応する信号成分だけを選択的に回折させることができる。ここで、互いのホログラムを区別するために最小限必要な角度変化量、すなわち角度選択性は、

$$\Delta\theta = \frac{\lambda \cos\theta_0}{L \sin\theta_0} \quad (2.2)$$

で表される。

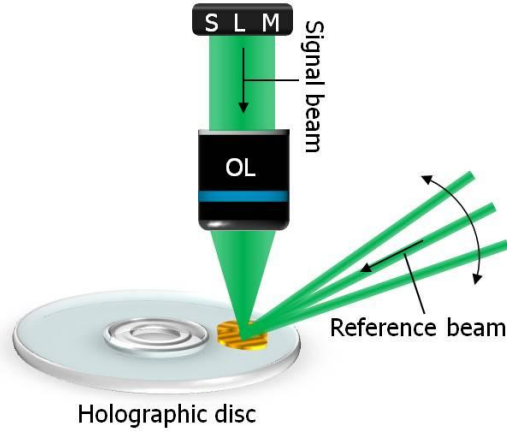


Fig. 2.2. Angular multiplexing.

波長多重

図 2.3 に波長多重記録の模式図を示す．波長多重記録は角度ではなく光源の波長変化によってブラッグ回折条件を調節する手法である[13,14]．波長がシフトした場合，回折効率

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n L}{\lambda \cos \theta_0} \right) \sin^2 \left(\frac{2\pi L \sin^2 \theta_0}{\lambda^2 \cos \theta_0} \Delta \lambda \right) \quad (2.3)$$

となる．このとき，互いにホログラムを区別するために必要な波長変化量である波長選択性 $\Delta \lambda$ は，

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2 \cos \theta_0}{2nL \sin^2 \theta_0} \quad (2.4)$$

で表される．この式から，波長選択性が最も鋭くなるのは θ_0 の値が π となる場合，つまり互いに対抗伝搬する光波の干渉による反射型ホログラムの場合であることが分かる．

波長多重記録では波長可変のレーザを使用することになるが，その光源は発振可能な波長帯域が広く，選択波長の帯域は狭く，安定に動作し，かつ選択波長の調整に要する時間が短いことが求められる．現在のところそのような光源は安価に入手できそうにないが，もしこれらの条件を備えたレーザ光源が利用できれば，波長多重記録も有効な多重化手段の一つと成り得る．

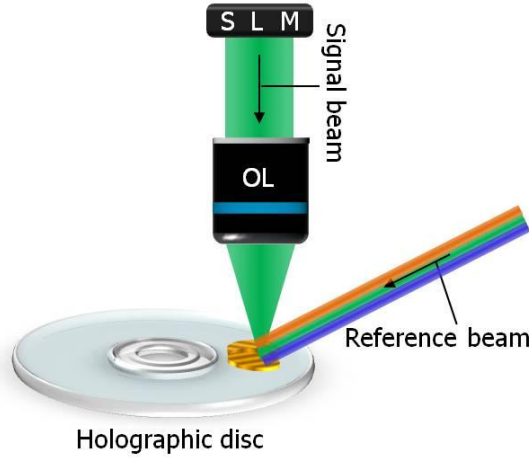


Fig. 2.3. Wavelength multiplexing.

球面波シフト多重

図 2.4 に球面波シフト多重記録の模式図を示す．ブラッグ回折の角度特性を巧みに利用して，ディスク型のような記録メディアの回転によってページを選択できるシステムが球面波シフト多重方式である[15,16]．本方式では，参照光に収束又は発散する球面波を用いる点の特徴である．ここで，信号光を平面波であると仮定する．この信号光と参照光の干渉を局所的に見れば，参照球面波の一部はほぼ平面波と近似できるので，平面波どうしの干渉による回折格子が記録されるとみなせる．球面波は記録媒質の位置によって異なる角度成分を有する平面波の集合とみなせるので，書き込まれる回折格子の角度も記録媒質上の位置によって連続的に変化することになる．

球面シフト多重は厚いホログラムのブラッグ選択性を基礎としているため，回折効率がほぼ 0 となるために必要な媒体の位置シフト量(シフト選択距離)は，格子ベクトルに対して平行な方向(ブラッグ選択方向)では小さく，垂直な方向(ブラッグ縮退方向)では大きくなる．特に信号光と参照光の曲率半径 R が等しい場合，シフト選択性はブラッグ選択方向だけの 1 次元に縮退し，

$$\Delta x = \frac{\lambda R}{nL \sin \theta_s} \quad (2.5)$$

となる． θ_s は信号光と参照光のなす角度である．シフト選択性はスポットサイズよりも十分に小さいので，記録スポットを少しずつシフトさせることでホログラムを多重記録することができる．この方式では，媒体が厚くなるほどシフト選択性は狭くなり，より多数のホログラムを多重記録できる．

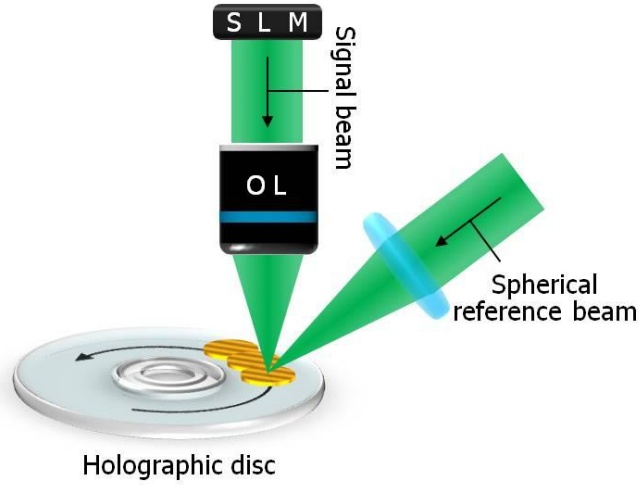


Fig. 2.4. Shift multiplexing with spherical wave.

2.2.2 位相相関型多重方式

位相多重方式

位相多重方式は、参照光の空間位相分布を変調することによりホログラムを多重化する方式である。記録スポットにおいて参照光の空間周波数に位置依存がない場合、ホログラムの回折効率は、記録参照光と再生参照光の空間位相の相関によって決まり、

$$\eta = \eta_0 \iint A_{\text{write}}(x, y) A_{\text{read}}^*(x, y) dx dy \quad (2.6)$$

と表される。ここで、 η_0 は規格化定数、 A_{write} と A_{read} はそれぞれ記録参照光と再生参照光の振幅、アスタリスクは複素共役を表す。この効果を利用すると、各ページに相互相関の低い参照光パターンを変調することによる多重化が可能となる。これまでに、すりガラスなどの微細なランダム位相媒質を用いたスペックル多重方式や、空間位相変調器を用いて互いに直交する位相分布を参照光に変調する位相コード多重方式などが提案されている。

位相コード多重

位相コード多重は、空間光位相変調器等を用いて参照光の位相分布を制御することにより多重化を行う方式である[17]。図 2.5 に示す様に、システムに可動部を必要としないことが大きな特長である。この方式では、各ページに互いに直交する位相を参照光に与えることができるため、角度多重やランダム位相多重などと比較しページ間クロストークを抑えることができる。実際は、位相変調器に高い位相制御の精度が要求されるため、実用化には至っていない。

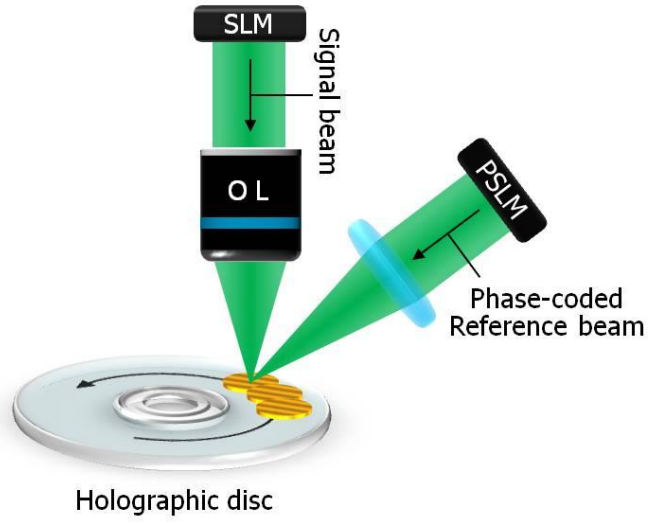


Fig. 2.5. Phase code multiplexing.

スペックル多重

スペックル多重方式では、原理的には位相コード多重方式と同じであるが、位相変調器の代わりにすりガラス等のランダム位相媒質を用いて確率的にランダムな位相のばらつきでページを消す[18,19]. ここで、スペックルとは、ランダム位相媒質からの散乱光が互いに干渉し合うことで遠視野に形成されるコントラストの高い斑点状の強度分布である。スペックル多重では、参照光路状のランダム位相媒質をわずかに変位させることで、参照光の空間位相相関が消失し、再生光の重ね合わせの結果、総体として再生光が消える。単純なシステムが構成でき、実用を視野に入れた研究が継続されている。

スペックルシフト多重

図 2.6 にスペックルシフト多重記録の模式図を示す。スペックル参照光シフト多重方式は、位相相関による選択性を基礎としている[20]. この場合の選択性は式(2.6)より

$$\eta = \eta(0,0) \iint A_{ref}(x,y) A_{ref}^*(x+\Delta x, y+\Delta y) dx dy \quad (2.7)$$

の形の自己相関関数で表され、ホログラムの厚さには依存しない。 A_{ref} は記録スポットにおける参照光振幅、 Δx , Δy はそれぞれ媒体の x , y 方向シフト距離を表す。ほとんどの場合、自己相関関数は中心対称であるので、相関型のシフト多重では、 x , y の両方向のシフト選択距離は等しくなる。

式(2.7)の自己相関関数は、Wiener-Khintchine 定理を用いると、

$$\eta = \eta(0,0) \iint \langle |a_{ref}(x,y)|^2 \rangle \exp\{j2\pi(f_x \Delta x + f_y \Delta y)\} df_x df_y \quad (2.8)$$

のようにフーリエ変換の形式で表現することもできる． $\langle |a_{ref}(x, y)|^2 \rangle$ は記録媒質における参照光の角度パワースペクトル（強度スペクトルの集合平均）を表し， f_x 及び f_y は空間周波数である．

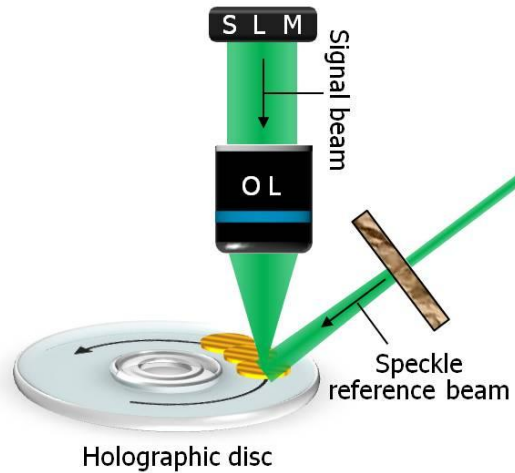


Fig. 2.6. Speckle shift multiplexing.

コリニアシフト多重

図 2.7 にコリニアシフト多重記録の模式図を示す[21]．球面波シフト多重，スペックルシフト多重と同様に，記録媒質のシフトによってデータページの記録・再生ができるもう一つの方式にコリニア方式がある．これは，単一の SLM にによって内側領域に信号光，外側領域に参照光を表現し，これらの二つの光を単一の対物レンズを通して記録媒質に集光し，干渉させる方式である．再生時には，書き込み時と同一の参照光を用いてホログラムからデータページを読み出す．先述したように，コリニア方式は参照光と物体光の光路を共通化しているため，光学系の安定性に優れている．また，光路が単一であることから，従来光メモリと光学系が類似しており，サーボ技術がそのまま流用できるという点も特長である．

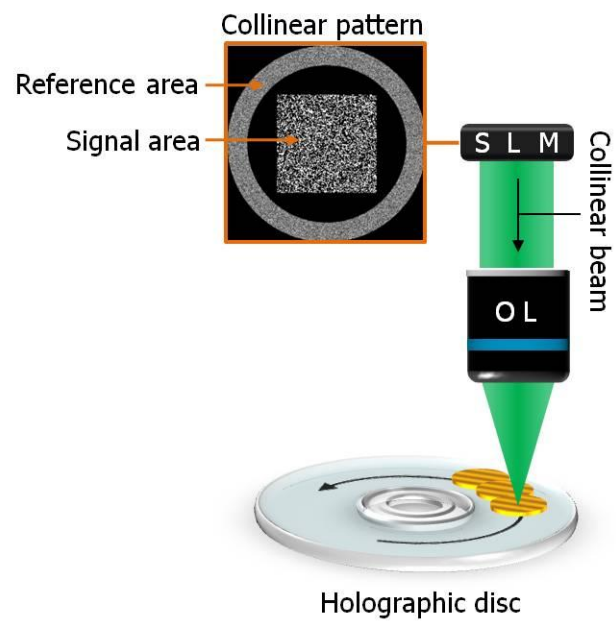


Fig. 2.7. Collinear shift multiplexing.

2.3 性能パラメータ

記録密度

3次元光記録であるHDSにおいて、回折限界によって制約される極限的な記録密度 L/λ^3 のオーダーである。しかし実際には、記録媒質や光検出器で発生するノイズが存在し、他方でホログラムの回折効率が多重数の増加に伴い減少する。よって、再生に十分な信号対ノイズ比を確保できるホログラム多重数には限界があるため、事実上記録密度は制限される。HDSの記録密度 D は、以下の式で与えられる。

$$D = \frac{MN_p^2}{D_a^2} \quad (2.9)$$

ここで、 M はホログラム多重数、 N_p^2 は空間光変調器によって生成されるページ当たりのピクセル数、 M はホログラム多重数、 N_p^2 は空間光変調器によって生成されるページ当たりのピクセル数、 D_a は信号光をレンズで集光した時の開口スポット幅である。また、ピクセル幅 l_p 、レンズ焦点距離を f とすると、Nyquist のサンプリング定理より

$$D_a \geq D_N = \frac{\lambda f}{l_p} \quad (2.10)$$

が成り立つ[22]。 D_a が D_N よりも小さいと、ピクセル間のクロストークが大きくなり、完全なページデータは復元できなくなる。信号光のレンズの開口数 NA_{sig} は

$$NA_{sig} = \sin \theta_{sig} \cong \frac{l_p N_p}{2f} \quad (2.11)$$

であるので、記録密度 D は、

$$D = M \left(\frac{2NA_{sig}}{\xi \lambda} \right)^2 \quad (2.12)$$

となる。ここで、 ξ は開口サイズ係数 ($\xi=1$ のとき Nyquist の開口サイズ) である。この式から、HDSの記録密度は2次元記録の密度 $(2NA_{sig}/\xi\lambda)^2$ の M 倍となることが分かる。従来の光ディスクと同様に、対物レンズの NA は高く、レーザ光の波長 λ は短い方が高記録密度を実現できる。

ダイナミックレンジ

次に多重数 M の限界について考える。ホログラム M 枚を多重記録する場合、ホログラムの回折効率は、

$$\eta = \left(\frac{M\#}{M} \right)^2 \quad (2.13)$$

となり，多重数 M の二乗に反比例して減少することが知られている[23]．上式の $M\#$ (エムナンバー)は記録媒質のダイナミックレンジを表すパラメータであり，ホログラム 1 枚当たりに対する回折効率の平方根の総和として定義される．

$$M\# = \sum_{i=1}^M \sqrt{\eta_i} \quad (2.14)$$

$M\#$ の値は単位長さ当たりの屈折率変化量と媒質の厚みの積に比例する．この $M\#$ はホログラム媒質の多重記録性能を評価するためにしばしば用いられる．

転送速度

HDS の再生におけるデータ転送速度 R は主として光検出器の性能に依存し，

$$R = \frac{N_p^2}{t_{int}} \quad (2.15)$$

と表される． t_{int} は検出器の積算時間である．ここで，積算時間を短くすると出力信号のフォトンを集められなくなるため，エラーが増加する．そのため， 10^{-3} 程度の RAW ビットエラー率を確保できるような t_{int} に留める必要がある．いま，ターゲットの BER を達成するために必要な出力面の 1 ピクセルに入射するフォトンの数を n_s とすると，

$$R = \frac{\eta_q}{n_s} \frac{P_{ref}}{h\nu} \left(\frac{M\#}{M} \right)^2 \quad (2.16)$$

が得られる．従って，HDS の読出し速度は，レーザパワー，量子効率，ホログラム 1 枚あたりの回折効率によって決定される．

2.4 ノイズ低減技術

HDS におけるノイズは、ランダムノイズと固定的で予測可能な非ランダムノイズに分類することができる。非再生ホログラムからのノイズ(ページ間クロストーク)はランダムノイズの一種であり、これは予め予測不可能なノイズである。同様に、CCD のショットノイズも、時間的にランダムなノイズであり、低減することが難しい。これに対して、記録されるホログラムの不均一性から生じる再生ページデータの強度むらやピクセル間クロストークは、各再生ページデータにおいてほぼ変化がないため、予め予測可能なノイズと考えられる。

2.4.1 逆フィルタ

G. W. Burr らによって提案された逆フィルタは、固定的なノイズを低減するための技術であり、原理は非常にシンプルである[24]。予め、SLM から CCD までの透過ページデータ、又は、多重ホログラムからの再生データページをテンプレートとして測定しておく。この時、ページ間クロストークが生じない程度に大きく多重間隔を確保し、かつ、複数枚のページデータを再生しそれらを平均化する。これは、測定するテンプレートにランダムノイズであるページ間クロストークや CCD ノイズが含まれることを回避するためである。本技術は、これらのランダムノイズを低減の対象としていない。

テンプレートが求まった後は、これを基に逆フィルタを生成する。逆フィルタの目標は、再生ページデータを構成する全てのピクセルが等価な輝度を持つようにすることである。つまり、テンプレートにおいて、輝度が弱い ON ピクセル領域はより多くの露光時間を取り、逆に輝度が強い OFF ピクセルは露光時間を少なくするような逆フィルタを容易に作成可能である。図 2.8 は、逆フィルタを使用した場合とそうでない場合の再生結果を示している。逆フィルタの適用により、ビットエラー率が大幅に改善されていることが見て取れる。

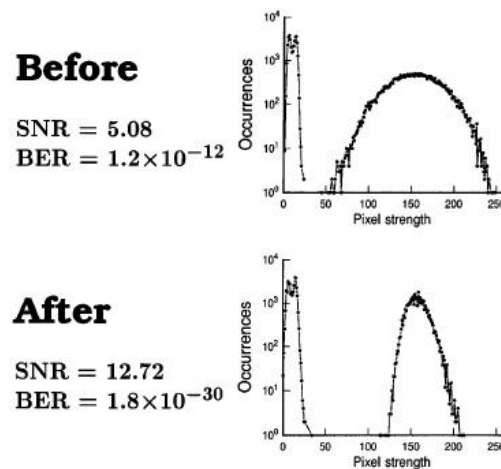


Fig. 2.8. Histograms of detected pixel values for holograms before and after use of the predistortion technique.

2.4.2 共焦点ピンホール

ページ間クロストークの低減を目的として、記録媒質の前後に二つの4f光学系を組み、それぞれの焦点面にピンホールを配置する方法が提案されている[25]。図2.9は共焦点ピンホールの概念を示している。記録媒質の前に配置されたピンホールは、ページデータの不要な高空間周波数成分を除去し、記録媒質の無駄な消費を避けることができる。これに対して、記録媒質の後側に配置したピンホールはページ間クロストークを除去することを目的としている。しかしながら、ピンホールを配置することで再生信号に含まれるノイズを低減する方法は、光学研究において古くから一般的に用いられている手段であり、むしろピンホールによって取り除くことのできないページ間クロストークを如何に低減するかが重要な課題と言える。

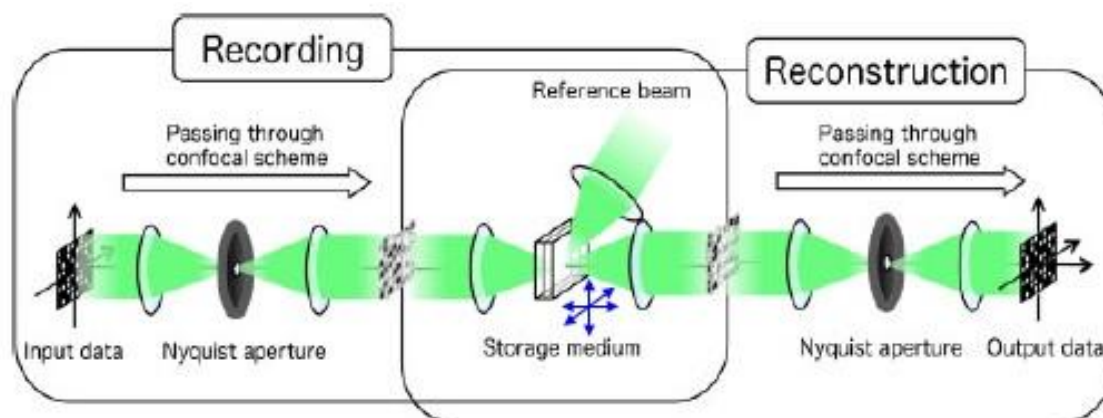


Fig. 2.9. Schematic of the reflection-type holographic memory with confocal scheme.

参考文献

- [1] S. S. Orlov *et al.*, “High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system,” *Appl. Opt.*, **43**, pp. 4902-4914 (2004).
- [2] Y. Matsumura *et al.*, “Tilt compensation method of two-beam angle multiplexing holographic memory,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, pp. 3837-3839 (2007).
- [3] H. Horimai *et al.*, “Collinear holography,” *Appl. Opt.*, **44**, pp. 2575-2579 (2005).
- [4] H. Horimai *et al.*, “Collinear technology for a holographic versatile disk,” *Appl. Opt.*, **45**, pp. 910-914 (2006).
- [5] M. Dubois *et al.*, “Characterization of microholograms recorded in a thermoplastic medium for three-dimensional optical data storage,” *Opt. Lett.*, **30**, pp. 1947-1949 (2005).
- [6] V. Ostroverkhov *et al.*, “Micro-Holographic Storage and Threshold Holographic Recording Materials,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**, 03A035(1-6) (2009).
- [7] B. Das *et al.*, “Phase modulated gray-scale data pages for digital holographic data storage,” *Opt. commun.*, Vol. 282, pp. 2147-2154 (2009).
- [8] S. Pu *et al.*, “Polarization multiplexing holographic optical recording of a new photochromic diarylethene,” *Opt. Eng.*, **47**, 030502(1-3) (2008).
- [9] Y. C. Jeong *et al.*, “Blue laser-sensitized photopolymer for a holographic high density data storage system,” *Opt. Express*, **18**, pp. 25008-25015 (2008).
- [10] P. Yeh, “*Introduction to photorefractive nonlinear optics*”, (John Wiley & Sons, Inc. 1993).
- [11] K. Curtis *et al.*, “Method for holographic storage using peristrophic multiplexing,” *Opt. Lett.*, **19**, pp. 993-994 (1994).
- [12] F. H. Mok, “Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate,” *Opt. Lett.*, **18**, pp.915-917 (1993).
- [13] D. Lande *et al.*, “Digital wavelength-multiplexed holographic data storage system,” *Opt. Lett.*, **21**, pp. 1780-1782 (1996).
- [14] S. Yin *et al.*, “Wavelength multiplexed holographic storage in a sensitive photorefractive crystal using a visible-light tunable diode laser,” *Opt. commun.*, **101**, pp. 317-321 (1993).
- [15] S. S. Orlov *et al.*, “Holographic shift multiplexing in thin volumetric media,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **20**, pp. 1912-1921 (2003).
- [16] G. Barbastathis *et al.*, “Shift multiplexing with spherical reference waves,” *Appl. Opt.*, **35**, pp 2403-2417 (1996).
- [17] M. Ezura *et al.*, “Holographic memories using 2-dimensional phase-code multiplexing method,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, pp. 4954-4958 (2004).
- [18] A. M. Darskii *et al.*, “Shift selectivity of holograms with a reference speckle wave,” *Opt. Spectrosc.* **65**, pp.392-395 (1988).

- [19] Y. H. Kang *et al.*, "Volume hologram scheme using optical fiber for spatial multiplexing," Opt. Lett., **22**, pp.739-741 (1997).
- [20] V. Markov *et al.*, "Multilayer Volume holographic optical memory," Opt. Lett., **24**, pp. 265-267 (1999).
- [21] K. Tanaka *et al.*, "Improved performance in coaxial holographic data recording," Opt. Express, **15**, pp. 16196-16209 (2007).
- [22] M. Bernal *et al.*, "Balancing interpixel cross talk and detector noise to optimize areal density in holographic storage systems," Appl. Opt., **37**, pp.5377-5385 (1998).
- [23] F. H. Mok *et al.*, "System metric for holographic memory systems," Opt. Lett., **21**, pp. 896-898 (1996).
- [24] G. W. Burr *et al.*, "Noise reduction of page-oriented data storage by inverse filtering during recording," Opt. Lett., **23**, pp. 289-291(1998).
- [25] O. Matoba *et al.*, "Improvement of Storage Capacity Using Confocal Scheme in Reflection-Type Holographic Memory System with Speckle Shift Multiplexing," Jpn. J. Appl. Phys., **50**, 09ME08(1-5) (2011).

第3章

光複素振幅制御技術

コンピュータは、時間や空間、エネルギーを効率化し、我々の社会をより豊かにしているが、これは光学の分野においても同様と言える。例えば、コンピュータと光学の融合によって、我々の生活に欠かせないデジタルカメラやハイビジョンディスプレイ等が実現されている。しかしながら、これらの光デバイスは、光の空間振幅情報(輝度情報)のみをコンピュータで制御しており、空間位相情報の制御を行っていない。一般的に、光の位相は振幅よりも多くの情報を伝達することができるとされており[1]、光の振幅と位相を含む複素振幅をコンピュータによって制御することで、より多彩かつ高性能な光デバイスを創出することができる。例えば、光複素振幅をコンピュータによって制御することで、完全な三次元ディスプレイを実現することができる[2-4]。また、光複素振幅制御によって、生体内の多重散乱[5]と吸収を考慮した光断層撮影を実現できる可能性もある。この他にも、光複素振幅制御技術は、本論文のテーマでもあるホログラフィックメモリ(HDS: Holographic data storage)の記録密度やデータ転送速度を大幅に改善させることもできる。このように、光の振幅だけでなく位相も含めた光複素振幅制御は、より多くの可能性を有しており、光学研究者の間で関心が集まっている。本章では、この光複素振幅制御の根幹を担う幾つかの光複素振幅生成・検出方式を紹介する。

最も代表的な光複素振幅生成方法は、二つの空間光変調器(SLM: Spatial light modulator)の直列配置である。一般的に、SLMは光の振幅と位相を同時に変調することができないため、一つのSLMで振幅を、もう一つのSLMで位相を、それぞれ独立に変調することで任意の複素振幅を生成する必要がある。これに対して、一つのSLMで任意の複素振幅を生成する方法として、計算機合成ホログラム(CGH: Computer-generated hologram)の使用が挙げられる。先述した様に、一つのSLMで振幅と位相を同時に変調することはできないが、複素振幅情報を振幅または位相のどちらか一方にエンコードしたCGHパターンをSLMに表示し、その変調光に対して適切な光学的デコード処理を施すことによって、任意の複素振幅を実光学系上に再現することができる。

最も代表的な光複素振幅検出技術として、位相シフトデジタルホログラフィ(PSI: Phase shifting digital holography)が挙げられる。CCDやCMOS等の光撮像素子は、一般的に信号光の空間振幅情報のみを検出可能とし、位相情報を直接検出することができない。しかし、信号光の複素振幅情報を参照光の干渉によって強度分布にエンコードし、そのエンコードパターンを撮像素子によって検出することで、複素振幅情報の計測が可能になる。PSIは、参照光の位相をシフトすることで複数のエンコードパターン(干渉縞)を生成する必要があり、この位相シフトを行う手段によって分類することができる。本章では、PSIの中でも有力な時間位相シフト法、空間位相シフト法、ホログラフィック

ダイバーシティ法について紹介する.

3.1 二つの SLM による複素振幅生成

一般的な SLM は、一つの動作パラメータ電圧 V によって制御されている．従って、一つの SLM によって複素平面における全ての複素振幅値を表現することは原理的に不可能である．しかしながら、二つの SLM を組み合わせ、電圧 V_1 と電圧 V_2 という二つの動作パラメータを独立に制御することで、任意の複素振幅値を表現することが可能になる[6,7]．ここで、SLM により変調される複素振幅値を $h(V)$ 、振幅を $a(V)$ 、位相を $\varphi(V)$ とする．

$$h(V) = a(V) \exp[i\varphi(V)], \quad (3.1)$$

図 3.1 に、位相と振幅応答が結合した一般的な TN 型 SLM の動作曲線の一例を示す．動作パラメータ V を操作することで、振幅 $a(V)$ と位相 $\varphi(V)$ は図示された軌跡を辿る．このように、一つの SLM で複素平面上の全ての複素振幅値を表現することは不可能である．

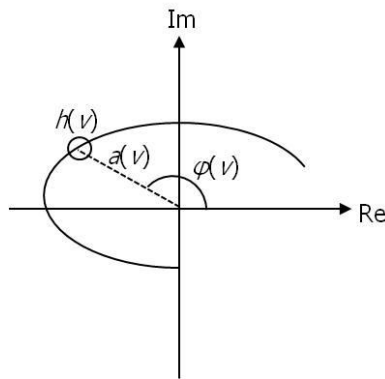


Fig. 3.1. Operating curve of SLM whose amplitude and phase are coupled.

図 3.2(a)と(b)に、二つの SLM を組み合わせる場合の二つの動作形態を示す．図 3.2(a)では、並列的に配置された二つの SLM によって、それぞれ独立した二つの変調光波を生成し、その後 BS によってそれらを合波することで、任意の空間複素振幅が表現される．この場合、二つの SLM の動作曲線は、和の形で組み合わせられることになる．対して図 3.2(b)では、SLM と SLM2 が 4f 光学系を挟んで直列に配置されている．この場合、二つの動作曲線は、積の形で組み合わせられる．図 3.2(a)に示す並列配置の形態は、図 3.2(b)に示す直列配置の形態と比べて、より簡易な光学系を用いて実現できることが分かる．また、図 3.2(b)に示す直列配置の形態を反射型 SLM によって実現する場合、著しく光利用効率が低くなる．加えて、透過型 SLM が有する標準の占有率(Fill factor)は、反射型 SLM のそれと比較して極めて低い．以上のことから、現状では、図 3.2(a)に示す並列配置を用いて光複素振幅を生成することがより望ましい．

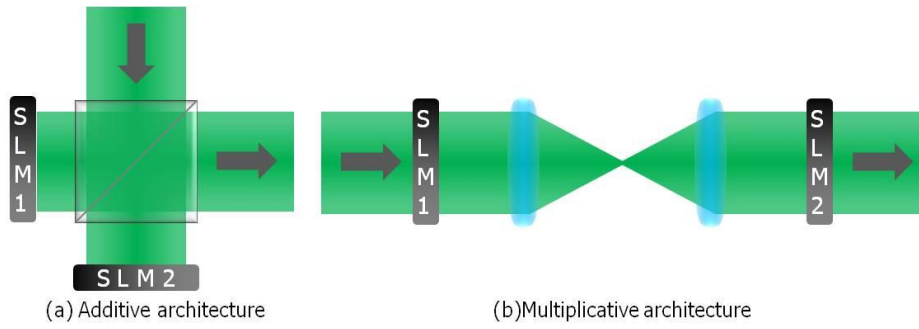


Fig. 3.2. Architecture for combining two spatial light modulators.

図 3.3(a)は、二つの動作曲線の和を取ることによって表現可能になる複素振幅値を示している。表現可能な複素振幅値を決定するために、まずは動作曲線 $h_1(V)$ のある任意の点 A から始める。この点 A に対して、動作曲線 $h_2(V)$ の軌跡を図示するように足し合わせる。次に、動作曲線 $h_1(V)$ 上の点 B に対しても同様のことを行う。このような足し合わせを動作曲線 $h_1(V)$ 上の全ての点に対して行うことで、表現可能な複素振幅値の領域が決定される。

二つの動作曲線を積の形で組み合わせる場合も同様、動作曲線の積を $\log$ スケールに変換し、それらを足し合わせることで、表現可能な複素振幅値を求めることができる。二つの動作曲線の積 $h_1(V)h_2(V)$ は、 $\log$ をとると、 $\log[h_1(V)h_2(V)] = \log[h_1(V)] + \log[h_2(V)]$ の形に変換される。

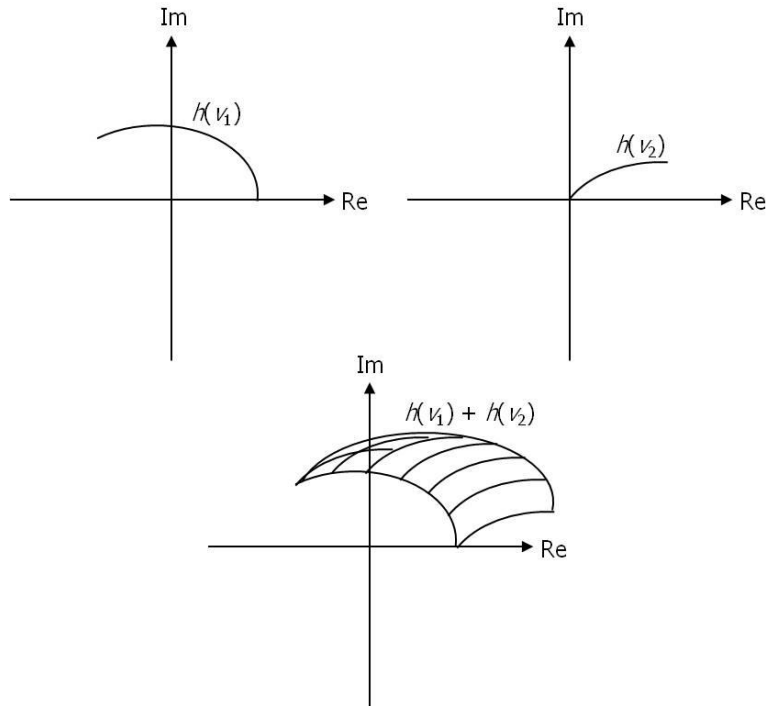


Fig. 3.3. Accessible complex amplitude value by combining two spatial light modulators.

3.2 計算機合成ホログラムによる複素振幅生成

3.2.1. バイナリー迂回位相ホログラム

計算機合成ホログラム(CGH)の中で、最も古く、最も有名な方法は A. W. Lohmann らによって提案されたバイナリー迂回位相ホログラムである[8]。この方法では、ホログラム面を複数の正方形のセル($N_x \times N_y$ 個)に分割し、その中に設けた副セルの面積で所望の振幅を、副セルの位置で位相を表現する。

図 3.4 に迂回位相ホログラムの概念図を示す。ホログラム面に対して、以下に示す軸外平面波を照射するとする。

$$U_p(x, y) = \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta) \quad (3.2)$$

ここで、 λ は光源波長、 θ は軸外平面波の波数ベクトルとホログラム法線間の角度、 x はホログラム面での x 軸方向の空間位置を示す。平面波をホログラム面に対して斜めに入射する理由は、ホログラム面での各空間位置 x において、平面波の光学位相は異なる値を持つようにするためである。 x 方向のセル幅は入射平面波における位相関数の 1 周期すなわち $\lambda / \sin \theta$ となるように設定することで、副セルの位置が任意の位相に対応できるようにする。

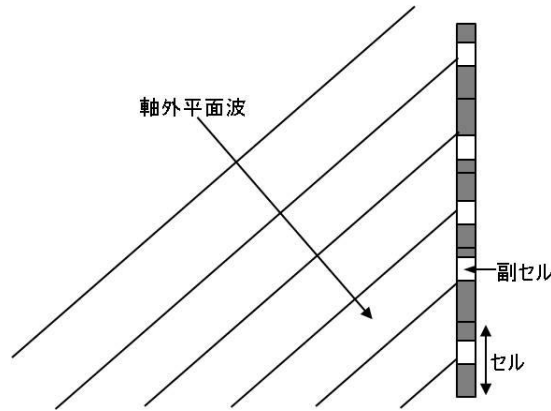


Fig. 3.4. Concept of detour phase effect.

次に、ホログラム面において、一つのセルの中に幅(W_x, W_y)の副セルがある場合に、フーリエ変換レンズの後側焦点面に生成される回折パターンを考える。ホログラム面の副セルは、以下の式によって表現される。

$$t_A(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x-x_0}{W_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_0}{W_y}\right) \quad (3.3)$$

ここで、 (x_0, y_0) は、ホログラム面での副セルの中心位置を示す。この副セルを、式(3.2)に示す軸外平面波で照射する場合、

$$U_i(x, y) = \exp(-jk \sin \theta_x) \text{rect}\left(\frac{x-x_0}{W_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_0}{W_y}\right) \quad (3.4)$$

となり，この光波場の光学的フーリエ変換分布は，以下で表現される．

$$U_f(x, y) = \frac{W_x W_y}{\lambda f} \text{sinc}\left(\frac{W_x(u + \lambda f \alpha)}{\lambda f}\right) \text{sinc}\left(\frac{W_y v}{\lambda f}\right) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda f} [(u + \lambda f \alpha) x_0 + v y_0]\right) \quad (3.5)$$

ここで，上式を求める際，フーリエ変換の性質である相似定理と偏移定理を用いており， $\alpha = \sin \theta / \lambda$ とする．次に，上式の近似について考える． x 方向のセル幅 W_x が軸外平面波の周期よりも十分に小さい場合，すなわち， $W_x \ll \alpha^{-1}$ である場合，一つ目の sinc 関数における移動成分は無視することができる．また，再生像面での対象とする領域 ($L_u \times L_v$) が sinc 関数の幅より十分に小さい場合，これらの関数を 1 と近似することができる．以上を考慮すると，一つのセルが寄与する再生光波場分布は，以下の式に近似できる．

$$U_f(x, y) = \frac{W_x W_y}{\lambda f} \exp(-j2\pi \alpha x_0) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda f} [u x_0 + v y_0]\right) \quad (3.6)$$

以下では，ホログラム面において，複数のセルがある場合の回折パターンについて考える．各セルは (p, q) で指定するとする．また，各副セルは異なる幅の組み合わせ (W_x, W_y) を持つ．さらに，再生位相を，副セルの中心位置を各セル内で x 方向に移動することで制御するとすると， (p, q) 番目の副セルの中心位置は，以下の式によって表現できる．

$$(x_0)_{pq} = p\Delta x + (\delta x)_{pq}, (y_0)_{pq} = p\Delta y \quad (3.7)$$

これによって，像面における全再生光波場は，

$$U_f(x, y) = \sum_{p=0}^{N_x-1} \sum_{q=0}^{N_y-1} \frac{(W_x)_{pq} (W_y)_{pq}}{\lambda f} \exp(2\pi \alpha p\Delta x) \exp\left[2\pi \alpha (\delta x)_{pq}\right] \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda f} [u p\Delta x + u (\delta x)_{pq} + v q\Delta y]\right) \quad (3.8)$$

となる．ここで，ホログラム面での入射平面波の位相周期 α^{-1} は一つのセル幅 Δx に等しなくてはならず，最初の指数関数項は常に 2π の整数倍となる．そのため，この項は 1 と置くことができる．さらに， $(L_u/2, -L_u/2)$ に渡って u 方向に広がる対象とする像領域の幅が十分に小さく，

$$\frac{L_u (\delta x)_{pq}}{2\lambda f} \ll 1 \quad (3.9)$$

であると仮定すれば，指数関数項は，

$$\exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda f}u(\delta_x)_{pq}\right] \approx 1 \quad (3.10)$$

となる．以上により，式(3.8)は以下のように変形される．

$$U_f(x, y) = \sum_{p=0}^{N_x-1} \sum_{q=0}^{N_y-1} \frac{(W_x)_{pq} (W_y)_{pq}}{\lambda f} \exp\left[2\pi\alpha(\delta_x)_{pq}\right] \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda f}[up\Delta x + vq\Delta y]\right] \quad (3.11)$$

ここで，所望の複素振幅分布を $a_{pq}(x, y)\phi_{pq}(x, y)$ とし，上式を見ると， W_x と W_y を適切に制御することで，任意の振幅 $a_{pq}(x, y)$ を表現できることが分かる．また，

$$\exp\left[-j2\pi\alpha(\delta_x)_{pq}\right] = \exp(j\phi_{pq}) \quad (3.12)$$

を満たす $(\delta_x)_{pq}$ を選択することで，任意の位相を表現することができる．図 3.5 に，バイナリーホログラムの構造の一例を示す．

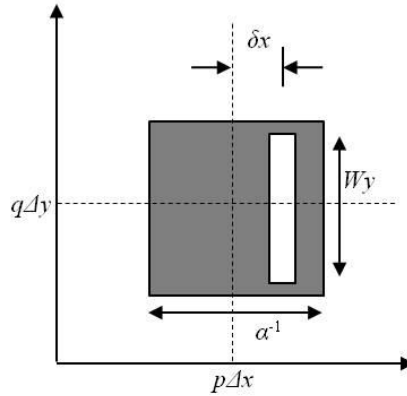


Fig. 3.5. Structure of the (p, q) cell in the binary hologram.

また，図 3.6 に，バイナリー迂回位相ホログラムとそのホログラムからの再生像をそれぞれ示す．

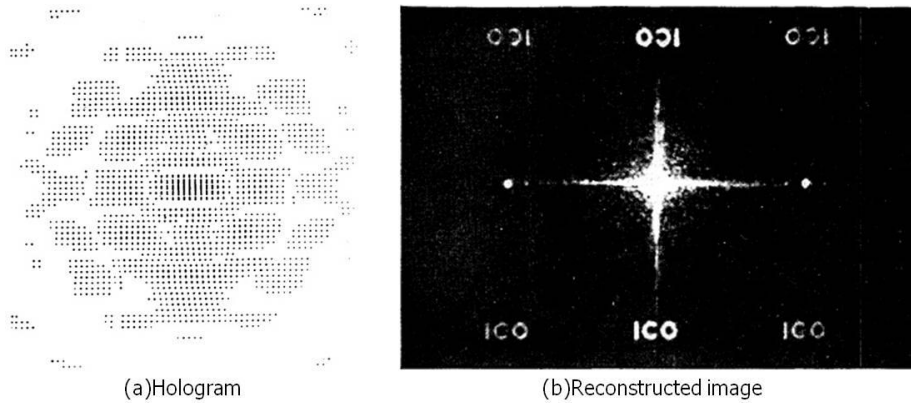


Fig. 3.6. Binary Fraunhofer hologram.

3.2.2. Lee による迂回位相ホログラム

前節で紹介したバイナリー迂回位相ホログラムでは、セル内における副セルの空間的位置と面積をそれぞれ独立に調整することで、フーリエ変換領域での再生像の位相と振幅を制御している。Lee らはこの迂回位相ホログラムの概念を用いた別の方法を提案している[9]。この方法では、一つのセル内の空間的に異なる位置に固定した四つの副セルが用意され、一つ目は正の実数部分(位相 0)、二つ目は正の虚数部分(位相 $\pi/2$)、三つ目は負の実数部分(位相 π)、四つ目は負の虚数部分(位相 $3\pi/2$)を表す。また、各セルにグレーレベルの透過率を持たせることで、任意の振幅を制御する。

以下では、Lee らによる迂回位相ホログラムの原理を解析的に示す。まず、元の複素振幅分布 $f(x,y)$ のフーリエ変換を行い、合成ホログラム面における各セルでの複素振幅分布 $|F(u,v)| \exp[j\phi_{pq}(x,y)]$ を求める。この複素振幅分布 $|F(u,v)| \exp[j\phi_{pq}(x,y)]$ は以下に示す四つの直交成分に分解できる。

$$F(u,v) \exp[j\phi(u,v)] = F_1(u,v) - F_3(u,v) + jF_2(u,v) - jF_4(u,v) \quad (3.13)$$

ここで、

$$\begin{aligned} F_1(u,v) &= \begin{cases} |F(u,v)| \cos \phi(u,v) & \text{if } \cos \phi(u,v) > 0 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \\ F_3(u,v) &= F_1(u,v) - |F(u,v)| \cos \phi(u,v), \\ F_2(u,v) &= \begin{cases} |F(u,v)| \sin \phi(u,v) & \text{if } \sin \phi(u,v) > 0 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \\ F_4(u,v) &= F_2(u,v) - |F(u,v)| \sin \phi(u,v). \end{aligned} \quad (3.14)$$

となる。 $F_1(u,v)$ は正の実数部を、 $F_2(u,v)$ は正の虚数部を、 $F_3(u,v)$ は負の実数部を、 $F_4(u,v)$ は負の虚数部をそれぞれ表している。

次に、上記四つの直交成分(副セルに対応)に表現したい位相をホログラムにエンコードする方法について説明する。正の実数のある関数 $G(u,v)$ を用意し、そのフーリエ変換分布 $g(x,y)$ は $W \times W$ の範囲に制限されていると仮定する。これによって、離散関数 $G_s(u,v)$ は、

$$G_s(u,v) = G(u,v) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(u - n/W + b, v - m/W), \quad (3.15)$$

と書かれる。なお、 $\delta(u,v)$ は二次元デルタ関数とし、定数 b はシフトパラメータと呼ばれる。このシフトパラメータについては後に述べる。さらに、離散関数 $G_s(u,v)$ (ホログラム面) のフーリエ変換分布 $g_s(x,y)$ (像面) は、以下の式によって与えられる。

$$g_s(x, y) = t_n(x - nW, y - mW), \quad (3.16)$$

$$t_n(x, y) = g(x, y) \exp(j2\pi nbW) \quad (3.17)$$

ここで、式(3.17)を見ると、各 $t_n(x, y)$ 関数に対して位相因子 $\exp(j2\pi nbW)$ が存在している。これは、副セルを元の位置から空間的に b だけシフトすることで、像面のある特定の位置に位相変化 $\exp(j2\pi nbW)$ をもたらすことを意味している。ここで、 $t_1(x, y)$ を例にとり、 $t_1(x, y)$ とシフトパラメータ b の関係を一覧にする。

b	$t_1(x, y)$
0	$g(x, y)$
$1/4W$	$jg(x, y)$
$2/4W$	$-g(x, y)$
$3/4W$	$-jg(x, y)$

上記表から、シフトパラメータ $b = 0$ の時、 $t_1(x, y)$ は再生像の正の実数部分を、 $b = 1/4W$ の時、 $t_1(x, y)$ は再生像の正の虚数部分を、 $b = 2/4W$ の時、 $t_1(x, y)$ は再生像の負の実数部分を、 $b = 3/4W$ の時、 $t_1(x, y)$ は再生像の負の虚数部分をそれぞれ表すことが分かる。つまり、 $1/4W$ ずつシフトされた四つの副セルのいずれか二つを利用することで、任意の複素振幅をフーリエ変換を介して得ることができる[図 3.7]。

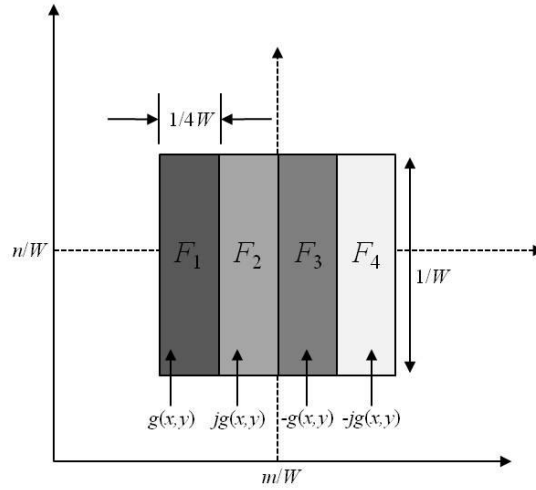


Fig. 3.7. Structure of the (m, n) cell in the Lee's hologram.

以下では、実際に、合成ホログラムからの再生複素振幅分布を考える。まずは、四つの副セルを $1/4W$ ずつシフトすることで生成される合成ホログラム $H(u, v)$ を以下の式によって表す。

$$H(u, v) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^4 F_k(u, v) \delta[u - (4n - k + 1), v - m/W]. \quad (3.18)$$

ここで、 $F_k(u,v)$ は、正の実数であり、グレーレベルを持つとする。最後に、合成ホログラム $H(u,v)$ をフーリエ変換することで、以下に示す所望の複素振幅分布を得る。

$$h(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^4 f_k(x-nW, y-mW) \exp[jn(k-1)\pi/4]. \quad (3.19)$$

最後に、図 3.8 に、本方式における合成ホログラムとそのフーリエ変換像(再生像)を示す。

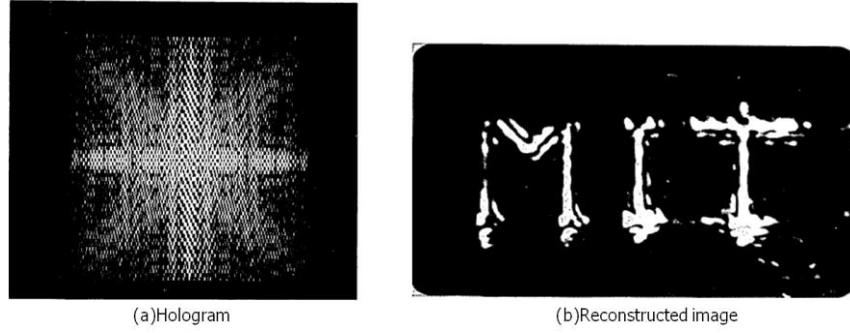


Fig. 3.8. Lee's hologram.

3.2.3. 軸外ホログラム

通常の光学ホログラムでは、信号光と参照光の干渉縞が記録されるが、これをコンピュータ上でも実現すれば、SLMによって任意の複素振幅を生成できる[10]。すなわち、コンピュータ上で、信号光と参照光それぞれのホログラム面上での複素振幅分布を求め、それらによる干渉縞を計算し、その干渉縞をSLMに表示すれば良い。

以下では、本方式の原理を解析的に示す。信号光 U_s はホログラム面の法線に対して平行に、参照平面波 U_r はホログラム面の法線に対して角度 θ で入射した場合を考える。 U_s はホログラム面における信号光の複素光波分布を、 U_r はホログラム面における参照平面波の複素光波分布をそれぞれ指すとする、これらは以下の式によって表現されるとする。

$$U_s = a(x, y) \exp\{-i[kz + \varphi(x, y)]\} \quad (3.20)$$

$$U_r = b \exp\{-i[kz \cos \theta + kx \sin \theta]\} \quad (3.21)$$

ここで、 $a(x, y)$ と b は信号光と参照光の振幅分布、 $\varphi(x, y)$ は信号光の位相分布とする。今、ホログラム面は $z = 0$ の位置にあるとすると、 U_s と U_r は以下のように書き直せる。

$$U_s = a(x, y) \exp[-i\varphi(x, y)] \quad (3.22)$$

$$U_r = b \exp[-ikx \sin \theta] \quad (3.23)$$

これら二つの光波の干渉により以下に示すホログラムが求まる。

$$\begin{aligned} |U_s + U_r|^2 &= |U_s|^2 + |U_r|^2 + U_s U_r^* + U_s^* U_r \\ &= |a(x, y)|^2 + |b(x, y)|^2 + 2a(x, y)b \cos[kx \sin \theta + \varphi(x, y)] \end{aligned} \quad (3.24)$$

右辺の第1項と第2項は、不要な情報であるため取り除くことができ、上式は以下のように変形される。

$$A_s(x, y) = I_0 + 2a(x, y) \cos[kx \sin \theta + \varphi(x, y)] \quad (3.25)$$

ここで、 $A_s(x, y)$ はSLMに表示する振幅ホログラム、 I_0 は $A_s(x, y)$ を正に保つためのオフセット成分とする。上式によって計算された振幅ホログラム $A_s(x, y)$ をSLMに表示し、参照平面波を照射することで、実光学系上に任意の複素振幅を生成することができる。ただし、図3.9に示す通り、振幅ホログラムの透過光は0次光方向に $I_0 U_r$ 、+1次光方向に $U_s |U_r|^2$ 、-1次光方向に $U_s^* U_r^2$ をそれぞれ含むため、空間周波数領域で所望の+1次回折光成分のみを抽出する必要がある。

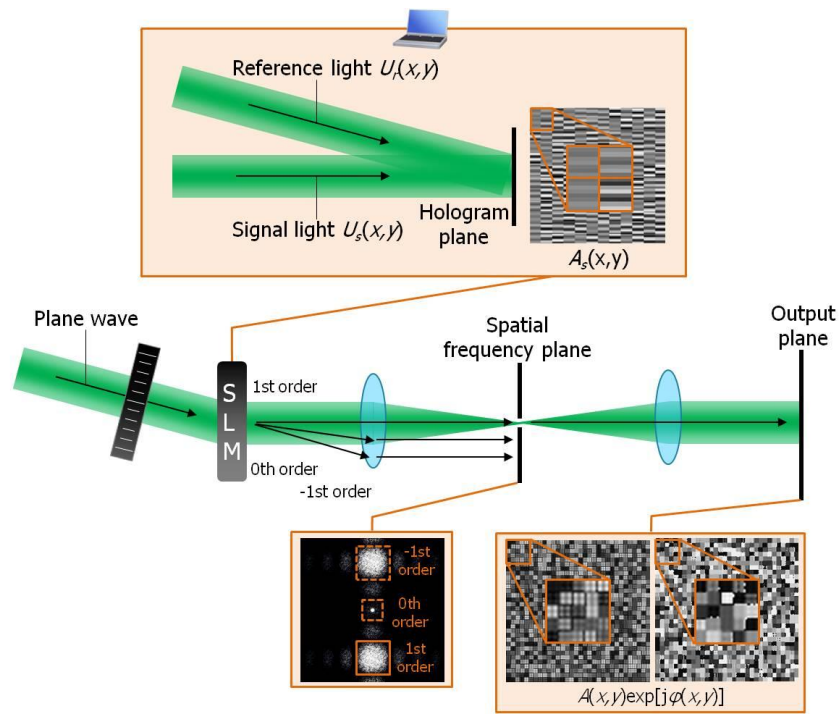


Fig. 3.9. Off-axis amplitude hologram.

3.2.4. 二重位相ホログラム

前節で紹介した軸外ホログラムでは、+1 次光に所望の複素振幅場を変調していた。一方の二重位相ホログラムでは、0 次光に任意の複素振幅場を変調することができる [11,12]。つまり、SLM への入射光と同軸方向に所望の複素振幅場を生成することができるため、より簡単な光学系で実現できる。また、本方式では、所望の複素振幅の内、位相成分は SLM によって直接表現し、振幅成分は位相格子の強さによって表現する。つまり、ホログラム面における各データピクセル領域に位相格子を形成し、その格子の強さによって振幅を制御する。

以下では、図 3.10 に示す概念図を用いて、二重位相ホログラムの動作について具体的に説明する。まず、所望の複素振幅 $a(x,y)\varphi(x,y)$ を以下に示す二つの位相値 $\theta_1(x,y), \theta_2(x,y)$ に分解する。

$$\theta_1(x,y) = \varphi(x,y) + \cos^{-1}[a(x,y)],$$

$$\theta_2(x,y) = \varphi(x,y) - \cos^{-1}[a(x,y)] \quad (3.26)$$

その後、図 3.10 に示すように、これらの二つの位相値を空間的に交互に配置したチェスボード位相パターンを生成し、これを SLM に表示する。図 3.10 を注意深く観察すると、各データピクセル領域に斜め方向の位相格子が形成されている。例えば、 $a(x,y) = 0$ の時、 $\varphi(x,y) - \pi/2$ と $\varphi(x,y) + \pi/2$ の位相値から成るバイナリー位相格子が生成され、この位相格子に入射される光波は全て高次方向へ回折される。同様に、 $a(x,y) = 1/2$ の時、 $\varphi(x,y) - \pi/3$ と $\varphi(x,y) + \pi/3$ の位相値から成る回折格子が形成され、この格子に入射する光波は、0 次方向と高次方向へそれぞれ 50% ずつ回折される。さらに、 $a(x,y) = 0$ の時は、アーコサイン成分が 0 になるため、位相格子が生成されず、全ての入射光波がそのまま 0 次方向へと透過する。以上のように、位相格子の強さを制御することで、0 次方向と高次方向へ回折する成分を調整する。空間フィルタリングによって高次成分だけをカットすれば、振幅を制御することが可能になる。

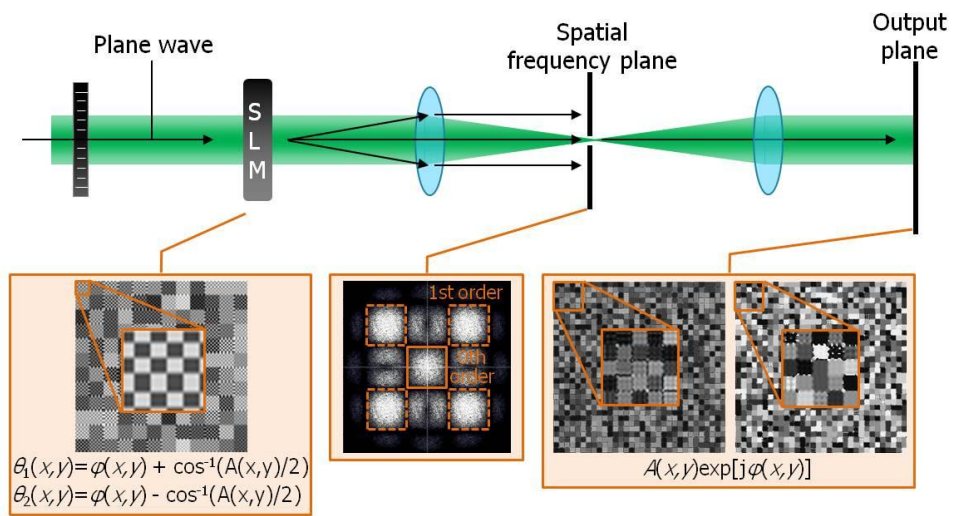


Fig. 3.10. Double phase hologram.

3.2.5. キノフォーム

複素振幅情報 $a(x,y)\phi(x,y)$ が十分に拡散性を有する場合、そのフーリエ変換スペクトル $F[a(x,y)\phi(x,y)]$ は一様に散乱した波面になる。「散乱波面において、位相分布は元物体のほとんど全ての重要な特徴を有しており、振幅分布は不要である」という光の性質を利用し、散乱スペクトル波面の位相分布のみ $\arg\{F[a(x,y)\phi(x,y)]\}$ を抽出し、これを SLM に表示する。以上がキノフォームによる複素振幅生成の概念である[13,14]。キノフォームは、軸外ホログラムや二重位相ホログラムのように、不要な回折次成分を持たないため、非常に光利用効率が高い。また、CGH 技術においてホログラム生成にかかる計算量は重要な課題であるが、この点においても、キノフォームは参照光の計算を不要とするため従来 CGH よりも優れている。しかしながら、キノフォームは、散乱波面をフーリエ変換によって求めており、ホログラム面(SLM 面)と像面はフーリエ変換の関係になる[図 3.11]。つまり、像再生領域が SLM 面に対するフーリエ領域に限定される。さらに、キノフォームでは、一様な散乱スペクトル波面を得るために、物体に細かいランダム位相を付加し、拡散性を持たせている。そのため、再生像には大きなスペックルノイズが発生する。

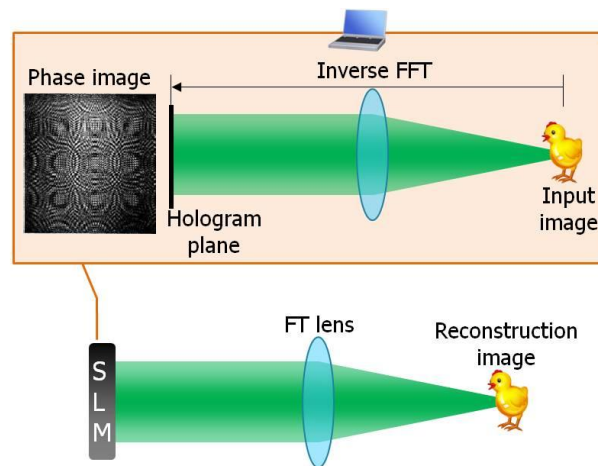


Fig. 3.11. Kinoform using Fourier transform lens

3.3 位相シフトデジタルホログラフィによる光複素振幅検出

光の複素振幅を検出する代表的な方法は、シャックハルトマンセンサ方式[15]や波面曲率センサ方式[16], 位相シフトデジタルホログラフィ等が挙げられる. 以下の節では, 光学研究者の間で, 最も馴染み深く, かつ, 最も利用されている位相シフトデジタルホログラフィ(PSI: Phase-shifting digital holography)について説明する. PSI は, 被計測光との干渉縞を生成する参照光に対して複数回の位相シフトを与えることで光複素振幅を検出する. この位相シフトを行う方法は, 大きく分けて時間位相シフト法と空間位相シフト法に分類することができる. 時間位相シフト法は, PSI における最も初期の形態であり, ピエゾ素子等による光遅延走査によって, 参照光に位相シフトを与える. それゆえ, 時間位相シフト法では, 複数回の干渉縞計測が求められる. これに対して, 空間位相シフト法では, SLM 等の空間位相変調デバイスを用いて, 参照光波面に空間的な位相シフトが与えられる. そのため, 空間位相シフト法における干渉縞計測は一回のみで良い. つまり, 時間位相シフト法では位相シフトを時間軸上で行い, 空間位相シフト法では位相シフトを空間軸上で行うことになる.

3.3.1. 時間位相シフト法

図 3.12 に時間位相シフト法の基本概念を示す[17]. 参照光路には一様な位相シフトを与えるピエゾ素子等を配置される. ピエゾ素子を光軸に沿って微小変位させることで参照光に対して一様な位相シフトを与え, 複数枚の干渉縞を複数回に分けて取得する. コンピュータ上に取り込まれた複数枚の干渉縞強度分布を以下に示す式に代入し, 複素振幅分布を求める.

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right]$$
$$a(x, y) \propto \sqrt{[I_4(x, y) - I_2(x, y)]^2 - [I_1(x, y) - I_3(x, y)]^2} \quad (3.27)$$

$a(x, y)$ は被計測光の振幅分布, $\varphi(x, y)$ は被計測光の位相分布とする. また, $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$, $I_4(x, y)$ は, それぞれ参照光に対する位相シフト量が 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$ の時の干渉縞強度である. 上式は 4 ステップアルゴリズムに基づいており, 3 ステップアルゴリズムや 2 ステップアルゴリズムを時間位相シフト法に適用することも当然可能である.

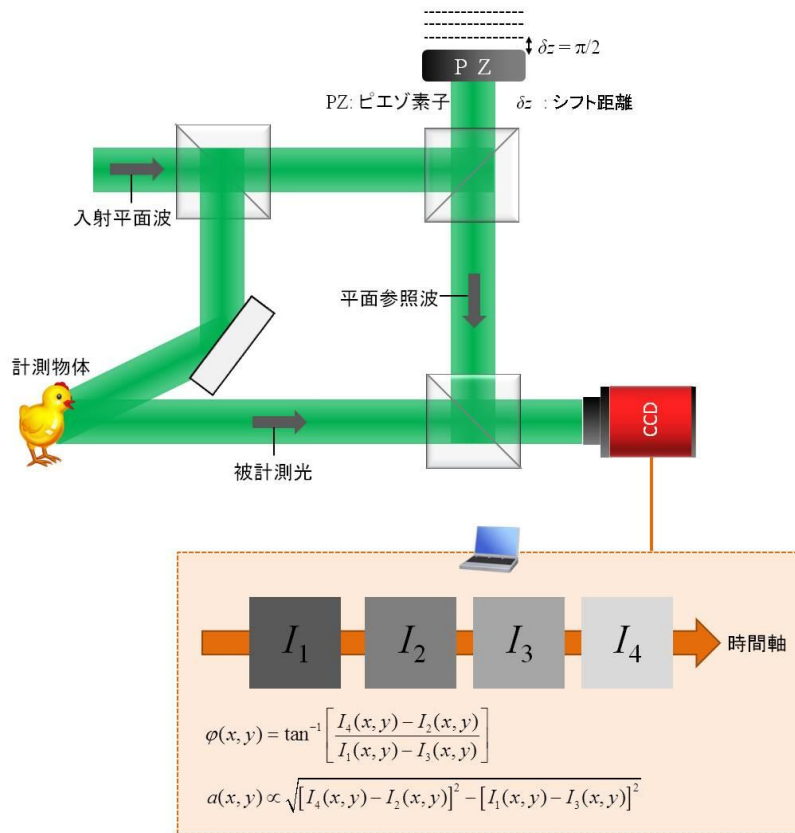


Fig. 3.12. Temporal phase-shift with piezo actuator.

3.3.2. 空間位相シフト法

空間位相シフト法では、参照光波面に対して一様ではない空間位相シフトを与えることで、上記した $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$, $I_4(x, y)$ 等の複数の干渉縞情報を全て含む一枚の干渉縞 $I_s(x, y)$ を撮像素子によって取得する[18]。コンピュータ内に取り込まれた一枚の干渉縞 $I_s(x, y)$ は $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$, $I_4(x, y)$ 等の複数枚の干渉縞に分解され、式(3.27)を用いることで光複素振幅分布が求まる。一様ではない空間位相シフトを参照光に与える方法は、位相変調型の SLM の利用が最も一般的であるが、SLM は非常に高価な電気光学素子である。そこで、より安価な素子によって空間位相シフトを生成する方法や物理的な空間位相シフト素子を用いることなく空間位相シフトを生成する方法がこれまでに検討されている。以下では、この空間位相シフトを与える興味深い幾つかの方法について述べる。

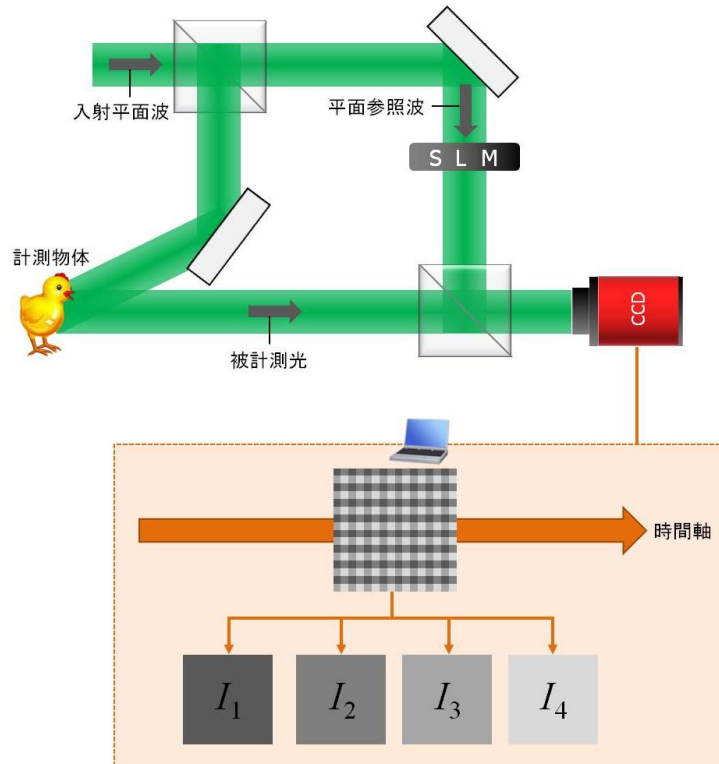


Fig. 3.13. Spatial phase-shift with spatial light modulator.

(i) 迂回位相効果による空間位相シフト

3.2.1 節のバイナリー迂回位相ホログラムで利用される迂回位相効果を応用することで、撮像素子面に空間位相シフト分布を与えることができる。図 3.14 に迂回位相効果による空間位相シフト法の概念を示す[19]。撮像素子面の法線に対して角度 θ だけ x 軸方向に傾いた平面参照光を照射する。この時、撮像素子面に到達する参照光波面は各 x 軸の位置において異なる光学位相を持つことになる。間隔 δx のサンプリング点間での位相シフト量は $\delta\phi = 2\pi\delta x \sin\theta/\lambda$ である。この時、各サンプリング点間での位相シフト量が $\delta\phi = \pi/2$ になるような入射角度 θ を設定することで、隣接した 4 点における参照光波面の位相は $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ となる。この方法は、空間位相シフトを与える物理的な素子が不要であるため、安価、かつ、簡易な光学系を実現できる。しかしながら、本方式では、空間位相シフトの方向が参照光の傾き方向に依存し、等方的な位相シフトを与えることができないため、一つの空間軸における空間解像度が大きく犠牲になる。

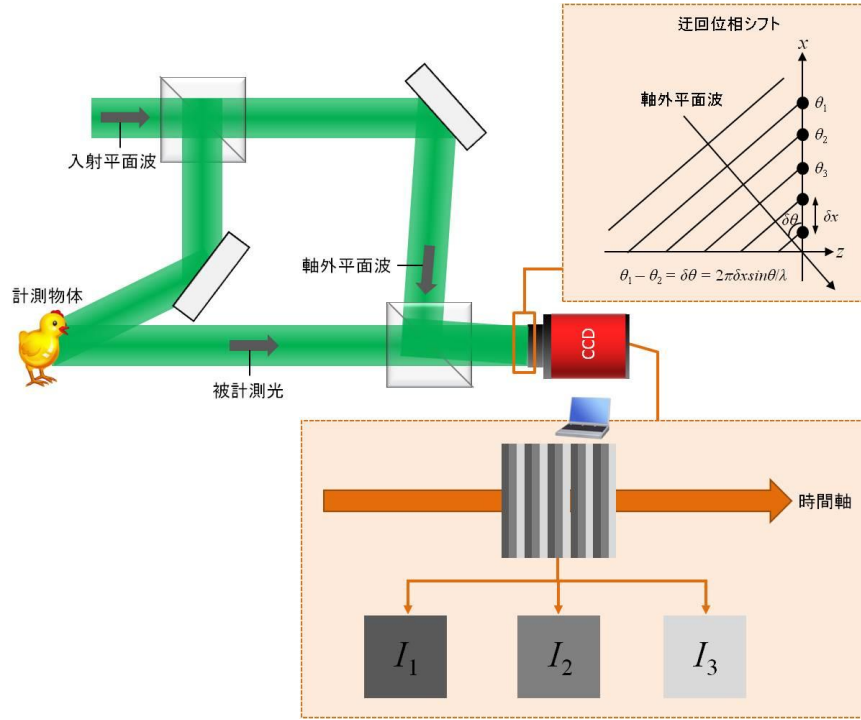


Fig. 3.14. Spatial phase-shift using detour phase effect.

(ii) ランダムディフューザによる空間位相シフト

参照光波面に与える空間位相シフト分布は必ずしも周期的である必要はなく、各空間位置で異なる位相を持っていれば複素振幅を計測することが可能である。この考えに基づいた方式がランダム位相参照光を用いた空間位相シフト法である[20]。図 3.15 はその概念を示しており、参照光路にランダムディフューザを配置することでランダムな参照光波面を生成する。

ここで、撮像素子面上における被計測光の振幅分布を $a_s(x,y)$ 、位相分布を $\varphi_s(x,y)$ 、ランダム参照光の振幅分布を $a_r(x,y)$ 、位相分布を $\varphi_r(x,y)$ とする。ここで、図 3.15 に示す様に、振幅分布 $a_r(x,y)$ を構成する各ピクセル内において、位相分布は $\varphi_{r1}(x,y)$, $\varphi_{r2}(x,y)$, $\varphi_{r3}(x,y)$, $\varphi_{r4}(x,y)$ を持つとする。ランダム参照光の振幅分布 $a_r(x,y)$ と位相分布 $\varphi_{r1}(x,y)$, $\varphi_{r2}(x,y)$, $\varphi_{r3}(x,y)$, $\varphi_{r4}(x,y)$ が既知である場合、以下に示す式によって被計測光の振幅分布 $a_s(x,y)$ と位相分布 $\varphi_s(x,y)$ を求めることができる。

$$\varphi_s = \tan^{-1} \left[\frac{(I_3 - I_4)(\cos \varphi_{r1} - \cos \varphi_{r2}) - (I_1 - I_2)(\cos \varphi_{r3} - \cos \varphi_{r4})}{(I_1 - I_2)(\sin \varphi_{r3} - \sin \varphi_{r4}) - (I_3 - I_4)(\sin \varphi_{r1} - \sin \varphi_{r2})} \right]$$

$$a_s = \frac{(I_1 - I_2)}{2a_r \left[(\cos \varphi_{r1} - \cos \varphi_{r2}) \cos \varphi_0 + (\sin \varphi_{r1} - \sin \varphi_{r2}) \sin \varphi_0 \right]} \quad (3.28)$$

なお、 I_1 , I_2 , I_3 , I_4 は、各位相値に対応する干渉強度とする。また、空間位置の座標 (x,y)

は省略している.

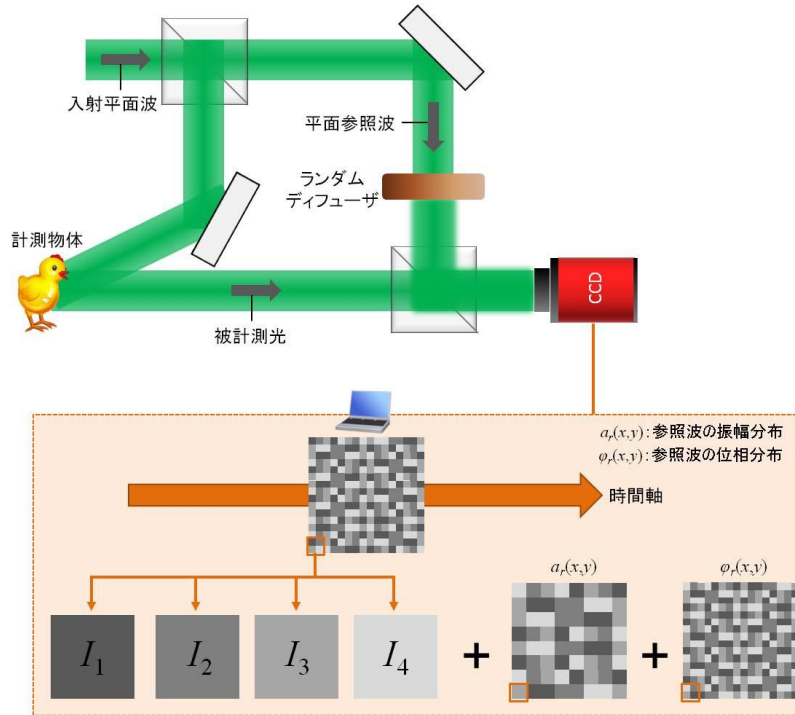


Fig. 3.15. Spatial phase-shift using random diffuser.

本方式の利点は、空間位相シフトを与える素子として SLM の代わりにすりガラスやファイバ等のランダムディフューザを用いることで、より安価な光学系を構築できる点にある。一方、本方式では、撮像素子面でのランダム参照光の複素振幅分布を予め計測しておく必要がある。また、本方式では、式(3.27)と式(3.28)を比較すると分かる様に、複素振幅を求めるための計算量が大きい。この他にも、本方式では、各ピクセル領域において参照光の位相が十分にランダムであると仮定しているが、実際には参照光波面の位相がほぼ一様になる計測領域も存在するため、複素振幅計測の精度が部分的に劣化する。

(iii)部分的タルボット効果による振幅格子を用いた空間位相シフト

ある周期構造体に対して平面波を照射し、観測位置がタルボット長($Z_T = 2L^2/\lambda$)の整数倍の時($Z = mZ_T$)、観測位置での透過光波場は周期構造体と全く同じものになる。つまり、レンズを用いなくてもこのような複製像が周期構造体の背後にいくつも出現する。このような現象はタルボット効果と呼ばれ、この効果によって生成される像はタルボット像と呼ばれる[21,22]。加えて、あるタルボット像から次のタルボット像の間に観察位置を置くと($Z = mZ_T + P$)、部分的タルボット効果という興味深い現象が起きる。例えば、平面波をバイナリー振幅格子に照射すると、部分的タルボット長において、幾つかの離散的な位相値からなる位相格子パターンを観察することができる。逆に、バイナリー位相格子に平面波を照射すると、部分的タルボット長において、位相格子パターンを観察す

ることができる。

文献[23]では、周期構造体としてバイナリ振幅格子を採用し、振幅格子と位相検出面の間の距離を部分的タルボット長 $Z = mZ_T + 1/4$ に設定することで、位相検出に必要な周期的空間位相シフト分布を形成している[図(3.16)]。本方式の利点は、空間位相シフトを与えるものとして、簡単かつ安価に生産することができる振幅格子を利用している点にある。一方で、振幅格子と位相検出面の間の距離、および、振幅格子の周期構造の正確さが位相検出の精度に大きく影響することに注意する必要がある。

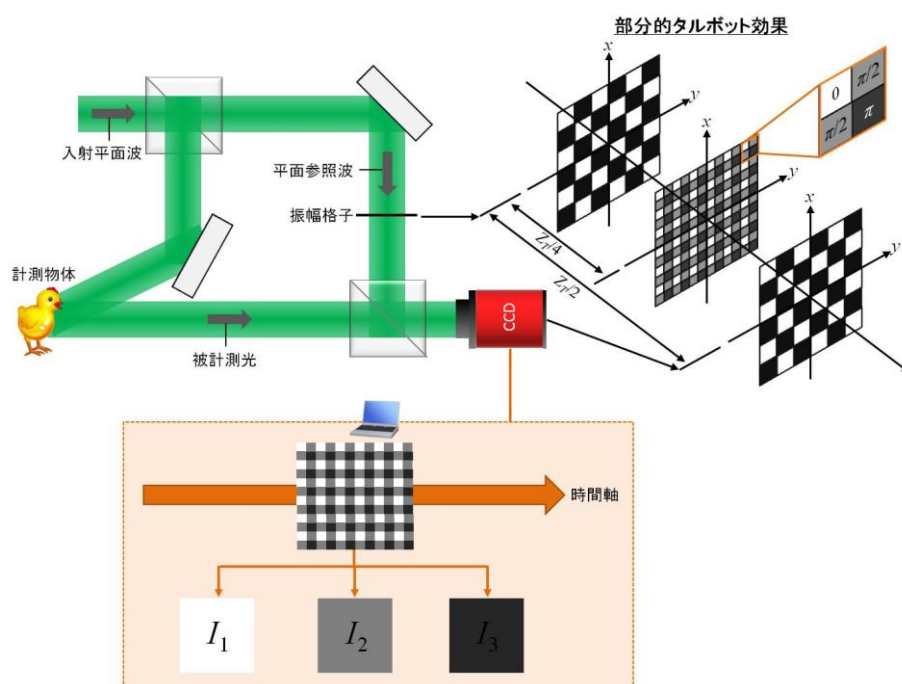


Fig. 3.16. Spatial phase shift using fractional Talbot effect.

3.3.3. ホログラフィックダイバーシティ干渉法

時間位相シフト法は計測時間を犠牲にし、空間位相シフト法は空間解像度を犠牲にする。これに対して、ホログラフィックダイバーシティ干渉法(HDI: Holographic diversity interferometry)では、複数の干渉縞を複数の撮像素子によって同時に取得するため、高速・高分解能な複素振幅計測が実現可能になる[24]。

図 3.17 に、2 ステップアルゴリズムを適用した HDI の基本形態を示す。被計測光は、1/2 波長板を透過し、P 偏光と S 偏光成分が 1:1 である 45 度直線偏光になる。一方の参照光は、1/4 波長板を透過し、円偏光に調整される。次に、BS によって被計測光と参照光が合波される。その後、被計測光が PBS を透過することで、撮像素子 1 に被計測光の P 偏光成分が、撮像素子 2 に被計測光の S 偏光成分が到達する。また、参照光が PBS を透過することで、撮像素子 1 に参照光の P 偏光成分が、撮像素子 2 に参照光の S 偏光成分が到達する。円偏光において P 偏光成分と S 偏光成分は相対的に $\pi/2$ の位相差があるため、撮像素子 1 と撮像素子 2 に到達する参照光には $\pi/2$ の位相差が生じている。これによって、撮像素子 1 と撮像素子 2 は、 $\pi/2$ の位相差を持った被計測光と参照光の干渉縞を同時に取得することができる。

撮像素子 1 と撮像素子 2 で計測される干渉縞強度分布をそれぞれ I_0 , $I_{\pi/2}$ とし、予め測定した参照光の強度分布を r_0 とすると、以下の式によって複素振幅 $a_s(x,y)\varphi_s(x,y)$ を求めることができる。

$$\varphi_s = \tan^{-1} \left(\frac{I_{\pi/2} - V_0}{I_0 - V_0} \right)$$

$$a_s(x,y) = \frac{\sqrt{(I_0 - V_0)^2 + (I_{\pi/2} - V_0)^2}}{2r_0} \quad (3.29)$$

ここで、 V_0 は

$$V_0 = \frac{I_0 + I_{\pi/2} + 2r_0^2 - \sqrt{(I_0 + I_{\pi/2} + 2r_0^2)^2 - 2(I_0^2 + I_{\pi/2}^2 + 4r_0^4)}}{2} \quad (3.30)$$

とする。

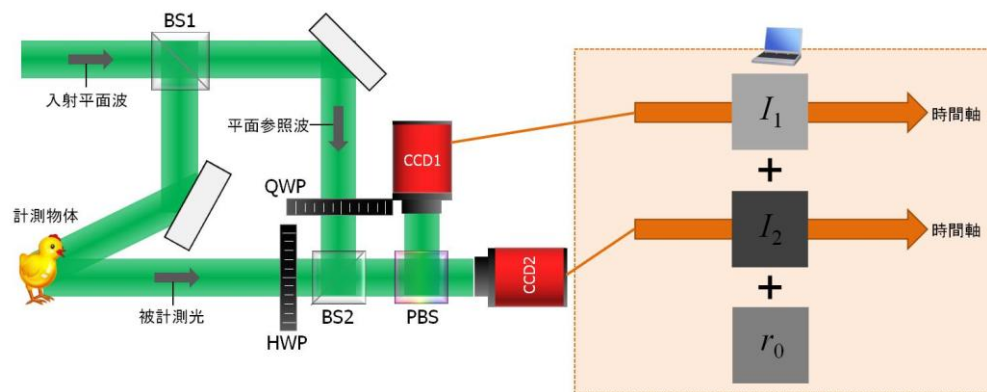


Fig. 3.17. Holographic diversity interferometry.

3.4 光複素振幅制御を用いた位相共役技術

以下ではまず位相共役光の性質について記述する．位相共役光とは，ある光波に対して，空間に依存する項が互いに複素共役であり，同一の波面を有し逆方向に伝搬する光波を指す[25]．位相共役光は，位相補正作用や時間反転性を有し，レーザーからディスプレイまで広い分野で応用されている[26,27]．通常の鏡により反射した光と位相共役鏡により反射した光の違いを図 3.18 に示す．図 3.18(a)に示す通常の鏡の場合，位相歪み物体を透過して波面の一部の位相が遅れた入射光に対して，反射光は鏡面により折り返した波面となる．反射光は，再び位相歪み物体を透過し，位相遅れは 2 倍になる．一方，図 3.18(b)に示す位相共役鏡の場合，位相共役鏡への入射光と同じ波面が逆方向に伝搬するため，再び位相歪み物体を透過した場合，波面の位相遅れは相殺される．このように，位相共役光は，入射波面の歪みに対する補正作用を有している．

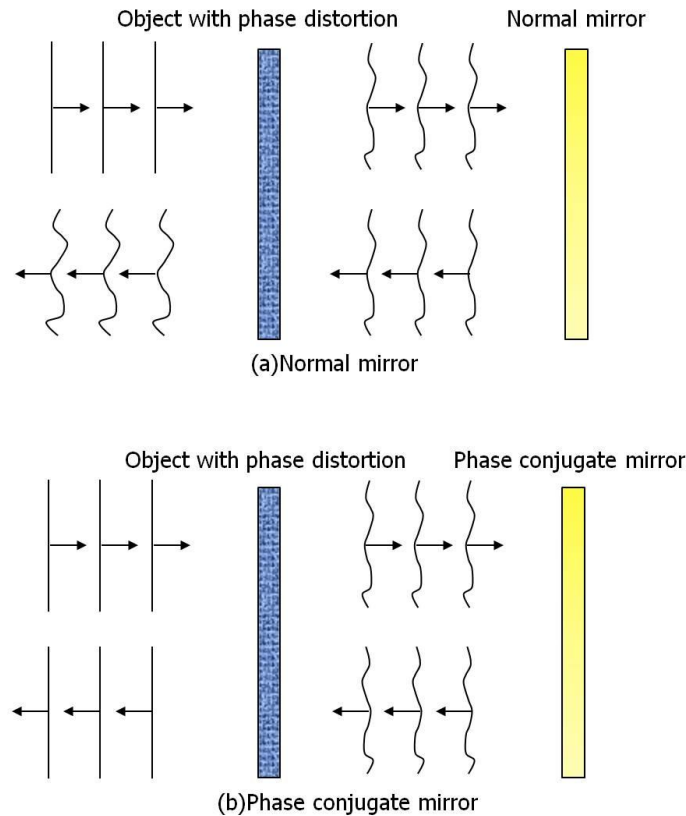


Fig. 3.18. Compensation effect of phase distortion by optical phase conjugate light.

位相共役光を純光学的に発生させる最も古典的な方法は，図 3.19 に示すフォトリフラクティブ結晶による 2 光波混合や 4 光波混合の利用である．しかしながら，この方法は，光学系の著しい大型化・複雑化を招く．入射光波自身によって位相共役波を発生させる自己励起型の場合，用いる光学系は非常にコンパクトであるが，逆に位相共役忠実度の劣化を招いてしまう[28]．また， BaTiO_3 等の通常のフォトリフラクティブ結晶を用

いる場合、位相共役光の発生に要する時間は秒単位と非常に遅いため、動的な位相補正等を行うことは難しい。加えて、反射光パワーと入射光パワーの比で定義される位相共役反射率は通常数十%である。ポンプ光のパワーを最適化することで、位相共役反射率を 100%以上にすることもできるが[29]、通常ポンプ光用の別光源が必要になる。

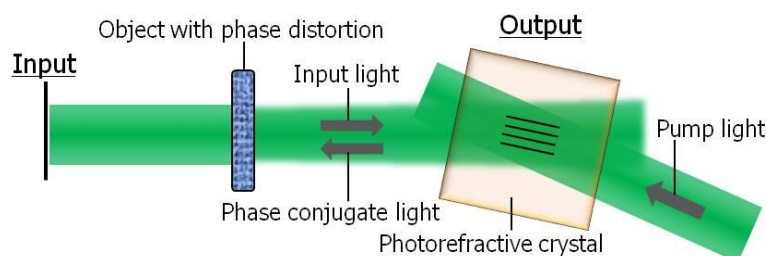


Fig. 3.19. Optical phase conjugation with photorefractive crystal.

これに対して、柔軟性や応答速度に優れた光複素振幅検出技術と生成技術に基づいたデジタル光位相共役鏡に最近注目が集まっている[30,31]。この位相共役鏡は、通常 SLM と CCD、BS の組み合わせによって構成される非常に簡素な光学系を持つ[図 3.19]。動作原理は非常に簡単で、CCD へ入射する光波の複素振幅を検出した後、コンピュータ上でその取得した複素振幅の位相共役を計算する。計算した位相共役な複素振幅を SLM によって光波に変調することで位相共役光を発生させる。このデジタル光位相共役鏡の応答速度は、SLM や SLM と CCD の応答速度に依存し、ms オーダーになると考えられる。従って、フォトリフラクティブ結晶よりこのデジタル光位相共役鏡の方が二桁程度高い応答速度を有していることになる。また、フォトリフラクティブ結晶のように波長依存性がほぼない点も大きな利点と言える。さらに、発生させる位相共役光のパワーは、入射光パワーに依存せず、自由に選択することができる点も大きな特色である。一方、入力光の空間解像度に制約があることはこの位相共役鏡の欠点と言える。デジタル光位相共役鏡の空間解像度は、SLM と CCD のそれに依存し、標準的には 1000×1000 ピクセル程度である。対して、フォトリフラクティブ結晶を用いた光位相共役鏡は、デジタル位相共役鏡と比べて、遥かに大きな空間解像度を有している。

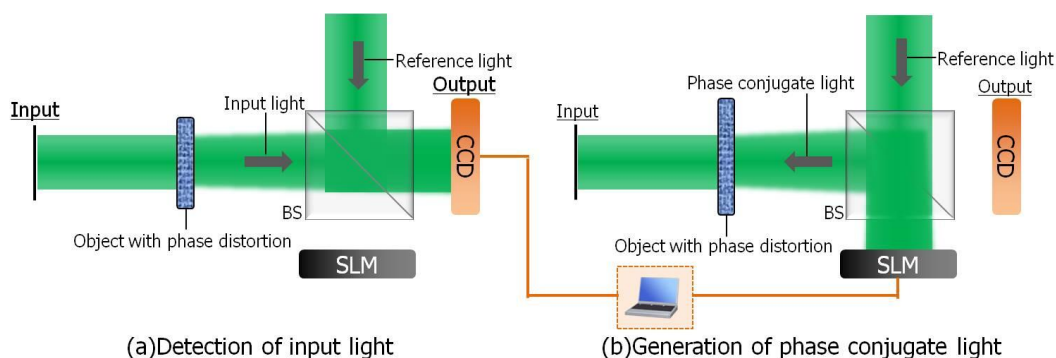


Fig. 3.20. Digital-optical phase conjugation using complex amplitude control technique .

位相共役伝搬を全てコンピュータ上で行う純粋なデジタル位相共役技術がいくつかの研究グループによって最近報告している[32,33]. 光学的に位相共役伝搬を行う場合、位相歪みが補正された波面は入力側でしか得られず、位相共役光による位相補正作用は閉ループである。従って、出力側で位相補正された波面を得るためには、出力側から予めパイロット光を射出し、入力側に位相共役鏡を設置しておく必要がある。そのため、出力側にもレーザー光源が必要になる。これに対して、デジタル位相共役技術では、入力光の複素振幅を検出した後、位相共役伝搬をコンピュータ上で仮想的に行う。そのため、単方向の光波伝搬が可能になり、光学システムもコンパクトになる。ただし、入力光が通過する光学系を予めコンピュータ上でモデル化しておかなければ、このデジタル位相共役伝搬は成立しない。図 3.21 に示す光学系の場合、入力面から位相歪み物体までの物理的距離や位相歪み物体の位相プロファイルが既知である必要がある。従って、モデル化が難しい光学システムの場合、デジタル位相共役技術の技術的難易度は高くなる。また、光学的な位相共役伝搬では、位相歪み物体に時間的な変動があっても、改めて位相共役光を発生させれば良い。つまり、位相歪み物体にどのような変動があるか意識する必要がない。これに対して、デジタル位相共役伝搬では、変動後の位相歪み物体を改めてコンピュータ上でモデル化する必要がある。従って、現実的には、デジタル位相共役伝搬に動的な特性を持たせることは難しいと考えられる。このように、フォトリフラクティブ結晶を用いた光学的位相共役、複素振幅制御技術に基づいたデジタル光位相共役、複素振幅検出技術に基づいたデジタル位相共役、それぞれの技術は利点と欠点を併せ持っており、用途に応じて使い分ける必要がある。

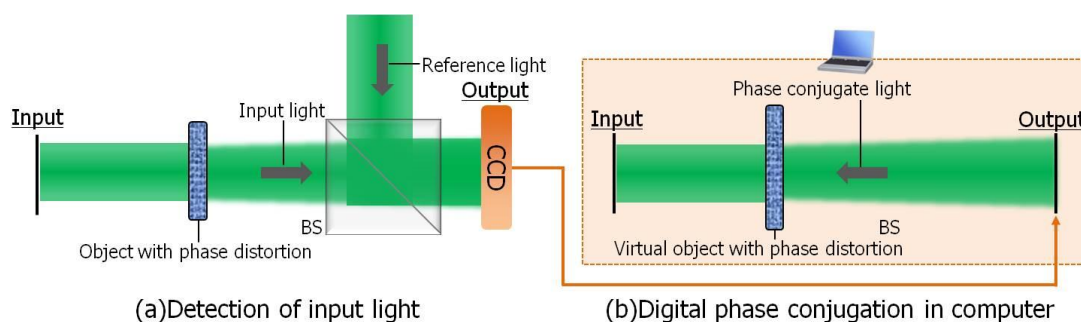


Fig. 3.21. Digital phase conjugation using complex amplitude detection technique.

参考文献

- [1] V. Oppenheim *et al.*, “The importance of phase in signals,” *Proc. IEEE*, **69**, pp. 529-541 (1981).
- [2] D. Leseberg *et al.*, “Computer-generated holograms of 3-D objects composed of tilted planar segments,” *Appl. Opt.*, **44**, pp. 2575-2579 (2005).
- [3] A. Tay *et al.*, “An updatable holographic three-dimensional display,” *Nat. Lett.*, **451**, pp. 694-698 (2008).
- [4] Y. Sando *et al.*, “Holographic three-dimensional display synthesized from three-dimensional Fourier spectra of real existing objects,” *Opt. Lett.*, **28**, pp. 2518-2520 (2003).
- [5] Z. Yaqoob *et al.*, “Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples,” *Nat. Photon.*, **2**, pp. 110-115 (2008).
- [6] L. G. Neto *et al.*, “Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled-mode liquid-crystal televisions,” *Appl. Phys.*, **35**, pp. 4567-4576 (1996).
- [7] R. D. Juday *et al.*, “Full complex modulation with two one-parameter SLMs,” *Proc. SPIE*, **1558**, pp. 499-504 (1991).
- [8] A. W. Lohmann *et al.*, “Binary Fraunhofer holograms, generated by computer,” *Appl. Opt.*, **6**, pp. 1739-1748 (1967).
- [9] W. H. Lee, “Sampled Fourier transform hologram generated by computer,” *Appl. Opt.*, **9**, pp. 639-643 (1970).
- [10] A. J. Macgovern *et al.*, “Computer generated holograms for testing optical elements,” *Appl. Opt.*, **10**, pp. 619-624 (1971).
- [11] T. Sarkadi *et al.*, “Spatial filters for complex wavefront modulation,” *Appl. Opt.*, **52**, pp. 5449-5454 (2013).
- [12] V. Arrizon *et al.*, “Complex modulation with a twisted-nematic liquid-crystal spatial light modulator: double-pixel approach,” *Opt. Lett.*, **28**, pp. 1359-1361 (2003).
- [13] L. B. Lesem *et al.*, “The kinoform: A new wavefront reconstruction device,” *IBM J. Res. Dev.*, **13**, pp. 150-155 (1969).
- [14] J. Amako *et al.*, “Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator,” *Appl. Opt.*, **30**, pp. 4622-4628 (1991).
- [15] J. W. Hardy *et al.*, “Adaptive optics for astronomical telescopes,” Oxford University Press, (1998)
- [16] F. Roddier *et al.*, “Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics,” *Appl. Opt.*, **27**, pp.1223-1225 (1988).
- [17] I. Yamaguchi *et al.*, “Phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.*, **22**, pp. 1268-1270

(1997).

- [18] Y. Awatsuji *et al.*, “Scheme to improve the reconstructed image in parallel quasi-phase-shifting digital holography,” *Appl. Opt.*, **45**, pp 968-974 (2006).
- [19] 高濱 祐史他, “任意位相シフト公式を用いたシングルショットデジタルホログラフィ,” OPJ2009 講演予稿集CD-ROM, 25aF6, (2009).
- [20] T. Nomura *et al.*, “Single-exposure phase-shifting digital holography using a random-phase reference wave,” *Opt. Lett.*, **35**, pp.2281-2283 (2010).
- [21] A. W. Lohmann *et al.*, “Array illuminator based on phase contrast,” *Appl. Opt.*, **27**, pp. 2915-2921 (1988).
- [22] C. Zhou *et al.*, “Simple equations for the calculation of a multilevel phase grating for Talbot array illumination,” *Opt. Commun.*, **115**, pp. 40-44 (1995).
- [23] L. M. Leon *et al.*, “Single-shot digital holography by use of the fractional Talbot effect,” *Opt. Express*, **17**, pp. 12900-12909 (2009).
- [24] A. Okamoto *et al.*, “Holographic diversity interferometry for optical storage,” *Opt. Express*, **19**, pp. 13436-13444 (2011).
- [25] P. Yeh, “*Introduction to photorefractive nonlinear optics*”, (John Wiley & Sons, Inc. 1993).
- [26] S. MacCormack *et al.*, “High-brightness output from a laser-diode array coupled to a phase-conjugating mirror,” *Opt. Lett.*, **18**, pp. 211-213 (1993).
- [27] T. Omatsu *et al.*, “Investigation of photorefractive phase conjugate feedback on the lasing spectrum of a broad-stripe laser diode,” *Opt. Commun.*, **146**, pp. 167-172 (1998).
- [28] J. Feinberg *et al.*, “Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection,” *Opt. Lett.*, **7**, pp. 486-488 (1982).
- [29] S. Mailis *et al.*, “High-phase-conjugate reflectivity (>800%) obtained by degenerate four-wave mixing in a continuous-wave diode-side-pumped Nd:YVO₄ amplifier,” *Opt. Lett.*, **24**, pp. 972-974 (1999).
- [30] M. Cui *et al.*, “Implementation of a digital optical phase conjugation system and its application to study the robustness of turbidity suppression by phase conjugation,” *Opt. Express*, **18**, pp. 3444-3453 (2010).
- [31] I. N. Papadopoulos *et al.*, “Focusing and scanning light through a multimode optical fiber using digital phase conjugation,” *Opt. Express*, **20**, pp. 10583-10590 (2012).
- [32] C. Barsi *et al.*, “Imaging through nonlinear media using digital holography,” *Nat. Photon.*, **3**, pp. 211-215 (2009).
- [33] A. Goy *et al.*, “Digital reverse propagation in focusing Kerr media,” *Phys. Rev. A*, **83**, 031802(1-4) (2011).

第 4 章

多層化コリニアホログラフィックメモリ

本章では，多層化コリニアホログラフィックメモリ (MCHM: Multilayer Collinear Holographic Memory) を新たに提案・検討する．MCHM は，従来のコリニアホログラフィックメモリ (CHM : Collinear Holographic Memory) に新たに多層化技術を導入することで，記録媒質の深さ方向 (z 軸方向) の記憶空間を効率的に活用することを可能にし，記録密度の大幅な拡大が期待できる．また，現行の多層 BD のように媒質側に構造的な負担を掛けずに，純光学的な多層化ホログラムをバルク媒質に形成できる点は MCHM の大きな特色である．物理的な層構造を有する記録媒質に MCHM を適用した場合は，それぞれの層に対して純光学的な多層化ホログラムを形成できる．一方，多層化技術を導入することで，記録・読出し光の焦点位置を従来の 2 次元ではなく 3 次元的に精密に調心する必要性が生じる．しかし，MCHM は，従来光ディスクドライブと浸透性が高い CHM を基礎にしているため，トラッキングやフォーカスサーボ技術をそのまま流用できる[1]．そのため，記録光の焦点位置を精密に制御でき，安定したホログラフィック記録・再生が実現できる．

4.1 節では，まず MCHM の基本動作と特長を説明する．4.2 節では，数値シミュレーションによって MCHM の基礎特性や性能評価を行う．具体的には，4.2.1 節において，まずシミュレーションモデルについて記述する．4.2.2 節において，記録媒質の厚さに対する横方向シフト選択性の変化を考察し，コリニア記録方式において記録媒質の厚さ領域が全く活かされていないことを明らかにする．4.2.3 節では，記録媒質の深さ方向のシフト選択性を示し，ホログラム多層化の有用性を示す．4.2.4 節では，ホログラムの多層化を行う上で懸念される層間クロストークの低減策として可動ランダム位相マスク (MRPM : Movable Random Phase Mask) の導入を提案する．4.2.5 節では，再生信号における SNR の閾値から記録可能なデータページ数の限界を求め，MCHM によって得られる HDS の記憶容量を示す．

4.1 多層化ホログラフィックメモリの基本動作・特長

図 4.1 に透過型 MCHM の模式図を示す．従来の CHM では，記録媒質の裏面に反射層を設け，反射光を CCD により検出することで，コンパクトな系を保っている．しかし，反射型光学系の場合，反射層から反射した光波と入射する光波の干渉縞，入射光波同士の干渉縞等，異なった種類の干渉縞が記録媒質に形成されてしまう．そのため，記録媒質に状態変化が起こった場合，異なった種類の干渉縞にそれぞれ異なる状態変化(縞の間隔や方向)をもたらす，補償技術を適用した場合でも再生品質の劣化が避けられなくなる[2]．対して，MCHM では，記録媒質の裏面に反射層を設けない透過型の光学系を想定している．これは，ホログラムの多層化を行う際，記録焦点スポットを記録媒質の深さ方向へシフトする必要がある，記録焦点スポットが反射面に存在しない場合 MCHM は正常に動作しないためである．従来の反射型 CHM と比較すると，光学系は若干大型化することになるが，上記した再生品質の劣化は原理的に起きない．

以下では，MCHM の基本動作を記述する．記録過程では，まず，参照光と信号光領域から構成されるコリニアパターンを SLM(空間光変調器)に表示する．入射光が SLM に照射させることで，データページを有する信号光とリング型の参照光が同軸上に生成される．これらを対物レンズを通して記録媒質に集光することで，ホログラムが記録される．面方向へ多重記録を行う場合，記録媒質を面方向へシフトすることで，異なるデータページをホログラムとして多重記録する．ホログラムを深さ方向へ多層記録する場合は，記録媒質を深さ方向へシフトすることで，異なるデータページをホログラムとして多層記録する．このように記録スポットを三次元的にシフトすることで，記録領域を均一的に使用する．読出し過程では，参照光パターンのみを SLM に表示することで，読出し参照光を生成する．参照光を対物レンズを通して記録媒質内のホログラムに照射することで，再生信号光を読み出す．この時，記録媒質の位置は，読出したいホログラムを記録した時と同じ位置に設定する．

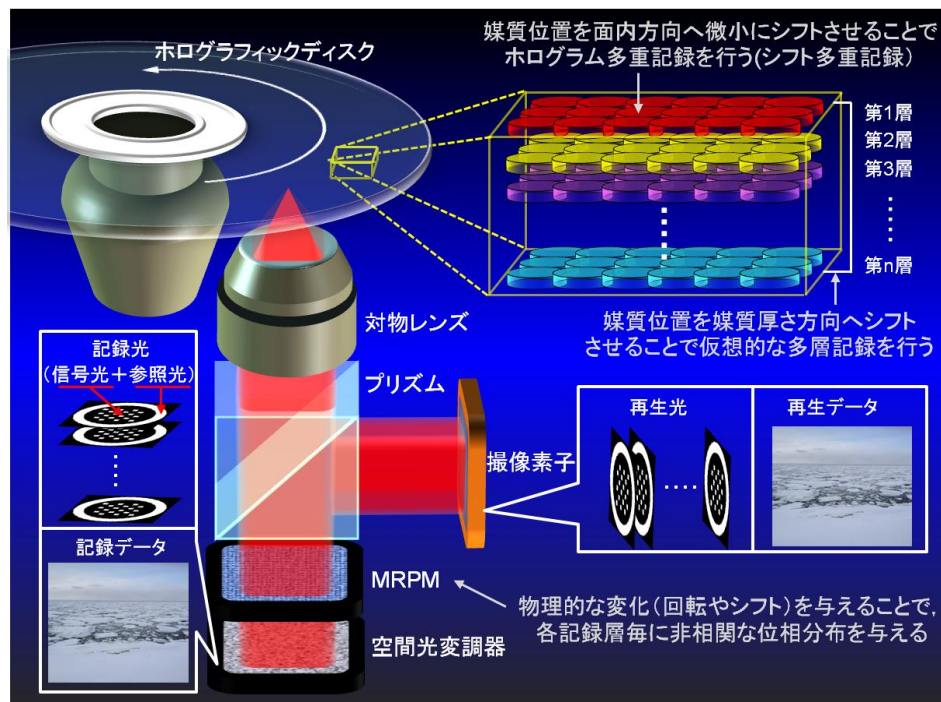


Fig. 4.1. Schematic of multilayer collinear holographic memory.

4.2 数値シミュレーション

4.2.1 シミュレーションモデル

4.2.1.1 三次元高速フーリエ変換ビーム伝搬法(FFT-BPM)

FFT-BPM では、光の伝搬過程を回折効果と位相回転効果とに分離することで近似計算を行う。基本式は複素振幅を $\phi(x, y, z)$ とすると以下の形になる。

$$\phi(x, y, z + \Delta z) = P(\Delta z/2)Q(\Delta z)P(\Delta z/2)\phi(x, y, z) \quad (4.1)$$

パデ式に対する均質媒質伝搬項 P と位相回転項 Q はそれぞれ次式のように表わせる[3]。

$$P(\Delta z/2) = \exp \left(-j \frac{\frac{\nabla_{\perp}^2 + k_0^2 n_a^2}{2k_0 n_0} \frac{\Delta z}{2}}{1 + \frac{\nabla_{\perp}^2 + k_0^2 n_a^2}{4k_0^2 n_0^2}} \right) \quad (4.2)$$

$$Q(\Delta z) = \exp \left[-jk_0 \left(\frac{n^2 - n_a^2 - n_0^2}{2n_0} \right) \Delta z \right] \quad (4.3)$$

n_0 は参照屈折率、 k_0 は真空中での波数ベクトル、 $\nabla_{\perp}^2$ は横方向のラプラシアンであり、それぞれ

$$n_0 = \frac{\iint \phi^* (\nabla_{\perp}^2 + k_0^2 n^2) \phi dx dy}{k_0^2 \iint |\phi|^2 dx dy} \quad (4.4)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.5)$$

$$\nabla_{\perp}^2 = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} \quad (4.6)$$

となる。ここで、 n は変調後の記録媒体における屈折率分布、 λ は光源波長である。 n_a は、参照屈折率 n_0 の値によらず、位相回転効果を小さく保つための変数であり、以下の式によって定義される。

$$n_a^2 = \frac{\iint n^2 |\phi|^2 dx dy}{\iint |\phi|^2 dx dy} - n_0^2 \quad (4.7)$$

以下では FFT-BPM における計算の流れを示す。

I. 入射面($z = z_0$)におけるスペクトル光波分布 $\tilde{\phi}(u, v, z_0)$ を入射光波分布 $\phi(x, y, z_0)$ の FFT によって計算する。

$$\tilde{\phi}(u, v, z_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x, y, z_0) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (4.8)$$

II. $z = z_0 + \Delta z/2$ におけるスペクトル光波分布 $\tilde{\phi}_{\text{before}}(u, v, z_0 + \Delta z/2)$ を均質媒質伝搬効果によ

って計算する.

$$\tilde{\phi}_{\text{before}}(u, v, z_0 + \Delta z / 2) = P(\Delta z / 2) \tilde{\phi}(u, v, z_0) \quad (4.9)$$

III. 上記スペクトル光波分布に対して逆 FFT を行い, その後位相回転効果を掛け合わせることで, 実光波分布 $\phi_{\text{after}}(x, y, z_0 + \Delta z / 2)$ を次式の形で得る.

$$\begin{aligned} & \phi(x, y, z_0 + \Delta z / 2) \\ &= \int \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\phi}(u, v, z_0 + \Delta z / 2) \exp[j2\pi(ux + vy)] dx dy \times \exp(-jk_0 \Delta n \Delta z) \end{aligned} \quad (4.10)$$

IV. 位相回転後の $z = z_0 + \Delta z / 2$ におけるスペクトル光波分布 $\tilde{\phi}_{\text{after}}(u, v, z_0 + \Delta z / 2)$ を FFT により求める.

$$\tilde{\phi}_{\text{after}}(u, v, z_0 + \Delta z / 2) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x, y, z_0 + \Delta z / 2) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (4.11)$$

V. $z = z_0 + \Delta z$ におけるスペクトル光波分布 $\tilde{\phi}(u, v, z_0 + \Delta z)$ を均質媒質伝搬効果によって計算する.

$$\tilde{\phi}(u, v, z_0 + \Delta z) = P(\Delta z / 2) \tilde{\phi}_{\text{after}}(u, v, z_0 + \Delta z / 2) \quad (4.12)$$

VI. 上記スペクトル光波分布に対して逆 FFT を行うことで, $z = z_0 + \Delta z$ における実光波分布 $\phi(u, v, z_0 + \Delta z)$ を得る.

$$\phi(x, y, z_0 + \Delta z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\phi}(u, v, z_0 + \Delta z) \exp[j2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (4.13)$$

以上が FFT-BPM における基本的な計算の流れである. FFT-BPM では, $z = z_0 + \Delta z$ における実光波分布を求める際, 1 レイヤの均質媒質伝搬の計算を $z/2$ に分割するスプリットステップ法を用いている.

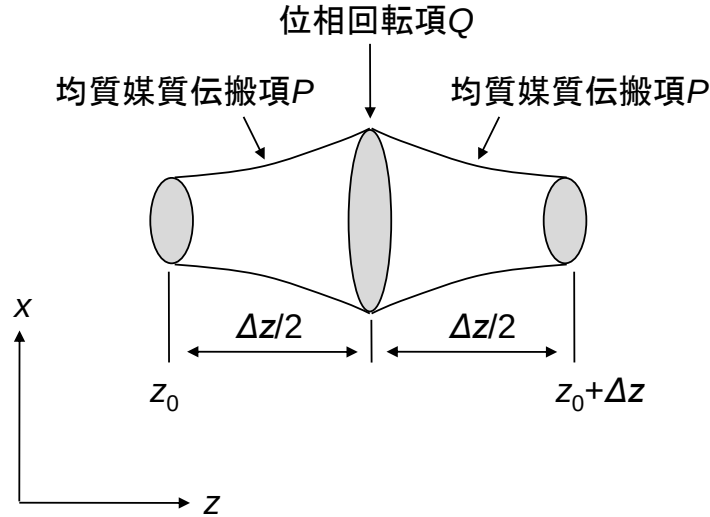


Fig. 4.2. Propagation model of FFT-BPM for single calculation layer.

4.2.1.2 記録モデル

SLM のピクセルサイズを l_{px} , ピクセル数を N_{px} とする. より精度が高い計算を行うために 1 ピクセルを N_1 個にオーバーサンプリングし, このメッシュのサイズを dx_1 とする.

$$dx_1 = l_{px} / N_1 \quad (4.14)$$

ここで, 入力データの分布だけではなく, その周りに 0 で埋められた新たなデータを加える (ゼロ詰めする, またはゼロパディングする). これは, 空間周波数領域におけるサンプリング間隔を狭める事で FFT の計算精度を高めるためである. 従って, 解析領域は, SLM 領域の N_2 (ゼロパディングレート) 倍に設定される. このことによって, 全体の解析サンプル数 N_x は以下のように定義される.

$$N_x = N_{px} N_1 N_2 \quad (4.15)$$

SLM によって与えられた記録光分布 $s_0(x)$ は, レンズのフーリエ変換作用によって得られるフーリエスペクトル分布 $s_1(x')$ と次式のような関係になる.

$$s_1(x') = \frac{1}{i\lambda f} F \left[s_0 \left(\frac{x'}{\lambda f} \right) \right] \quad (4.16)$$

SLM 面と記録フーリエ面における各格子点の座標値 x , x' は以下のように定める.

$$x = \left(i - \frac{N_x}{2} \right) dx_1, \quad x' = \left(i' - \frac{N_x}{2} \right) dx \quad (i, i' = 0, 1, \dots, N_x) \quad (4.17)$$

式(4.17)における dx はフーリエ面における格子点間隔 (刻み幅) を表わす. FFT を用いた場合, SLM 面での空間周波数領域における格子点間隔 du は以下の式になることが知られている.

$$du_1 = \frac{1}{N_x dx_1} \quad (4.18)$$

よって格子点 i における SLM 面の空間周波数 u_1 は式(4.19)のようになる.

$$u_1 = \left(i - \frac{N_x}{2} \right) du_1 = \frac{i - \frac{N_x}{2}}{N_x dx_1} \quad (4.19)$$

式(4.16)と式(4.19)より, 以下の関係式を導くことができる.

$$S_0 \left(\frac{x'}{\lambda f} \right) = S_0(u_1) \Leftrightarrow \frac{\left(i' - \frac{N_x}{2} \right) dx}{\lambda f} = \frac{i - \frac{N_x}{2}}{N_x dx_1} \quad (4.20)$$

この時に, $i = i'$ でなければこの関係式は満たされない場合が起こり, 計算誤差が生じてしまう. そのため, 記録フーリエ面の刻み幅 dx は $i = i'$ の際のもを常に用いており, 次式のように定義する[4].

$$dx = \frac{\lambda f}{N_x dx_1} = \frac{\lambda f}{l_{px} N_{px} N_2} \quad (4.21)$$

一方, z 軸方向の刻み幅 dz は,

$$dz = \frac{L}{N_z} \quad (4.22)$$

として表わされる. ここで, L は記録媒体の厚さ, N_z は z 軸方向のサンプル数である. z 軸方向の刻み幅に制限はないが, その値は波長の半分程度あれば十分に計算精度の高いものとなる.

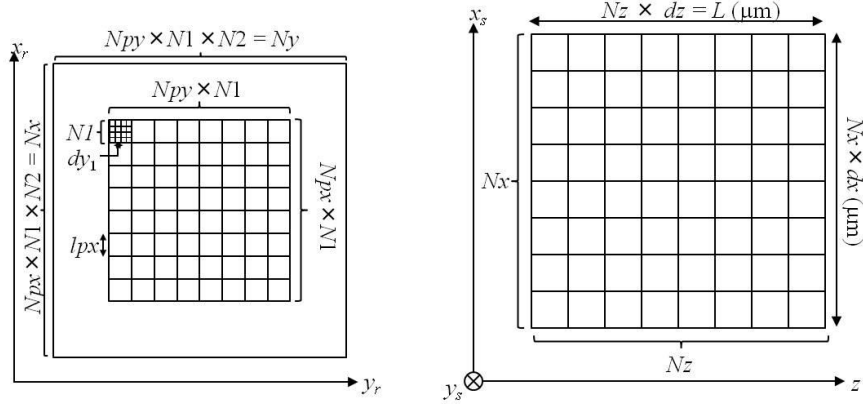


Fig. 4.3. Mesh layouts in real space and spatial frequency space.

本解析では, 記録媒体として厚さ L を有するフォトポリマーを想定しており, 屈折率分布は記録硬の露光量 $E(\text{J}/\text{cm}^2)$ に対して指数関数的に飽和すると仮定した. ここで屈折率分布は次式によって表される.

$$\Delta n(x, y, z) = \Delta n_{\max} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{\sum_{k=1}^N E_k}{E_r} \right) \right\} = \Delta n_{\max} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{E_N + \sum_{k=1}^{N-1} E_k}{E_r} \right) \right\} \quad (4.23)$$

ここで, $n_{\max}$ は屈折率変調量の最大振幅 (ダイナミックレンジ) を示し, E_{sat} は飽和エネルギー流束密度 (J/cm^2) である. 式(4.23)から, ホログラム多重記録時におけるフォトポリマーの屈折率分布は, N 回目記録における総露光量から求められることがわかる. しかし, ホログラム記録毎における露光量を残しておくのは計算メモリの無駄使いとなる. そのため, 本解析では $N-1$ 回目記録までの総露光量 $\sum_{k=1}^{N-1} E_k$ を $N-1$ 回目記録での屈折率分布から逆算して式(4.24)を導出する.

$$\sum_{k=1}^{N-1} E_k = -E_r \log \left(1 - \frac{\Delta n_{N-1}}{\Delta n_{\max}} \right) \quad (4.24)$$

そして, 式(4.24)を式(4.23)に代入することで N 回目記録における屈折率分布を求める.

$$\Delta n(x, y, z) = \Delta n_{\max} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{E_N - E_\tau \log \left(1 - \frac{\Delta n_{N-1}}{\Delta n_{\max}} \right)}{E_\tau} \right] \right\} \quad (4.25)$$

以下では，図 4.4 に示す光学モデルに対応させたシミュレーションの簡単な流れを示す．

記録過程

1. 0 と π の 2 値ランダム位相を持つリング型の参照光パターンを計算する．
2. 0 と 1 の 2 値強度情報を有するデータページを計算する．また，0 と π の 2 値ランダム位相を付加することで，集光面での強度ピークを分散させる．
3. 参照光パターンとデータページから構成されるコリニアパターンを SLM 面に配置する．
4. 入射光にコリニアパターンを変調することで，同軸上に信号光と参照光を生成する．
5. 高速フーリエ変換(FFT)により，信号光と参照光のフーリエ変換を行い，フーリエ領域における光波分布を求める．
6. 媒質内のある特定深さの記録位置(P_x, P_y, P_z)にフーリエ光波分布の中心を配置する．この位置が集光スポットになる．
7. 特定の位置(P_x, P_y, P_z)から媒質表面($P_x, P_y, 0$)までの逆伝搬計算を角度スペクトル法によって行い，媒質表面における入射光波分布を計算する．
8. 媒質表面($P_x, P_y, 0$)から裏面(P_x, P_y, L)までの伝搬計算を FFT-BPM により行う． L は媒質の厚さとする．
9. 媒質中の 3 次元的な光波分布が誘起する屈折率分布を計算する．光波分布から屈折率分布への変換は式(4-25)に従う．
10. 多重または多層記録を行う場合，上記過程 1~9 を繰り返す．異なるデータページを x 軸方向へ多重記録する場合は，集光スポット位置を(P_x, P_y, P_z)から($P_x + \Delta x, P_y, P_z$)にシフトする． y 軸方向へ多重記録する場合も， x 軸方向の場合と同様である．異なるデータページを z 軸方向へ多層記録する場合は，集光スポット位置を(P_x, P_y, P_z)から($P_x, P_y, P_z + \Delta z$)にシフトする．

4.2.1.3 読出しモデル

読出し過程

1. 記録過程において計算した参照光パターンを SLM 面に配置する．
2. 入射光に参照光パターンを変調することで，参照光を生成する．
3. 高速フーリエ変換(FFT)により，参照光をフーリエ変換し，フーリエ空間における光波分布を求める．

4. 読出したいホログラムを記録した時と同様の集光位置(P_x, P_y, P_z)に、フーリエ光波分布の中心を配置する。
5. 集光位置(P_x, P_y, P_z)から媒質表面 $P_z = 0$ での入射位置($P_x, P_y, 0$)までの逆伝搬計算を角度スペクトル法によって行い、読出し光波の入射分布を計算する。
6. 媒質表面($P_x, P_y, 0$)から裏面(P_x, P_y, L)までの伝搬計算を FFT-BPM により行う。
7. 媒質裏面(P_x, P_y, L)から集光位置(P_x, P_y, P_z)までの伝搬計算を角度スペクトル法によって行う。
8. IFFT により、CCD 面での回折光波分布を計算する。
9. 異なるデータページを読み出したい場合は、上記過程 1~8 を同様に行う。x 軸方向の異なるデータページを読み出すときは、集光スポット位置を(P_x, P_y, P_z)から($P_x + \Delta x, P_y, P_z$)にシフトする。異なる層に記録されたデータページを読み出すときは、集光スポット位置を(P_x, P_y, P_z)から($P_x, P_y, P_z + \Delta z$)にシフトする。

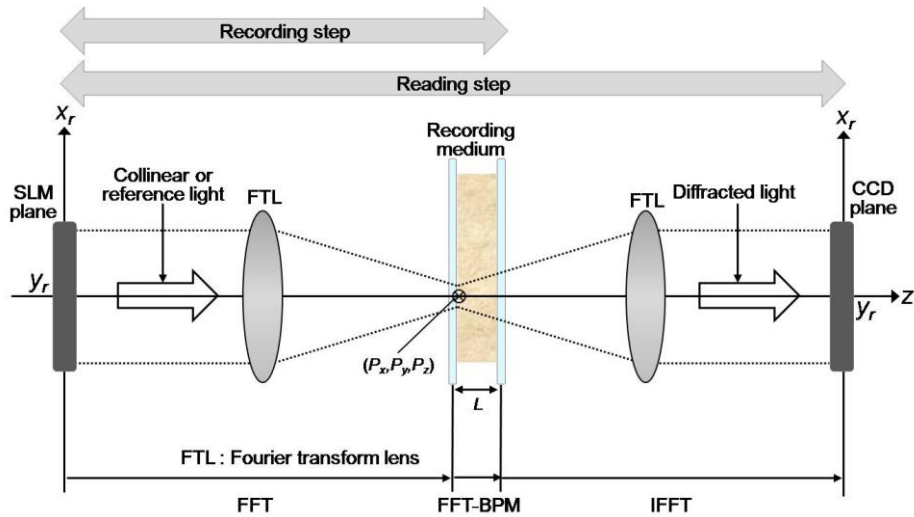


Fig. 4.4. Simulation model for multilayer collinear holographic memory.

表 I にシミュレーションパラメータを示す。実際的な HDS を想定し、光源波長は 408nm, 対物レンズの開口数(NA)は 0.54, 媒質の厚さは 600 μ m, データピクセルの数は 256 $\times$ 256 とする。各データピクセルは ON または OFF のランダム強度信号情報を有しており、ON ピクセル数と OFF ピクセル数の比率は 1:1 とする。また、記録フーリエ面での直流成分を除去するために、各データピクセルは 0 または π のランダム位相が付加されているとする。

Table I. Simulation parameters.

Wavelength, λ (nm)	408
Focal length, f (mm)	4.0
Numerical aperture of objective lens, NA	0.54
Index, n_o	1.5
Refractive index modulation depth, n_{max}	4.0×10^{-3}
Recording medium size, $W_x \times W_y \times L$ (μm^3)	$162.8 \times 162.8 \times 600$
Sample number, $x \times y \times z$	$512 \times 512 \times 400$
Step size, $dx \times dy \times dz$ (μm^3)	$0.318 \times 0.318 \times 1.50$
Pixel number of SLM, $N_{px} \times N_{py}$	256×256
Pixel pitch of SLM, $d_x \times d_y$ (μm^2)	20×20
Oversampling ratio, N_1	2
Zero-padding ratio, N_2	1
Diameter of inner (outer) circle of reference pattern to dimension of SLM	0.8 (1.0)
Total recording power, P_{in} (mW)	1
Saturation energy flux density, E_{sat} (J/cm^2)	0.46
Exposure time, t (s)	1

4.2.2 面内方向シフト選択性の媒質厚さ依存性

ここでは、コリニアシフト多重記録方式が媒質深さ方向を効果的に活用できないことを示す。図 4.5 に、記録媒質の厚さと x 軸方向シフト選択性の関係を表す。ここで、シフト選択性とは、読出し参照光のシフト距離に対する回折効率の第一零点のことであり、ホログラムを多重する間隔を決定するための重要な指標である。また、コリニアシフト多重記録は x 軸方向と y 軸方向のシフト選択性は等しいため、 y 軸方向シフト選択性の評価は省略する。図 4.5 を観察すると、厚さ $200\mu\text{m}$ の記録媒質において、回折効率の第一零点は参照光のシフト距離が約 $1.5\mu\text{m}$ の時である(この場合、シフト選択性は $1.5\mu\text{m}$ である)。さらに、記録媒質の厚さを $400\mu\text{m}$, $600\mu\text{m}$, $800\mu\text{m}$, $1000\mu\text{m}$ と変化させた時、 x 軸方向シフト選択性は約 $1.5\mu\text{m}$ から全く変化しなかった。この結果は、コリニアシフト多重記録におけるシフト選択性が記録媒質の厚さに依存せず、媒質の深さ方向が効果的に活用されていないことを示唆している。記録媒質が有する理論的な記録密度は、 L/λ^3 (L : 媒質厚さ, λ : 光源波長) のオーダーであり、記録媒質厚さに比例することから、深さ方向の記憶空間を効果的に活用できる多層化技術を導入することは記録密度の拡大に必要不可欠であることが分かる。

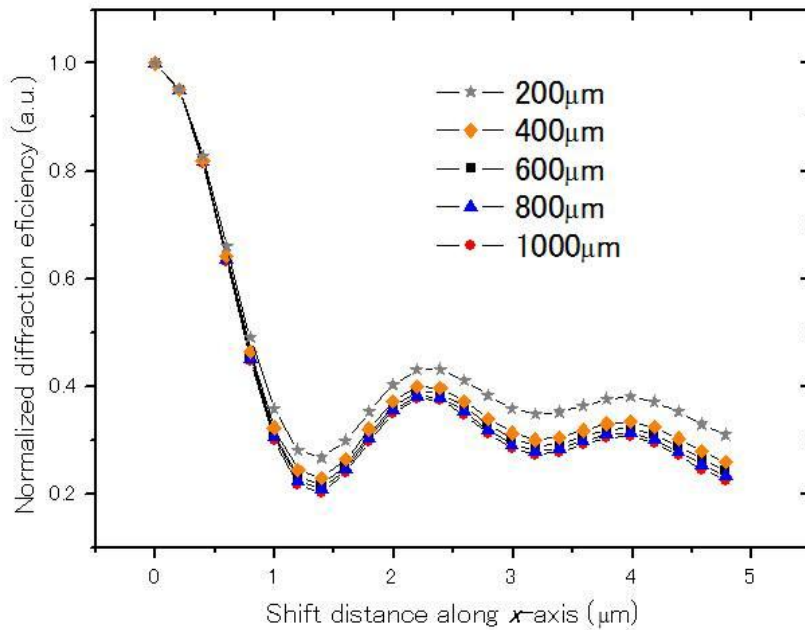


Fig. 4.5. Shift selectivity along x axis that depends on thickness of the medium.

4.2.3 媒質深さ方向のシフト選択性

ここでは、媒質深さ方向(z 軸方向)のシフト選択性を示し、ホログラム多層化の実現可能性を示す。 z 軸方向シフト選択性は、記録層の間隔を決定する重要な指標となる。図 4.6 に対物レンズの各 NA に対する z 軸方向シフト選択性を示す。NA の増大と共にシフト選択性が急激に改善されており、NA = 0.60 におけるシフト選択性は約 $5\mu\text{m}$ であった。この結果は、記録位置を z 軸方向へ約 $5\mu\text{m}$ 程度シフトすることで深刻なページ間クロストークを伴うことなく次のホログラムが書き込めることを意味している。また、この結果は、媒質のダイナミックレンジが無限という理想的条件下においては、約 $500\mu\text{m}$ の厚さを持つ媒質中に約 100 層の記録層を形成できることを示唆している。

MCHM におけるシフト選択性は、記録フーリエ面において参照光が形成するスペックルサイズによっても推測することができる。各軸方向の平均スペックルサイズを求める式は以下によって与えられる[5]。

$$a = \frac{1.22\lambda}{2NA} \quad (4.26)$$

$$b = \frac{8n\lambda}{(2NA)^2} \quad (4.27)$$

ここで、 a は面内方向である x - y 軸方向のスペックルサイズ、 b は z 軸方向のスペックルサイズ、 n は記録媒質の屈折率を表す。式(4.26)によると、 x - y 軸方向のシフト選択性は NA に反比例して改善する。式(4.27)によると、 z 軸方向のシフト選択性は、NA の二乗に反比例して改善する。つまり、NA の増加に伴うシフト選択性の改善の程度は、 x - y 軸方向よりも z 軸方向の方が大きいことが分かる。ここで、シミュレーション計算による z 軸方向シフト選択性と上式から導いた平均スペックルサイズの NA 依存性を図 4.7 に示す。NA の変化に対する z 軸方向シフト選択性とスペックルサイズの変化は同様の傾向を示すことが見て取れる。両者の値に若干のずれが生じているが、これは恐らくピクセル単位で制限された参照光のランダムパターンの影響と考えられる。

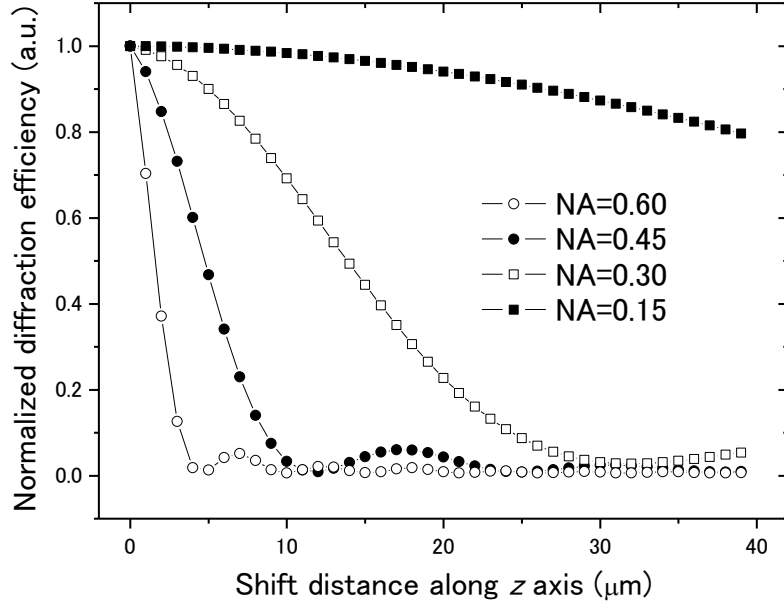


Fig. 4.6. Shift selectivity along z-axis that depends on NA of objective lens.

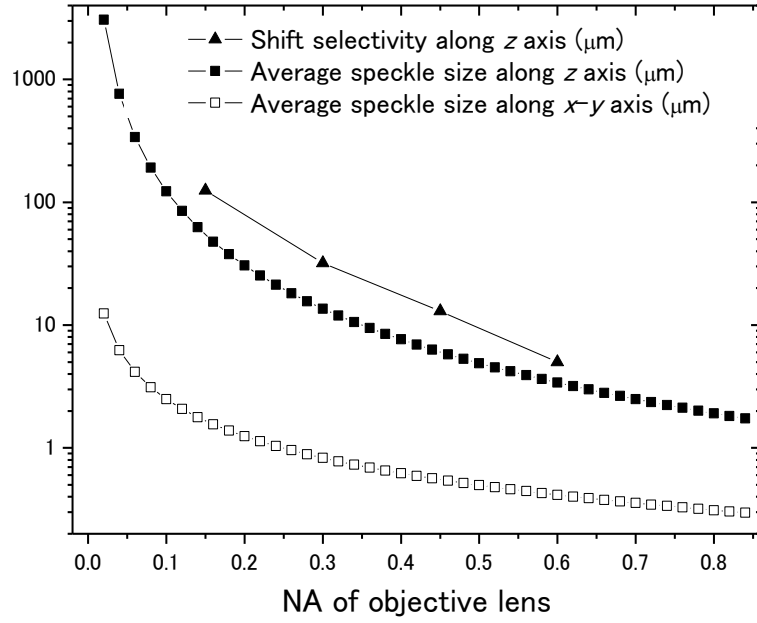


Fig. 4.7. Shift selectivity along z-axis by numerical simulation and average speckle size on recording plane.

4.2.4 層間クロストークの低減

4.2.4.1 可動ランダム位相マスクの導入

非再生層からのクロストークノイズ(層間クロストークノイズ)は再生品質を大きく低下させる．図 4.8 は層間クロストークノイズの概略を示している．まず，再生層におけるあるホログラム（黒色）を選択的に読み出すとする．この場合，読出し参照光は非再生層に記録されているホログラム（灰色）も同時に通過する．そのため，非再生層のホログラムから不要な回折光が生じ，それが純粋な再生信号光と共に CCD によって検出される．この不要な回折光は層間クロストークと呼ばれ，再生信号の品質を著しく劣化させる．HDS システムにおける記録密度は主に再生信号の品質によって決定されるため，この層間クロストークをできる限り抑制し，多層化技術の有用性を高めることが必要不可欠である．

そこで，MCHM に可動ランダム位相マスク(MRPM: Movable random phase mask)を導入し，層間クロストークノイズの低減を図る．4f 光学系を介した SLM 面と共役な位置に MRPM を配置し，MRPM の空間シフトによって各データページに対して異なるランダム位相パターンを付加する．このことによって，ホログラム同士の相互相関を低下させ，層間クロストークの低減を図る．

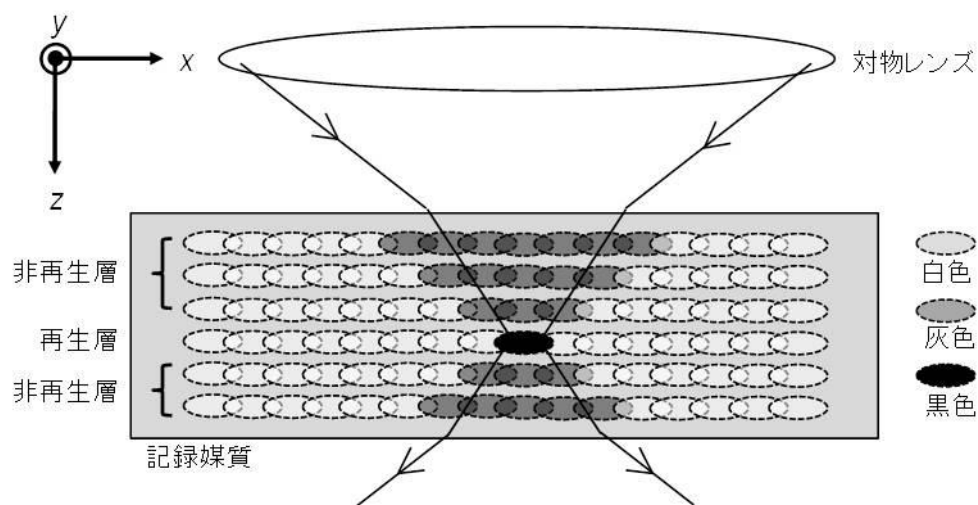


Fig. 4.8. Inter-layer crosstalk.

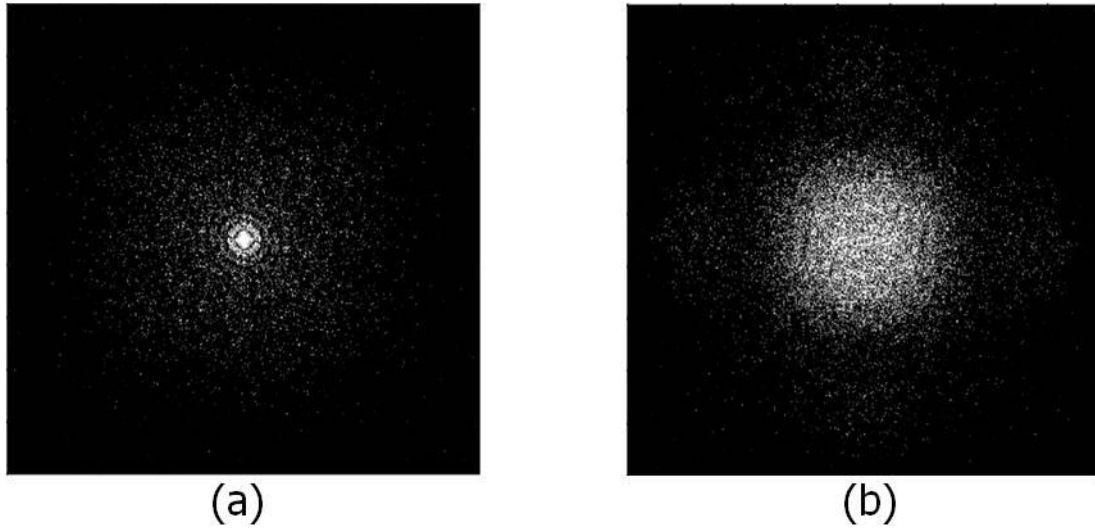


Fig. 4.9. Refractive index distributions on recording plane. (a)Locally-intense distribution. (b)Widely-scattered distribution.

4.2.4.2 層間クロストーク低減効果

図 4.10 では、読出し時に用いるランダム位相パターンが記録時と同一の場合と異なる場合において、回折効率特性を比較している．記録時と同一のランダム位相パターンを用いる場合、読出し参照光のシフトに応じて不要な回折光成分は周期的に大きく振動していることが分かる．この回折光成分は、ホログラムを多重記録する場合にクロストークノイズとして作用し、再生画像の品質劣化を招く．一方、記録時とは異なるランダム位相パターンを用いる場合、回折効率にサイドローブが全く発生していない．この結果によって、MRPM によって各記録層毎に非相関のランダム位相パターンを与えることで、層間クロストークを大幅に除去できることを明らかになった．

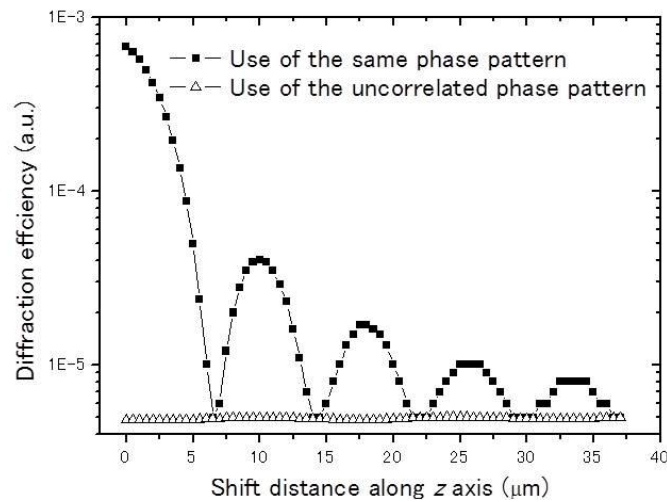


Fig. 4.10. Suppression effect of inter-layer crosstalk by MRPM.

4.2.4.3 MRPM による再生画像品質の改善

20 枚のデータページを多層化記録再生することで、MRPM が層間クロストークを低減可能にすることを明らかにする。再生品質を評価する指標として、以下で定義する信号対雑音比(SNR: Signal to noise ratio)を用いる。

$$SNR = \frac{I_{on} - I_{off}}{\sqrt{\sigma_{on}^2 + \sigma_{off}^2}} \quad (4.28)$$

I_{on} と I_{off} はそれぞれ ON ピクセルと OFF ピクセルの平均強度, σ_{on} と σ_{off} はそれぞれ ON ピクセルと OFF ピクセルの標準偏差を示す。

図 4.11 に示すページ配置に従って、 z 軸方向へ約 $15\mu\text{m}$ 間隔で 20 枚のデータページを多層記録し、各深さ位置に記録されたホログラムの再生品質を評価した。ここで、FRPM(位相マスクを固定する)の場合、各データページに対して同一のランダム位相パターンを与えるとする。一方、MRPM(位相マスクを可動にする)の場合、各データページに与えるランダム位相パターンは互いに相関のないものとする。図 4.12 は、各深さ位置に記録されたホログラムから再生した画像の SNR を表している。20 枚の再生ページにおける SNR 平均は、MRPM の場合 4.70, FRPM の場合 3.82 であった。この結果から、MRPM を導入することで、層間クロストークが抑制され、再生 SNR の改善に繋がることが明らかになった。

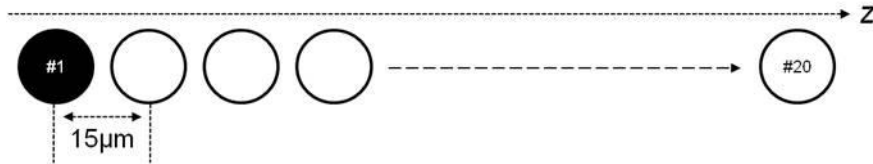


Fig. 4.11. Page layout along z -axis.

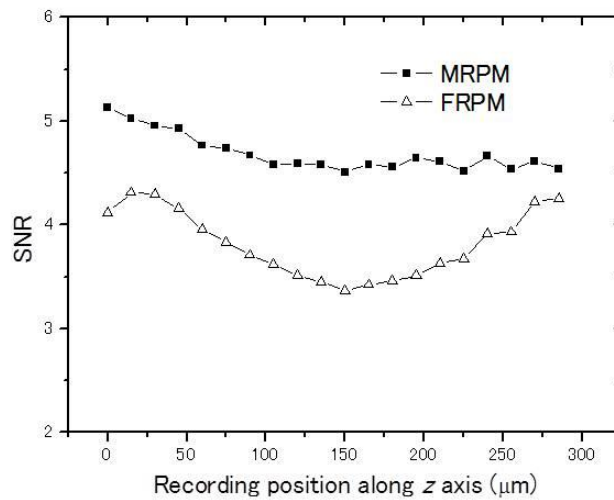


Fig. 4.12. Improvement effect of SNR by MRPM.

4.2.3 記録密度の改善

先述したように、ホログラムの多層化に伴い層間クロストークが発生するため、層数に比例して記録密度が改善される訳ではない。そこで、本節では、数値シミュレーションによって、最も記録媒質の利用効率が高くなる層数を明らかにし、最大でどの程度記録密度を拡大できるか示す。

4.2.3.1 ページ配置設計

ここでは、次節以降で議論する MCHM の性能評価に用いるページ配置を示し、それらの仕様について述べる。

図 4.13 に 4 種類の設計したページ配置をそれぞれ示す。図 4.13(a) のページ配置では、 x - y 軸方向へのコリニアシフト多重記録のみが実行される。一方、図 4.13(b), (c), (d) に示すページ配置では、 x - y 軸方向へのコリニアシフト多重記録と z 軸方向への多層化記録が行われる。多層数は、それぞれ 2 層、3 層、4 層とする。記録媒質の利用効率を公平に比較するために、全てのページ配置は、同じ記録体積 [$143.9 \times 143.9 \times 600.0 (\mu\text{m}^3)$] と記録データページ数(64 枚)を持っているとした。また、各ホログラムに割り当てられる露光量も一定としている。この様に設計されたページ配置を用いることで、純粋に媒質媒質の利用効率を比較することが可能になる。表 II に各ページ配置における詳細な仕様を示しておく。図 4.14 は上記ページ配置に従ったホログラム記録を行った際に媒質に誘起される屈折率分布断面を示す。

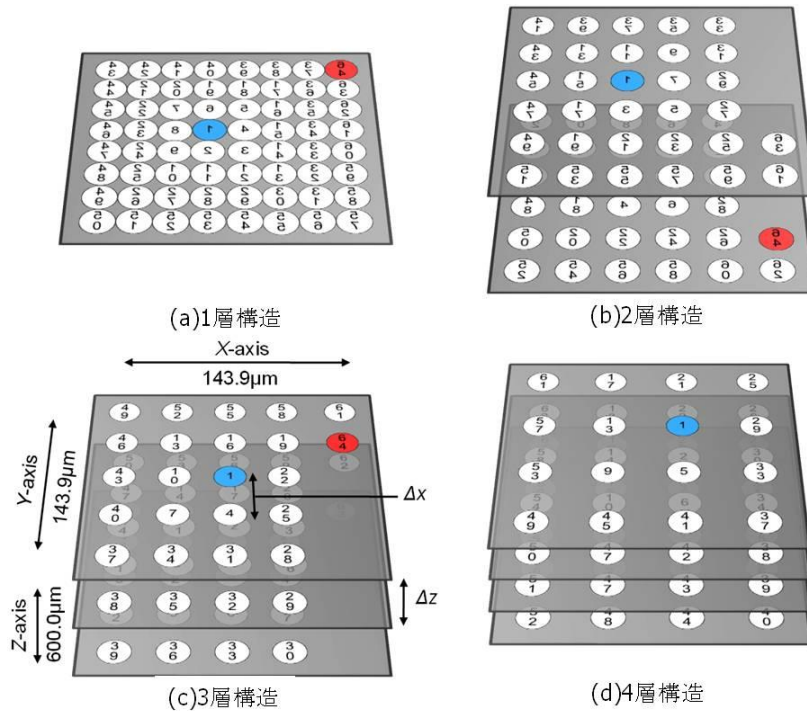


Fig. 4.13. Three-dimensional page layouts. (a) In the case of conventional CHM. (b)-(d) in the case of MCHM.

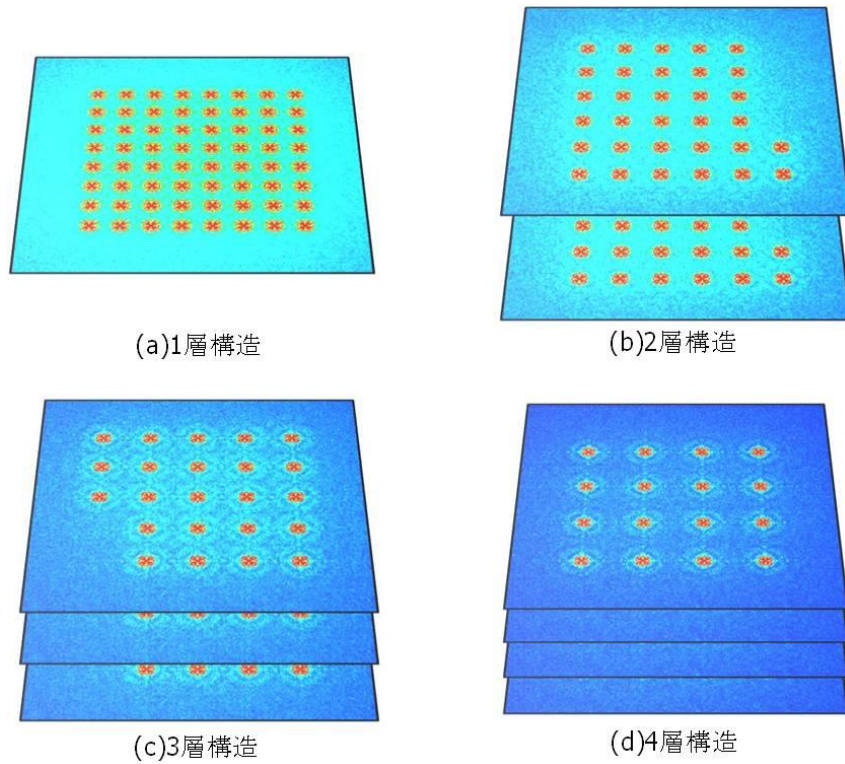


Fig. 4.14. Cross-section of refractive index distributions at each depth related with Fig. 4.13.

Table. II. Design specification of each page layout in Fig. 4.11.

Recording layouts	Shift pitch along x axis, Δx (μm)	Position of recording layer along z axis, $P_{N\text{th layer}}$ (μm)	Number of recorded holograms, $M_x \times M_y \times M_z$ (64)	Limited recording Volume, $Dx \times Dy \times Dz$ (μm^3)
(a)	1.91	$\times$	$(8 \times 8 \times 1)$	$143.9 \times 143.9 \times 600$
(b)	2.87	0, 600	$(6 \times 6 \times 2) - 8$	
(c)	3.51	0, 300, 600	$(5 \times 5 \times 3) - 11$	
(d)	4.45	0, 200, 400, 600	$(4 \times 4 \times 4)$	

4.2.3.2 再生画像品質の評価

初めに、前節で設計したページ配置に従う多層記録再生を行い、各ページ配置の媒質利用効率を比較する。図 4.15 は、記録データページ数 S に対する再生 SNR の変化を表している。各ページ配置の共通する傾向として、記録データページ数 S の増加に伴い、再生 SNR は徐々に低下していく。また、各ページ配置における $S = 64$ の SNR は、(a) の場合に 3.04、(b) の場合に 3.90、(c) の場合に 3.46、(d) の場合に 3.34 となった。また、(b) の場合における $S = 64$ の時の SNR 値は、(a) の場合における $S = 40$ 、(c) の場合における $S = 54$ 、(d) の場合における $S = 51$ の時の SNR 値と一致している。この結果から、設計したページ配置間では、二層構造を有するページ配置(b)が最も高い SNR を持つことが分かる。これは、ページ配置(b)が記録媒質全体にホログラムを最も均一に記録でき

るためと考えられる。

以下では、層数の増加に比例して媒質の利用効率が向上するわけではないという点について簡単に考察する。まず(a)と(b)間の結果の違いに着目する。図 4.14 に示す通り、面方向について、(a)は、(b)よりもホログラム多重数が多いため、面方向からのクロストークがより大きいと考えられる。一方、層方向に関しては、(a)は深さ方向からのクロストークは無いが、(b)は非再生層からのクロストークの影響を受ける。つまり、(a)は面方向のクロストークがより大きい、(b)は深さ方向のクロストークがより大きい。この両者の場合において、結果から推測すると、面方向からのクロストークが層方向からのクロストークより大きかったため、(a)は(b)よりも再生 SNR の点で劣ったと考えられる。(b)と(c)の結果の違いについても同様の推測をすると、(b)は、(c)よりも面方向からのクロストークはより大きい、層方向のクロストークはより小さい。つまり、層方向からのクロストークが面方向からのクロストークより大きかったため、(c)は(b)よりも再生 SNR の点で劣ったと考えられる。このように、層数に比例して媒質の利用効率が向上するわけではなく、面方向へのホログラム多重数と層方向へのホログラム層数を、クロストークが最小化されるように最適化する必要があることが分かる。

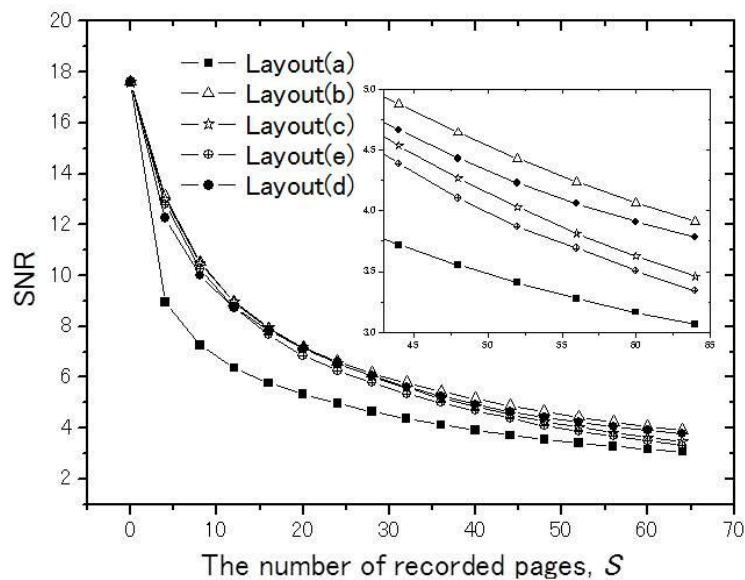


Fig. 4.15. SNR comparison between page layouts designed in Fig. 4.10.

4.2.3.1 記録密度の評価

本節では、図 4.15 の結果を受けて、コリニアシフト多重記録のみを用いるページ配置(a)とシフト多重記録と多層化技術を併用するページ配置(b)を達成可能な記録密度の点において比較する。具体的には、実際の HDS システムにおいて、最低限必要とされる再生 SNR は 1.0 とされているため[6]、この閾値を基準にとり、ページ配置(a)と(b)におけるデータページ数の限界を求める。図 4.16 によると、ページ配置(a)では、170 枚目のデータページを記録・再生した時点で再生 SNR は 1.0 に達した。一方、ページ配置(b)では、SNR の低下はページ配置(a)の場合と比較して緩やかであり、結果 325 枚のページを記録・再生した時点で再生 SNR は 1.0 に達した。以上の結果より、従来の CHM と比較して、MCHM は少なくとも 2 倍近い記録密度を達成できることが明らかになった。より高い NA を有する対物レンズやより厚みのある記録媒質を用いることで、MCHM による記録密度の拡大は 2 倍に留まらないと予想される。

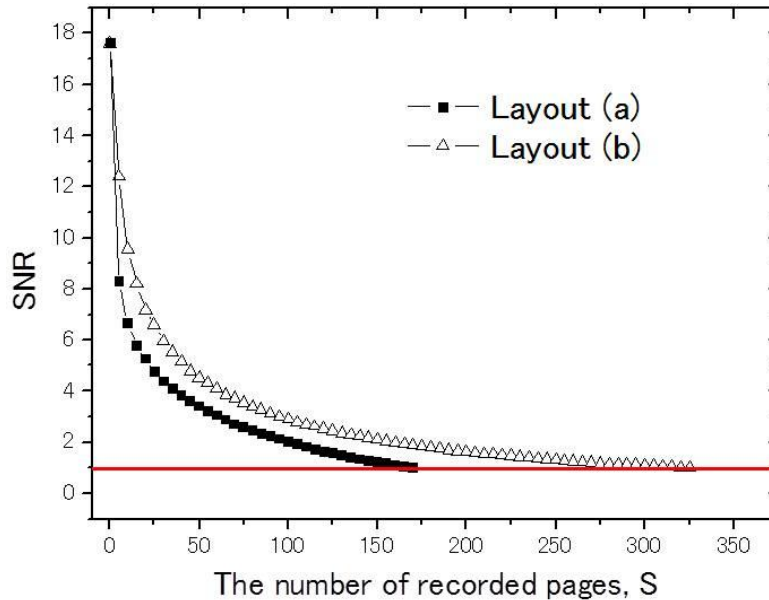


Fig. 4.16. Evaluation of the achievable number of pages.

4.3 実験

本節では、実験により、MCHM の再生特性を明らかにすると共に、層間クロストーク低減の効果を実証する。

4.3.1 実験光学系

実験パラメータは表 III に示している通りである。図 4.17 に本実験で用いたコリニアパターンを示す。コリニアパターンの直径を変化させることで、実効的な参照光開口数を変化させている。MCHM の再生特性を評価するための実験光学系を図 4.18 に示す。光源は 532nm の DPSS レーザ、最大出力は 200mW とする。本実験では、光パワーの損失を低減するために、SLM の代わりに OHP フィルムを用いた。記録時は、コリニアパターンが印刷された OHP フィルムを用いるとし、コリニアパターンは、参照光領域と信号光領域から構成される。参照光領域は全て ON ピクセルから構成されるリング型とする。信号光領域は、 32×32 のデータピクセルから構成され、0 または 1 のバイナリ強度変調を有する。OHP フィルムによってコリニアパターンが変調された光波(信号光と参照光)は、L1 と L2 から構成される $4f$ 光学系を介して可動ランダム位相マスク(MRPM)面に到達する。この MRPM は、層間クロストーク低減と直流成分除去の二つの役割を同時に有している。ピクセルサイズは $30 \times 30(\mu\text{m}^2)$ とし、各ピクセルは 0 または π の位相値を持つ。位相マスク面に到達した光波は、L3 と L4 から構成される $4f$ 光学系を介してビーム径が $1/2$ に縮小され、対物レンズ開口面に到達する。対物レンズの開口数(NA)は 0.65、焦点距離は 4.5mm、作動距離(レンズ表面から焦点位置までの距離)は 0.45mm である。対物レンズを通して、同軸上に配置された信号光と参照光は、記録媒質中に集光し、ホログラムが記録される。記録媒質は Inphase 社提供のフォトポリマーを用いており、厚さは $400\mu\text{m}$ とする。対物レンズの作動距離が 0.45mm であるため、記録媒質は接触しない程度に対物レンズに近づけて配置している。読み出し時は、参照光パターンのみが印刷された OHP フィルムを用い、参照光をフォトポリマー内に記録されたホログラムに照射する。ホログラムから回折した再生信号光は L5, L6, L7 を介して CCD によって強度情報が検出される。

Table III. Experimental parameters.

Wavelength of laser source	532
Focal length of objective lens	4.0
Numerical aperture of objective lens	0.65
Index of recording medium	1.5
Thickness of recording medium (μm)	400
Pixel number of data page printed on OHP film	32×32
Shape of reference pattern printed on OHP film	Ring of all white
Size of binary random phase mask (mm^2)	12×12
Pixel pitch of binary random phase mask (μm^2)	30×30
Pixel number of CCD (μm^2)	1280×960
Entire size of CCD (mm^2)	5×5

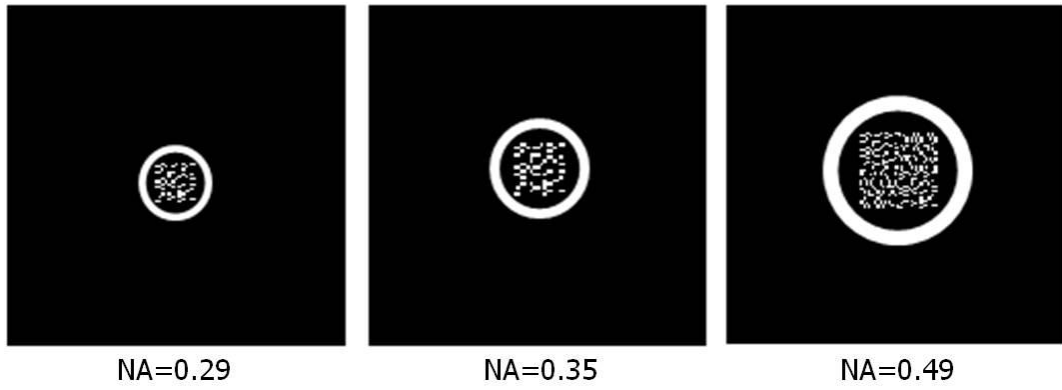


Fig. 4.17. Collinear patterns for each NA of reference light By changing diameter of collinear pattern, reference NA can be changed.

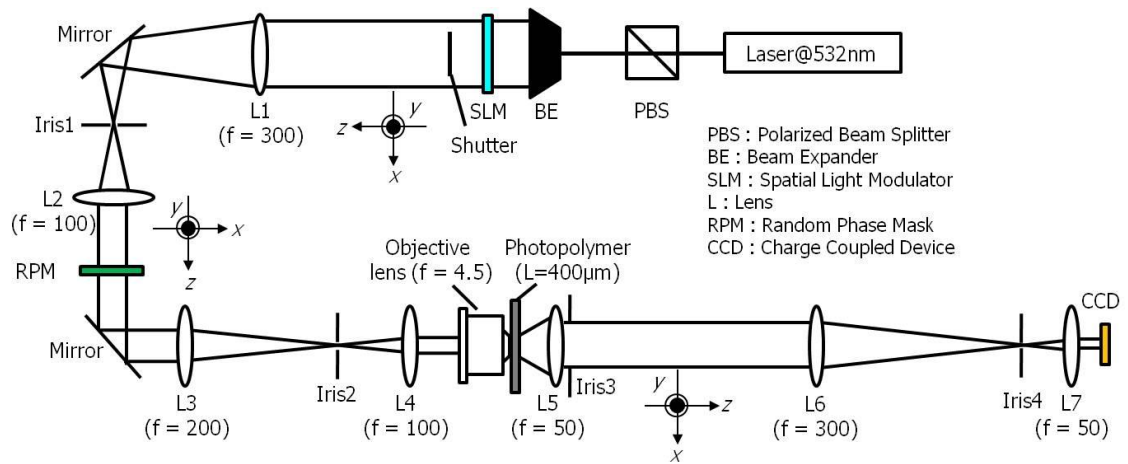


Fig. 4.18. Experimental setup.

4.3.2 実験方法

まず、多層記録の実験方法について記述する．最初に、データページ#1 と参照パターンから構成される OHP フィルム#1 を用意し、入射光に変調する．OHP フィルムによって生成された信号光と参照光は、MRPM 面に到達し、ランダム位相パターン#1 が付加される．その後、信号光と参照光は、対物レンズを介して記録媒質に照射され、ホログラム#1 が記録位置#1 に記録される．その後、次のホログラムを記録するために、MRPM の空間的位置を相関が無くなるまでシフトする．また、記録媒質の位置も、光軸方向(z 軸方向)へ 50 μ m シフトする．データページ#2 と参照パターンから構成される OHP フィルム#2 を用意し、入射光に変調する．OHP フィルムによって生成された信号光と参照光は、MRPM 面に到達し、ランダム位相パターン#2 が付加される．その後、信号光と参照光は、対物レンズを介して記録媒質に照射され、ホログラム#2 が記録位置#2 に記録される．以上の動作を、データページ#3～#5 に対しても繰り返すことで、5 枚のホログラムが 50 μ m 間隔で多層記録される．ここで、ホログラム#1～#5 の記録時間は、全て 5 秒で統一した．また、ポリマー化の反応を完全に終了させるために、記録間隔を約 10 分確保した．記録光(信号光と参照光)パワーは 1.0mW であった．

次に、多層化記録されたホログラムの再生手順を示す．MRPMと記録媒質をそれぞれ位置#1に戻す．参照パターンのみから構成されるOHPフィルムを用意し、入射光に変調する．OHPフィルムによって生成された参照光は、MRPM面に到達し、ランダム位相パターン#1が付加される．その後、参照光は、対物レンズを介して記録媒質に照射されることで、ホログラム#1が読み出され、回折した再生信号光#1がCCDによって検出される．同様に、MRPMと記録媒質をそれぞれ位置#2にシフトする．OHPフィルムによって生成された参照光は、MRPM面に到達し、ランダム位相パターン#2が付加される．その後、参照光は、対物レンズを介して記録媒質に照射されることで、ホログラム#2が読み出され、回折した再生信号光#2がCCDによって検出される．以上の動作を繰り返すことで、再生信号光#3～5も得ることができる．なお、読み出し用の参照光パワーは5 μ Wに減衰させており、これは読み出し過程で、記録媒質に不要なホログラムが形成されることを避けるためである．

4.3.3 媒質深さ方向のシフト選択性

図 4.19 に参照光の NA に対する z 軸方向のシフト選択性を示す。結果を見ると、参照光 NA が大きくなるにつれて、 z 軸方向シフト選択性が改善されていることが分かる。また、NA が 0.29, 0.35, 0.49 のとき、 z 軸方向シフト選択性はそれぞれ $55\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$, $14\mu\text{m}$ であった。NA = 0.35 の場合の結果を見ると、媒質を元の記録位置から $5\mu\text{m}$ シフトさせた時に回折効率が最大になっているが、本来は $0\mu\text{m}$ の時(記録時と同じ位置)に最大になるはずである。これは、フォトポリマーの収縮または膨張によってホログラムの再生条件が変化したからと考えられる。図 4.20 に、本実験と等価な条件で計算したシミュレーション結果を示す。おおよそのシフト選択性は、全ての NA において、実験結果と一致していることが見て取れる。図 4.21 は、シフト距離に対する再生像の変化を示している。参照光 NA は 0.49 とする。シフト距離が $0.0\mu\text{m}$ (元の記録位置)のとき、二値構造が明確に観察されるが、シフト距離を少しずつ伸ばしていくと、再生像は急激に弱くなっている。特に、シフト距離が $10\mu\text{m}$ を超えると、ほぼホログラムから再生像が回折されないことが分かる。

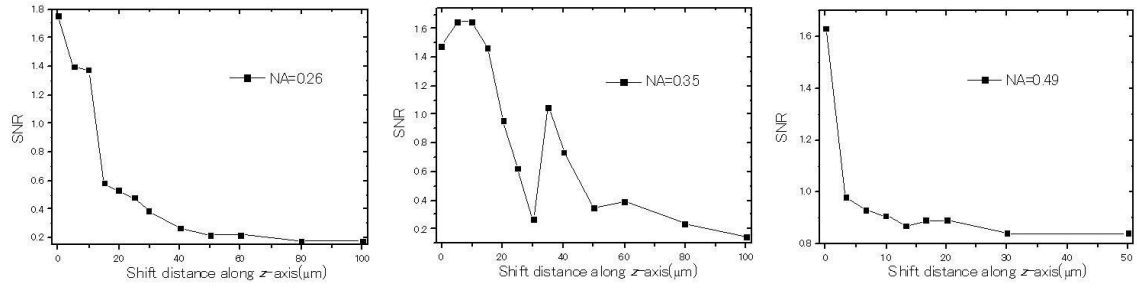


Fig. 4.19. Shift selectivity along z-axis for each reference NA by experiment.

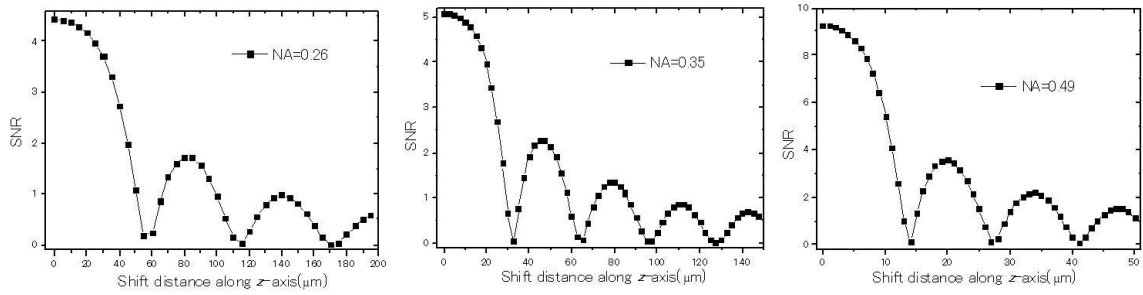


Fig. 4.20. Shift selectivity along z-axis for each reference NA by simulation.

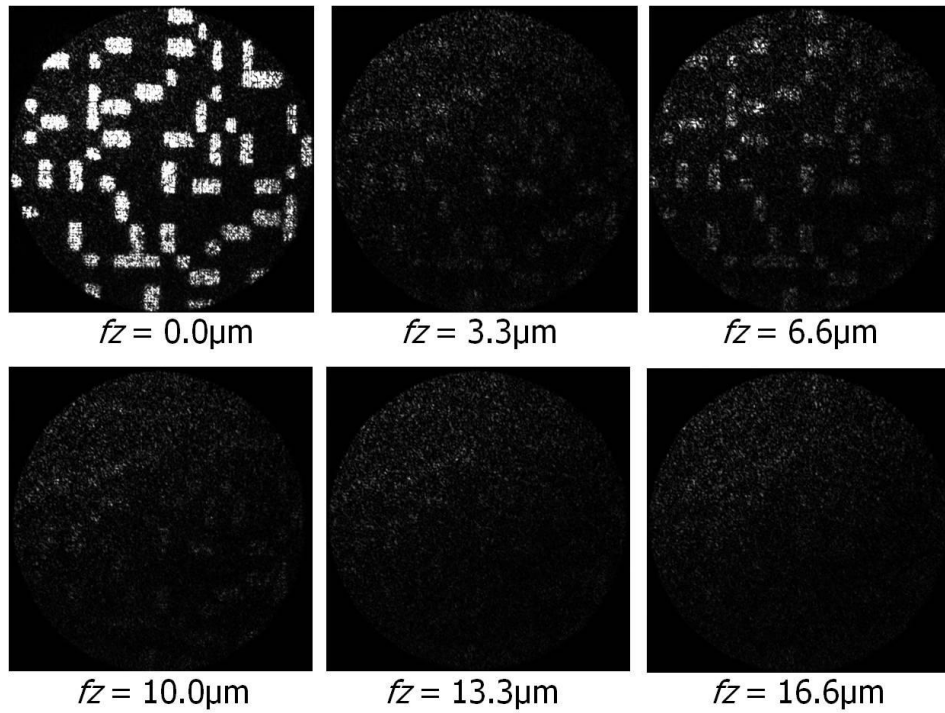


Fig. 4.21. Reconstructed images for each position along z-axis.

4.3.4 層間クロストーク低減効果

まず、ホログラム記録時とは異なる位置に MRPM をシフトした場合に、再生 SNR がどのように変化するかを観察することで MRPM の空間相関特性を調べた。その結果を図 4.22 に示す。MRPM を記録時と同じ位置に配置した場合(シフト距離が零の場合)、再生 SNR は 2.0 を示すが、MRPM のシフト量を大きくするにつれて、再生 SNR は 2.0 から大きく減少していく。また、シフト量が $50\mu\text{m}$ 以降になると、SNR の変化の割合が急激に小さくなる。そこで、この $50\mu\text{m}$ を非相関位相パターンを得るために必要なシフト距離と定め、以下の多層化記録実験において用いた。

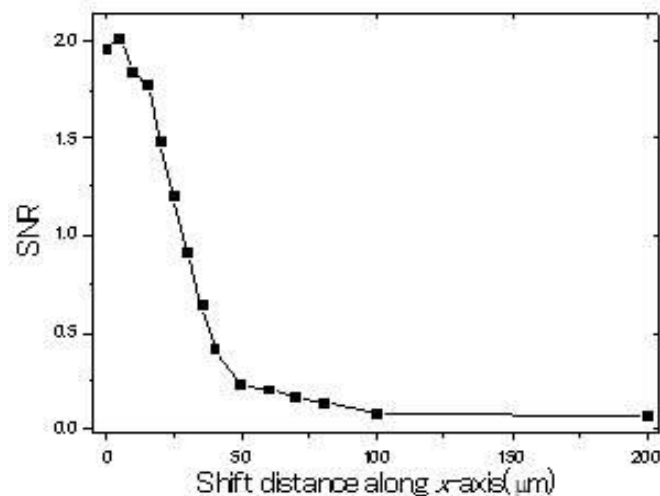


Fig. 4.22. Spatial correlation property of binary phase mask.

図 4.23 に多層化ホログラムからの再生 SNR を示す。MRPM を適用する場合、平均 SNR は 1.37、対して MRPM を適用しない場合、平均 SNR は 1.04 であった。図 4.24(a) に MRPM を適用した場合の再生像、図 4.24(b)に MRPM を適用しない場合の再生像をそれぞれ示す。(a)を見ると、各深さ位置からの再生像には、明確なバイナリー構造が確認できる。各ピクセル内にスペックルノイズが観察されるが、これは、 0 と π のランダム位相付加が要因である。これに対して、(b)を見ると、各再生像は、全体に渡って暗く、OFF ピクセル領域に比較的大きなノイズが観察される。これらの結果から、MRPM を適用することで、多層化クロストークを低減できることを実験的に実証したと言える。

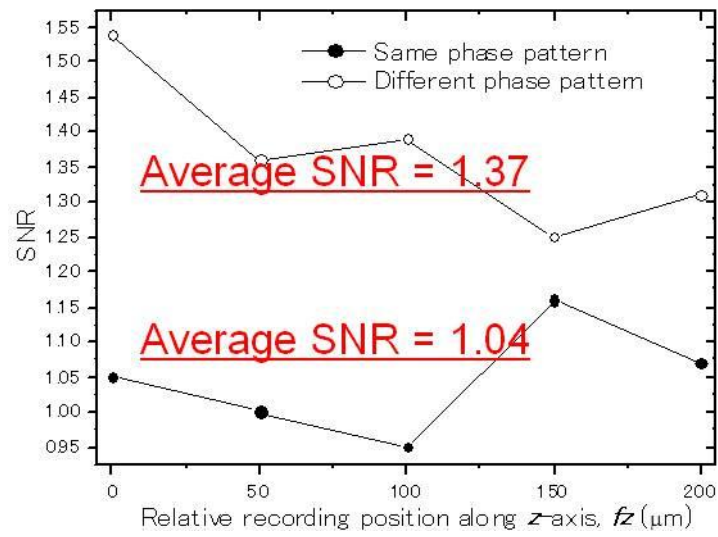


Fig. 4.23. Improvement effect of SNR by MRPM.

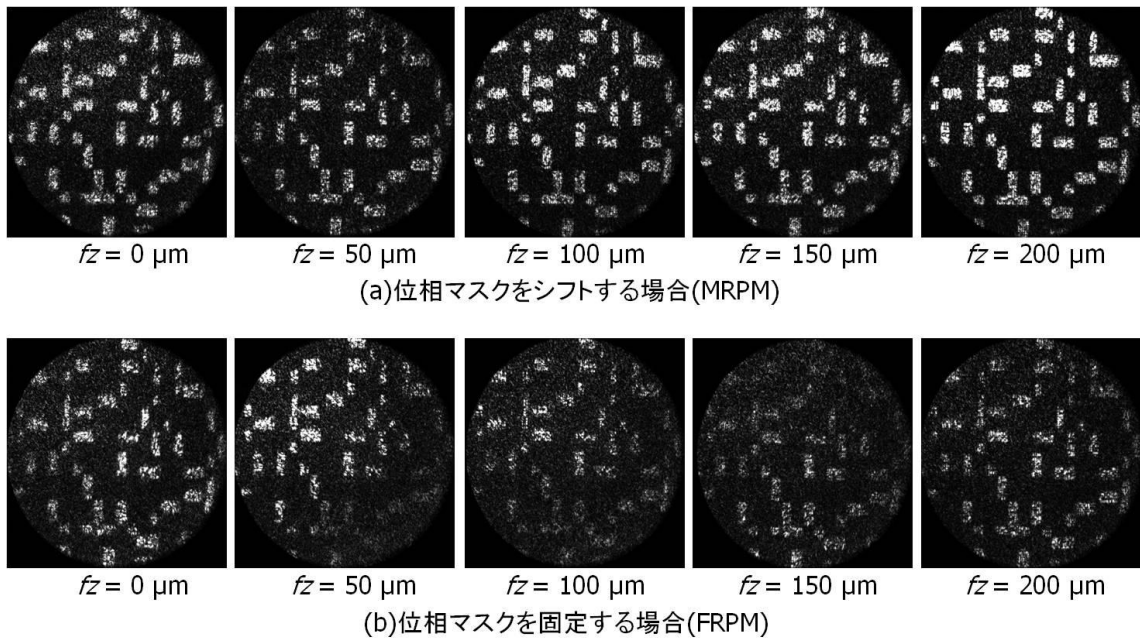


Fig. 4.24. Reconstructed images with and without MRPM

4.4 まともと今後の課題

HDS では、2 次元データページを記録媒質に 3 次的に分散させ、ホログラムとして記録する。すなわち、HDS は、記録空間を従来の 2 次元から 3 次的に拡張するため、達成される記憶容量はブルーレイ等のそれを遥かに凌ぐ。しかし、これまでの HDS では、記録媒質の面方向へ如何にしてホログラムを密に詰め込むかに焦点を置いており、3 次元の記憶空間を効率よく活用できているとは言い難い。このような背景から、本章では、多層化コリニアホログラフィックメモリ(MCHM)を提案した。4.2.2 節において、従来のコリニアホログラフィックメモリ(CHM)は記憶媒質の深さ方向の記憶領域を効率的に活用できないことをシミュレーションによって明らかにした。その後、4.2.3 節では、対物レンズの NA が 0.60 の時、記憶媒質の深さ方向に多層化できるホログラム数の限界が約 100 層であることをシミュレーションによって示し、多層化記録の大きな可能性を示した。さらに、4.2.4 節では、可動ランダム位相マスク(MRPM)を導入することで、層間クロストークを低減できることを示した。4.2.5 節では、MCHM において、2 層構造の場合に最も高い媒質利用効率を得られ、記憶容量はおおよそ 2 倍程度向上することを明らかにした。4.3 節では、5 枚のホログラムの多層化記録再生を実験的に実証した。

今後の課題としては、まず、3 次元ページ配置を最適化し、MCHM によって得られる記録密度を最大化する必要がある。そのためには、面方向へホログラムを多重記録した場合に発生するページ間クロストーク量を全ての多重間隔に対して数値化する必要がある。同様に、深さ方向へホログラムを多層記録した場合に発生するページ間クロストーク(層間クロストーク)量を全ての多層間隔に対して数値化する必要がある。このような定量的な評価の後、この評価結果を基に、3 次的なページ配置の最適化を図ることが望ましい。

ページ配置の最適化を図ることで得られる記録密度の改善は、大きく見積もっても 2 倍程度と推測され、飛躍的な記録密度の改善を実現するためには、深さ方向のクロストーク(層間クロストーク)や面方向のクロストークをさらに抑制していくことがやはり必要不可欠である。これまでに提案されてきたクロストーク低減技術や先述した MRPM は、多重ホログラムや多層ホログラムの相互相関を低下させるものであり、これらは記録時のクロストーク低減技術とみなすことができる。しかしながら、ホログラムの相互相関を実質的に完全に零にすることはほぼ不可能であり、少なからずクロストークは多重ホログラムから発生してしまう。このため、記録時の工夫によってホログラムから回折されるクロストーク量を減少させるのではなく、再生時の仕掛けによってホログラムから回折されたクロストークを低減することが今後のクロストーク低減技術に求められる点である。そこで、第 4 章では、ホログラムから回折されたクロストークの大幅な低減を可能にするデジタル画像拡散技術を提案している。

多層化を行うことで、再生 SNR が低減する理由は、層間クロストーク以外にも、波面擾乱の影響も考えられる。例えば、媒質の浅い位置に記録されたホログラムを読み出す場合、そのホログラムからの回折光は、深い位置に記録された非再生ホログラムを透過することになり、この際に位相擾乱を受ける。この位相擾乱は、撮像素子面で強度変化となって現れ、再生品質を低下させる可能性がある。この位相擾乱の問題を解決する一つの手段としては、遺伝的アルゴリズム[7]による位相波面の最適化が考えられる。つまり、非再生ホログラムによる波面擾乱を相殺するような位相波面を遺伝的アルゴリズム等によって求め、その位相波面を SLM 等の空間光変調素子によって光波に変調する。

参考文献

- [1] H. Horimai *et al.*, “Collinear technology for holographic versatile disk,” *Appl. Opt.*, **45**, pp. 910-914 (2006).
- [2] Mitsuru Toishi *et al.*, “Experimental analysis in recording transmission and reflection holograms at the same time and location,” *Appl. Opt.*, **45**, pp. 6367-6373 (2006).
- [3] K. Kawano and T. Kitoh, *Introduction to Optical Waveguide Analysis*, Wiley, New York, (2001).
- [4] S.R. Lambourdiere *et al.*, “Simulation of Holographic Data Storage for the Optical Collinear System,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, pp. 1246-1252 (2006).
- [5] T. Shimura *et al.*, “Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function,” *Opt. Lett.*, **31**, pp. 1208-1210 (2006).
- [6] Hisayuki Yamatsu *et al.*, “Shift Selectivity and Hologram Playback Margin Dependence on the Average Speckle Size of a Randomly Phase Encoded Reference Beam,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, pp. 4949-4953 (2004).
- [7] T. Muroi *et al.*, “Optical compensation of distorted data image caused by interference fringe distortion in holographic data storage,” *Appl. Opt.*, **48**, pp. 3681-3690 (2009).

第5章

ページ間クロストーク低減のためのデジタル画像拡散技術

ホログラフィックメモリ (HDS: Holographic data storage)において記憶容量を増加させるためには、できる限り微小な間隔でより多くのホログラムを多重記録しなければならない。しかしながら、ホログラム多重間隔の理論限界であるシフト選択性に従ってホログラムの多重記録を行う場合、非常に大きなクロストークノイズが非再生ホログラムから生じ、再生信号の品質が著しく損なわれる。それゆえ、このノイズの影響を緩和させるために実際に採用されている多重間隔は理論限界の約 20 倍に相当する 10 μ m 程度でしかない。理論的な記憶容量限界は数 100TB/disc であるのに対して、現在までに報告されている記憶容量は 500GB/disc 程度でしかないことから、非再生ホログラムから生じるクロストークノイズ(以下、ページ間クロストークと呼ぶ)が本来の潜在的多重能力を大きく阻害していることは明らかである。ページ間クロストークを低減する方法として、空間周波数面でフィルタリングを行う方法が提案されているが、この方法では、再生信号成分と同じ周波数帯を持つクロストーク成分を除去することが難しい。また、ページ間クロストーク成分や再生信号成分の発生源は読出し光であり、それゆえページ間クロストークと再生信号成分はほとんど同じ空間周波数帯域を有すると。従って、上記手法によるページ間クロストークの低減効果は不十分であると考えられる。

これに対して、我々は、デジタル画像拡散技術(DIDT: Digital image diffusion technique)と呼ばれるページ間クロストーク低減方式を新たに提案し、記憶容量の大幅な増加を図る。DIDT では、ランダムディフューザを用いて予め信号光に空間位相変調を付加し、その後の再生時に、位相共役な回折光に対して再度同様の空間位相変調を付加する。この動作を行うことで、再生信号光とページ間クロストーク間に空間スペクトルの違いを生成し、ページ間クロストークを大幅に低減する。ただ、これらの上記動作を全光学的に行うためには、ランダムディフューザや付随するレンズ群、及び、ホログラムの位相共役読出し光学系が必要になるため、系全体の大型化し、かつ、忠実度が低い位相共役読出し光によって信号の品質低下を招く。DIDT では、予め計算機内で変調信号光を生成し、その複素振幅を空間光変調器によって表現することで、記録光学系を大幅に簡素化できる。さらに、通常ホログラム読出し手順で得られた回折光の複素振幅を検出し、その後の位相共役再生をデジタル的（計算機内の処理）に行うことで、光学的な位相共役読出し光学系等を不要にできる。以上のように DIDT は、光学的処理とデジタル処理を効果的に融合することで、従来と全く同一の簡素な光学系を用いてページ間クロストークを大幅に低減できる。

5.1 節では、まずページ間クロストーク低減を全光学的に実現する基本光学系を説明する。次に、複素振幅生成技術と複素振幅検出技術を導入することで、大幅に簡素され

る光学系を説明する．5.2 節では，DIDT の動作確認と性能評価を数値シミュレーションによって行う．5.3 節では，5 枚のデータページの多重記録再生実験を通して，DIDT の有用性を実験的に実証する．また，デジタル位相共役再生を実現するために求められる実験技術についても述べる．5.4 節では，本章を総括し，DIDT における今後の課題についても述べる．

5.1 基本動作・特長

図 5.1(a)-(b)にページ間クロストークを全光学的に実現する場合の基本光学系を示す．ここで，信号変調方法は，強度変調型，位相変調型[1]，およびそれらの多値変調型[2]，空間直交振幅変調型などいずれでも構わない．また，ランダムディフューザの配置場所に関して特に制約はないが，効率的にページ間クロストーク成分を拡散させることができるフーリエ面への配置が最も望ましい．ランダムディフューザは，ビーム拡散が可能なものであれば特に制限はなく，すりガラスや位相変調 SLM を用いることができる．

本クロストーク低減方式の適用範囲は，特定の光学系に限定されないが，以下では，二光束光学系の場合を例として説明する．最初に図 5.1(a)に示す記録過程の動作を説明する．まず，SLM に平面波を照射することで，データページが変調された信号光を生成する．この時の信号光振幅は $a_j(r)$ とする．添え字 $j(j = 1, 2, 3, \dots)$ はページ番号とする．次に，レンズ 1 によってフーリエ変換された信号光がランダムディフューザを透過することで，信号光に空間位相変調が掛けられ，広範囲に拡散される．この時，変調信号光の振幅 $g_j(r)$ は以下の式で表現する．

$$g_j(r) = A_j(r) \exp(-i\phi(r)) \quad (5.1)$$

$A_j(r)$ はフーリエ変換後の信号光振幅を表す．また，ランダムディフューザの位相分布 $\phi_j(r)$ は，

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} (n-1)h(r) \quad (5.2)$$

である．ここで， n はディフューザの屈折率， λ はレーザ光源の波長， $h(r)$ はディフューザの表面プロファイルである．その後，変調信号光をレンズ 2 とレンズ 3 による $4f$ 光学系を介して記録媒質に再度集光し，別光路から用意された参照光と干渉させることでホログラムを記録する．多重記録を行う場合は，参照光の入射条件（入射角度，波面位相等）をデータページ毎に逐次変位させながら，上記記録過程を同様の手順で繰り返せば良い．

次に，図 5.1(b)に示す光学的位相共役読出し・再生過程の動作を説明する．まず，位相共役鏡により射出された参照光の位相共役光を記録媒質中の再生ホログラムに照射する．位相共役光の性質に関しては 3.4 節を参照する．記録媒質中にホログラムが多重記録されている場合，回折光には，位相共役な再生データページ成分以外にページ間クロストーク成分も混ざっている．記録媒質から読み出された回折光は，その後，レンズ 1 とレンズ 2 を介してディフューザ面に到達する．ディフューザ面における回折光は以下の式によって表現する．

$$A_k^*(r) \exp\{i\phi(r)\} + \alpha(r) \exp\{-i\beta(r)\} \quad (5.3)$$

ここで，添え字 k は再生データページの番号，第 1 項は位相共役な再生データページ成分，第 2 項はページ間クロストーク成分を表し， $\alpha(r)$ はランダムな強度分布， $\beta(r)$ はランダム

な位相分布とする．次に，この回折光がディフューザを再透過することで記録時と同様の位相変調が以下のように付加される．

$$A_k^*(r) \exp\{i\phi(r)\} \exp\{-i\phi(r)\} + \alpha(r) \exp\{-i\beta(r)\} \exp\{-i\phi(r)\} \quad (5.4)$$

この時，再生データページ成分の位相変調は相殺されるが，ランダムなページ間クロストーク成分はさらに広範囲に拡散される．

$$A_k^*(r) + \alpha(r) \exp\{-i\beta(r)\} \exp\{-i\phi(r)\} \quad (5.5)$$

$A_k^*(r)$ はレンズ 3 を介して撮像素子面に到達し，最終的な再生データページ $a_k^*(r)$ が検出される．一方，第 2 項のページ間クロストーク成分は，記録時よりもさらに広範囲に拡散するため，その大部分がレンズ 3 の外に逸れる．以上がページ間クロストーク低減の基本概念である．

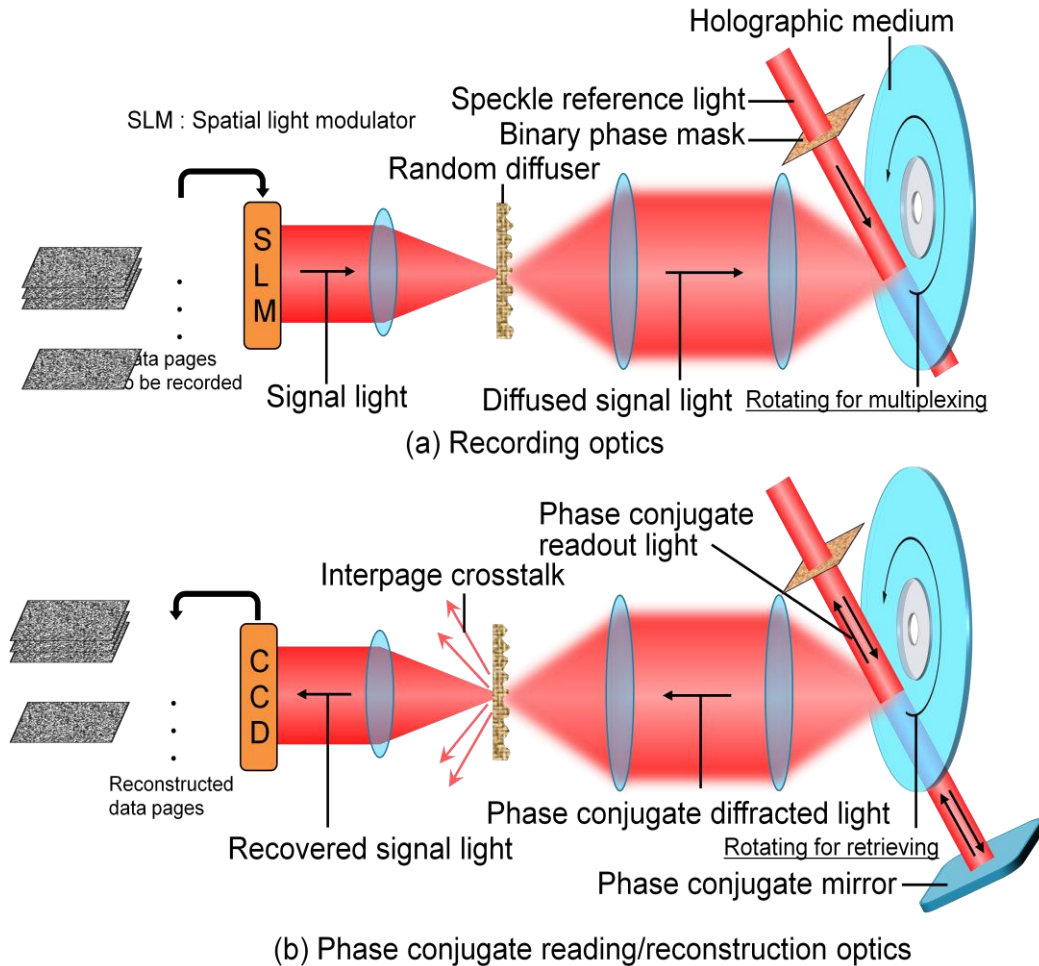


Fig. 5.1 Basic concepts for removing interpage crosstalk in the case of speckle shift multiplexing.

図 5.1(a)-(b)に示す通り，ページ間クロストーク低減を全光学的に実現するためには，ランダムディフューザやそれに付随する複数のレンズ，位相共役鏡を新たに光学系に付加する必要がある．さらには，位相共役鏡から射出される不完全な位相共役光によって，再生データページの品質低下を招くことも懸念される．我々は信号生成の段階で位相変調効果を含めた信号光を空間光変調器によって表現することで，ランダムディフューザ等の付加的な素子を不要にし，記録光学系を簡素化する．また，通常のパログラム読出し過程で得られた回折光を複素振幅検出し，上記再生過程[図 5.1(b)]をデジタル的（計算機内の処理）に行うことで，光学的な位相共役読出し及び再生を不要にする．以上の説明の概略図を図 5.2(a)-(d)にそれぞれ示す．図 5.2(a)は，計算機内で処理されるデジタル画像拡散過程の光学モデルを示す．ここでは，信号光に対してランダムディフューザによって位相変調を付加し，変調信号光を計算する．本過程における計算量は，高速フーリエ変換と逆変換，信号光とランダムディフューザとの透過関数との乗算のみであり， $2N^2 \log_2 N + N^2$ によって表される． N^2 は，SLM のピクセル数とする．次に，図 5.2(b)に示す記録過程では，まず SLM によって，通常の記録データページではなく図 5.2(a)において計算機内で生成された変調信号の複素振幅を表現する．SLM による複素振幅表現の手段は 3.1 節と 3.2 節とを参照する．その後，生成された変調信号光をレンズ 1 を介して記録媒質に照射しパログラムを記録する．結局，この記録光学系は，複素振幅を有する変調信号を SLM によって表現する点以外は，一般的な HDS の記録光学系と全く同一であることが分かる．また，図 5.2(c)に示す読出し過程では，実際に光学的な位相共役読出しは行わず，通常の手順に従ってパログラムから回折光を得て，その複素振幅を位相検出法によって計測する．位相検出法は，用いる光学系に応じて適切に選択すれば良いが，有力な方法として，高分解能かつ高速に位相検出可能なパログラフィックダイバーシティ干渉法(HDI: Holographic diversity interferometry)が挙げられる．一度，ある光波の複素振幅を計測すれば，計算機内でその光波に対して様々な操作や伝搬計算を高速かつ高精度に行うことが可能になる．本発明では，回折光の複素振幅を記録媒質の背後に配置された位相検出器で計測し，その後の処理を計算機内に任せることで，再生光学系を完全に不要にする．図 5.2(d)にコンピュータ上で行われるデジタル位相共役再生過程の光学モデルを示す．まず初めに計測した回折光の位相共役波を計算する．次に，フーリエ変換を施し，再度ランダムディフューザによる位相変調 $\exp\{-i\phi(r)\}$ を付加する．この一連の処理は，位相共役波を計算することなく計測した回折光自身をフーリエ変換し，符号を反転させた空間位相変調 $\exp\{i\phi(r)\}$ を掛け合わせる 것과等価であり，基本的にはどちらの方法でも同様のページ間クロストーク低減効果が期待できる．空間位相変調が再度付加された後は，逆フーリエ変換を行い，位相共役な再生データページを得る．このデジタル位相共役再生過程における計算量は，基本的にはデジタル変調信号生成過程と同様， $2N^2 \log_2 N + N^2$ によって表せられる．以上のように，複素振幅生成技術と複素振幅検出技術を導入し，コンピュータ上のデジタル処理と光学処理を効果的に融合することで，従来の記録読出し光学系に対して新たな光学素子を付加することなく，ページ間クロスト

ークを大幅に低減することができる。

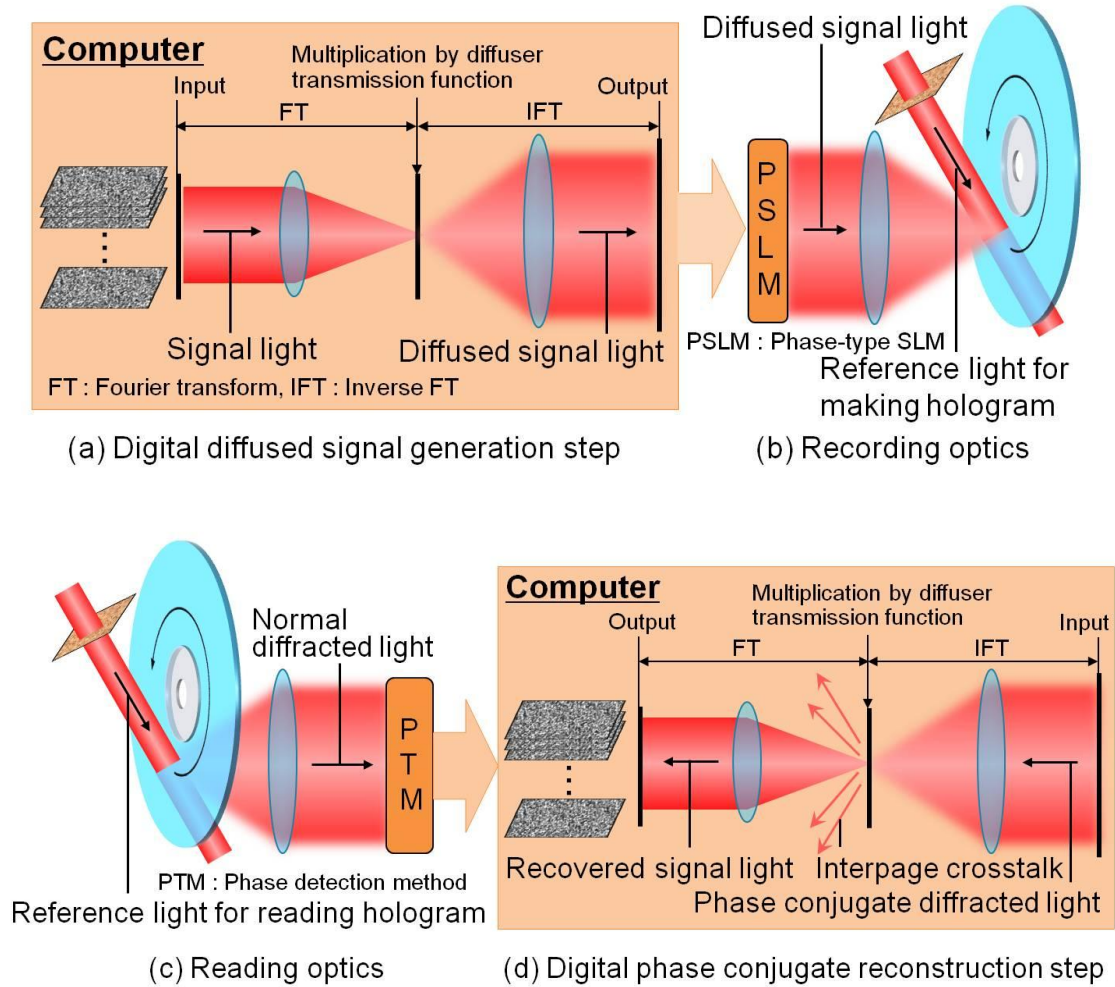


Fig. 5.2 Schematic diagrams of digital spatial spectrum diffusion technique in the case of the speckle shift multiplexing. (a) Digital diffused signal generation step. (b) Recording optics. ISLM and PSLM play roles in generating the diffused signal light with various complex amplitudes. (c) Reading optics. PTM detects complex amplitudes of the diffracted light to perform the subsequent phase conjugate reconstruction step in the computer. (d) Digital phase conjugate reconstruction step. Phase conjugation is calculated by inverting the sign of the phase terms in the diffracted light on the input plane.

5.2 数値シミュレーション

5.2.1 数値シミュレーションモデル

以下では, 図 5.3(a)-(d)の光学モデルに対応させたシミュレーションの流れを記載する. 本シミュレーションでは, スペックルシフト多重方式を用いた二光束光学系に本ノイズ低減方式を適用することを想定している.

デジタル画像拡散過程[図 5.3(a)]

11. 入力面において, 2 値強度情報を有するデータページを信号光に変調する.
12. 高速フーリエ変換(FFT)により, 信号光をフーリエ変換する.
13. ランダムディフューザの空間位相分布とフーリエ変換信号光波分布とを乗算する.
14. 逆 FFT(IFFT)により, 出力面での拡散信号光(複素振幅分布)を求める.
15. 多重記録を行う場合, 異なるデータページに対して上記動作を行えば良い.

ホログラム記録過程[図 5.3(b)]

10. 複素振幅生成が完全であると仮定し, SLM 面に上記過程の手順 4 で求めた拡散信号光(複素振幅分布)をそのまま配置する.
11. 高速フーリエ変換(FFT)により, 記録媒質裏面(フォトポリマー)での拡散信号光波分布を求める.
12. 角度スペクトル法により, 記録媒質裏面(フォトポリマー)から表面までの上記光波分布の伝搬計算を行う.
13. 記録媒質表面において, フラットコサイン型の窓関数をかけた参照光波面を計算する.
14. 参照光にランダム位相マスクを乗算し, スペックル参照光を生成する. 図 5.3(b)において, 位相マスクは媒質から離れた位置に配置されているが, 実際の計算では, 簡単化のために, 位相マスク面と媒質表面は同じ位置にあると仮定している.
15. 記録媒質表面において, 拡散信号光波分布とスペックル参照光波分布を足し合わせ, 干渉光を生成する.
16. FFT-BPM[4.2.1 節を参照]により, 上記光波分布の記録媒質内における伝搬計算を行い, 上記光波分布が誘起する屈折率分布(ホログラム)を計算する. 光波分布から屈折率分布へ変換する式は[4.2.1 節を参照]を参照する.
17. 多重記録を行う場合, 基本的には上記動作と同じであるが, 記録媒質表面での干渉光の位置を空間的に微小にシフトする.

ホログラム読出し過程[図 5.3(c)]

1. 上記過程で用いたものと同じスペックル参照光を記録媒質表面に用意する. スッペ

クル参照光の入射位置は、読み出したいホログラムを記録したい時の条件に合わせる。

2. FFT-BPM により、記録媒質表面から裏面までのスッペクル参照光の伝搬計算を行い、記録媒質裏面での回折光波分布を求める。
3. 記録媒質裏面での回折光の逆フーリエ変換を IFFT により計算し、CCD 面での回折光波分布を求める。

デジタル位相共役再生過程[図 5.3(c)]

1. 複素振幅検出が完全であると仮定し、上記過程の手順 3 で求めた CCD 面上での回折光波分布を入力面に配置する。
2. 位相成分の符号を反転し、位相共役な回折光波分布を計算する。
3. FFT により、ランダムディフューザ面での回折光波分布を計算する。
4. ランダムディフューザの空間位相分布とフーリエ変換回折光波分布とを乗算する。
5. IFFT により、出力面での回折光波分布(再生データページ)を求める。
6. この時、データページ領域の外側にページ間クロストーク成分が大きく拡散している。

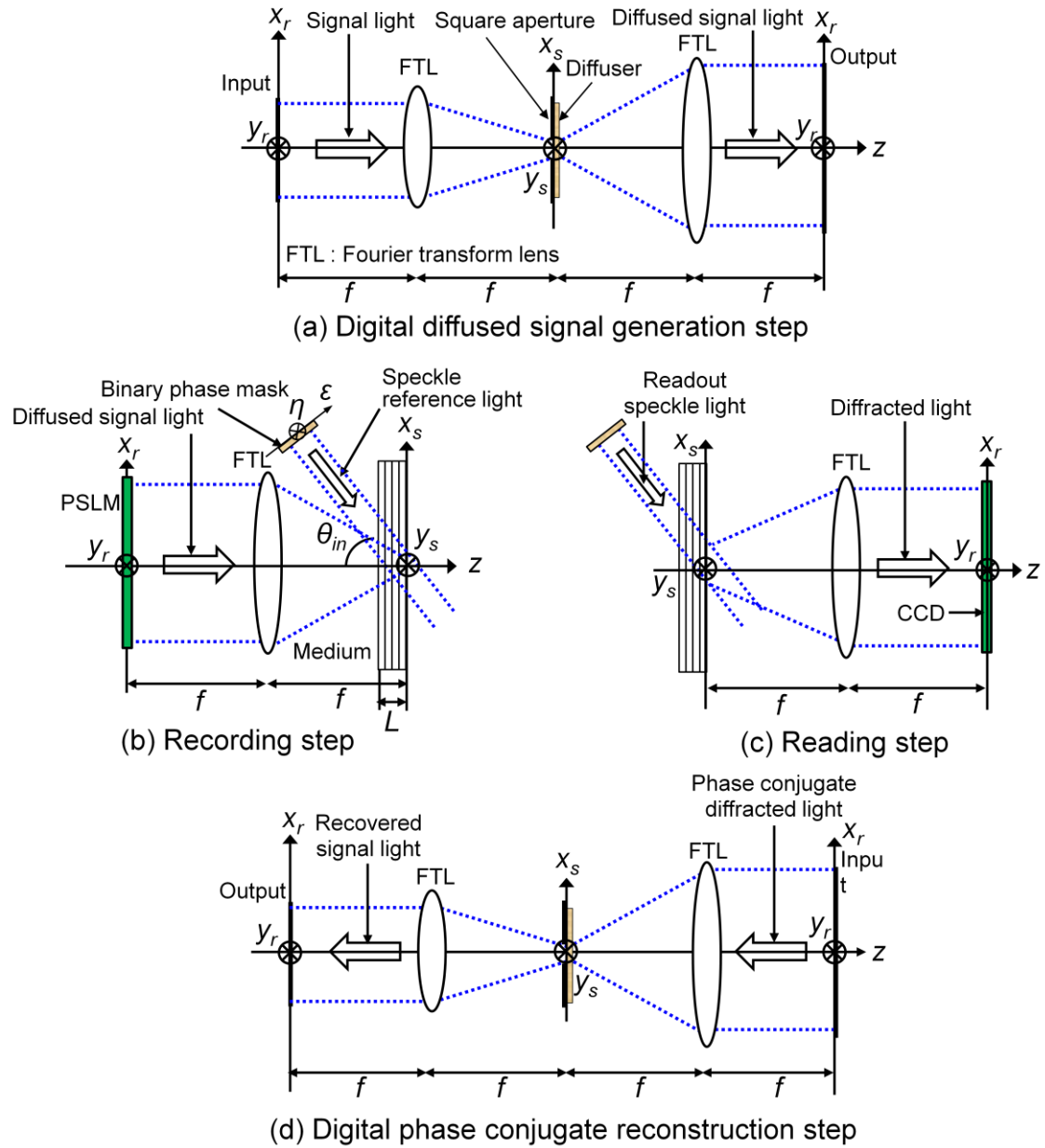


Fig. 5.3 Simulation models

図 5.4 は、実空間面，空間周波数面，参照光路のランダム位相マスク面，それぞれの面における計算領域の定義を示している． $N1$ は，計算精度を向上させるためオーバーサンプリングレートである． $N2$ は，空間周波数面での刻み幅を細かくするためのゼロパディングレートである．また，記録媒質は， Nz 枚の計算層に仮想的に分割されている．本シミュレーションで用いたパラメータを表 $X.X$ に示す．空間周波数面での開口系は，ナイキスト開口の 2 倍に設定している．また，対物レンズの NA (開口数)は，実際的な値よりかなり小さい値に設定されているが，これは使用した計算機のメモリの大きさによって制限されている．しかし，本ノイズ低減方式は，対物レンズの NA には特

に依存しないと考えられるので、シミュレーションの信頼性は保証されているとする。
また、スペックル参照光の入射角度も、計算機のメモリによって制限されている。

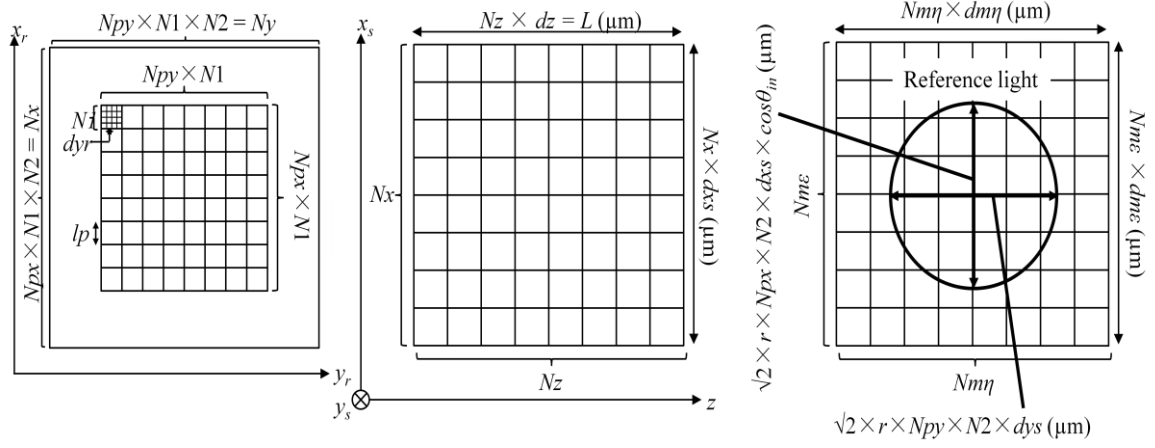


Fig. 5.4. Mesh layouts in each plane of the simulation model. (a) On real space plane. The oversampling rate $N1$ is for increasing calculation precision. The zero padding rate $N2$ is for subdividing the step size d_{xs} in spatial frequency space. (b) In spatial frequency space. The recording medium is divided into N_z discrete calculation layers. (c) Binary phase mask plane in the reference path.

Table I. Simulation parameters.

Wavelength, λ (nm)	408	Refractive index modulation depth, n_{max}	4.0×10^{-3}
Numerical aperture of the objective lens, NA	0.08	Saturation energy flux density, E_{sat} (J/cm ²)	0.30
Thickness of the medium, L (μm)	400	Total recording power, P_{in} (mW)	0.1
Index of the recording medium, n_0	1.5	Exposure time, t (s)	0.1
Oversampling ratio, $N1$	4	Index of the diffuser, n_{dif}	1.5
Zero-padding ratio, $N2$	8	Spread angle of the diffuser, θ_{dif}	10.0
Sample number, $x \times y \times z$	$1024 \times 1024 \times 600$	Incident angle of speckle reference beam, θ_{in}	28.0°
Step size in real space, $d_{xr} \times d_{yr}$ (μm ²)	7.5×7.5	Pixel number of binary phase mask, $N_{m\epsilon} \times N_{m\eta}$	128×128
Pixel number of SLM, $N_{px} \times N_{py}$	32×32	Pixel pitch of binary phase mask, $d_{m\epsilon} \times d_{m\eta}$ (μm ²)	2.5×2.5
Pixel pitch of SLM, $l_{px} \times l_{py}$ (μm ²)	30×30	Square aperture size, $A_x \times A_y$ (μm ²)	163.2×163.2
Step size in spatial frequency space, $d_{xs} \times d_{ys} \times d_z$ (μm ³)	$0.32 \times 0.32 \times 0.67$		

5.2.2 量子化誤差の影響

従来の HDS では、2 値の強度情報を有する信号を SLM に表示していたが、DIDT では、様々な複素振幅値を持つ拡散信号を SLM によって光波に変調する必要がある。そのため、階調数が低い SLM を利用することは、重大な量子化誤差を招く可能性がある。ここでは、前節で示したシミュレーションモデルを用いて、階調数と再生品質の関係を示す。なお、CCD の階調数は一般的に SLM のそれよりも大きいため、CCD による量子化誤差は考慮しない。また、SLM の階調数に対する変調応答性は完全に線形であると仮定する。振幅と位相成分の量子化はそれぞれ独立に行い、コンピュータ上で扱われる実部と虚部はそれぞれ浮動小数点数の倍精度(double 型)で扱われるとする。表 II は、SLM の階調数を変えた場合の再生信号の SNR を示している。ここで、SNR(信号対雑音比)は、以下の式によって与えられる。

$$SNR = \frac{\mu_{on} - \mu_{off}}{\sqrt{\sigma_{on}^2 + \sigma_{off}^2}} \quad (5.6)$$

μ_{on} と μ_{off} は ON と OFF ピクセルの強度平均値、 σ_{on} と σ_{off} は ON と OFF ピクセルの標準偏差を示す。結果を見ると、階調数を上げるほど、量子化誤差の影響は徐々に弱くなり、SNR が改善されている。SLM の階調数として一般的な 8bit の場合を見ると、若干 SNR の低下は見られるが、重大な量子化誤差は生じていないことが分かる。近年、12bit の階調数を有する LCoS-SLM の開発も報告されており[3]、これを利用すると量子化誤差はほぼ無視できるレベルになると考えられる。

Table II. SNRs depending on the gray level of two SLMs. Quantization-related noise is decayed with increasing gray levels. Optical complex amplitude in the computer is basically treated in the double-precision floating point of 64 bit representation.

No quantization by SLM gray level	7-bit gray level	8-bit gray level	9-bit gray level
5.99	5.52	5.76	5.89

5.2.3 ページ間クロストークの低減効果

ここでは、数値シミュレーションによって、DIDTによりページ間クロストークを低減できることを示す。DIDTは、基本的にあらゆる多重方式に適用可能であるが、以下の実証では、スペックルシフト多重記録に適用されるとする。また、以下に示す結果にはSLMによる量子化誤差は含まれていないことに注意する。図5.5は多重記録のスケジューリングを示している。黒色で示す中心のホログラムを評価対象とし、これは最も周辺ホログラムからの重なりが大きくSNRの低下が激しいためである。図5.6はx-y軸方向のシフト選択性を示しており、x軸方向のシフト選択は約 $2.7\mu\text{m}$ 、y軸方向のシフト選択は約 $3.5\mu\text{m}$ であった。以下の多重記録再生シミュレーションにおいて、ホログラムの多重間隔は、図5.6に示すシフト選択性の約3倍とし、x軸方向を約 $8.1\mu\text{m}$ 、y軸方向を約 $10.5\mu\text{m}$ に設定している。

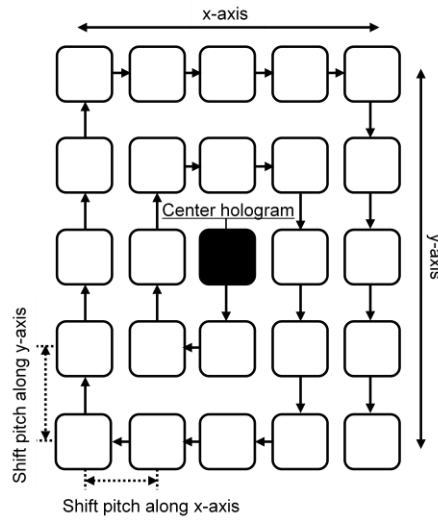


Fig. 5.5. Page layout in speckle shift multiplexing. Black mark indicates the reconstruction hologram, for evaluation.

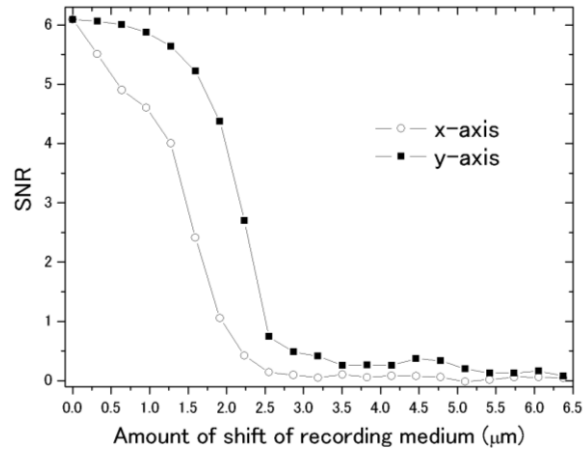


Fig. 5.6. Shift selectivity along x and y-axes in speckle shift multiplexing.

図 5.7(a)-(b)では、ホログラムの多重数の増加に伴う再生特性の推移を、スペックルシフト多重方式(従来手法)と DIDT をスペックルシフト多重方式に適用した場合(提案手法)において、比較している。図 5.7(a)における縦軸はノイズ成分の強さを表しており、前節における式(5.6)の分母をノイズ成分の強さとする。図 5.7(a)の結果を見ると、従来法の場合、多重数の増加に従い、ノイズ成分(ページ間クロストーク)が急激に増加しているが、これに対して、提案手法の場合、ノイズ成分の成長が十分に抑制されている。加えて、ランダムディフューザのシフト動作を加えることで、さらにノイズ成分が低減されていることが分かる。これは、各ホログラムに異なるディフューザプロファイルを与えることで、多重ホログラム間の相互相関が低くなり、発生するページ間クロストーク自体が減少したためと考えられる。次に、図 5.7(b)では、ホログラムの多重数に対する SNR の変化を示している。従来方式の場合、多重数の増加に伴い、大きく SNR が低下しているが、提案方式では、SNR の低下が抑制され、多重数が増加した場合でも高い SNR を維持していることが分かる。高い SNR を維持しているという事は、まだまだ多くのホログラムを多重記録することができる事を意味しており、これは提案手法の方が従来手法よりも高い記録密度を達成できることを示唆している。なお、本シミュレーションにおいて、ホログラムの多重間隔は、シフト選択性の約 3 倍に設定しているが、これに特段の理由はない。多重間隔をどのように設定したとしても、DIDT によるページ間クロストークの低減効果は表れる。また、本シミュレーションにおいて、多重記録方式としてスペックルシフト多重方式を採用しているが、これに特別の理由はない。DIDT は、コリニアシフト多重方式や角度多重方式等にも適用することができ、大幅なノイズ低減を可能とする。

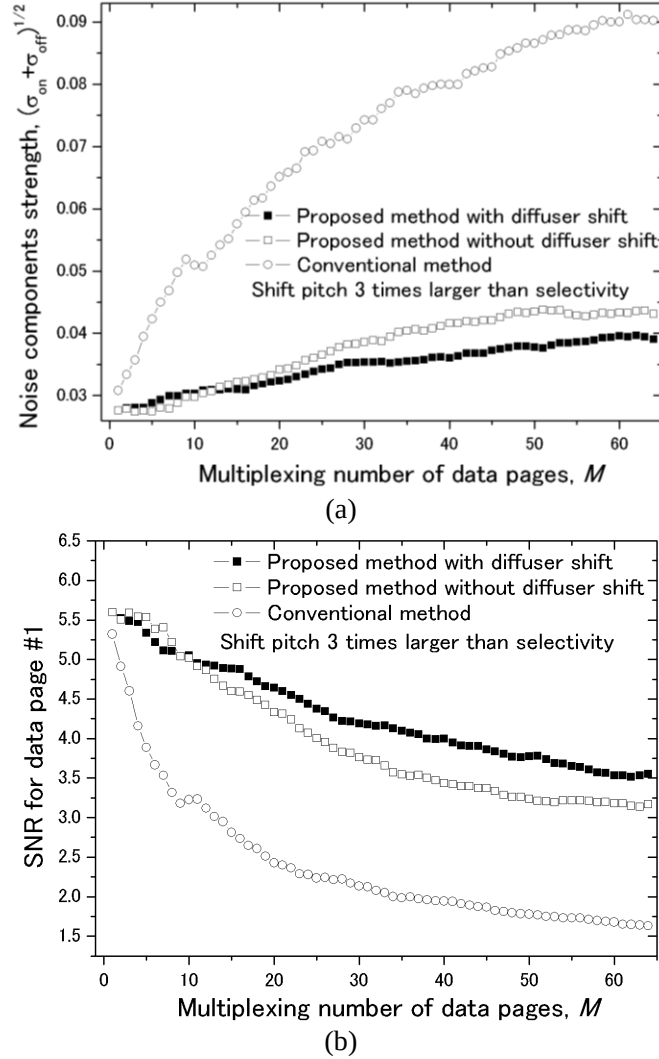


Fig. 5.7. Comparisons of reconstruction characteristics in the proposed and conventional method.

図 5.8 では, DIDT における再生特性の拡散角度依存性を示している. 結果を見ると, ランダムディフューザの拡散角度が大きくなるにつれて, 再生 SNR の低下が抑えられていることが分かる. これは, より大きな拡散角度を有するランダムディフューザを用いることで, より大きな記録密度の改善が期待できることを意味している. しかしながら, 拡散角度を上げるほど, 用いるデータページの空間解像度は下げる必要がある. つまり, 拡散角度の増加は HDS のデータ転送速度の低下を招く. 従って, DIDT において, ページ間クロストークとデータ転送速度はトレードオフの関係にあり, 必要以上に拡散角度を上げることは望ましくない. ただし, 多値振幅と多値位相を組み合わせた空間直交振幅変調信号を使用することで, ページ間クロストーク低減による転送速度の減少を補うことができる.

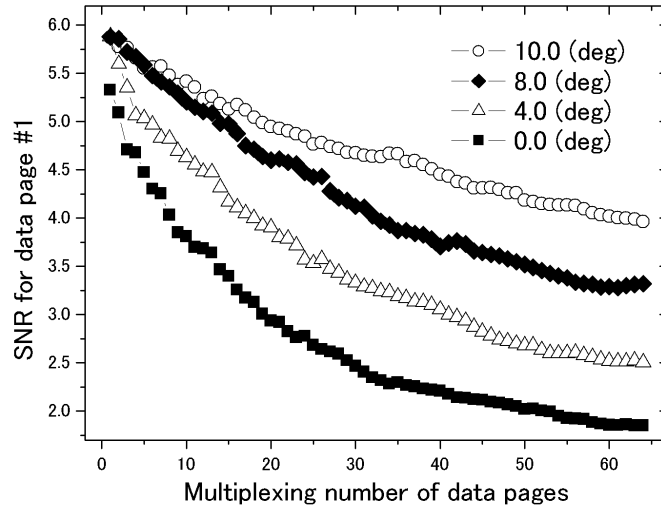


Fig. 5.8. Relationship between diffusion angle and crosstalk suppression effect.

以下では、ページ間クロストークの低減を通して、多重間隔を縮小できることを示す。図5.9は、ホログラムの多重間隔に依存する達成可能な多重数を示している。従来方式の場合、多重間隔の増加に伴い、達成可能な多重数が増加している。これは、多重間隔の増加によって、ホログラム同士の重なりが減り、ページ間クロストークが低減されたためであり、当然の結果と言える。特に注目すべき点は、シフト選択性の5倍に多重間隔が設定された従来方式の場合と、シフト選択性と等価な多重間隔が設定された提案方式の場合とで、達成可能な多重数が一致していることであり、これは提案方式によって、多重間隔を約1/5に縮小できることを示している。

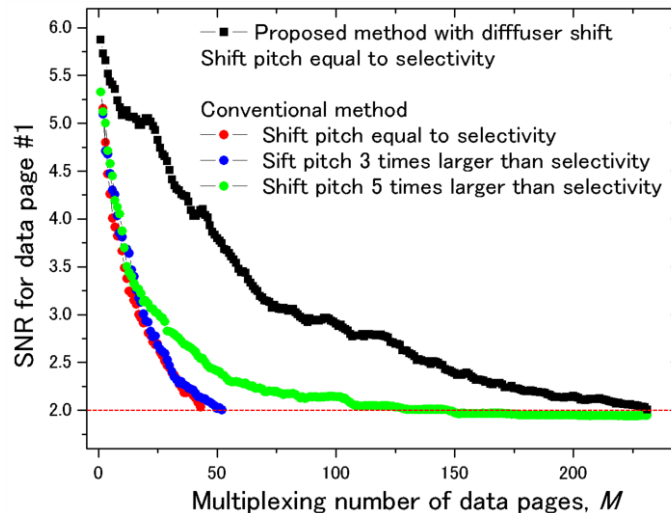


Fig. 5.9. Achievable multiplexing number depending on hologram shift pitch when the threshold SNR is set at 2.0.

次に、ページ間クロストーク低減を通して、記憶容量を増加できることを示す。図5.10では、従来方式と提案方式における達成可能な多重数を比較している。最低限必要な

SNR(閾値)は2.0に設定している。結果を見ると、従来方式の場合、約42枚のホログラムを多重記録した時点で再生SNRが閾値に到達している。対して、提案方式の場合、536枚のホログラムを多重記録した時点で再生SNRが閾値に到達している。この結果は、多重記録に要した記録面積を考慮すると、 $536/42 \times (190 \times 200 \mu\text{m}^2) / (190 \times 200 \mu\text{m}^2) = 5.5$ 倍の記憶容量を提案方式によって向上できることを示している。ただし、この結果はランダムディフューザによる拡散角度を 10° に設定した場合の一例であり、拡散角度を向上させることで更なる記憶容量の改善も可能である。ホログラムの多重間隔を約2倍に設定している点において特段の理由はなく、どのような多重間隔であってもDIDTによる記録密度の拡大は可能である。

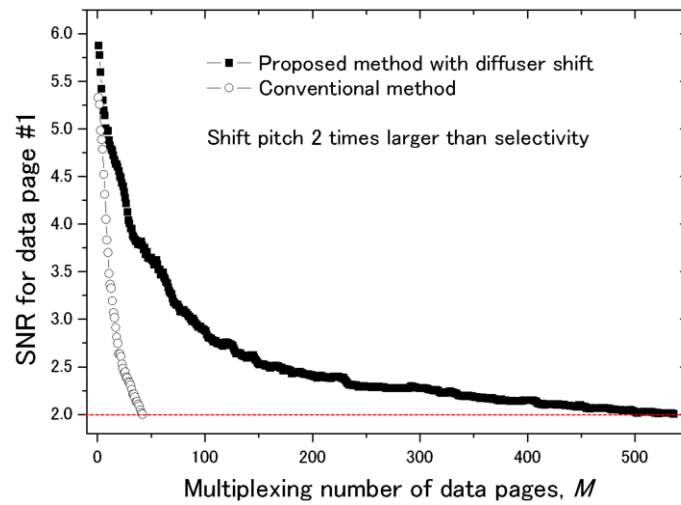


Fig. 5.10. Comparison of achievable multiplexing number in the proposed and conventional methods when the threshold SNR is set at 2.0.

5.3 実験

5.3.1 実験光学系

本実験では、5枚のホログラムの多重記録・再生を通して、DIDTによってクロストークが低減されることを実証する。また、本実験は、デジタル位相共役再生を実験的に実証する初めての試みでもあるため、その点においても非常に意義がある。

図5.11に用いた実験光学系を示す。まず各光学素子の仕様を記載する。用いたレーザーは、532nmのDPSSレーザーであり、最大出力は200mWである。SLMは、浜松フォトンクス社製のLCoS-SLM(x10468)を用いており、ピクセル数は 800×600 、ピクセルサイズは $20\mu\text{m}$ である。CCDは、スティングレイ社製で、ピクセル数は 1920×1080 、ピクセルサイズは $3.75\mu\text{m}$ である。記録媒質は、共栄社化学社提供のナノゲルフォトポリマーを用いており、通常のフォトポリマーより高い空間周波数成分を記録可能なものである。全体の材料厚さは約1.6mmで、その内訳は、前面ガラス0.4mm、後面ガラス0.8mm、フォトポリマー0.4mmとする。また、記録媒質は、スペックルシフト多重記録のために、最少分解能が $2\mu\text{m}$ であるx-y軸自動ステージ上に設置されている。フォトポリマー媒質前後に配置される対物レンズは、全視野において像面歪曲が生じない長作動対物レンズ(シグマ光機, SPAHL-50)を用いており、NAは0.42である。記録・読み出し参照光路には、スペックル参照光を生成するために、0と π の位相値をランダムに有する位相マスクを配置している。位相マスクの各ピクセルサイズは $30 \times 30\mu\text{m}^2$ 、全体のサイズは $1.2 \times 1.2\text{cm}^2$ とする。また、位相マスク面からホログラフィック媒質間に、L6-L7およびL8-L9の二つの4f縮小光学系を組み、位相マスクの実効的サイズを1/10に縮小している。これによって、記録面における参照光領域(ホログラム領域)は $1.2 \times 1.2\text{mm}^2$ となり、かつ、シフト選択性を1/10に低減することができる。信号光と参照光の交差角度は約 60° に設定した。位相検出器は、ホログラフィックダイバーシティ干渉計(HDI: Holographic diversity interferometry)を利用した[4]。

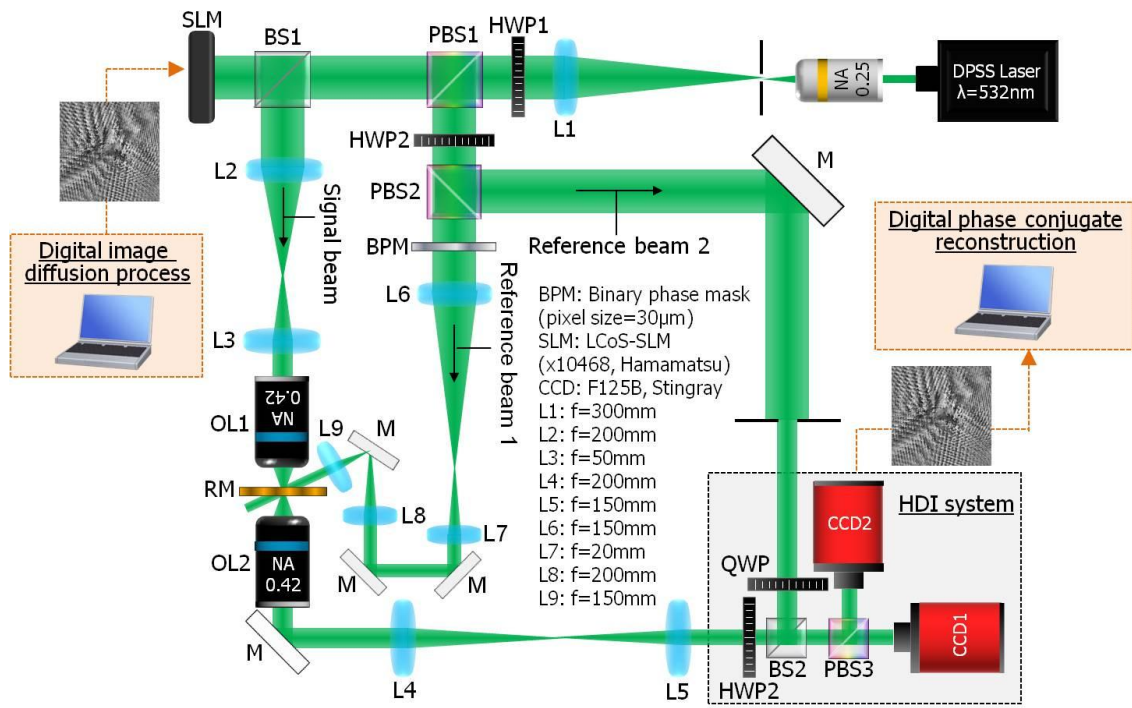


Fig. 5.11. Experimental setup

5.3.2 実験方法

まず本実験で用いる5枚の異なるデータページを図5.12に示す．データページは 8×8 のデータピクセルから構成され、 0 と π の2値位相変調を持つ．位相ラッピングが観察されるが、これはLCoS-SLMの初期形状歪みを補正するための位相パターンを付加しているためである．これらのデータページは記録される前に、デジタル画像拡散過程[図X.X(a)]において、予め拡散画像に変換され、それらの拡散画像を図5.13に示す．

以下では、本実験における多重記録の動作手順について説明する．最初に、信号光路と記録・読み出し用参照光路のシャッターを開け、位相計測用参照光路のシャッターを閉じる．拡散画像#1をSLMに表示し、拡散信号光#1をスペックル参照光との干渉によってホログラフィック媒質面の記録位置#1に記録する．次に、拡散画像#2をSLMに表示する．拡散信号光#2をスペックル参照光との干渉によってホログラフィック媒質面の記録位置#2に記録する．記録位置の空間的なシフトは、自動ステージによって行われ、シフト間隔は $8\mu\text{m}$ シフトに設定した．以上の動作を拡散画像#5まで続けることで、多重間隔 $8\mu\text{m}$ で5枚の拡散位相画像を多重記録する．ここで、拡散信号光#1~#5の記録時間は、回折効率が均一になるように調整し、それぞれ2秒、4秒、6秒、8秒、10秒とした．また、ポリマー化の反応を完全に終了させるために、記録間隔を約10分確保した．記録時の信号光パワーと参照光パワーはそれぞれ $70\mu\text{W}$ 、 $210\mu\text{W}$ とした．なお、従来のスペックルシフト多重を行う場合においても、同様の動作手順であるが、SLMに表示する画像を変更している．つまり、図5.13に示す拡散画像ではなく、図5.12に示すデータページを直接記録媒質へ記録する．

以下では、読み出しの動作手順を示す．まず、信号光路のシャッターを閉じ、位相計測用参照光路のシャッターを開ける．次に、自動ステージによって媒質を元の記録位置#1に戻し、読み出し用参照光を媒質へ照射することで拡散信号光#1を読み出す．そして、HDIによって位相計測を行い、光学的な拡散画像#1を電子データに変換する．次に、媒質を元の記録位置#2にシフトし、読み出し用参照光によって、拡散信号光#2を読み出す．HDIによって、光学的な拡散画像#2を電子データに変換する．上記動作を繰り返すことで、拡散信号光#1~#5を順々に読み出す．全ての拡散画像#1~#5を読み出した後は、デジタル位相共役再生によって、再生データページ#1~#5を計算する．読み出し時における読み出し用参照光パワーと位相計測用参照光パワーはそれぞれ $35\mu\text{W}$ 、 $10\mu\text{W}$ とした．



Fig. 5.12. Original data page and it is also used in normal speckle shift multiplexing

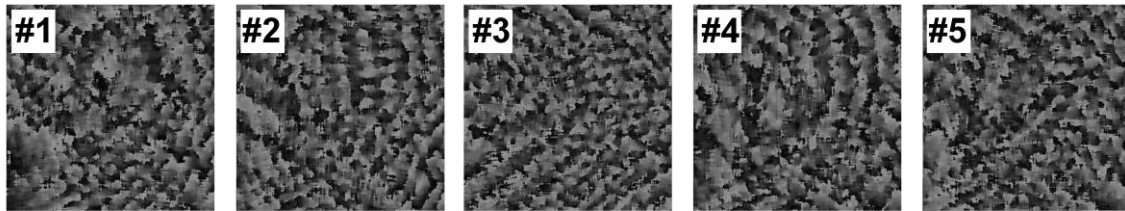


Fig. 5.13. Diffusion phase-only image and it is also used in speckle shift multiplexing with our method

5.3.3 デジタル位相共役再生

デジタル位相共役再生を動作させる上で必要な実験技術を以下に示す。

(i) SLMとCCD間のピクセルマッチング

SLMとCCD間のピクセルマッチングは必ずしも行う必要はないが、ピクセルマッチングを行う方がデジタル位相共役再生処理が非常に簡単になる。ピクセルマッチングを行わない場合、デジタル画像拡散過程とデジタル位相共役再生で扱う画像サイズを一致させるために、コンピュータによる補正処理が必要になる。また、補正処理時に量子化誤差も発生してしまう。

図5.14にピクセルマッチングの概念図を示す。SLMとCCDのピクセルサイズはそれぞれ $20 \times 20 (\mu\text{m}^2)$ 、 $3.75 \times 3.75 (\mu\text{m}^2)$ と異なる。そこで、75mmと400mmの焦点距離を持つ2枚のレンズから構成される4f光学系をSLMとCCD間に挿入し、レンズビーム径を3/16に縮小している。図5.15は、ピクセルマッチングが完全に動作した場合に、拡散位相画像がSLMとCCD面上に表示・照射される領域を示している。図5.15(a)に示すSLM面上に表示された拡散位相画像は、CCD面上で図5.15(b)に示す空間ピクセル座標に結像する。ただし、用いるレンズの焦点距離は必ずしも仕様通りではないため、CCD面上に結像する画像のサイズに若干のずれが生じる場合がある。また、BSやレンズが光軸に対して垂直に配置されていない場合、CCD面に結像する画像に傾きが生じる場合がある。従って、デジタル位相共役再生には、非常に精密な光学調整が求められる。

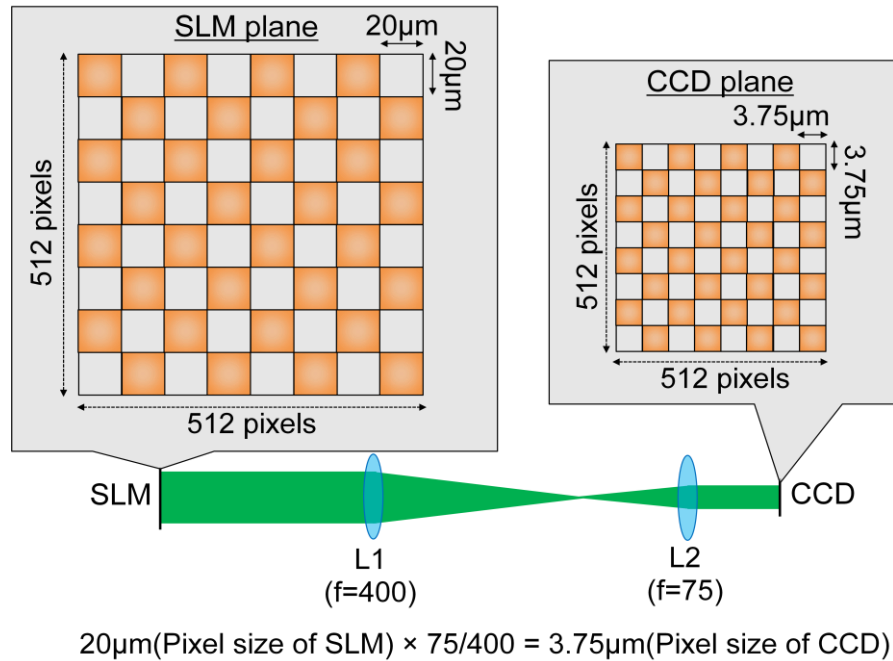


Fig. 5.14. Reduced optical system for the pixel matching between SLM and CCD. Image on the SLM is imaged onto the CCD with 1:1 relationship.

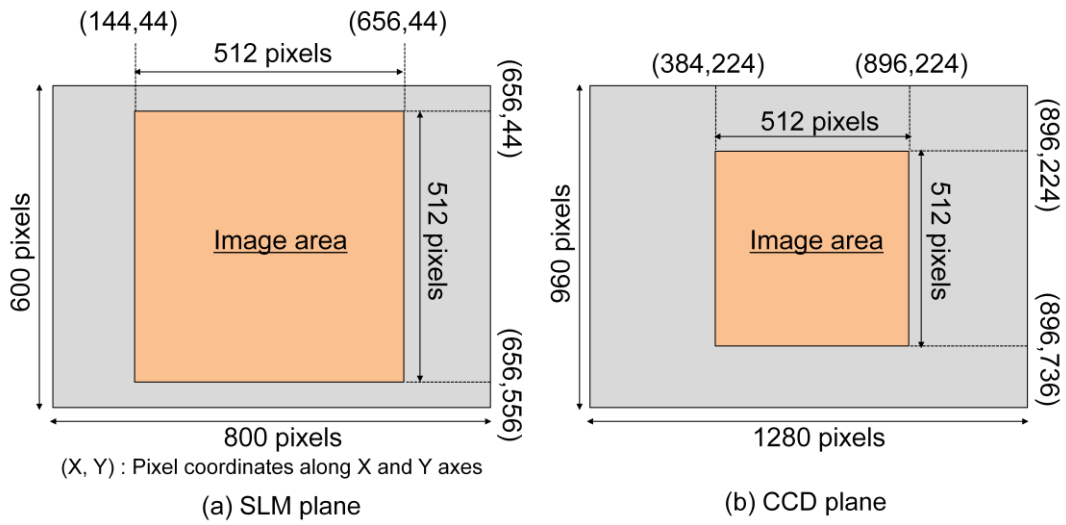


Fig. 5.15. Image alignment on SLM and CCD. In the case where optical image is not correctly imaged onto the CCD plane, as illustrated in Fig. x(b), due to image tilt and size expansion/reduction, digital phase conjugation does not work.

(ii)光学歪みの補正

光波が光学系を伝搬する際、各光学素子から大きな位相歪みを受け、これを補正しない場合、本実験におけるデジタル位相共役再生は成立しない。具体的に歪みを与える主要な要因としては、図5.11における各平凸レンズが持つ収差や対物レンズの焦点位置に配置された記録媒質が挙げられる。特に、焦点距離 $f=75\text{mm}$ の平凸レンズは、大きな曲率を持つため、光波に大きな収差を与える。また、厚さ 1.6mm を持つ記録媒質も同様に、透過する光波に非常に大きな球面収差を与える。

図5.16に本実験で用いた歪み補正方法を示す。まず、SLMに白紙ページを表示し、光学系を伝搬した平面波を、CCD面上でHDIによって位相計測する。この時、光学系に歪みがない場合、一様な位相分布が計測されるはずであるが、各光学素子の収差や素子調整の不正確さによる位相歪みが計測される。ここでは、この計測した位相歪みパターン自身を補正データとして用いる。具体的には、ある位相画像を計測した時、コンピュータ上でこの計測画像に対して、位相歪みパターンを差し引き、位相歪みの無い補正された位相画像を得る。高い空間周波数を持つ位相画像の場合、必ずしも白紙ページと等価な位相歪みを受けるわけではないが、本実験では少なくともこの簡単な補正方法が十分に機能する。

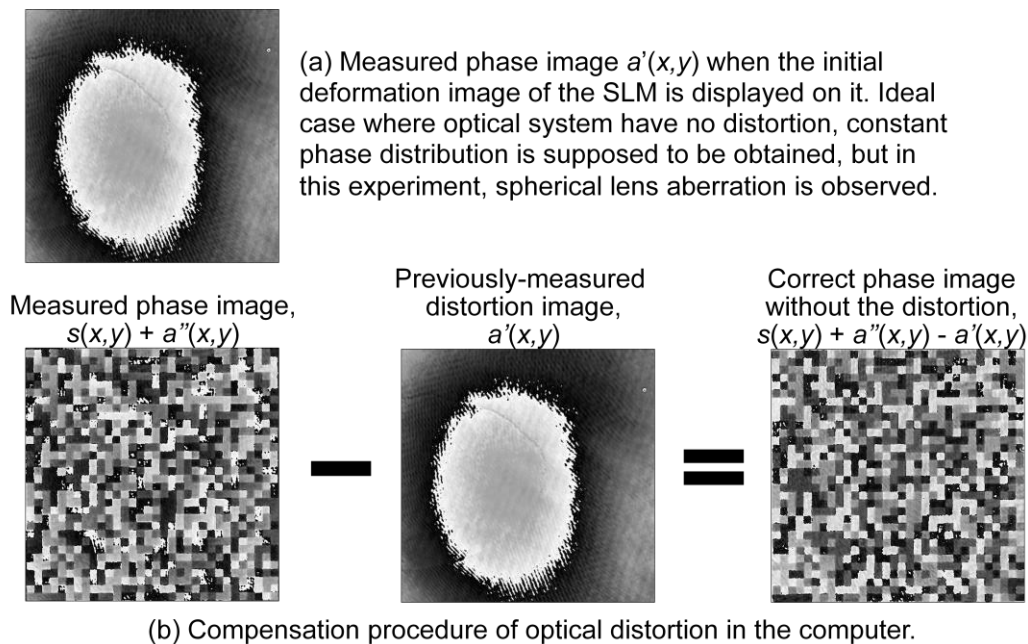


Fig. 5.16. Compensation of optical distortion such as lens aberration and dust on optical elements. When optic distortion is compensated, digital phase conjugation can be realized.

5.3.4 ページ間クロストーク低減

図 5.17 と図 5.18 に、多重記録されたホログラムからの再生画像を示す。図 5.17 は従来方式による再生画像、図 5.18 は提案方式による再生画像をそれぞれ示している。従来方式の結果を見ると、他ページからの大きなページ間クロストークノイズが重畳しており、非常に不鮮明である。各再生画像の SNR は、それぞれ 0.28, 0.91, 2.25, 1.19, 2.01 であった。5 枚の多重記録にしては再生品質が劣化し過ぎているように見えるが、これは多重間隔をシフト選択性と等価に設定していることが最大の要因と考えられる。一方、図 5.18 の結果を見ると、各再生画像は、非常に高いコントラストを示しており、明らかにクロストークノイズが低減されている。また、各再生画像の SNR は、それぞれ 7.56, 7.16, 6.97, 6.85, 7.21 であった。以上のように、元構造が判別できないような拡散した画像を敢えて使用することで、大幅な SNR の改善を達成した。加えて、世界初のデジタル位相共役再生の実験的実証に成功したとも言える。

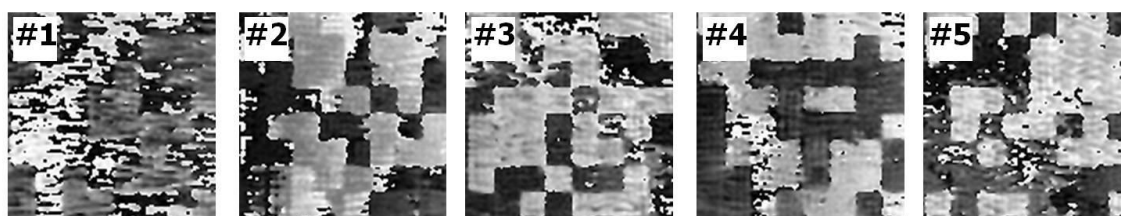


Fig. 5.17. Reconstructed data page in normal speckle shift multiplexing.



Fig. 5.18. Reconstructed data page in speckle shift multiplexing with our method.

5.4 まとめと今後の課題

本章では、HDS におけるページ間クロストーク低減技術として、デジタル画像拡散技術(DIDT)を提案した。DIDT は、複素振幅生成技術と複素振幅検出技術を基にして一部の光学処理をコンピュータ処理に置き換えているため、位相共役光学系やランダムディフューザ等の新たな光学素子を追加することなくページ間クロストークを大幅に低減できる。また、DIDT において、HDS にデジタル位相共役再生を世界で初めて導入している点は大きな特色と言える。5.2 節では、数値シミュレーションにより DIDT の性能評価を行った。具体的には、拡散率 N_{diff} をおよそ 3 倍に設定した時、記憶容量を約 6 倍に拡大できることを示した。拡散率 N_{diff} をさらに増加させることによって、記憶容量を 10~20 倍に拡大することも可能であるが、データ転送速度が犠牲になる点に注意が必要である。さらに、5.3 節では、5 枚のホログラムの多重記録再生実験を通して DIDT によるノイズ低減効果を実証した。本実験において、使用した光学系は従来型 HDS と全く同じものであり、複素振幅制御技術を基にした高度なコンピュータ処理を導入している点で従来 HDS と異なる。

今後の課題としては、まず数値シミュレーションによって DIDT の最適化を行う必要がある。現段階では、ランダムディフューザの拡散率 N_{diff} や対物レンズの NA を固定しており、これらパラメータの変化がページ間クロストークの低減効果に与える影響を調査し、パラメータの最適化を図らなければならない。

また、DIDT ではコンピュータ上のデジタル処理を特長としているが、この処理にかかる時間は HDS のデータ転送速度に影響を与える可能性がある。そこで、再生時の一連の流れ(光学ホログラムの読出し、光複素振幅検出、デジタル位相共役再生)にかかる時間を自動プログラム化した実験によって見積もり、HDS の転送速度にほぼ影響がないことを示す必要がある。

DIDT においてコンピュータ上で行うデジタル位相共役再生では、実光学系を構成するレンズの形状や偏光素子等を考慮しているわけではない。つまり、従来の光位相共役再生に見られる光学系の歪み補正効果は、このデジタル位相共役再生では実現することが難しい。すなわち、現状のデジタル位相共役再生はページ間クロストークのみを低減可能とし、HDS システム全体の固定的なノイズ(SLM の初期形状歪み、CCD ノイズ、レンズ収差、光学素子の傷)は残留したままである。そこで、これら固定ノイズを低減するプログラムをデジタル位相共役再生に組み込むことで、より完全なデジタル位相共役再生を実現することが今後求められる。また、高度なデジタル位相共役再生の技術的確立は、HDS に留まらず、画像イメージング技術や生体計測等の多くの分野に飛躍的な進歩を与える。

参考文献

- [1]. W. Jia *et al.*, “Coaxial holographic encoding based on pure phase modulation,” *Appl. Opt.*, **50**, pp. H10-H15 (2011).
- [2]. B. Das *et al.*, “Phase modulated gray-scale data pages for digital holographic data storage,” *Opt. Commun.*, **282**, pp. 2147-2154 (2009).
- [3]. T. Inoue *et al.*, “LCOS spatial light modulator controlled by 12-bit signals for optical phase-only modulation,” *Proc. SPIE*, **6487**, 64870Y(1-11) (2007).
- [4]. A. Okamoto *et al.*, “Holographic diversity interferometry for optical storage,” *Opt. Express*, **19**, pp. 13436-13444 (2011).

第 6 章

光複素振幅生成のための空間クロスモジュレーション法

光複素振幅は光の位相と振幅の組み合わせであり、コンピュータによってこれらを制御することは、光学研究を多様化し、光学処理の高速性と電子処理の柔軟性を組み合わせたハイブリッドな光デバイスを創出可能にする。光複素振幅生成技術は、半世紀ほど前に光情報処理分野で初めて使用され、その後今日に至るまで、ビーム形成[1]、光ピンセット[2,3]、ホログラフィックメモリ(HDS: Holographic data storage)、3D ディスプレイ、大気揺らぎの補正[4]等のあらゆる分野で応用されている。

通常、空間光変調器(SLM: Spatial light modulator)は任意の振幅と位相を同時かつ独立に操作することはできない。そこで、二つの SLM を直列に繋ぎ、各 SLM によって振幅と位相を別々に変調することで任意の複素振幅を合成する方法が提案されている[5]。しかしながら、この方法では、必要な光学素子数が非常に多くなる点が課題になる。具体的には、二つのレンズから構成される $4f$ 光学系、及び、複数の偏光子と検光子を用意しなければならない。また、二つの SLM の位置合わせをピクセル単位の精度で行う必要もある。従って、振動が大きい環境下では、この方法は機能しないと考えられる。

先述したように、一つの SLM で所望の複素振幅を変調することは通常不可能である。しかし、コンピュータ上で所望の複素振幅情報を振幅分布または位相分布に適切な処理を通してエンコードし、そのエンコードパターンを SLM に表示することで、実光学系上に所望の複素振幅場を作り出すことが可能になる。その代表的な方法として、オフアキシス計算機合成ホログラム(CGH: Computer generated holograms)がある[6]。このオフアキシス CGH では、任意の複素振幅を参照平面波との干渉縞によって位相ホログラムまたは振幅ホログラムとしてエンコードし、そのエンコードパターンを SLM に表示することで複素振幅変調を実現する。この方法は、単一の SLM のみで実現できるため、先述した SLM を直列配置する方法と比較すると、装置の低コスト化が可能である。しかしながら、正確な 1 つの複素振幅場を実現するためには SLM のピクセルを 100 個程度犠牲にしなければならない。従って、生成可能な光複素振幅場の空間解像度は非常に低くなる。また、この方式では、+1 次回折光だけを抽出し、光複素振幅変調を実現するため、達成可能な回折効率は最大で 30%程度である。

この他、複素振幅変調を実現する代表的な方法として、二重位相ホログラム法がある[7,8]。この方法では、任意の複素振幅値を二つの位相値に分解し、それらを空間的に交互に配置したチェスボード型位相分布(エンコードパターン)を SLM に表示することで、光複素振幅変調を実現する。本方式は、回折格子を SLM に表示し、必要な回折成分だけを抽出するという点では、上記したオフアキシス CGH と同様である。そのため、本方式における達成可能な空間解像度や回折効率は低くなる。

これらに対して、入射光エネルギーを全て所望の光複素振幅に費やすことができる方法として、オンアクシス CGH の一種であるキノフォームが古くから提案されている[9]。キノフォームでは、全ての入射光成分が所望の回折次成分にのみ消費されるため、90%以上の回折効率を達成できる。キノフォームでは、複素振幅情報のフーリエ変換スペクトルにおける位相成分をエンコードパターンとしており、これは「拡散性の強い物体のフーリエ変換分布は、散乱波面を形成し、その波面における位相分布は元物体のほとんど全ての重要な特徴を保持している」という光の性質を基にしている。この光波における位相の重要性はこれまでもいくつかの研究で経験的に実証されている。しかしながら、キノフォームは複素振幅物体の再生空間が SLM 面のフーリエ空間近傍に限られるという重大な欠点を持つ。また、キノフォームでは、フーリエスペクトルの振幅波面を一樣にするために物体にランダム位相を付加している。そのため、キノフォームによって再生される物体には細かいスペックルノイズが生じてしまう。

これらの問題を解決するために、我々は、空間クロスモジュレーション法(SCMM: Spatial cross modulation method)と呼ばれる光複素振幅生成技術を新規に提案している。SCMM では、ランダムディフューザを用いることで複素振幅物体の散乱波面を生成し、その波面の位相成分のみを抽出した散乱位相画像をエンコードパターンとする。SCMM における最も重要な特長は、ランダムディフューザを配置することで、フーリエ変換を行う事なく任意の空間に物体の散乱波面を形成できる点にある。この特長によって、SCMM における再生可能な領域は、従来の「フーリエ変換面近傍」から「全空間」に拡張される。また、キノフォームではコンピュータ上で物体にランダム位相を直接付加しているが、SCMM ではランダム位相を有するディフューザを物体の外に配置している。そのため、SCMM による再生物体は本質的にスペックルノイズを含まない。さらに、SCMM は、キノフォームと共通して、入射光パワーの全てが所望の回折光に消費されるという特長を持つため、理想的にはほぼ 100%の回折効率を達成できる。この他、高い空間解像度、単一の SLM で実現できる点も SCMM の特色である。

6.1 節では、SCMM の基本構成・動作原理を説明する。6.2 節では、数値シミュレーションによって SCMM の再生特性を評価する。具体的に、6.2.1 節では、数値シミュレーションモデルを説明する。6.2.2 節では、ランダムディフューザの拡散程度によって再生品質がどのように変化するか調査し、結果の考察を通して SCMM における再生特性を理解する。6.2.3 節では、SCMM、オフアクシス CGH、二重位相ホログラム法を、空間解像度および回折効率の観点から比較する。6.3 節では、SCMM を HDS に応用した場合について述べる。具体的には、6.3.1 節で基本動作および特長について述べる。6.3.2 節では、実験光学系と実験手順について説明する。6.3.3 節では、実験結果を示し、SCMM が任意の複素振幅を有するデータページを生成できることを示す。6.3.4 節では、本章を総括した後、今後の課題について述べる。

6.1 基本動作・特長

ここでは、図 6.1 に示す SCMM の基本動作について、コンピュータ上の拡散位相画像計算過程(デジタルエンコード過程)と所望複素振幅の光学的再生(光学的デコード過程)に分けて説明する。ここで、図 6.1 において、元物体の入力・再生空間は、SLM 面と光学的に等価な位置に設定しているが、これに制限されるものではない。

図6.1(a)に示すコンピュータ上のエンコード過程では、まず初めに、入力空間に任意の複素振幅物体を用意する。なお、物体に2次元、または、3次元の制限はない事に注意する。次に、複素物体のフーリエ変換分布を高速フーリエ変換法(FFT)により求める。そして、フーリエ変換面において、物体光の空間フーリエスペクトルとデジタルランダムディフューザ(コンピュータ上の仮想的なランダムディフューザ)の空間位相分布を掛け合わせる。その後、掛け合わされた空間スペクトルの逆フーリエ変換を通して、元物体の拡散画像(散乱波面)が出力面において求まる。拡散画像の計算後、振幅成分を排除し(一定と仮定)、位相画像の符号を反転(位相共役の計算)することで、SLMに表示する拡散位相画像(エンコードパターン)が完成する。ここで、この散乱位相画像には元複素振幅物体の振幅と位相情報が空間的に相互に変調されているため、以降において、散乱位相画像を空間クロスモジュレーション画像と呼ぶ。CGHにおける計算量は、3D動画表示の場合、特に重要な課題である。上記エンコード過程において、扱う複素振幅物体を2D画像と仮定した場合、2Dのフーリエ変換と2Dの逆フーリエ変換、2D分布同士の乗算の処理が必要になるため、総計算量は $2N^2 \log_2 N + N^2$ で表される。なお、 N はx軸方向のSLMピクセル数である。

図6.1(a)に示す光学的デコード過程について説明する。初めに、クロスモジュレーション画像(散乱位相画像)を位相SLMに表示し、入射光をSLMに照射する。次に、変調された光波は、第一フーリエ変換レンズを介して光学的フーリエ変換され、光学的ランダムディフューザ面に到達する。その後、スペクトル変調光がランダムディフューザを再度透過することで、元の複素振幅物体が再生空間に結像する。ここで、SCMMを正常に動作させるためには、デジタルディフューザと光学的ディフューザの空間位相分布が一致している必要がある。これらの分布を一致させるためには、主に以下の手段が考えられる。(1)光学ディフューザの空間分布を予め位相計測手法等で計測しておき、その計測データをエンコード過程で用いるデジタルディフューザとする方法と、(2)電氣的に制御可能な位相SLMを光学ディフューザとして用いる方法である。

以下では、SCMM の特徴について述べる。初めに、SCMM とキノフォームを比較してみる。両方式は、散乱波面における位相成分の重要性を活用する点で共通している。しかし、両方式は、複素振幅物体の入力・再生空間の自由度に決定的な違いがある。従来のキノフォームでは、フーリエ変換レンズ、または、遠方場によるフーリエ変換を通して散乱波面を求めるため、入力空間(再生空間)は図 6.1 に示すフーリエ空間に限定されていた。一方の SCMM は、物体をランダムディフューザに透過させることで、あら

ゆる空間に散乱波面を形成することが可能である。つまり、物体の入力再生空間は、従来の「フーリエ変換面近傍」から「全空間」に拡張される。また、一般的なキノフォームでは、一様な散乱スペクトル波面を得るために、物体にランダム位相を埋め込んでおり、これによって、再生物体には、斑点状のスペックルノイズが発生する。一方の SCMM では、物体にランダム位相を付与せず、ランダム位相を有するディフューザに透過させることで、一様な散乱波面を計算しているため、本質的にスペックルノイズが発生しない。

次に、SCMM と従来方式(オフ軸 CGH および二重位相ホログラム)を比較する。先述したように、従来方式では、複素振幅情報をホログラムの形にエンコードするため、エンコードパターンを表示した SLM からの反射光は複数の回折次成分をもつ。つまり、不要な回折次成分に光パワーが分散させるため、達成可能な回折効率²は 20~30% 程度である。これに対して、SCMM は、SLM へ表示する散乱位相画像は、ブレード格子のように、単一の回折次成分のみをもつ。そのため、90% 以上の回折効率を達成できる。この他、SCMM は、従来方式と比べ、より高品質な複素振幅を再生できる。そのため、達成可能な空間解像度も高い。これら優位性の実証は、6.2.4 節において数値シミュレーションによって行う。

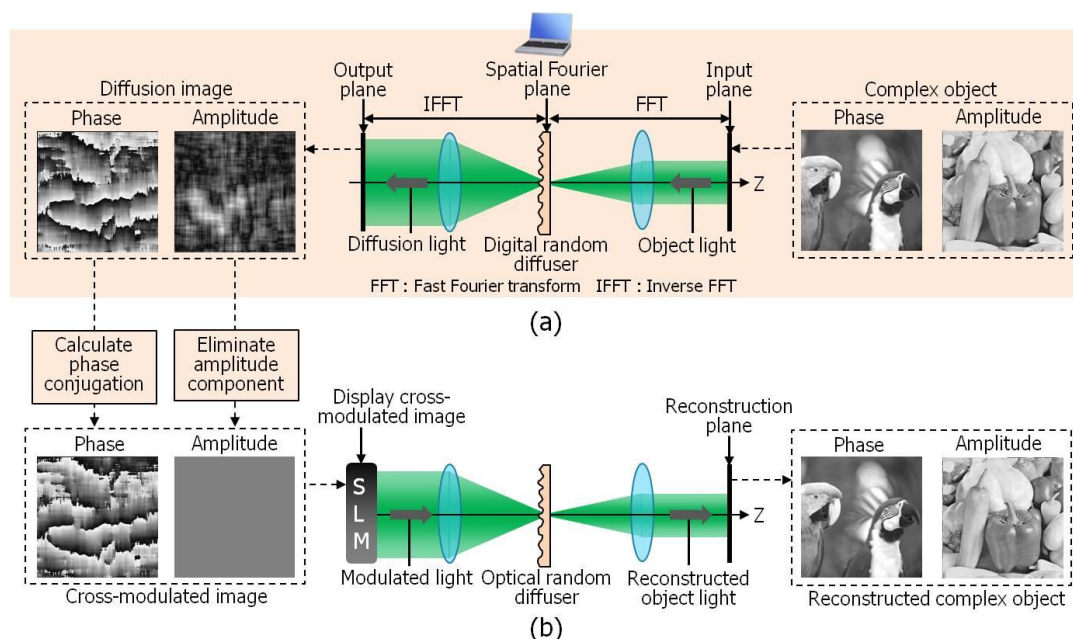


Fig. 6.1. Conceptual diagrams of spatial cross modulation. (a) Digital encode step in computer. (b) Optical decode step.

6.2 数値シミュレーション

6.2.1 シミュレーションモデル

以降の節では、SCMM の再生特性を数値シミュレーションによって評価している．そこで本節では、SCMM、二重位相ホログラム、オフアクシス CGH、それぞれの数値シミュレーションのモデルについて説明する．用いたシミュレーションパラメータは表 I に纏めている．

Table I. Summarized simulation parameters.

Common parameters		Parameters for spatial cross modulation	
Wavelength of laser source, λ (nm)	532	Diffusion angle by diffuser, θ_{diff} (degree)	Variable
Focal length of Fourier transform lens, L_f (mm)	200	Zeropadding rate, N_θ	32
Number of data pixel, $N_{dx} \times N_{dy}$	32×32	Gray level of random diffuser, G_{diff} (level)	2048
Pitch of data pixel, $L_{dx} \times L_{dy}$	Variable	Parameters for double phase modulation	
Nyquist aperture size, D_N (μm)	$\lambda L_f / L_{dx}$	Number of subpixel per data pixel, $N_{ux} \times N_{uy}$	Variable
Gray level for amplitude image, G_p (level)	8	Size of spatial filter in Fourier plane ($\times D_N$), S_f	Variable
Gray level for phase image, G_a (level)	8	Parameters for off-axis amplitude hologram	
Parameters for SLM		Number of SLM pixel per grating, N_s	Variable
Gray level of SLM, G_{slm} (level)	256	Number of grating per data pixel, N_g	Variable
Pitch of SLM pixel, $L_{px} \times L_{py}$ (μm_2)	10×10	Incident angle of reference light, θ_{in} (degree)	$\lambda / (N_s L_{dx})$
Number of SLM pixel, $N_x \times N_y$	1024×1024	Size of spatial filter in Fourier plane ($\times D_N$), S_f	Variable
Modulation depth of phase-only SLM, Md	2π		

シミュレーションで仮定する SLM の仕様は、ピクセル数:1024×1024, 変調範囲:[0, 2 π], グレーレベル: 256 階調(8bit), フィルファクター及び反射率(透過率): 100%とする．用いる複素振幅物体は、簡単化のため 2D 画像とする．図 6.2 と図 6.3 に、シミュレーションの光学モデル図とフローを示す．物体の入力再生面は、簡単化のため SLM と光学的に等価な位置に設定している．ただし、SCMM の実施形態はこれの限りではないことに注意する．図 6.3(b)に示す二重位相ホログラムのシミュレーションフローにおいて、複素振幅値 $A(x,y)\exp[j\phi(x,y)]$ の二つの位相ベクトル θ_1 と θ_2 への分解は以下の式に従って行っている．

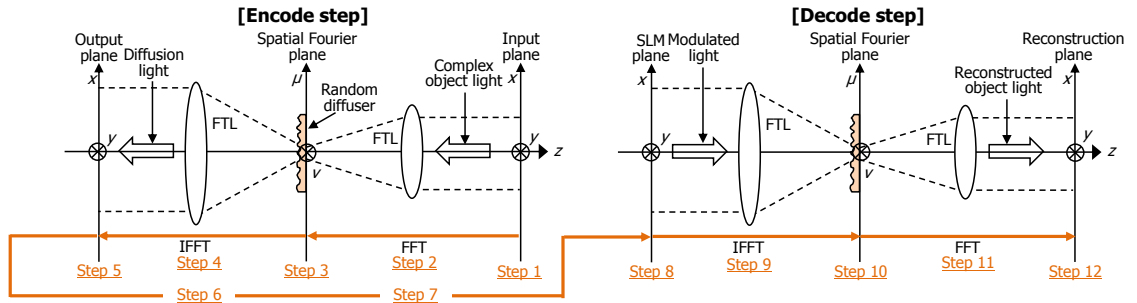
$$\theta_1(x, y) = \phi(x, y) + \cos^{-1} \left[\frac{A(x, y)}{2} \right], \quad (6.1)$$

$$\theta_2(x, y) = \varphi(x, y) - \cos^{-1} \left[\frac{A(x, y)}{2} \right]. \quad (6.2)$$

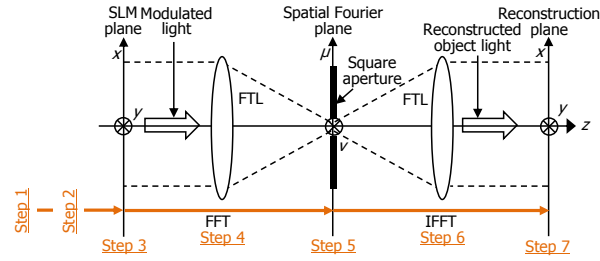
図 6.3(c)に示すオフ軸 CGH のシミュレーションフローにおいて, SLM に表示する振幅ホログラム $I(x, y)$ は以下の式によって与えられる.

$$I(x, y) = I_0 + A(x, y) \cos[kx \sin \theta_{in} - \varphi(x, y)], \quad (6.3)$$

I_0 は $\cos$ 項が常に正であるためのバイアス成分, θ_{in} を参照平面波の入射角度とする.



(a) Spatial cross modulation method



(b) Double phase modulation and off-axis amplitude hologram

Fig. 6.2. Simulation models.

[Encode step]

- Step 1. Make light with original complex object in input plane
- Step 2. Fourier-transform light by FFT
- Step 3. Multiply spatial spectrum of object light and spatial phase distribution of random diffuser
- Step 4. Inversely Fourier-transform multiplied light by IFFT
- Step 5. Diffusion image is obtained in output plane
- Step 6. Eliminate amplitude components in diffusion image
- Step 7. Calculate phase conjugation of the diffusion image

[Decode step]

- Step 8. Make light with cross-modulated image on SLM
- Step 9. Inversely Fourier-transform modulated light by IFFT
- Step 10. Multiply spatial spectrum of modulated light and spatial phase distribution of random diffuser on Fourier plane
- Step 11. Fourier-transform multiplied light
- Step 12. Original complex object is reproduced from phase only image on reconstruction plane

(a) Spatial cross modulation

[Encode step]

- Step 1. Decompose original complex object into two values using Eqs. (1)-(2)
- Step 2. Calculate encoded image like chess-board pattern using two values

[Decode step]

- Step 3. Make light with above phase distribution on SLM plane
- Step 4. Fourier-transform diffracted light by FFT
- Step 5. Extract zeroth diffraction order by spatial filtering
- Step 6. Inverse Fourier transformation of filtered light by IFFT
- Step 7. Complex object is reproduced on reconstruction plane

(b) Double phase modulation

[Encode step]

- Step 1. Make plane wave as reference light
- Step 2. Calculate encoded image by interference of complex object and plane wave with given incident angle using Eq. (3)

[Decode step]

- Step 3. Irradiate plane wave onto hologram on SLM plane
- Step 4. Fourier-transform diffracted light by FFT
- Step 5. Extract +1 diffraction order by spatial filtering
- Step 6. Inverse Fourier transformation of filtered light by IFFT
- Step 7. Complex object is reproduced on reconstruction plane

(c) Amplitude off-axis CGH

Fig. 6.3. Simulation flows.

図 6.4(a)-(c)に、SLM 上に表示されるエンコードパターン在设计図を示す。SCMM の場合、SLM 面上において[図 6.4(a)], 拡散率 N_{diff} を有するディフューザによって散乱したクロスモジュレーション画像は $N_{dx}N_{diff} \times N_{dy}N_{diff}$ の SLM ピクセルから構成される。 N_{dx} と N_{dy} はそれぞれ各軸方向のデータピクセル数とする。拡散率 N_{diff} はディフューザの拡散角 θ_{diff} から以下の式に従って求められる。

$$N_{diff} = \frac{\theta_{diff} + \cos^{-1}(N_{dx}L_{dx}/2L_f)}{\cos^{-1}(N_{dx}L_{dx}/2L_f)}. \quad (6.4)$$

ここで、 $\cos$ 項は元画像の最大角度スペクトル、 L_{dx} はデータピクセルピッチ、 L_f はフーリエ変換レンズの焦点距離とする。SLM の全体領域は、 $N_{dx}N_0 \times N_{dy}N_0$ と表され、 N_0 はゼロパディングレート、つまり、元画像を拡散させるためのゼロを詰めた領域である。例えば、 $N_0=N_{diff}$ の時、クロスモジュレーション画像は SLM の全体領域をカバーすることになる。次に、二重位相ホログラムの場合について説明する。図 6.4(b)に示す SLM 面上において、チェスボード位相パターンは $N_{dx}N_{ux} \times N_{dy}N_{uy}$ の SLM ピクセルから構成される。 N_{ux} と N_{uy} はそれぞれサブピクセルの数(SLM 数)とする。この方法では、一つのデータピクセル範囲に $N_{ux} \times N_{uy}$ の SLM ピクセルが含まれている。最後に、オフアキシス CGH の場合について説明する。図 6.4(c)に示す SLM 面上において、表示される振幅ホログラムは、 $N_{dx}N_sN_g \times N_{dy}N_sN_g$ の SLM ピクセルから構成される。ここで、 N_s は格子当たりの SLM ピクセル数、 N_g はデータピクセル当たりの回折格子数を表している。つまり、一つのデータピクセルは $N_sN_g \times N_sN_g$ の SLM ピクセル数を有することになる。

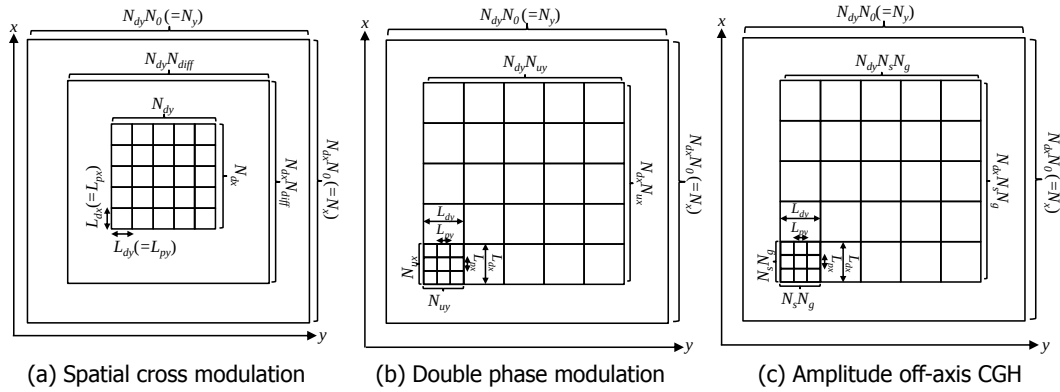


Fig. 6.4. Pixel layouts on SLM plane for each complex modulation. (a) Zero padding rate N_0 is for extra area to diffuse original image. (b) One data pixel consists of $N_{ux} \times N_{uy}$ subpixels (SLM pixels). (c) One data pixel consists of $N_s N_g \times N_s N_g$ SLM pixels.

次に、上記設計図を基に生成したエンコードパターンの例を図 6.5 に示す。用いた入力画像の仕様は表 I の通りである。図 6.5(a)は、 $N_{diff} = 8$ の場合におけるクロスモジュレーション画像を示している。元画像が大きく拡散し、元構造が全く判別できない状態が観察される。図 6.5(b)は、 $N_{ux} \times N_{uy} = 8 \times 8$ の場合におけるチェスボード位相パターンを示している。分解した二つの位相値が空間的に交互に配置されている様子が見て取れる。図 6.5(c)は、 $N_s = 4$ 、および、 $N_g = 2$ の場合における振幅ホログラム画像を示している。各データピクセルの範囲に二つの格子が存在し、それぞれの格子に四つの SLM ピクセルが含まれていることが分かる。

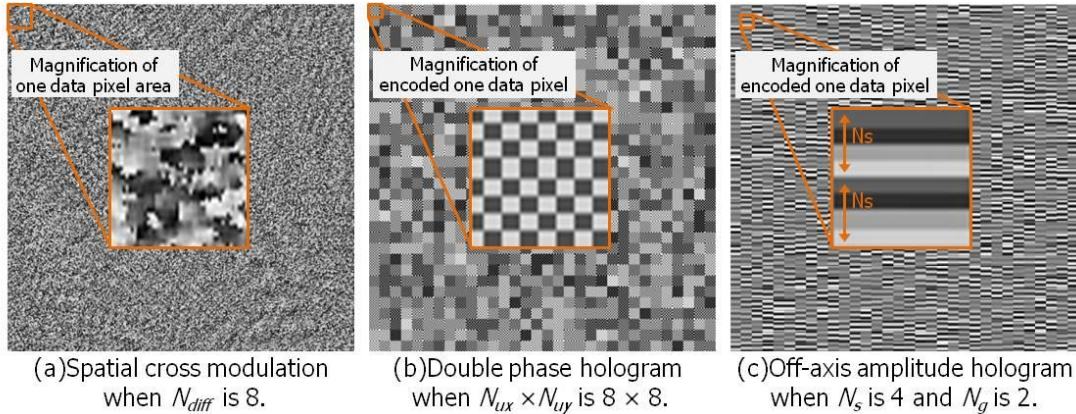


Fig. 6.5. Example of encoded images displayed on the SLM. These are used for reconstructing original complex object.

ランダムディフューザモデルとしては、ガウシアン型ランダムディフューザを仮定している。商用化されているほとんどの広角ディフューザはガウシアン型自己相関関数を持っている。ランダムディフューザの透過関数は以下の式によって表され、

$$t(x, y) = \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} (n_{diff} - 1) h(x, y) \right], \quad (6.5)$$

n_{diff} はディフューザの屈折率, λ は光波長, $h(x,y)$ はディフューザプロファイルとする.
ディフューザプロファイルの計算方法の詳細は文献[10]に譲る.

6.2.2 動作確認

以下では、SCMM が複素振幅変調方式として正常に機能することを確認する。

まず、図 6.6(a)と図 6.6(b)に入力振幅画像と入力位相画像を示す。それぞれの画像は、256 レベルの階調数によって表現され、全てのレベルを適切に含んでいる。従って、これらの画像から構成される複素振幅画像は、あらゆる複素振幅値を含むと仮定する。図 6.6(c)は用いたランダムディフューザの表面プロファイルを示しており、拡散率 N_{diff} は 4 に設定している。次に、このランダムディフューザによって拡散された散乱振幅画像と散乱位相画像(クロスモジュレーション画像)を図 6.6(d)と 6.6(e)にそれぞれ示す。散乱振幅画像を見ると、元の画像構造が全く判別できない程度に一様に拡散している。同様に、散乱位相画像も元の画像構造が全く判別できない程度に拡散している。このような状態の場合、先述したように、図 6.6(a)と図 6.6(b)に示した振幅と位相情報の両方が散乱位相画像に相互に変調されていることになる。最後に、図 6.6(e)に示す空間クロスモジュレーション画像から再生した複素振幅画像を図(f)-(g)に示す。再生位相画像は、劣化する事無く、ほぼ元通りに復元されている。一方、再生振幅画像は、若干の背景ノイズを含んでいる様子が見て取れる。これは、散乱振幅画像は一様(全てのピクセルの振幅を 1)であると仮定したことが主な要因である。この背景ノイズは、ランダムディフューザの拡散率 N_{diff} を向上させることで、容易に減少させることが可能である。ただし、詳しくは後述するが、拡散率 N_{diff} の向上と空間分解能はトレードオフの関係にあることに注意が必要である。

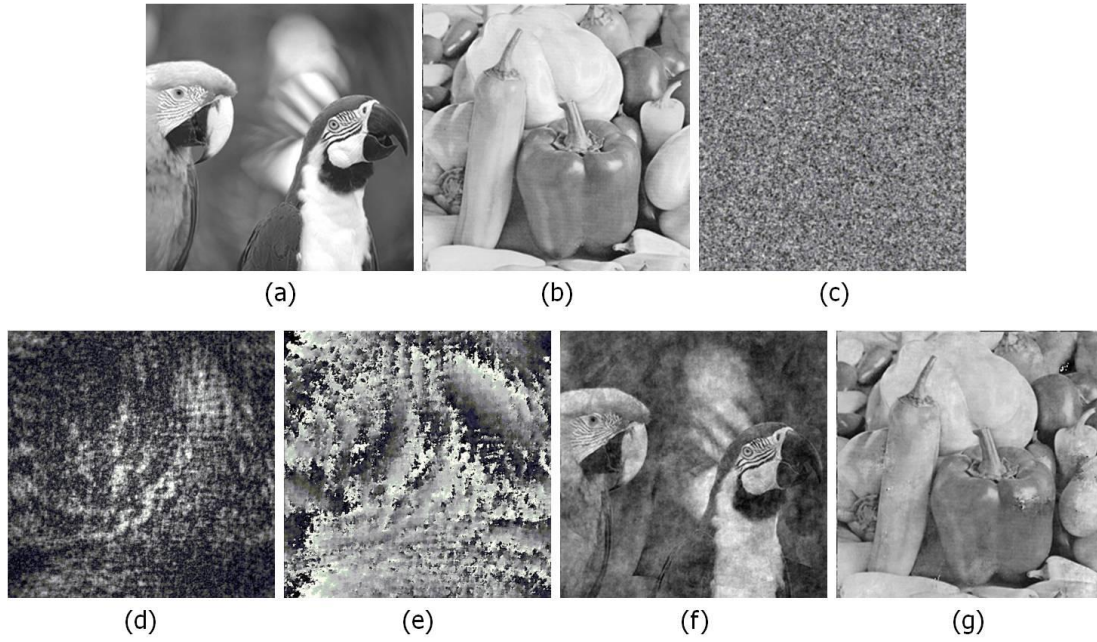


Fig. 6.6. Full complex amplitude modulation by spatial cross modulation method. Number of data pixel in used image is 256×256 and diffusion ratio by diffuser is 4.0. Note that the number of data pixel is different from that shown in Table I just in this case. (a)Original amplitude image; (b)Original phase image; (c)Spatial profile of random diffuser; (d)Diffused amplitude image; (e)Diffused phase image(Cross-modulated image); (f)Reproduced amplitude image; (g)Reproduced phase image.

6.2.3. ランダムディフューザの拡散率依存性

ここでは、拡散率 N_{diff} の向上した場合、再生振幅と再生位相成分の品質がどのように変化するか考察する。図 6.7 は、再生複素振幅画像における品質の拡散率依存性を示している。ここで、再生品質の評価指標として、以下の式で定義される信号対雑音比(SNR: Signal to noise ratio)を導入する。

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{m=0}^{N_{dx}} \sum_{n=0}^{N_{dy}} O(mL_{dx}, nL_{dy})^2}{\sum_{m=0}^{N_{dx}} \sum_{n=0}^{N_{dy}} \left\{ O(mL_{dx}, nL_{dy})^2 - R(mL_{dx}, nL_{dy})^2 \right\}}, \quad (6.6)$$

(mL_{dx}, nL_{dy}) は x - y 平面での空間ピクセル座標、 $O(mL_{dx}, nL_{dy})$ と $R(mL_{dx}, nL_{dy})$ はそれぞれ元画像と再生画像を示す。図 6.7 を見ると、拡散率 N_{diff} の増加に伴い、再生振幅画像の SNR は向上している。これは、元振幅画像の情報が拡散率 N_{diff} の増加に伴い散乱位相画像へ移行するためと考えられる。これに対して、再生位相画像の SNR は一見奇妙な振舞を見せている。 $N_{diff} = 3$ 以下の時、 N_{diff} の増加に伴い、SNR は低下傾向を示すが、 $N_{diff} = 3$ 以上の時、一転して SNR は増加傾向を示す。以下では再生位相の SNR が低下することについて考察を行う。まず拡散率 N_{diff} が低い場合、散乱振幅画像は極めて不均一な状態になると考えられる。その場合、各ピクセルでの散乱振幅値(真値)と一定振幅値(近似値)の間に大きなギャップが生まれ、これが再生位相画像の劣化を招くと考えられる。対して、拡散率 N_{diff} が高い場合、散乱振幅画像はより一様な波面を有するようになり、これによって上記ギャップが改善され、結果的に SNR の向上に繋がると推測される。再生位相の SNR が低下するもう一つの可能性として、元位相成分が散乱振幅画像(後に一定と仮定される)へ移行することが考えられる。しかし、もしこれが真である場合、再生位相 SNR は、 $N_{diff} = 3$ を超えた場合でも、常に低下傾向を示すはずである。従って、上記した可能性は否定される。なお、 N_{diff} が 11 を超える時、再生位相の SNR に不安定さが見られるが、これは恐らく位相ラッピングの影響であると予想される。

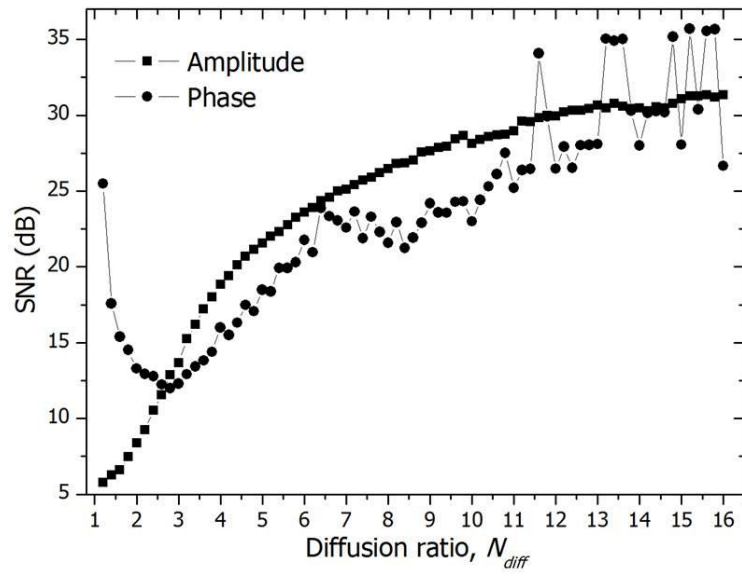


Fig. 6.7. Reconstruction quality depending on diffusion ratio N_{diff} by random diffuser.

6.2.4. 空間解像度及び回折効率の比較

まずは、各複素変調方式(SCMM, 二重位相ホログラム, オフアクシス CGH)を達成可能な空間解像度の観点から比較する. 図 6.8 に, SNR とコードレート(CR: Code rate)の関係を示す. ここで, コードレート CR は, 元画像とエンコード画像間のサイズ比であり, 空間解像度を評価する指標となる. 例えば, CR が大きい時, 空間解像度は低いとし, CR が小さい時, 空間解像度は高いとする. より詳しい定義は, 図 6.8 の説明文に記載されている. 結果を見ると, 各変調方式における共通する傾向として, CR の増加に伴い, SNR が向上する. 最も着目すべき傾向は, 全てのコードレート CR に渡って, SCMM が常に従来方式より高い SNR を維持していることである. この結果は, 同じ SNR を得るために必要なコードレート CR は SCMM の方が従来方式より低いことを示している. 例えば, SNR を 10(dB)を設定した場合, 本方式は 2~3 の CR を, 従来方式は 6 程度の CR をそれぞれ必要とする. 以上より, SCMM は従来方式より空間解像度の点で優れていることが分かる. 図 6.9 に CR = 8 の場合における各変調方式の再生複素振幅画像を示す. 二重位相ホログラムとオフアクシス CGH の再生結果を見ると, データピクセルの境界部分がぼやけており, 中心領域でもむらが観察される. 一方, 本方式の再生結果を見ると, 境界部分 (高空間周波数成分) は維持されており, むらも非常に小さい.

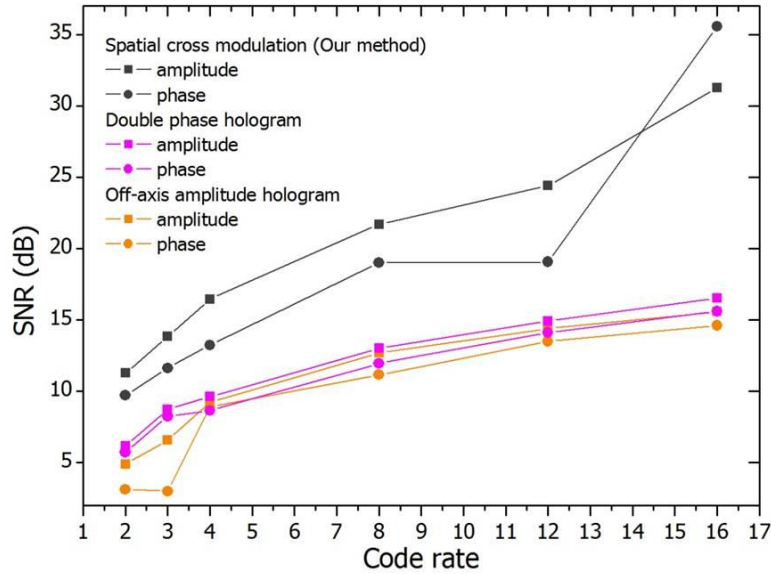


Fig. 6.8. Comparison of achievable spatial resolution between our method and conventional methods. Code rate in horizontal axis is defined as the ratio of the size between original image and encoded image on SLM and it is used for evaluating the achievable spatial resolution. For example, in our method, if the phase-only diffraction image is displayed on the SLM in the region being 4×4 times larger than the original image, the code rate is 4. As well, in the case of the double phase hologram, if the number of subpixels $N_{ux} \times N_{uy}$ within one data pixel is 4×4 , the code rate is 4. In the case of the off-axis amplitude hologram, if the number of SLM pixels $N_s N_g \times N_s N_g$ within one data pixel is 4×4 , the code rate is regarded as 4. Size of the square aperture used in the off-axis amplitude hologram and double phase hologram is optimized to obtain highest SNR for performing fair comparison.

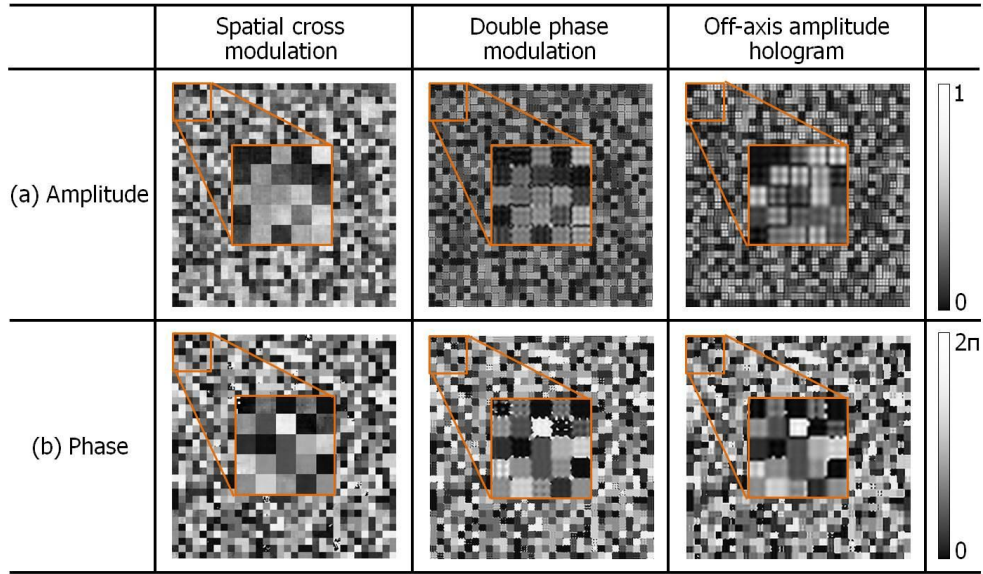


Fig. 6.9. Example of reproduced complex images for each complex modulation methods when code rate is 8.

次に、各複素変調方式(SCMM, 二重位相ホログラム, オフアクシス CGH)を達成可能な回折効率の観点から比較する. 図 6.10 に, 回折効率とコードレート CR の関係を示す. 結果を見ると, 二重位相ホログラムの場合, 得られる回折効率は 20%以下であることが分かる. これは, 所望の複素振幅変調を実現するために, 不要な回折次成分を除去していることに起因する[図 6.11(b)]. 同様に, オフアクシス CGH の場合, 5%以下の回折効率しか達成されていない. 仮に, オフアクシス CGH を振幅モードではなく位相モードで動作させるとしても, 得られる回折効率はおよそ 20%程度である. これらの従来方式は, 不要な回折次成分を除去し, 必要な回折次成分を抽出するという点で共通しており[図 6.11(b)と図 6.11(c)], それゆえ, 達成可能な回折効率は非常に低い. これに対して, SCMM の結果を見ると, 90%以上の回折効率が達成されている. SCMM において, 照射されるクロスモジュレーション画像は, 単一の回折次成分のみを回折させ, 理想的には, ブレーズド格子のように, 全ての入射光エネルギーがこの単一成分に使われる. これらの結果から, 回折効率の観点において, SCMM は従来方式を大きく凌駕することが分かる.

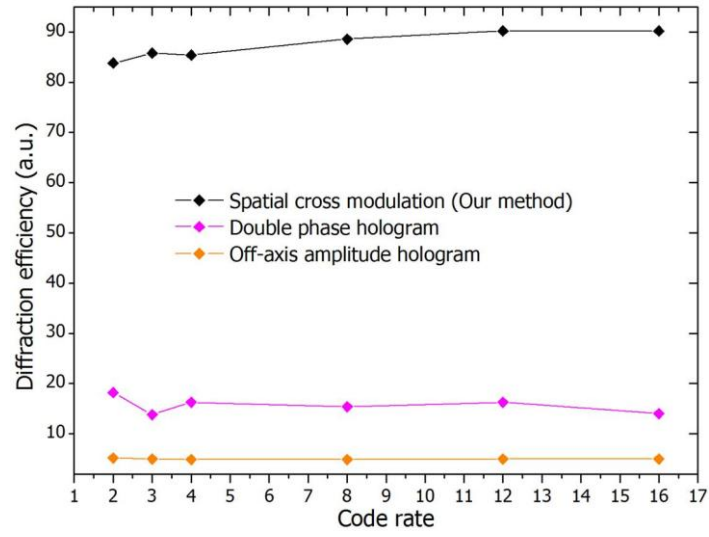


Fig. 6.10. Comparison of achievable diffraction efficiency between our method and conventional methods. The size of the square aperture used in the off-axis amplitude hologram and double phase hologram is the same as used in Fig. 8.

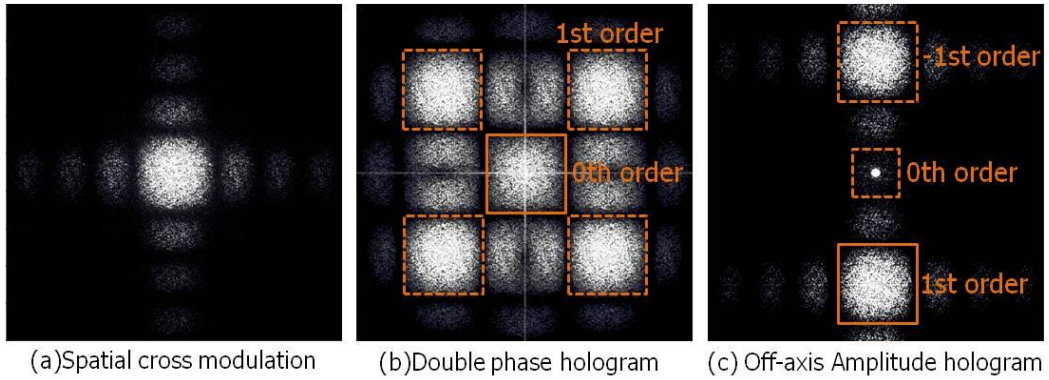


Fig. 6.11. Spatial Fourier spectrum for each complex modulation method. (a) No unwanted diffraction order appears. (b) 0th diffraction order corresponds to desired complex signal. (c) 1st diffraction order corresponds to desired complex signal.

6.3 ホログラフィックメモリへの応用

空間クロスモジュレーション法(SCMM)は、三次元ディスプレイ、バイオイメーシング、ビーム整形等のあらゆる分野に応用可能である。特に、SCMM を HDS に応用する場合、様々な利点をもたらすことができる。第一に、多値振幅と多値位相を組み合わせた空間直交振幅変調信号(SQAM: Spatial quadrature amplitude modulation)を SCMM によって生成することで、データ転送速度や記憶容量の増加が可能になる。第二に、SCMM を介した高度な電子処理の導入によって HDS を構成する光学素子数の減少や光学歪みの除去等を実現できる可能性もある。本節では、SCMM の応用形態を説明した後、SCMM による 8 値 SQAM 信号の生成実験を報告する。

6.3.1 基本動作

図 6.12 に SCMM を応用する HDS システムの概念図を示す。本システムの流れは、(a) コンピュータ上のデジタル拡散過程(エンコード過程)、(b) 光学的ホログラム記録・読み出し過程、(c) コンピュータ上のデジタル位相共役再生過程(デコード過程)、以上の三つの過程から構成される。本システムの強調すべき特長は、エンコードされた複素振幅信号が光学的ではなく電子的にデコードされる点にある。これは、従来の HDS に付加的な光学素子が不要であることを意味する。より具体的な動作の流れを図 6.12 を用いて以下で説明する。

図 6.12(a)に示すデジタル拡散過程(エンコード過程)では、まず SQAM 信号である複素振幅データページを入力面に用意する。従来の HDS では、2 値振幅変調されたデータページを用いるが、本 HDS システムでは、SQAM 信号(多値振幅と多値位相の組み合わせ)を使用する。次に、ランダムディフューザ(コンピュータ上の仮想的なディフューザ)によって複素振幅データページを拡散させた後、振幅成分を一定と近似し、位相成分のみを抽出する。以上によって、SLM に表示される拡散位相画像(空間クロスモジュレーション画像)が計算される。これらの動作は 6.1 節で説明したものと同様である。

次に、図 6.12(b)に示す光学的ホログラム記録・読み出し過程では、まず記録・読み出しに用いる空間クロスモジュレーション画像を位相 SLM に表示する。このように、従来の HDS では、2 値振幅画像を直接記録媒質に記録するが、本システムでは、元構造が全く判別できない散乱した位相画像を媒質に記録する。SLM によって光波に変調されたクロスモジュレーション画像は、光学的にデコードされることなく直接媒質に参照光との干渉によってホログラムとして記録される。ここで、本システムにおいて、記録媒質への多重記録方法に関して特に制約はない。ホログラムの読み出し方法も、従来通り、記録時と同様の参照光を用いて行う。読み出された空間クロスモジュレーション画像は、位相検出法を介してコンピュータ上の電子データに変換され、処理過程が光学処理からコンピュータ処理に移行する。

図 6.12(c)に示すデジタル位相共役再生過程では、まず初めに計測した複素振幅データ

の位相共役を計算する(位相符号を反転させる). その後は, 図 6.12(a)に対する位相共役伝搬を行い, 元の複素振幅データページが再生される.

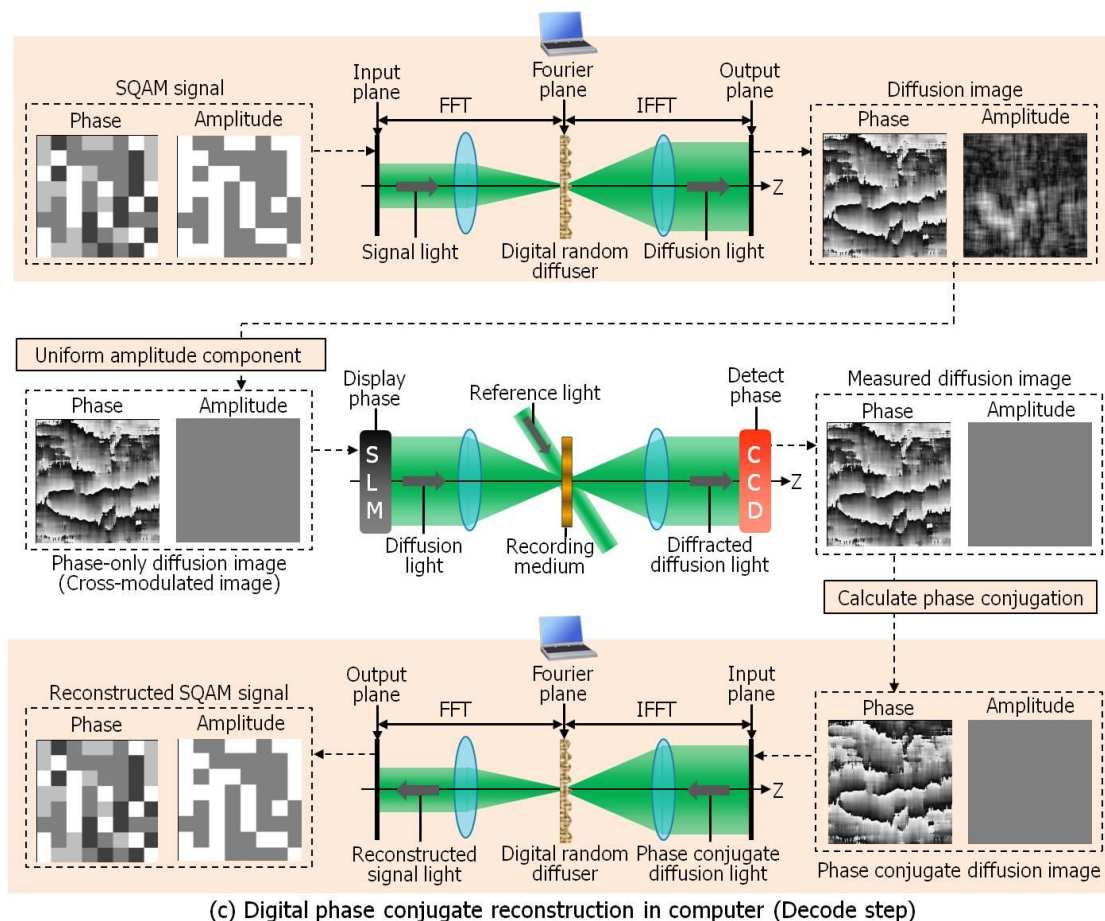


Fig. 6.12. Conceptual diagrams of our system when spatial cross modulation is introduced in the holographic data storage. In this system, the complex signal is digitally, not optically, reconstructed by importing phase information of the optical diffusion image into the computer through the phase detection method.

6.3.2. 実験光学系・実験方法

図 6.13 に実験で使用した光学系を示す．まず各光学素子の仕様を記載する．用いたレーザーは，532nm の DPSS レーザであり，最大出力は 200mW である．SLM は，浜松フォトニクス社製の LCoS-SLM(x10468)を用いており，ピクセル数は 800×600 ，ピクセルサイズは $20\mu\text{m}$ である．CCD は，スティングレイ社製で，ピクセル数は 1920×1080 ，ピクセルサイズは $3.75\mu\text{m}$ である．記録媒質は，共栄社化学社提供のナノゲルフォトポリマーを用いており，通常の写真ポリマーより高い空間周波数成分を記録可能なものである．全体の材料厚さは約 1.6mm で，その内訳は，前面ガラス 0.4mm，後面ガラス 0.8mm，フォトポリマー 0.4mm とする．

以下では，本実験の流れを実際に用いた画像を示しながら追っていく．まず，図 6.14 に本実験で使用した複素振幅画像を示す．振幅画像は，振幅 1.0 と 0.25 の 2 値変調から構成され，位相画像は，位相 $\pi/2$ ， π ， $3\pi/2$ ， 2π の 4 値変調から構成される．従って，この複素振幅画像は 8 値 SQAM 信号が変調されていることになる．データピクセル数は 8×8 とし，各データピクセルは 16×16 の SLM ピクセル数から成り立つ．この複素振幅画像は，拡散率 $N_{\text{diff}} = 4$ を持つ拡散板によって，広範囲に拡散される．生成されたクロスモジュレーション画像を図 6.15(a)に示す．デジタル拡散過程において計算されたこの画像は，図 6.13 中の LCoS-SLM に表示され，入射光波に変調される．変調された光波は，ナノゲルフォトポリマーを通過し，位相検出デバイスのホログラフィックダイバーシティ干渉計(HDI: Holographic diversity interferometry)に到達する．ここで，本実験では，記録と読出しは，簡単化のために省略した．HDI に到達したクロスモジュレーション画像は位相検出され，その検出データを図 6.15(b)に示す．最後に，この検出画像はデジタル位相共役再生過程を介して，元の複素振幅画像に復元される．以上が本実験の流れである．

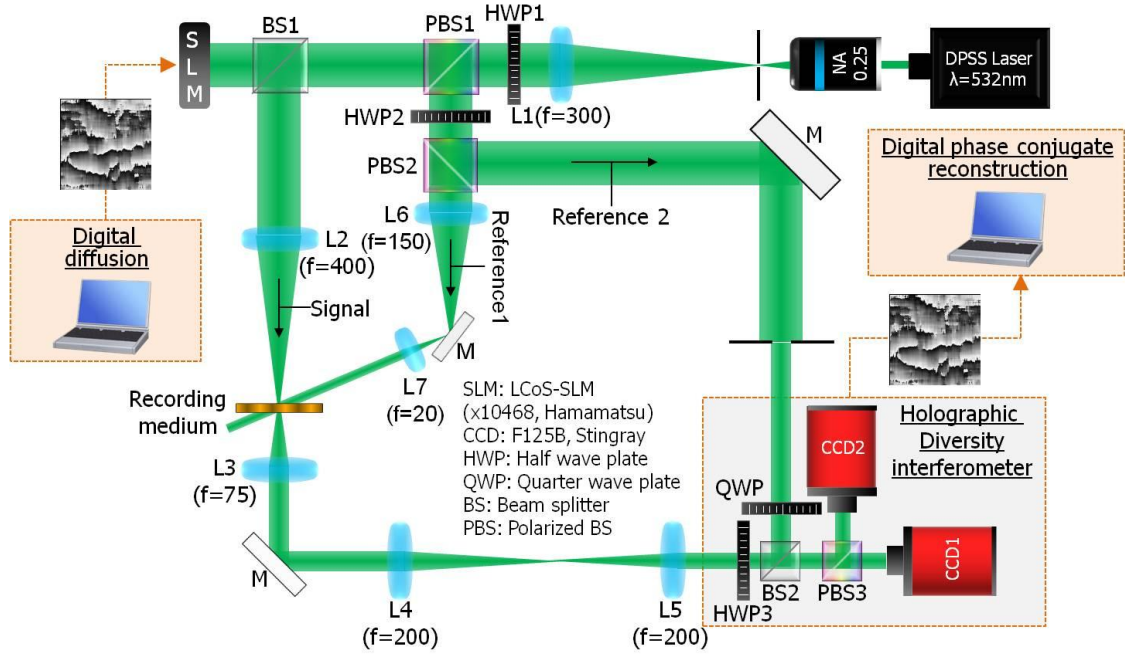


Fig. 6.13. Experimental setup for our system. Reference 1 is for optical hologram recording/reading. Reference 2 is for phase detection method. In this experiments, holographic recording/reading is not conducted for the simplicity, so the reference 1 is not used actually. SLM used in our experiment is phase-only LCoS-SLM(Hamamatsu, x10468). The recording medium arranged in the focal plane of L2 is nano-gel photopolymer with the thickness of 400 μ m provided by Kyoisha Chemical Co.. In addition, the phase of the diffusion image propagated from the SLM is detected by a holographic diversity interferometer (HDI) composed by two CCDs.

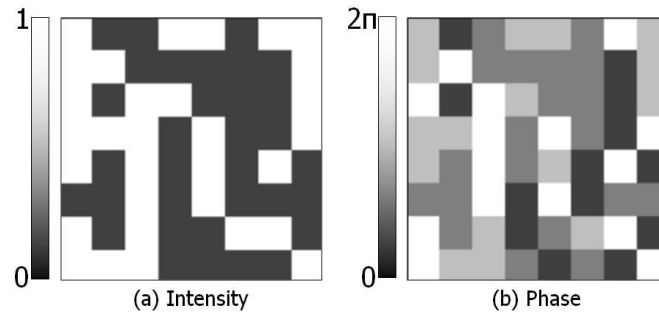


Fig. 6.14. Original SQAM signal used in our experiment. Each pixel in intensity image takes either of two values 1 and 0.25 randomly, as well, each pixel in phase image has either of four values $\pi/2$, π , $3\pi/2$ and 2π , therefore, totally 8-level SQAM is to be used. Each data pixel is represented by 16×16 SLM pixels.

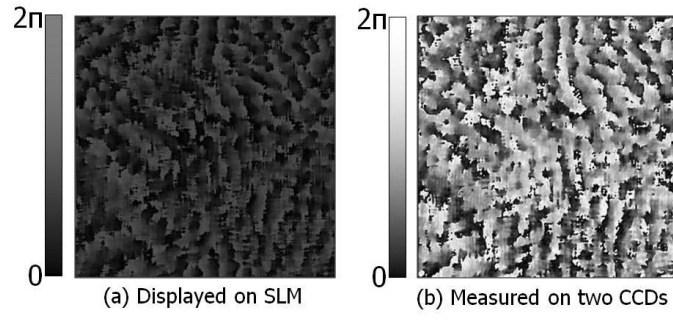


Fig. 6.15. (a) Cross-modulated phase image displayed on SLM. LCoS-SLM used in our experiment can modulate 2π when gray level is 85. This image is displayed on the region of 512×512 SLM pixels. (b) Cross-modulated phase image measured by holographic diversity interferometer using two CCDs. This image is also detected on the region of 512×512 CCD pixels.

6.3.3. 空間直交振幅変調信号の再生

図 6.16 に、デジタル位相共役再生過程を介して再生された複素振幅画像を示す．再生振幅画像は、若干ぼやけているが、2 値構造が明確に観察できる．このぼけの原因は、光学系サイズが有限であることに起因すると考えられる．同様に、再生位相画像においても、高いコントラストが得られ、4 値構造が明確に識別できる．この結果から、SCMM によって 8 値 SQAM 信号の再生に成功したと言える．最後に、図 6.17 に、再生画像の拡散率依存性を示す．拡散率 N_{diff} の増加に伴い、再生品質が大きく改善している様子が分かる．この結果は、図 6.7 に示すシミュレーション結果と同じ傾向である．

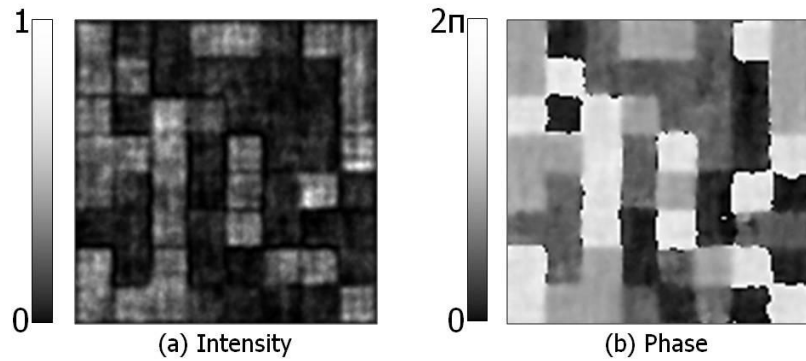


Fig. 6.16. SQAM signals recovered through digital phase conjugate reconstruction in Fig. 12 (c).

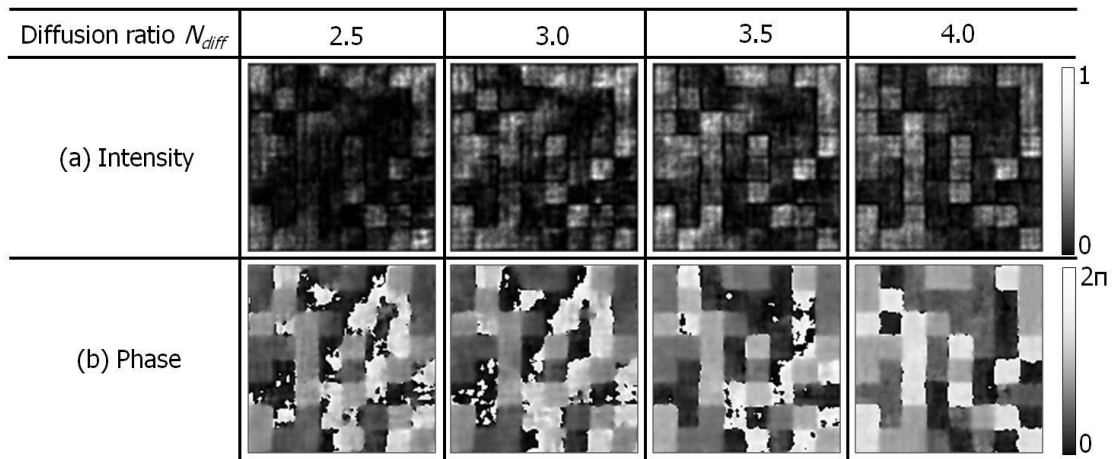


Fig. 6.17. Experimental results for reconstruction quality vs. diffusion ratio N_{diff} .

6.3.4. まとめと今後の課題

本章では、新たな複素振幅生成技術として空間クロスモジュレーション法(SCMM)を提案・検討した。6.2 節では、オフアクシス CGH や二重位相ホログラム(従来 CGH)と比較し、SCMM が達成可能な空間解像度と光利用効率の点で約 4 倍優れていることを明らかにした。このような優れた性能を有する SCMM は、三次元ディスプレイやビーム形成、光ピンセット等のあらゆる分野に大きく貢献すると考えられる。6.3 節では、HDS へ SCMM を応用する場合の基本動作について説明し、付加的な素子が不要であることを利点として述べた。加えて、HDS への応用に向けた基礎実験を行い、振幅 2 値と位相 4 値から成る 8 値 SQAM 信号の再生に成功した。このような多値 SQAM 信号の活用は、HDS における記録密度や転送速度の大幅な改善を可能にする。

SCMM では、元の複素振幅画像をランダムディフューザにより拡散させた際の拡散振幅成分を一定と近似するため、再生像の振幅や位相にノイズがのってしまう。従って、SLM に表示する拡散位相画像を最適化し、できる限りノイズを低減することが重要となる。振幅成分の無視によるノイズの発生は、キノフォームの分野でも同様に見られる課題であり、この課題の克服には実際多くの研究努力が費やされている[11,12]。従って、繰り返しフーリエ変換アルゴリズム等のキノフォームにおけるノイズ低減技術を流用し、SCMM のノイズ低減を実現することが今後必要になる。

SCMM では、元の複素振幅像を空間的に拡散させた散乱位相画像をエンコードパターンとして用いるため、再生像の空間解像度は SLM のそれより劣る。しかし、元の複素振幅画像の空間領域内で、複素振幅像を十分に散乱させることができるランダムディフューザを求めることができれば、SLM の空間解像度と等価な複素振幅画像を再生することができる。従来 CGH の性能を遥かに凌駕する高性能 SCMM を確立するためには、上記特性を有するランダムディフューザの開発が必要不可欠である。

参考文献

- [1] N. Chattapiban *et al.*, “Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator,” *Opt. Lett.*, **28**, pp. 2183-2185 (2003).
- [2] A. Ashkin *et al.*, “Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles,” *Opt. Lett.*, **11**, pp. 288-290 (1986).
- [3] Y. Roichman *et al.*, “Volumetric imaging of holographic optical traps,” *Opt. Express*, **14**, pp. 10907-10912 (2006).
- [4] P. M. Birch, “Real-time optical aberration correction with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator,” *Appl. Phys.*, **37**, pp. 2164-2169 (1998).
- [5] L. G. Neto *et al.*, “Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled-mode liquid-crystal televisions,” *Appl. Phys.*, **35**, pp. 4567-4576 (1996).
- [6] V. Arrizon *et al.*, “Accurate encoding of arbitrary complex fields with amplitude-only liquid crystal spatial light modulators,” *Opt. Express*, **13**, pp. 7913-7927 (2005).
- [7] C. K. Hsueh *et al.*, “Computer-generated double-phase holograms,” *Appl. Opt.*, **17**, pp. 3874-3883 (1978).
- [8] T. Sarkadi *et al.*, “Spatial filters for complex wavefront modulation,” *Appl. Opt.*, **52**, pp. 5449-5454 (2013).
- [9] L. B. Lesem *et al.*, “The kinoform: A new wavefront reconstruction device,” *IBM J. Res. Dev.*, **13**, pp. 150-155 (1969).
- [10] A. Shibukawa *et al.*, “Digital image diffusion technique for suppressing interpage crosstalk in holographic data storage,” *Jpn. J. of Appl. Phys.*, **52**, 09LD03 (2013).
- [11] N. C. Gallagher *et al.*, “Method for computing kinoforms that reduces image reconstruction error,” *Appl. Opt.*, **12**, pp. 2328-2335 (1973).
- [12] F. Wyrowski *et al.*, “Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **5**, pp. 1058-1065 (1988).

第7章

まとめと今後の研究課題

本論文では、ホログラフィックメモリ(HDS)における記録密度を理論限界に近づけることを目的として、記録媒質の均一な利用を可能とする多層化コリニアホログラフィックメモリ(MCHM)、ページ間クロストークの低減を可能とするデジタル画像拡散技術(DIDT)、任意の光複素振幅を生成可能にする空間クロスモジュレーション法(SCMM)をそれぞれ提案・検討した。以下では、具体的な本論文の総括を行う。

第2章では、HDSの基本構成や記録再生動作、ならびに、これまでに提案・検討されてきたHDSにおける代表的な多重記録方式やノイズ低減方式について説明した。

第3章では、これまでに提案・検討されてきた代表的な光複素振幅生成技術と検出技術の概要を示すと共に、その長所や短所について述べた。

第4章では、記録媒質の均一な利用を可能とするMCHMを提案・検討した。MCHMは、媒質深さ方向に沿う記録光スポットの位置制御によって、物理的な多層構造を持たないバルクな記録媒質に純光学的な多層化が可能である。数値解析によって、約100層のホログラム多層化が原理的に実現可能であることを示し、MCHMの潜在力を明らかにした。また、数値解析によって、層数が2層の場合に最も高い媒質利用効率を得られ、約2倍の記録密度改善が可能になることを明らかにしている。基礎実験も行っており、純光学的なホログラムの多層化が可能であることを確認した。今後は、クロストークノイズを最も抑えることが可能な3Dページ配置を探すこと、及び、クロストークノイズ低減技術の開発がMCHMの性能向上に繋がると述べた。

第5章では、ページ間クロストークの低減を可能にするDIDTを提案・検討した。DIDTは、ランダムディフューザと位相共役光の性質を巧みに活用することでページ間クロストークの低減を可能にすると共に、光複素振幅制御技術に基づいた高度なデジタル処理を効果的に用いることで、付加的な光学素子を不要にすることもできる。数値解析によって、DIDTは従来HDSの記録密度を5倍以上改善できることを明らかにし、ディフューザ拡散角の最適化によって10~20倍の記録密度改善も可能であると述べた。また、5枚のデータページを用いた多重記録再生実験を実際に行い、DIDTによるページ間クロストークの低減効果を確認した。今後は、拡散率やレンズNA等のパラメータの最適化し、さらなるDIDTの性能向上を図っていく必要がある。また、複素振幅検出やデジタル位相共役再生等の一連の動作を全て自動プログラム化し、DIDTがHDSの転送速度に影響を与えないことを実証する必要がある。さらに、DIDTをHDSに加えて生体イメージングや画像計測分野に応用することで、一般的なノイズ低減技術としてのDIDTを確立していくことが重要になる。

第6章では、高い空間分解能と光利用効率を有する光複素振幅生成技術として、SCMMを提案・検討した。SCMMは、光波における位相の重要性に着目した方式であ

り、ランダムディフューザによって生成される散乱位相波面から任意の光複素振幅分布を生成可能とする。数値解析によって、本方式を用いることで得られる空間解像度と光利用効率は、従来 CGH の場合と比べて 4 倍以上改善されることを明らかにした。また、HDS への応用に向けた基礎実験も行っており、本方式による 8 値 SQAM 信号の生成に成功した。今後は、SCMM によって得られる記録密度と転送速度の改善の程度を見積もる必要がある。また、SCMM は、従来の CGH 技術と比べ、再生像の空間解像度や光利用効率の点に加えて、再生空間の自由度の点で優れているため、従来にない大画面 3D ディスプレイを実現可能にすると考えられる。

本論文で提案・検討した MCHM, DIDT, SCMM を組み合わせ、本研究が完成する時、50TB/disc 近い記録密度を持つ HDS を構築できると考えられる。このような HDS は、スーパーハイビジョン映像やデジタルアーカイブ、データセンター等の多種多様な領域に応用され、一般社会に大きく貢献できる。また、HDS は、長期信頼性・省電力性を活かし、グリーン IT にも大きく貢献できる。例えば、データセンターにおける HDD を HDS に置換することが出来れば、4 分の 1 の省電力化が可能になる。

以下、将来的な研究指針について述べる。現在の光学デバイスは、純粋な光学技術だけに依存するのではなく、コンピューターによる電子処理技術を活用することで飛躍的な進歩を遂げている。その代表的な光学デバイスとして液晶ディスプレイやデジタルカメラ等が挙げられ、これらは主にコンピューターの電子処理技術によって画質の向上を追求している。しかしながら、これらのデバイスはあくまで光の振幅(輝度)情報のみを制御対象としており、今後のさらなる画質向上や 2 次元から 3 次元への表示空間の拡張を実現するためには、光の振幅に加え位相の制御が必要不可欠になる。一般的に、光の位相は振幅よりも多くの情報を伝達することができ、位相と振幅を含む複素振幅を制御することは、従来では不可能な独創的な光学デバイスの創出(3D カメラや 3D ディスプレイ)や従来光デバイスの飛躍的な性能向上(超深達生体イメージング)を実現可能にすると考えられる。従って、今後の研究指針としては、HDS の性能向上に加えて、光複素振幅制御の可能性を生かした光学デバイスの開発と光複素振幅制御技術自体の性能向上を追求することにある。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、非常に多くの方々にご指導・ご鞭撻を頂きました。ここに、深く感謝申し上げます。

北海道大学大学院情報科学研究科の富田章久教授には、学位論文審査会の副査を担当して頂くと共に、日頃から研究に関するご指導、激励を賜りました。ここに御礼申し上げます。同じく学位論文審査会の副査を担当して頂いた北海道大学大学院情報科学研究科の末岡和久教授には、ご多忙の中、多くの有益かつ的確な助言を賜りました。ここに、深く感謝申し上げます。北海道大学大学院情報科学研究科の岡本淳准教授には、日頃から研究の進め方や論文の書き方に関するご指導を賜りました。また、暖かい励ましのおかげで、ここまで研究に打ち込むことができました。ここに、深く感謝申し上げます。

筆者の所属する光エレクトロニクス研究室を卒業し、現在各方面でご活躍されている諸先輩方に感謝申し上げます。北海学園大学工学部の佐藤邦弘教授、山梨大学大学院医学工学総合研究部の本間聡准教授、北海道医療大学薬学部の二瓶裕之准教授、福岡大学工学部電子情報工学科の文仙正俊准教授には、特に国内外の会議等において、筆者の発表内容に対する多くの有益かつ的確な助言を頂きました。ここに、御礼申し上げます。岐阜大学教育学部の舟越久敏准教授には、特に数値シミュレーションの並列計算方法に関してご指導頂き、研究活動の効率化にご貢献頂きました。ここに、深く感謝申し上げます。九州工業大学情報工学研究院の高林正典助教には、基礎光学の勉強会や英語論文の輪読会等を企画・開催して頂きました。また、論文の書き方や実験素子の扱い方等、様々な研究指導を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。KDDI株式会社の若山雄太氏には、筆者の研究内容に関して多くの有益な議論をさせて頂きました。ここに御礼申し上げます。

研究室の同期生でもあり、友人でもある松岡史晃氏に感謝申し上げます。お互いに切磋琢磨し、研究生生活を楽しく過ごすことができました。

研究室の後輩である西牧可織氏、中田賢佑氏、川端謙人氏、小林俊哉氏、野澤仁氏、橋本裕史氏、王禹史、後藤優太氏、平崎裕貴氏、関貴久氏、前田智弘氏には、日頃から暖かいご支援を頂き、お陰様で楽しい研究生生活を過ごすことができました。ここに、御礼申し上げます。

研究業績目録

氏名 渋川 敦史

1. 論文 (学位論文関係)

I 査読付学会誌等

1. Atsushi Shibukawa, Atsushi Okamoto, Akihisa Tomita, Masanori Takabayashi, and Kunihiro Sato, "Multilayer Collinear Holographic Memory with Movable Random Phase Mask," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 50, No. 9, 09ME10, September 2011. (IF = 1.058)
2. Atsushi Shibukawa, Atsushi Okamoto, Yuta Wakayama, Akihisa Tomita, Hisatoshi Funakoshi, and Kunihiro Sato, "Digital Image Diffusion Technique for Suppressing Interpage Crosstalk in Holographic Data Storage," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 52, No. 9, 09LD03, September 2013. (IF = 1.067)

II 査読付国際会議プロシーディング

1. Atsushi Shibukawa, Atsushi Okamoto, Masanori Takabayashi, Junya Tanaka and Kunihiro Sato, "Shift selectivity in multi-layered collinear holographic system by medium shift along the thickness direction," International Workshop on Holographic Memories and Display 2009, 3C-1, December 2009.
2. Atsushi Shibukawa, Atsushi Okamoto, Akihisa Tomita, Masanori Takabayashi and Kunihiro Sato, "Low Inter-page Crosstalk Recording by Multi-layer Collinear Holographic Memory, Technical digest of International Symposium on Optical Memory 2010, Th-N-03, October 2010.
3. Atsushi Shibukawa, Atsushi Okamoto, Akihisa Tomita, Masanori Takabayashi, Kunihiro Sato, "Evaluation of the Performance in Multilayer Collinear Holographic Memory with Movable Random Phase Mask," Technical digest of The Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage 2011, OMD16, July 2011.
4. Atsushi Shibukawa, Atsushi Okamoto, and Yuta Wakayama, "Spatial Spectrum Diffusion and Digital Phase Conjugate Reconstruction for Suppressing Inter-Page Crosstalk in Holographic Data Storage," International Symposium on Optical Memory 2012, Tu-I-26, October 2012.
5. Atsushi Shibukawa, Atsushi Okamoto, Yuta Wakayama, Akihisa Tomita, Hisatoshi Funakoshi, and Kunihiro Sato, "Interpage crosstalk suppression by spatial spectrum diffusion and digital phase conjugate reconstruction," Technical digest of International Workshop on Holography and Related Technologies 2012, 13B2, November 2012.
6. Atsushi Shibukawa, Atsushi Okamoto, and Yuta Goto, "Generation of Optical Full-Complex-Amplitude Signals by Real-Space Representation Using Random Diffuser," Technical digest of International Symposium on Optical Memory 2013, Tu-H-02, August 2013.

7. Atsushi Okamoto, Atsushi Shibukawa, Akihisa Tomita, and Masanori Takabayashi, "Progressive Hologram Recording and Reconstruction Using Complex Amplitude Generation and Detection Technologies," Technical digest of International Symposium on Optical Memory 2013, Mo-E-01, August 2013[Invited].

2. 論文（その他）

I 査読付学会誌等

1. Atsushi Okamoto and Atsushi Shibukawa, "Multilayer Collinear Holographic Memory for Ultra-High Density Recording," Japanese Journal of Optics, Vol. 40, No. 11, pp. 591-593 (2011).
2. Keisuke Zukeran, Atsushi Okamoto, Masanori Takabayashi, Atsushi Shibukawa, Kunihiro Sato, and Akihisa Tomita, "Double-Referential Holography and Spatial Quadrature Amplitude Modulation," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 52, No. 9, 09LD13, September 2013.

II 査読付国際会議プロシーディング

1. Masanori Takabayashi, Atsushi Okamoto, and Atsushi Shibukawa, "Fundamental Experiment on Rewritable Collinear Holographic Data Storage," Technical digest of International Workshop on Holographic Memories and Display 2009, 3P-9, December 2009.
2. Atsushi Okamoto, Junya Tanaka, Hisatoshi Funakoshi, Akihisa Tomita, and Atsushi Shibukawa, "Full Motion Analysis for Holographic Memory by Three-Dimensional Fast Fourier Transform Beam-Propagation Method," Technical digest of International Symposium on Optical Memory 2010, Tu-I-14, October 2010.
3. Hisatoshi Funakoshi, Atsushi Okamoto, Masanori Takabayashi, Yuta Wakayama, and Atsushi Shibukawa, "High-Speed Full Motion Analysis Based on FFT-BPM for Collinear Holographic Memory," Technical digest of The Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage 2011, OMD22, July 2011.
4. Atsushi Okamoto, Keisuke Zukeran, Atsushi Shibukawa, Masanori Takabayashi, "Double-Referential Collinear Holographic Memory and Spatial Quadrature Amplitude Modulation," Technical digest of The Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage 2011, OTuD12, July 2011.
5. Keisuke Zukeran, Atsushi Okamoto, Masanori Takabayashi, Atsushi Shibukawa, and Akihisa Tomita, "38-Level Spatial Quadrature-Amplitude Modulation Recording with Double-Referential Holography," Technical digest of International Symposium on Optical Memory 2012, Th-L-06, October 2012.
6. Atsushi Okamoto, Atsushi Shibukawa, Yu Wang, Akihisa Tomita, Masanori Takabayashi, and Kunihiro Sato, "Holographic Modulation Method for Producing Collinear

Patterns with Multi-Valued Phase and Intensity Using a Single Spatial Light Modulator,”
Technical digest of International Symposium on Optical Memory 2013, Tu-I-21, August 2013.

3. 講演（学位論文関係）

1. 渋川敦史，岡本淳，高林正典，田中順也，佐藤邦宏，“空間光位相変調器を用いた焦点シフトによるコリニアホログラム空間多重記録，”日本光学会年次学術講演会，25pD2，新潟，11月 2009.
2. 渋川敦史，岡本淳，富田章久，高林正典，佐藤邦宏，“超高密度記録に向けた多層化コリニアホログラフィにおけるページ配置の最適設計，”日本光学会年次学術講演会，8aE2，東京，11月 2010.
3. 渋川 敦史，岡本 淳，富田 章久，高林 正典，“大幅な記録密度向上を目指した多層化コリニアホログラフィックメモリに関する研究，”平成23年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会，129，函館，10月 2011.
4. 渋川敦史，岡本淳，富田章久，高林正典，佐藤邦宏，“超高記録密度ホログラフィックメモリ実現を目指した光学的クロストークノイズ低減手法，”第47回応用物理学会北海道支部学術講演会/第8回日本光学会北海道地区 合同学術講演会，B-24，札幌，1月 2012.
5. 渋川 敦史，岡本 淳，若山 雄太，富田 章久，“デジタル空間スペクトル拡散技術によるホログラフィックメモリにおける記憶容量の飛躍的向上，”第48回応用物理学会北海道支部学術講演会/第9回日本光学会北海道地区 合同学術講演会，C-23，釧路，1月 2013.
6. 渋川 敦史，岡本 淳，富田 章久，“拡散画像のデジタル位相共役再生技術を用いたノイズ低減，”平成 25 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会，124，室蘭，10月 2013.
7. 渋川敦史，岡本淳，後藤優太，富田章久，佐藤邦宏，“ランダムディユーザを用いた空間クロスモジュレーションによる光複素振幅生成技術の提案とその応用，”日本光学会年次学術講演会，13aE6，奈良，11月 2013.

4. 特許

本論文に関連した特許 3 件（特願 2012-213102, 2013-168989, 2013-233492）
その他 ホログラフィック記録に関する特許 1 件（特願 2011-152685）

5. 受賞

1. International Workshop on Holography and Related Technologies 2012
Outstanding Student Paper Award IWH 2012 受賞
2. 第16回応用物理学会北海道支部学術講演会 発表奨励賞 受賞
3. 日本光学会 光みらい奨励金(コニカミノルタ科学技術振興財団賞) 受賞