

博士論文

表面型相関シフト多重  
ホログラフィックメモリー

平山 颯紀

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景 . . . . .	1
1.2	本研究の目的 . . . . .	3
1.3	本論文の構成 . . . . .	4
<b>第 2 章</b>	<b>ホログラフィックメモリー</b>	<b>6</b>
2.1	ホログラフィー . . . . .	6
2.1.1	光波の記録と再生 . . . . .	6
2.1.2	ホログラムの厚みと回折原理 . . . . .	6
2.1.3	記録材料の種類 . . . . .	9
2.2	信号の記録再生方式 . . . . .	12
2.2.1	ホログラムの多重記録方式 . . . . .	12
2.2.2	信号の変調方式 . . . . .	14
2.2.3	信号の符号化方式 . . . . .	14
<b>第 3 章</b>	<b>表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録再生システムの提案</b>	<b>17</b>
3.1	本システムの着想 . . . . .	17
3.2	本システムの構成 . . . . .	18
3.3	本システムのホログラム設計手法 . . . . .	19
3.4	再生特性の評価 . . . . .	21
3.4.1	取得される再生信号画像の理論式 . . . . .	21
3.4.2	再生信号画像の信号対ノイズ比 . . . . .	22
3.4.3	信号画像のシフト選択性の評価 . . . . .	25
3.5	本章のまとめ . . . . .	26
<b>第 4 章</b>	<b>表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの理論解析</b>	<b>28</b>
4.1	平面波展開モデル . . . . .	28
4.2	単一信号光画素・単一参照光画素・単一ホログラムの場合の像面の回折光 . . . . .	29
4.2.1	表面型ホログラムの位相分布 . . . . .	29
4.2.2	ホログラム面の回折光 . . . . .	30
4.2.3	像面の回折光 . . . . .	31

4.3	複数信号光画素・複数参照光画素・多重ホログラムの場合における記録再生過程	35
4.3.1	多重された表面型ホログラムの位相分布	35
4.3.2	ホログラム面の回折光	36
4.3.3	像面の回折光	39
4.3.4	シフト選択性	42
4.4	本章のまとめ	44
<b>第5章</b>	<b>ラマン=ナス回折に起因する再生信号のノイズ発生メカニズムとその抑制手法</b>	<b>46</b>
5.1	ラマン=ナス回折に起因する回折スポットの縮退	46
5.2	高次回折光によるノイズ	48
5.3	II字型信号・参照パターンを用いたノイズの抑制	51
5.3.1	II字型信号・参照パターン	52
5.3.2	数値計算によるシフト選択性の評価	52
5.3.3	原理検証実験によるシフト選択性の評価	54
5.4	本章のまとめ	57
<b>第6章</b>	<b>時系列信号の記録再生特性の解析と定量的評価</b>	<b>58</b>
6.1	記録再生システムの構成	58
6.2	本システムのシステムパラメータと記録再生特性の関係	59
6.2.1	記録密度・データ転送レートの定式化	59
6.2.2	クロストークノイズとシステムパラメータの関係	64
6.3	信号対ノイズ比による記録再生特性の定量的評価	66
6.4	表面型ホログラムの作製精度と記録再生特性の関係	69
6.5	本章のまとめ	71
<b>第7章</b>	<b>総括</b>	<b>73</b>
7.1	本研究のまとめ	73
7.2	今後の展望	75
	<b>参考文献</b>	<b>76</b>
	<b>研究業績</b>	<b>78</b>
	<b>謝辞</b>	<b>80</b>

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

人類の歴史の中で、重要な情報を記録し、長期間保存することの必要性は常に存在しており、古来より石板、本、写真、音盤といった様々な記録媒体を介して情報が保存されてきた。このような、何らかの記録媒体を介して情報を記録・保存・再生する一連のシステムのことをメモリーと呼ぶ。

コンピューター技術が発達した20世紀後半には、デジタル化によって、文字・画像・音声などのあらゆるアナログ情報を、同一の記録媒体に包括的に記録・保存することが可能となった。デジタル情報とは、0または1で表される二値の信号列であるが、実際に情報の記録・保存を行う際は、これらの信号列に対応した二種類の何らかの物理状態が記録・保存される。デジタル情報を記録・保存する代表的な記録媒体には磁気メモリーと光メモリーがあり、それぞれ磁気メモリーでは磁化の向きが、光メモリーでは光の位相状態が主に利用されている。1951年にデジタル情報を記録・保存する記録媒体として磁気テープが初めて採用されて以降 [1]、こうしたデジタルメモリー技術は今日に至るまで目覚ましい発展を遂げている。

そして近年では、人工知能技術の発達に伴う膨大なビッグデータの蓄積や、画像・音声情報の高解像度化によって、取り扱われる情報量が爆発的に増加している。このような情報社会において、その基盤を支えるメモリー技術には、より高速なデータ転送速度とより大きな記録容量が常に求められ続けている。現在使用されている磁気メモリーと光メモリーの主な性能を表1.1に示す。一般的に光メモリーよりも磁気メモリーの方がデータ転送速度、特に記録容量という点において優れており、上記のような大規模のデータ量を記録・保存する場合には磁気メモリーを採用することが主流となっている。現在データセンターでは主に磁気ディスクが使用されており、また、コールドデータと呼ばれるアクセス頻度の少ないデータのアーカイブとしては磁気テープが主に使用されている。

しかし磁気ディスクは、常時稼働や冷却装置の維持に高い電力コストを要することや、傷や埃に弱く、データ保存寿命が5年程度と短いために定期的なバックアップ作業を要するなど、TCO (Total Cost of Ownership) が高いという短所があり、これは情報量が飛躍的に増加した昨今において、極めて重要な問題となっている。また、磁気テープはデータ保存寿命が30年程度で単価も安く、磁気ディスクと比較して総保有コストの点で優れているが、磁気ディス

表 1.1 現行の磁気メモリーと光メモリーの主な性能比較

	磁気メモリー		光メモリー
	磁気ディスク (規格) (HDD 2.5")	磁気テープ (LTO 8)	光ディスク (AD)
データ転送レート [MB/sec]	315 (最外周, 15K rpm)	360 (非圧縮)	280 (読み出し時) 140 (書き込み時)
記録密度	847 [MB/mm <sup>2</sup> ]	2.6 [KB/mm]	5 [MB/mm <sup>2</sup> ]
データ保存寿命 [年]	5	10~30	50~100
ランダムアクセス	可	不可	可

ク同様傷や埃に弱く、また原理上ランダムアクセスができないため、目的の情報の読み出しに時間を要するという短所がある。

一方で光ディスクは、データ転送速度と記録容量において磁気ディスクや磁気テープには劣るものの、傷や埃などに対する耐久性が高く、少なくとも50年以上は保証される圧倒的な長期保存性とそれによるデータ維持コストの低さが最大の長所であり、磁気テープと異なりランダムアクセスも可能である。こうした特徴から、現在光ディスクは小～中規模の重要なデータの保管や、音楽・映像ファイルまたはソフトウェアの供給媒体として主に利用されている。

CD (Compact Disc) に始まり、DVD (Digital Versatile Disc), BD (Blu-ray Disc) と発展してきた光ディスクの記録密度の向上は、表 1.2 に示すように、主に記録再生光の短波長化と系の高 NA 化によって実現されてきた。しかし、400nm 以下の紫外域でも利用可能かつ安価なレーザーや記録材料については未だ開発途上であり、NA に関しても大気中ではその理論限界は1であることから、BD における波長 405nm, NA 0.85 にして既にこれ以上の原理的な記録密度の向上は困難であると言わざるを得ない。BD の後継である AD の記録密度の向上は信号処理技術によるものであり、記録再生光の波長と系の NA は BD と同じである。また、データ転送レートに関しても、記録再生の並列化によってある程度は向上が可能ではあるものの、Bit by Bit 記録再生方式である以上、光ヘッドやドライブを複数配置しなければならず、装置が複雑化してしまうという短所があるため、飛躍的な向上は期待しにくい。

表 1.2 光ディスクの性能の変遷

	CD	DVD	BD	AD
記録再生光の波長 [nm]	780	650	405	405
系の NA	0.45	0.65	0.85	0.85
データ転送レート [MB/sec]	1.4	22	54	370
記録容量 [Gbytes]	0.65	4.7	33	50

このように、低コストで安定した長期保存性を誇り、かつ大容量で高速なデータ転送速度を持つようなメモリーへの需要に対して、現行の磁気ディスクや磁気テープ、光ディスクがいずれも一長一短であるという現状の中、その解決手段の一つとして、近年ホログラフィックメモリーの技術に期待が寄せられている。ホログラフィックメモリーの最大の長所は、光メモリー

特有の TCO の低さを有しつつ、2次元信号パターンの記録再生とホログラムの多重記録による、既存の光ディスクの原理的な限界を大きく超えた高いデータ転送レートと記録密度を兼ね備えている点である。

実際、ホログラフィックメモリーが初めて考案されたのは1963年 [2] であり、これはCDが普及する1980年代よりも前にその基本的なコンセプトが存在していたことを意味する。メモリーとして高いポテンシャルを有しているはずのホログラフィックメモリーが実用化に至らなかった要因として、当時の光学機器や符号化技術の水準の低さに加え、書き換え可能な記録媒体として考えられていたフォトリフラクティブ材料の記録情報の揮発性と感度の低さ [3–5] が挙げられる。しかし、レーザー光源や空間光変調器、イメージセンサーなどの周辺機器の技術が著しく進歩したことに加え、新たな記録材料として書き換え不可で高感度なフォトポリマーが登場して以降、ホログラフィックメモリーは読み出し専用メモリーとして再び注目されるようになった [6–10]。特に、2005年に堀米秀嘉氏によって考案されたコリニアホログラフィックメモリー [11] は、現行の光ディスクのシステムと互換性のある極めて実用的なシステムであり、現在もさらなる記録材料の高性能化 [12–16] やノイズの抑制 [17–19] に関する研究が行われている。

## 1.2 本研究の目的

周辺機器の性能の進歩やフォトポリマーの登場、そしてコリニアホログラフィックメモリーのシステムの確立によって、当初の技術的な課題の多くが改善され、ホログラフィックメモリーは現行の光ディスクに代わる次世代の光メモリーとして十分な実用性を有するようになった。現状の主な課題点としては、再生トレランスの低さと記録媒体の一括複製の難しさが挙げられる。また、フォトポリマーの長期保存性に対する懸念も課題点として挙げられる。再生トレランスの低さと複製の難しさは、記録されるホログラムが体積（三次元）ホログラムであることに起因する。体積ホログラムは記録媒体が厚いほど鋭敏なブラッグ選択性を持つため、熱膨張による記録時と再生時の僅かな体積変化であっても、ブラッグ条件を満たさなくなり、信号対ノイズ比が低下してしまう。また、体積ホログラムを複製する場合は、多重ホログラムを構成するそれぞれのホログラムを1枚ずつ複製していく必要があるため、現行の光ディスクのような射出成型による一括複製ができず、量産化が困難である。フォトポリマー長期保存性については、現行の光ディスクのような凹凸構造に情報を記録する場合と比較して、情報の記録・保存を担っている材料内のポリマー分布が熱運動によって少しずつ変化してしまい、長期的にみると信号対ノイズ比が低下してしまうことが懸念されている。

このような現状の課題点を解決するため、本研究では事前に計算された多重ホログラムパターンを表面の微細構造で作製する、計算機合成ホログラム (CGH; Computer Generated Hologram) を用いたこれまでにない多重記録型のホログラフィックメモリーに着目した。このシステムの特徴は、記録されるホログラムが「表面（二次元）ホログラムである」という点と、現行の光ディスクと同様に「物理的な構造によって情報が記録される」という点である。これは、上述した「体積型ホログラム」と「フォトポリマー」に起因する従来手法の課題点を克服することが可能であると期待される。一方で、表面型ホログラフィックメモリーは、「平

面内に記録された情報を光で読み出す」という点では現行の光ディスクと同じであり、体積内に情報を記録できる従来のホログラフィックメモリーよりも、光ディスクに近い記録密度になることが予測される。光ディスクとの大きな違いは、2次元信号パターンの再生による圧倒的なデータ転送レートの向上が期待できるという点にある。

しかし、表面ホログラムには体積ホログラムのようなブラッグ選択性が原理的に存在しないという点や、光書き込みではなくコンピューターで計算したホログラムパターンを構造作製するという点において、本システムは従来の体積型かつ光書き込み方式のホログラフィックメモリーとは異なる記録再生原理に従い、異なる記録再生特性を示すことが予想される。よって、本研究ではこのような表面型かつ非光書き込み方式の多重記録型ホログラフィックメモリーに関する記録再生原理の解析と、それによる記録再生方式の見直し、そしてその記録再生特性の解明を行うことで、本システムの確立を目的として行った。

### 1.3 本論文の構成

本論文は全7章で構成される。第2章から第7章までの各章の概要を以下に示す。

#### 第2章 ホログラフィックメモリー

ホログラフィックメモリーの基本原理であるホログラフィーに関する一般的な説明を行い、その応用技術であるホログラフィックメモリーの過去の様々な記録再生方式についてまとめる。

#### 第3章 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録再生システムの提案

本研究のテーマである表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーのシステムの着想とその記録再生方法について述べ、数値計算による再生特性の評価を行った結果について述べる。

#### 第4章 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの理論解析

本システムの記録再生の各過程において、平面波展開モデルに基づいた解析解を導出することによって、本システムの記録再生原理の理論的な解析を行う。

#### 第5章 ラマン=ナス回折に起因する再生信号のノイズ発生メカニズムとその抑制手法

第3章で確認された、本システムに特有なラマン=ナス回折に起因する再生信号のノイズについて、第4章の解析結果を基に、その発生メカニズムの解明及び理論的に抑制可能な手法を提案する。さらに、その有効性を数値計算と原理検証実験によって評価した結果について述べる。

#### 第6章 時系列信号の記録再生特性の数値解析と定量的評価

第5章で提案したII字型信号参照パターンによるノイズ抑制手法を用いた表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーにおいて、時系列信号の記録再生を行う場合を想定し、記録再生特性とシステムパラメーターの関係性について述べる。また、クロストークノイズの影響

を数値計算により評価し、データ転送レートや記録密度の推定を行った結果について述べる。最後に、構造作製精度と記録再生特性との関係性について述べ、数値計算による定量的な評価を行った結果について述べる。

## 第7章 総括

本研究で得られた研究成果を総括し、今後の展望について述べる。



## 第 2 章

# ホログラフィックメモリー

### 2.1 ホログラフィー

ホログラフィーは 1948 年に Dennis Gabor [20] によって初めて考案された，光波の記録再生技術である．通常の写真では，3 次元物体を撮影した場合であっても，フィルムにはその強度情報しか記録されないため，写真から得られる被写体の情報は 2 次元になる．しかし，ホログラフィーでは光の位相情報も記録再生することができるため，3 次元物体からの回折光を完全に再現することができる．光波の記録再生には光の干渉と回折を利用するため，一般的にはレーザーのような高コヒーレントな光源が使用される．

#### 2.1.1 光波の記録と再生

ホログラフィーにおける，基本的な光波の記録過程と再生過程の概要図を図 2.1 に示す．記録過程では，レーザー光を物体に照射した際の回折光（物体光）と，物体光とコヒーレントで波面が既知である光（参照光）を干渉させる．この時得られる干渉光を，銀塩フィルム，フォトリフラクティブ材料，フォトポリマーといった感光材料に照射することによって，材料内部で干渉光の強度パターンに応じた光反応が生じ，その結果吸収率分布や屈折率分布などの空間的な物理特性変化による回折格子が形成される．この回折格子パターンは干渉パターン，すなわち物体からの回折光に由来するものであるため，これを記録することによって物体の 3 次元形状の情報が記録されることになる．このような，物体の情報を含んだ干渉パターンを反映した，何らかの物理的な特性分布のことをホログラムと呼ぶ．再生過程では，このホログラムに対して，記録過程で使用した参照光と同じ波面の光（読み出し光）を照射する．この時，回折格子であるホログラムによって読み出し光の強度または位相が変調され，その回折光として物体光と同じ波面の光が再生される．

#### 2.1.2 ホログラムの厚みと回折原理

ホログラムは物理的に回折格子の重ね合わせとして考えることができるが，ホログラムによる回折原理は，その厚みによって異なることに注意する必要がある．それぞれ薄いホログラムの場合はラマン＝ナス回折，厚いホログラムの場合はブラッグ回折と呼ばれる回折原理に従う．

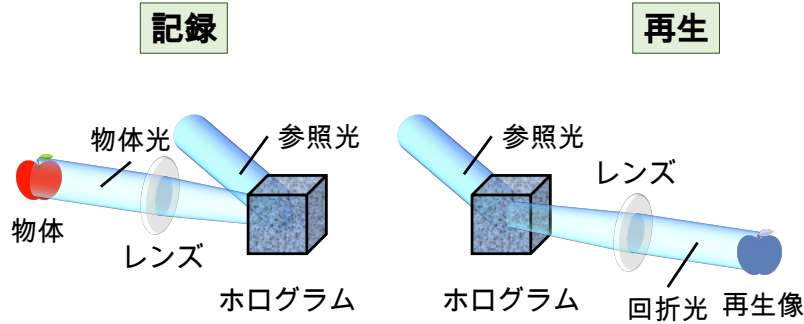


図 2.1 ホログラフィーの記録過程・再生過程

まず、ラマン=ナス回折について述べる．ここでは簡単のため、図 2.2 に示すように、 $x$  方向に沿った周期  $A$  の 1 次元単一回折格子からの回折について考える．この回折格子に波長  $\lambda$  の平面波が入射角  $\theta_{\text{in}}$  で入射したとき、隣り合う格子点から出射する 2 つの光が  $z$  方向に十分遠方な距離で交わる場合を考えると、この 2 つの格子点からの出射角はほぼ等しいとみなすことができる．この出射角を  $\theta_{\text{out}}$  とすると、グレーティング方程式（各格子点からの平面波が強め合う条件）は

$$A(\sin \theta_{\text{in}} + \sin \theta_{\text{out}}) = m\lambda \quad \left(-\frac{\pi}{2} \leq \theta_{\text{in}} \leq \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \leq \theta_{\text{out}} \leq \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.1)$$

と表される．ここで、 $m$  は任意の整数を表している．式 (2.1) は、隣り合う格子点から出射する光の光路長差が波長の整数倍となるような回折角  $\theta_{\text{out}}$  において光が強め合うことを表している．このとき、各整数値  $m$  に対応する回折角が  $m$  次の回折角を表している．

次に、ブラッグ回折について述べる．ここでは図 2.3 に示すように、 $x$  方向に沿った周期  $A$  の 1 次元単一回折格子が  $z$  方向に幅  $2L$  の厚みを持っている場合を考える．先程と同様にこの回折格子に波長  $\lambda$  の平面波が入射角  $\theta_{\text{in}}$  で入射する場合、 $x$  方向のある一つの格子点に対して、 $-L \leq z \leq L$  のあらゆる  $z$  方向の点からの出射光を考える必要がある．これらの点から出射する光が  $z$  方向に十分遠方な距離で交わる場合、これらの出射角は全てほぼ等しいとみなすことができる．その出射角を先程と同様に  $\theta_{\text{out}}$  とすると、位置  $z$  からの出射光と  $z = 0$  の位置からの出射光との光路長差  $d_z$  は

$$d_z = z(\cos \theta_{\text{in}} - \cos \theta_{\text{out}}) \quad (2.2)$$

と表される．したがって、 $-L \leq z \leq L$  における全ての出射光による干渉強度  $I$  は

$$\begin{aligned} I &= \left| \int_{-L}^L \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} d_z \right) dz \right|^2 \\ &= \left| \int_{-L}^L \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_{\text{in}} - \cos \theta_{\text{out}}) z \right] dz \right|^2 \\ &= \left| \frac{2\lambda}{2\pi (\cos \theta_{\text{in}} - \cos \theta_{\text{out}})} \sin \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_{\text{in}} - \cos \theta_{\text{out}}) L \right] \right|^2 \\ &= \left| 2L \text{sinc} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_{\text{in}} - \cos \theta_{\text{out}}) L \right] \right|^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

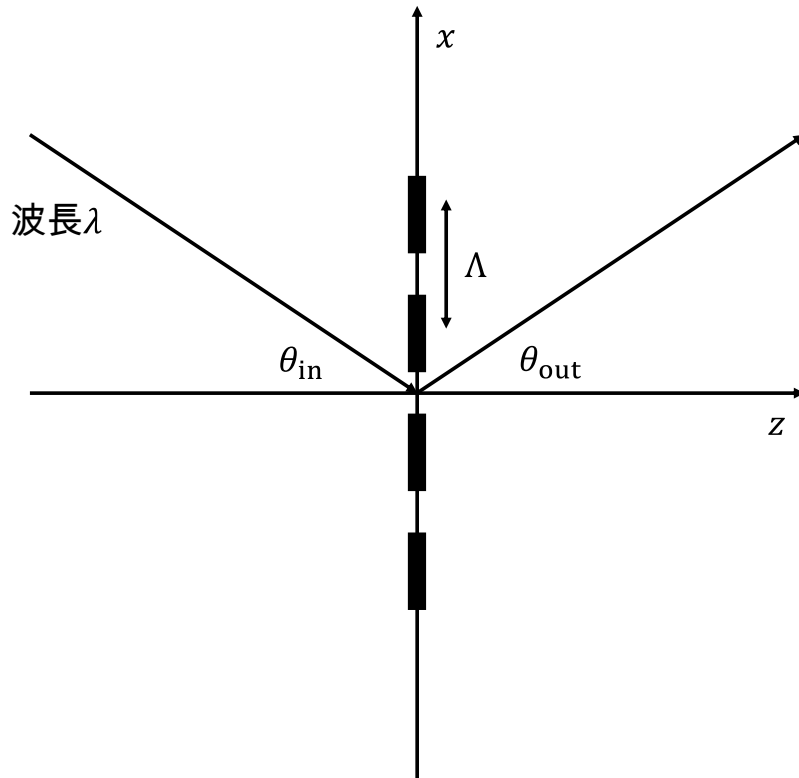


図 2.2 ラマン=ナス回折

と表される．式 (2.3) より， $I$  の強め合いの干渉条件は sinc 関数の引数が 0 になるとき，すなわち

$$\theta_{\text{in}} = \theta_{\text{out}} \quad \left( \because -\frac{\pi}{2} \leq \theta_{\text{in}} \leq \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \leq \theta_{\text{out}} \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.4)$$

が成り立つ場合のみであることが分かる．この条件において，式 (2.1) のグレーティング方程式は

$$2\Lambda \sin \theta_{\text{in}} = 2\Lambda \sin \theta_{\text{out}} = m\lambda \quad \left( -\frac{\pi}{2} \leq \theta_{\text{in}} \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.5)$$

と表される．このようなブラッグ回折時の特別な条件におけるグレーティング方程式はブラッグ条件と呼ばれる．

以上の結果を基に，ラマン=ナス回折とブラッグ回折の物理的な違いについてまとめる．ラマン=ナス回折の場合は，ある単一回折格子に入射する平面波に対して，式 (2.1) を満たすいくつかの回折角が存在する．一方でブラッグ回折の場合は，式 (2.5) に示すように，上記の条件に加え，さらに入射角と回折角が等しいという条件を満たさなければ強め合いの条件が成立しない．ホログラフィーの記録再生において厚いホログラムを用いる場合は，このブラッグ条件は基本的に記録時の参照光と全く同じ条件で読み出し光を照射した場合に成立し，このとき記録時の 3 次元物体像が回折光として再生される．参照光と読み出し光の入射角や波長が異なる場合は，基本的に条件を満たす回折角が存在しなくなるため，回折光が発生せず，3 次元物体像は再生されなくなる．このような，入射光の波長や入射角によって回折光の回折効率が変化する性質をブラッグ選択性と呼ぶ．薄いホログラムを用いる場合は，このようなブラッグ選

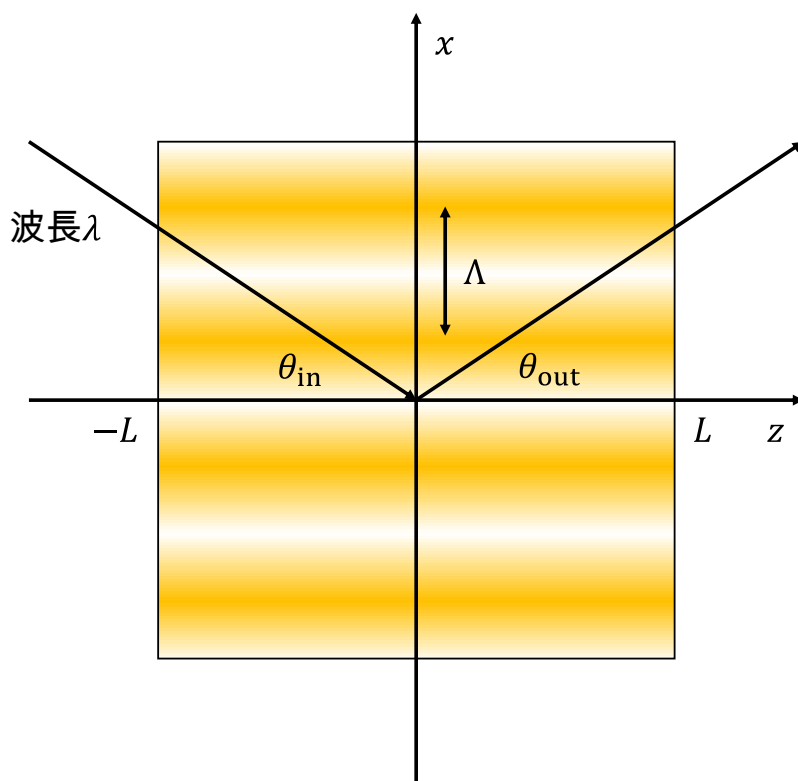


図 2.3 ブラッグ回折

択性は存在しないため、記録時の参照光と波長や入射角度が異なる読み出し光で再生した場合であっても回折光が発生し、3次元物体像が再生される。また、式(2.1)を満たす回折角は複数存在し得るが、記録した3次元物体像を再生する回折光は1次回折光( $m = 1$ )のみであり、他の次数の回折光は3次元物体像の再生には寄与せず基本的にはノイズとなる。

厚いホログラムと薄いホログラムにはそれぞれ異なる利点があり、ホログラフィーの研究内容によって使い分けられている。厚いホログラムを用いる利点には、ブラッグ選択性を利用したホログラムの多重記録が可能であるという点が挙げられる。ホログラフィックメモリーの高い記録密度はこの特徴を活かしたものであり、そのためホログラフィックメモリーにおいては一般的に厚みのあるホログラムが用いられている。一方で、薄いホログラムを用いる利点には、計算機合成ホログラムが利用できるという点が挙げられる。構造作製精度や空間光変調器の空間分解能の向上により、近年はメタサーフェスによる複素振幅変調ホログラム [21-25] や、空間光変調器を用いた3次元動画の再生 [26, 27] に関する研究が盛んに行われている。

### 2.1.3 記録材料の種類

ホログラフィーの記録過程では、物体光と参照光の干渉パターンをホログラム(屈折率格子や吸収格子など)として記録材料に記録する。ホログラムの記録には過去に様々な種類の材料が用いられてきた。初期の頃は通常の写真と同様に銀塩感光材も用いられており、これは干渉パターンの明暗に応じて吸収格子を形成し、入射光の振幅変調によって回折光を発生させるものであった。しかし、一般的に吸収格子の場合は吸収による光量のロスが問題となるため、実

用には向かず、現在ではほとんど用いられていない。その代わりに、現在では屈折率格子として機能するホログラムが一般的である。この場合、入射光の振幅ではなく、位相の変調によって回折光が発生するため、光量ロスの問題が大きく改善される。

屈折率格子を形成する記録材料について、「光書き込み型」と「非光書き込み型」に分けて、それぞれいくつかの例を挙げて説明する。光書き込み型の記録材料には数多くの種類があるが、中でも特にホログラフィックメモリーとの関連が深い材料として、フォトリフラクティブ材料とフォトポリマーが挙げられる。ホログラフィックメモリーの歴史的には、フォトリフラクティブ材料を用いた研究が以前から行われており、2000年頃からはフォトポリマーを用いた研究が主流となっている。

フォトリフラクティブ材料はその名の通りフォトリフラクティブ効果 [28] を用いて、干渉パターンに対応した屈折率格子を記録する記録材料である。代表的な材料としてニオブ酸リチウム ( $\text{LiNbO}_3$ ) 結晶などが挙げられる。フォトリフラクティブ効果とは、光励起された電子（または正孔）の移動によって、材料内部の電荷分布が光強度分布に応じて変化し、さらにその電荷分布に伴い生じた電場によって屈折率が増加する現象である。大きな特徴としては、異なる強度分布の光を照射する度に、その強度分布に応じて電荷が何度でも再移動するという点であり、この特徴を活かして書き換え可能な記録媒体としての利用が検討されていた。しかし、再生過程で読み出し光を照射する際にもフォトリフラクティブ効果が起き、屈折率分布が上書きされてしまうため、繰り返し読み出すことによって記録時の情報が次第に消えてしまうという、再生劣化と呼ばれる問題点がある。また、フォトリフラクティブ効果では、吸収した光子1個に対して発生する電子（または正孔）の数が最大1個であるため、銀塩感光材や後述するフォトポリマーのように、1個の光子に対して複数の光反応が生じる記録材料と比較すると、 $1\text{W}/\text{cm}^2$  でもその応答速度は数秒から数分オーダーであり、記録感度が極めて低いという点も大きな問題である。再生劣化の問題に対しては、2波長書き込み法 [29] による原理的な解決方法が考案されているものの、依然として低記録感度の問題は十分と言えるほどの解決には至っていない。

一方フォトポリマーは、干渉光の強度分布に対応したモノマーの光重合や分子の移動によって、材料内の屈折率分布が増加することを利用した記録材料である。記録材料として用いられるフォトポリマーの光重合反応は非可逆的であるため、一度形成された屈折率格子はその後の光照射によって変化することはない。また、フォトポリマーの重合反応は吸収された1個の光子に対して連鎖的に起きるため、記録感度も高い。こうした特徴から、フォトポリマーは読み出し専用のアーカイブメモリーとしての用途が期待されており、実用化において最も有力とされている記録材料である。ホログラム記録時のフォトポリマーの反応過程の一例を図 2.4 に示す。初期状態では、光重合性モノマーと、屈折率の異なる別のモノマーが材料全体にわたって均一に混ざりあって分布している (図 2.4(a))。この状態のフォトポリマーに、記録すべき干渉光が照射されると、その強度分布の明部では光重合性モノマーのポリマー化反応が活発に進行する (すなわち、光重合性モノマーが集中する)。また、明部に存在していたもう一種類のモノマーはポリマーに押し出され、暗部へと移動する (図 2.4(b))。その結果、干渉光の明部では光重合性モノマーが、暗部ではもう一種類のモノマーが集中する。したがって材料内にそれに応じた屈折率分布が形成される (図 2.4(c))。露光終了後は、強度の様な光で全面露光する

ことによって、残存する光重合性モノマーを全てポリマー化する。これによって、再生時の読み出し光照射などによるホログラムの追記・消去を防ぐことができる(図2.4(d)). フォトポリマーが用いられるようになった初期の頃は、ポリマー化に伴う媒体の体積変化(主に収縮)によって回折格子の周期が変化し、それによってブラッグ条件が変化してしまうことが問題となっていた。この問題に対しては、低屈折率の架橋ポリマーマトリクスと高屈折率の光重合性モノマーを組み合わせることにより、高屈折率と0.1%以下の収縮率を両立した材料が実現され、実用性が大きく改善された[30].

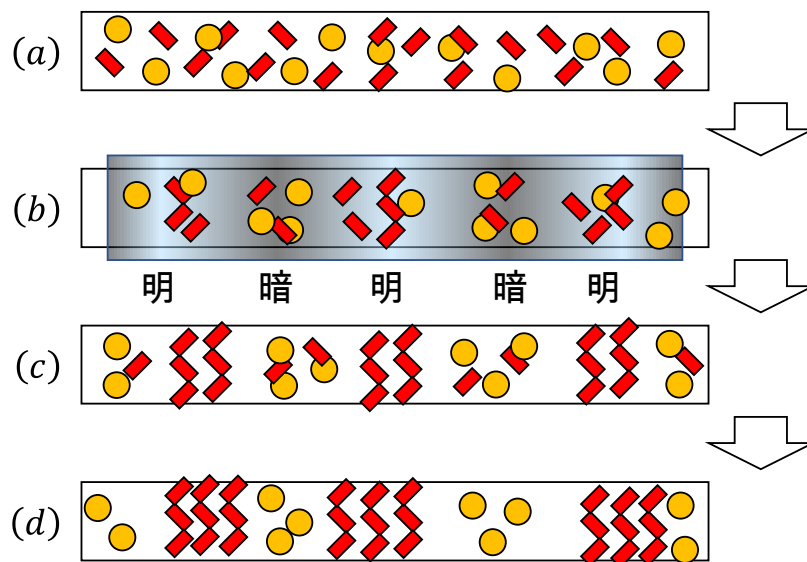


図2.4 ホログラム記録時のフォトポリマーの反応過程

次に、非光書き込み型の記録材料について述べる。一般的には、コンピューターで計算したホログラムの離散的な空間位相変調分布をピクセルごとに何らかの微細な表面構造で再現することで作製される。代表的な作製手法として、凹凸加工、液晶の利用、ナノ構造の利用が挙げられる。これらの手法はそれぞれホログラムの再現精度や作製速度に違いがある。

凹凸加工は、各ピクセルごとに材料の厚み(光軸方向の材料の幅)を変え、その光路長差による位相遅延量でホログラムの空間位相変調分布を再現する手法である。ナノインプリント技術のようにあらかじめ金型を作製しておくことで、大量かつ高速に複製することができる。しかし、各ピクセルの凹凸の高さをサブ波長オーダーで正確に作製する必要があるため、諧調数を増やすことが難しいという短所がある。

液晶を利用する手法は、各ピクセルごとに印加する電圧を変えることで液晶分子の配向方向を制御し、それに応じた液晶の屈折率変化でホログラムの空間位相変調分布を再現する手法である。最大の長所は、空間位相変調分布が可変という点である。ただし、他の手法と比較してピクセルピッチがマイクロオーダーと大きいため、空間分解能が低いという短所がある。また、電圧を加え続けていないとホログラムを維持できないため、情報保存用の記録媒体としての用途には使用できない。

ナノ構造を利用する手法は、入射光の波長以下の極めて小さい構造に光を入射し、その構造内部の電子振動を駆動することによって散乱光の振幅や位相、偏光といった光学特性を制御す

る手法である。微細加工技術の候補として挙げられる電子線リソグラフィーは作製に時間がかかることが短所だが、単純な構造であればナノインプリント技術を用いた比較的高速な作製が可能となる。構造を工夫することで位相変調以外にも偏光方向変調や振幅変調素子といったさまざまな光学特性を変調する表面素子を実現できる。またはその両方を利用することもできる。

## 2.2 信号の記録再生方式

一般的にホログラフィーでは3次元物体の記録再生を行うが、ホログラフィックメモリーでは図2.5に示すように、記録したいデジタル情報を2次元画像に変換し、空間光変調器等に表示したものを物体とする。本論文では以降、ホログラフィックメモリーにおける物体光のことを信号光と表記する。

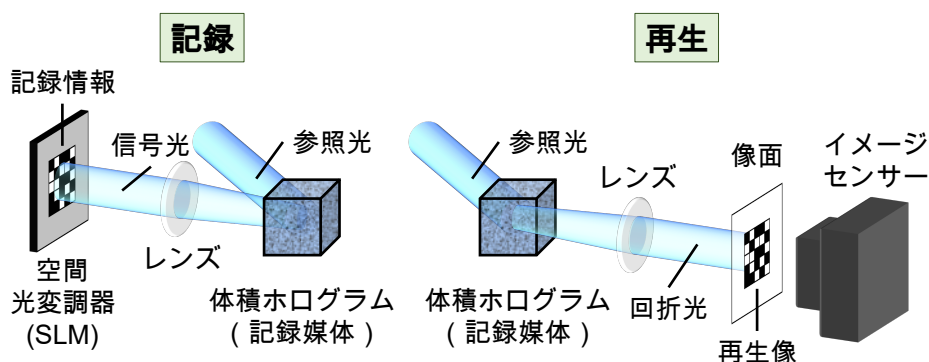


図 2.5 ホログラフィックメモリーの記録過程・再生過程

ホログラフィックメモリーにおける信号の記録再生システムは、「ホログラムの多重記録方式」、「信号の変調方式」、「信号の符号化方式」の3つの構成要素の組み合わせによって分類できる。

### 2.2.1 ホログラムの多重記録方式

ホログラフィックメモリーでは、異なる2次元画像の情報を含んでいるそれぞれのホログラムを1つの記録媒体に多重記録し、再生時に各画像を独立に読み出すことによって高い記録密度を実現している。多重記録の方式は主に2種類あり、ブラッグ選択性を利用する方法と、入射角度の異なる複数の平面波を同時に参照光として照射する方法に大別される。

ブラッグ選択性を利用する代表的な方法としては角度多重方式 [31–35] と波長多重方式 [36–38] が挙げられる。角度多重方式では、図2.6(a)に示すように、記録するホログラムごとに参照光の照射角度を変えながら1つの媒体に多重記録する。それぞれのホログラムは記録時の参照光と同じ角度の読み出し光を照射した場合にブラッグ条件を満たすため、これを利用してそれぞれのホログラムに記録された2次元画像情報を独立して再生することができる。波長多重方式では、図2.6(b)に示すように、記録するホログラムごとに参照光の波長を変えながら1つの媒体に多重記録する。角度多重と同様に、それぞれのホログラムは記録時の参照光と

同じ波長の読み出し光を照射した場合にブラッグ条件を満たすため、これを利用してそれぞれのホログラムに記録された2次元画像情報を独立して再生することができる。角度多重方式の場合は、参照光の入射角度を変える（または記録媒体の方を回転させる）ための機械的稼働部が必要になる。一方で波長多重方式の場合は、このような機械的稼働部が不要である代わりに波長可変レーザーを必要とする。しかし、波長可変範囲の大きい色素レーザーやチタンサファイアレーザーなどは装置が大きく、波長制御のための大掛かりな機構が必要であるという短所がある。

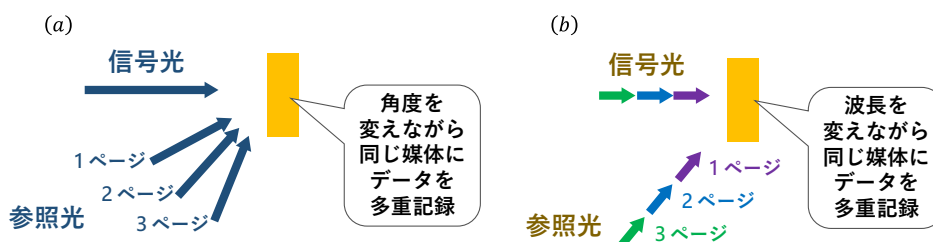


図 2.6 ホログラムの多重方式. (a) 角度多重方式, (b) 波長多重方式

入射角度の異なる複数の平面波を同時に参照光として照射する代表的な多重方式としては、相関シフト多重方式が挙げられる。ここでは相関シフト多重方式の一つであるコリニアシフト多重方式 [39–43] について述べる。コリニアシフト多重方式は、図 2.7 に示すように、1つの空間光変調器の内側の領域からの光を信号光とし、その領域を囲むようなリング状の領域からの光を参照光として使用する。記録過程では、信号画像と参照画像を1つの空間光変調器内に両方表示し、対物レンズの焦点面付近で記録材料に干渉パターンを記録する。このとき、参照光は複数の画素（点光源）から構成されているため、対物レンズの焦点面付近では入射角度の異なる複数の平面波の重ね合わせとして考えることができる。再生時には、空間光変調器内に参照画像のみを表示する。このとき、入射角度の異なる複数の平面波による回折光がそれぞれ像面で干渉し、その結果信号像が再生される。この信号像の干渉効果は記録媒体のシフトに伴い弱め合い、次第に消えていく。このようなシフト選択性を用いると、記録媒体を少しずつ横ずらししながら別のホログラムを重ねて記録することが可能となる。

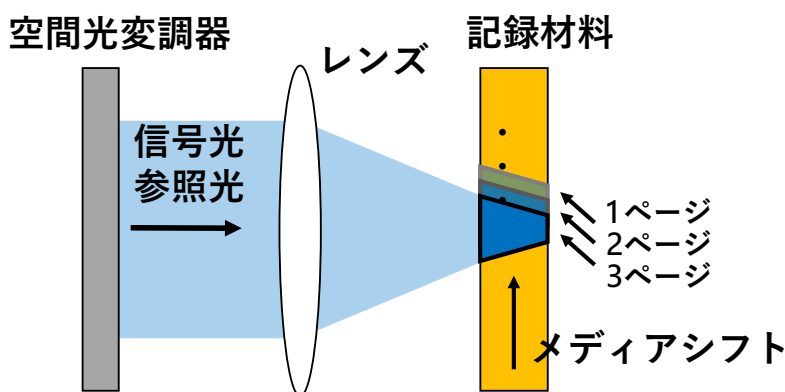


図 2.7 コリニアシフト多重方式

他の多重方式と比較してコリニアシフト多重方式が優れている点は、1光束干渉であるとい



う点である。これによって、記録・再生時の外乱耐性が高く系がコンパクトであるという長所があり、また現行の光ディスクの光ヘッド機構と共通した構造であるため、現行の光ディスクのシステムと互換性があるという長所もある。これらの理由から、これまでのホログラフィックメモリーのシステムの中で実用化の面で特に有力なシステムとされている。

### 2.2.2 信号の変調方式

次に、ホログラフィックメモリーにおける2次元信号画像のON/OFFを表現するための変調方式について述べる。もともとホログラフィーは物体の振幅と位相の情報を記録・再生することが可能であることから、ホログラフィックメモリーにおいても信号のON/OFFを強度または位相の差で表現する。強度変調方式の場合は2次元信号画像の各画素の強度が0の時をOFF、0でない時（輝点）をONとして2次元信号画像を作成する。一方で位相変調方式の場合は、2次元信号画像の各画素の位相が0の時をOFF、 $\pi$ の時をONとして2次元信号画像を作成する。

強度変調方式の場合は、再生信号画像1枚当たりの回折効率がその画像のON信号数に依存するため、それぞれの再生信号画像の強度にばらつきが生じてしまう。これは、入射する読み出し光の総エネルギーが常に一定であるため、再生するON信号の数が多いほど、ON信号1つ当たりに割り当てられるエネルギー量が分散して少なくなってしまうことが原因である。一方で、位相変調方式の場合は、信号のON/OFFによらず強度は一定であるため、それぞれの再生信号画像の回折効率にばらつきが生じることはない。しかし、通常のイメージセンサー単体では強度情報しか取得できないため、4ステップ位相シフト法 [44] のように、既知の波面を持つ光を別途用意し、再生光と干渉させることによって強度画像から位相回復を行う必要がある。

### 2.2.3 信号の符号化方式

ホログラフィックメモリーにおいて、記録すべきデジタル情報から2次元信号画像を生成する符号化方式には大きく分けて「ページ方式」と「時系列方式」が挙げられる。

まずページ方式について述べる。ページ方式は、2次元信号画像1枚ごとに情報の記録再生を行う符号化方式である。図2.8に示すように、あるデジタル情報を複数の2次元信号画像に分けて符号化し、多重記録を行う。このとき、符号化された1つ1つの2次元信号画像をページと呼ぶ。強度変調方式の場合、多重記録されたそれぞれのホログラムを次々に読み出していく際に、それぞれの再生信号画像の回折効率にばらつきが生じてしまうのを防ぐために、それぞれの2次元信号画像のON信号数を一定に保つような符号化方法が求められる。そのため、ページ方式における符号化方法には、Sparse Modulation Coding [45] の一種である  $m : M^2$  Modulation Coding が用いられることが多い。これは、2次元信号画像の全画素領域を  $M \times M$  画素の配列要素ごとに区分し、それぞれの  $M \times M$  配列要素のうち  $m$  点だけを輝点とする符号化方式である。この方法は、常に  $M^2$  画素のうち  $m$  画素しか輝点が存在しないため、ページ当たりの光量が一定に保たれるほか、 $M \times M$  画素の中で明るい順番に  $m$  画素を選択すればよいため、再生ページの輝度ムラに強いという利点がある。

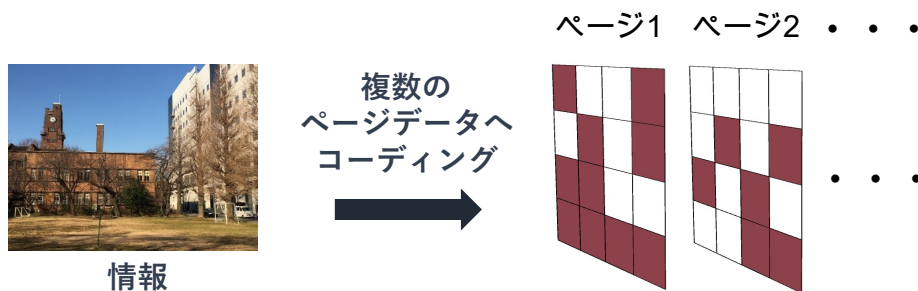


図 2.8 ホログラフィックメモリーにおけるページ方式による符号化法

次に、時系列方式について述べる。時系列方式は、図 2.9 に示すように、2次元信号画像のある1点の画素（これをチャンネルと呼ぶ）に着目し、多重記録によるその画素の連続的なON/OFFの変化によってデジタル情報を符号化する方式である。多重記録されたそれぞれの2次元信号画像を次々に再生する際に、各チャンネルのON/OFFが時間的に変化することから時系列信号と呼ばれる。2次元信号画像の記録再生は、時系列方式においては多チャンネルの時系列信号を並列に記録再生していることに相当する。時系列方式における符号化方法では、一般的にON信号またはOFF信号それぞれの続く長さをを用いる。この長さは、ある最小単位を決め、その長さの整数倍となるように記録されている。この最小単位の長さを $1T$ と定義する。時系列方式によるデジタル情報の記録再生は、現行の光ディスクでも採用されており、より具体的には、(1,7)RLL符号化(RLL; Run Length Limited)と呼ばれる、記録する信号長の長さを制限した符号化方法が採用されている。名前につけられる数字は、信号のON/OFFが一度切り替わったあとに、その信号が続く回数の最小値と最大値を表している。よって、例えば、(1,7)RLL符号化の場合、最短信号長は $2T$ 、最長信号長は $8T$ ということになる。

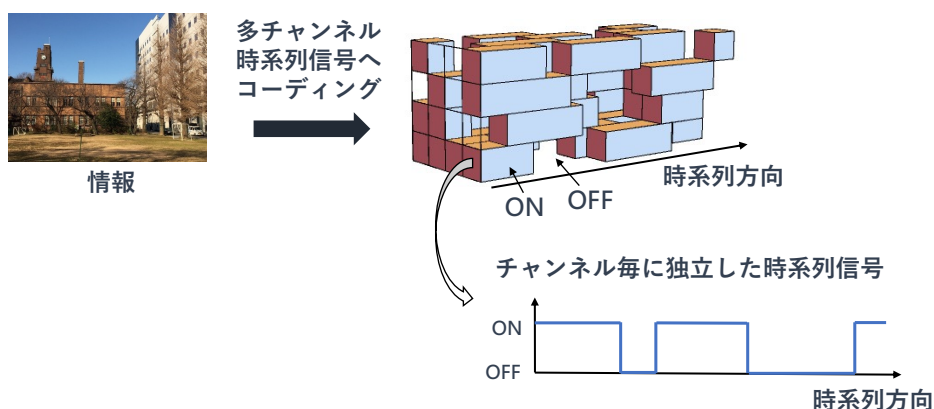


図 2.9 ホログラフィックメモリーにおける時系列方式による符号化法

ページ方式と時系列方式は、2次元画像を多重記録して次々に再生していくという点では同じだが、時系列方式はページ方式と比較して優れている点が多い。最も大きな利点は、より高い記録密度が実現可能であるという点である。このことを説明するために、ここでページ方式において、隣り合うページを独立に再生することが可能な最短の間隔を $L$ とする（上記の「間隔」とは、角度多重方式であれば角度間隔、波長多重方式であれば波長間隔、シフト多重方式

であれば記録媒体のシフト間隔のことをそれぞれ指す). この時, 当然  $L$  未満の間隔で多重記録を行えば, 再生時に両者のページを判別することはできなくなる. しかし, RLL 符号化を用いた時系列方式の場合は, たとえ  $L$  未満の間隔で多重記録を行ったとしても, 代わりに最短信号長が  $L$  以上になるように信号長を制限することによって, ON 信号長と OFF 信号長の長さをそれぞれ正しく判別することが可能となる. 例として, 記録間隔  $1T$  を  $L/2$  としたとき,  $1T = L/2 < L$  であるため,  $(-ON-ON-OFF-ON-ON-)$  と続くような時系列信号の OFF 信号長を判別することはできないが,  $(-ON-ON-OFF-OFF-ON-ON-)$  と続くような時系列信号の OFF 信号長を判別することは可能である. したがって, この場合では「少なくとも 1 回は信号が続く」, すなわち「最小信号長を  $2T$  とする」という制限を設けることによって, 記録された時系列信号を全て正しく判定できることになる. この時,  $L (= 2T)$  間隔でしか記録できないページ方式と比較すると, 時系列方式では  $3T$  や  $5T$  も信号長として利用できることから, 記録できるパターンの自由度を向上させることができる.

また, 時系列方式の別の利点としては, 連続的な信号の再生が可能であるという点である. ページ方式の場合, 記録されたページを再生する際には, その記録条件 (入射光角度や波長, 記録媒体のシフト位置など多重方式によって異なる) と同じ条件に正確に一致させる必要がある. その性質上, 各ページの再生は断続的に行う必要があるが, 機械的稼働部を瞬間的に駆動・停止させることはできないため, 1 つ 1 つのページを再生する度に一定の時間のロスが生じてしまう. 一方で, 機械的稼働部を止めることなく連続的に再生できる時系列方式はページ方式よりも速く, かつ技術的にも容易に信号の再生が実現できる. 特にコリニアシフト多重方式ではその恩恵は大きく, 記録媒体をディスク状にすることで, 現行の光ディスクのように記録媒体を回転させながら信号の再生を行うことができる. もともとコリニアシフト多重方式の記録再生光学系が現行の光ディスクと高い互換性を持つことから, 時系列方式のコリニアホログラフィックメモリーは極めて実用性の高いシステムであると言える. 時系列方式のコリニアホログラフィックメモリーに関する先行研究では, 強度変調方式の場合,  $1T = 500$  nm, 216 チャンネルにおける (1,7)RLL 符号化において,  $20T$  に相当する時系列信号の記録再生が実験的に確認されている [46]. また, 位相変調方式の場合は,  $1T = 200$  nm, トラックピッチ 1083 nm, 29116 チャンネルにおける (1,7)RLL 符号化において,  $24T$  に相当する時系列信号の記録再生が可能であることが数値計算によって示されている [47, 48].

一方で, 時系列方式にも短所がある. 時系列方式では, ON 信号長が途中で途切れることなく繋がっている必要があるため, ホログラムの記録間隔を狭めなければならない. これは, ページ方式と比較して記録媒体内にホログラムをより多く記録しなければならないことを意味している. フォトポリマーの材料が有限であることを考慮すると, ホログラム 1 枚当たりに消費できる材料が少なくなってしまう, 屈折率変調量が小さくなってしまふ. その結果, 各ホログラムからの再生信号の回折効率が小さくなってしまふという点が問題となる.

## 第3章

# 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録再生システムの提案

### 3.1 本システムの着想

第2章で述べたように、一般的なホログラフィックメモリーは、記録媒体である体積型ホログラムのブラッグ選択性を利用した多重記録により、3次元的に情報を記録することができ、それによって高記録密度を実現している。また、記録材料にフォトポリマーを用いることで、不揮発性で高感度な記録媒体の実現が可能となった。一方で、記録媒体が体積型ホログラムであることと、記録材料がフォトポリマーであることには欠点も存在する。記録媒体が体積ホログラムであることの欠点は、記録媒体の変形、主に温度変化による膨張収縮によって、ブラッグ条件が満たされなくなってしまうことにより、再生信号が劣化してしまうという点である。また、体積型記録媒体は一括複製ができないという欠点もあり、複製可能な量産型読み出し専用メモリーとしての用途に適していないという点も挙げられる。記録材料がフォトポリマーであることに関しては、材料内のポリマー化反応に由来する記録特性が空間的に不均一であることが挙げられる。

このような欠点を抱える従来の記録媒体に対して、本研究では表面の微細構造で作製される位相型ホログラムをホログラフィックメモリーの記録媒体に使用することに着目した。表面型ホログラムは体積型ホログラムとは異なり、ブラッグ選択性による高い記録密度は有していないものの、ブラッグ選択性に起因する低い再生トレランスの問題が原理的に存在しないという利点がある。また、ホログラムの位相変調分布が表面の物理的な構造に由来するため、従来のフォトポリマー材料と比較して安定した記録特性が実現できる利点がある。このような観点から、表面型ホログラムを記録媒体とするホログラフィックメモリーは、従来のホログラフィックメモリーの欠点を回避するような、原理的に異なる性質をもつ新しいホログラフィックメモリーとして期待できる。

次に、具体的なシステムの構想について述べる。上述した表面型ホログラムをホログラフィックメモリーの記録媒体として採用する際に、多重記録を行うかどうかについて考える必

要があった。多重記録を行わない場合は、有限のサイズに制限されたホログラムをそれぞれ互いに重ならないように平面内に敷き詰めていく方法が考えられる。しかし、この方法では隣り合うホログラムの距離が離れすぎてしまうため、時系列方式が採用できない（ON 信号長が途切れてしまう）。第2章で述べたように、記録密度や読み出し速度、従来光ディスクとの互換性という点ではページ方式よりも時系列方式の方が優れているため、本研究では表面型ホログラムを多重記録するホログラフィックメモリーのシステムが望ましいと考えた。ホログラムの多重記録方式には、ブラッグ選択性を利用する方式と、入射角度の異なる複数の平面波を同時に参照光として照射する相関シフト多重方式が提案されている。ここで、表面型ホログラムはブラッグ選択性が存在しないことを考慮すると、前者の多重方式は原理的に採用できない。したがって、後者の多重方式、特にその中でも実用化の面で最も有力とされているコリニアシフト多重方式を本システムの初期構想として採用するに至った。コリニアシフト多重方式は相関シフト多重方式の一種であることから、本研究では、このシステムを表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーと名付けた。

本来ホログラフィックメモリーは、現行の光ディスクと比較して大記録容量、高速データ転送速度を誇るという点で優れているが、大記録容量に関しては、記録媒体に三次元的に情報が記録されることに由来している。表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーは、多重記録を行うとはいえ、あくまで二次元的にしか情報が記録されないため、記録容量は原理的に従来のホログラフィックメモリーに劣る。つまり、従来のホログラフィックメモリーと比較すると、上述した記録媒体の変形に対する再生トレランスの高さ、記録媒体の複製の容易さ、記録特性の安定性といった利点を有しつつも、記録容量は小さいという、一長一短の関係にある。一方で、本システムを現行の光ディスクと比較した場合、「平面内に記録された情報を光で読み出す」という点では原理的に同じであり、そのため記録密度も現行の光ディスクと同程度になると予測される。しかし、本システムはホログラフィックメモリーの特徴を活かした、光ディスクにはない信号の並列記録再生が可能であり、原理的に高いデータ転送レートを有するという特徴を持つ。以上をまとめると、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーは光ディスクと同等の記録容量になると予想されるものの、従来のホログラフィックメモリーにはない、再生トレランスの高さや記録媒体の複製の容易さ、そして記録特性の安定性といった光ディスクに近い特徴を有し、かつホログラフィックメモリーの特徴を活かした高いデータ転送レートを誇るこれまでにない特徴をもった光メモリーが期待できる。

## 3.2 本システムの構成

表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録再生システムは上述したように従来のコリニアホログラフィックメモリーの記録再生システムをベースとしている。そこでまずは、従来のコリニアホログラフィックメモリーの記録再生システムの構成について述べる。図3.1に示すように、従来のコリニアホログラフィックメモリーの記録過程では、対物レンズの前側焦点面に空間光変調器 (Spatial Light modulator; SLM) が、配置されており、後側焦点面付近に記録材料が配置されている。SLM には信号パターン画像と参照パターン画像が同時に表示され、信号光と参照光の干渉パターンが屈折率分布として記録材料に記録されることで

位相ホログラムが生成される。次のホログラムを多重記録する際は、記録材料を面内方向にわずかにシフトさせた状態で、SLM に同じ参照パターン画像と異なる信号パターン画像を表示させて記録を行う。再生過程では、SLM に参照パターン画像のみを表示し、記録過程と同じ光学配置でホログラムに参照光を照射する。イメージセンサー側の対物レンズに関しては、前側焦点面付近にホログラム、後側焦点面にイメージセンサー面が位置するように配置されており、ホログラムによる回折によって再生された元の信号光がイメージセンサー面に結像され、再生信号画像を得ることができる。この時、ホログラムを面内方向に少しずつシフトさせていくことで、像面に結像される再生信号画像の強度が徐々に小さくなり、代わりに隣のホログラムからの別の再生信号画像の強度が大きくなっていく。このように、記録媒体を面内方向にシフトさせながら再生信号画像を次々に切り替えていくことで、ページ毎の情報を選択的に読み出していく。

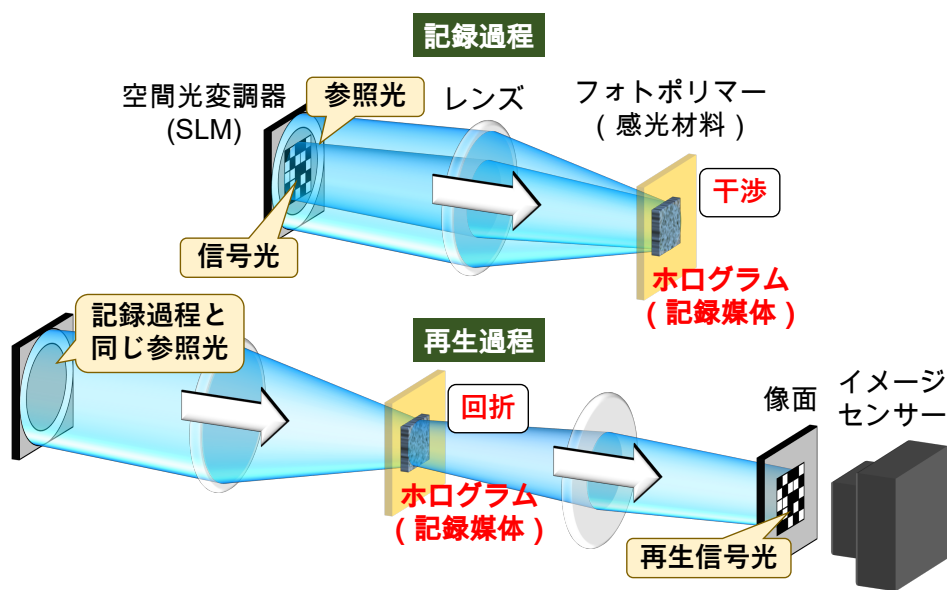


図 3.1 従来のコリニアホログラフィックメモリーの記録再生システム概要図

次に、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録再生システムの構成について述べる。図 3.2 に示すように、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーでは、図 3.1 の記録過程において、SLM から生じる信号光と参照光が対物レンズの後側焦点面に形成する干渉光の強度分布を計算によって求め、その干渉パターンに比例する位相変調分布を表面の構造作製によって再現することでホログラムを設計する。ここで、ホログラムの設計方法については次の節で詳しく述べる。再生過程では、図 3.2 に示すように、SLM に参照パターン画像のみを表示し、図 3.1 の再生過程と同様の光学配置でホログラムに参照光を照射し、イメージセンサーから再生信号像を取得する。

### 3.3 本システムのホログラム設計手法

表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーでは、信号光と参照光がホログラム面に形成する 2 次元の干渉光強度分布を計算し、その干渉パターンに比例する位相変調分布を表面

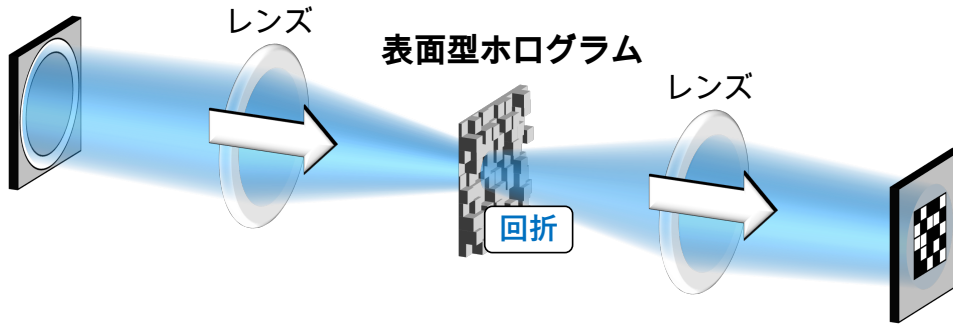


図 3.2 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録再生システムの概要図

型ホログラムとして設計する．ここで，設計すべきホログラムの位相変調分布の理論式を導出するために，図 3.3 に示すような光学系モデルを考える．信号パターン画像と参照パターン画像が表示される空間光変調器上の平面を SLM 面とし，この SLM 面に対して，対物レンズの後側焦点面をホログラム面とする．ここで，SLM 面の座標を  $(x, y)$ ，ホログラム面の座標を  $(X, Y)$  とし，SLM 面の信号光と参照光の複素振幅分布をそれぞれ  $u_{\text{sig}}(x, y)$ ， $u_{\text{ref}}(x, y)$  とする．この時，光の波長を  $\lambda$ ，レンズの焦点距離を  $f$  とすると，ホログラム面まで伝搬した信号光の複素振幅分布  $U_{\text{sig}}(X, Y)$  と参照光の複素振幅分布  $U_{\text{ref}}(X, Y)$  は，フレネル回折理論によりそれぞれ

$$U_{\text{sig}}(X, Y) = \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} u_{\text{sig}}(x, y) \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(xX + yY)\right] dx dy \quad (3.1)$$

$$U_{\text{ref}}(X, Y) = \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} u_{\text{ref}}(x, y) \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(xX + yY)\right] dx dy \quad (3.2)$$

と表される．ここで， $k$  は光の波数であり， $k = 2\pi/\lambda$  と表される．ホログラム面では，これらの信号光と参照光が干渉し，その強度分布  $I(X, Y)$  は

$$I(X, Y) = |U_{\text{sig}}(X, Y) + U_{\text{ref}}(X, Y)|^2 \quad (3.3)$$

と表される．

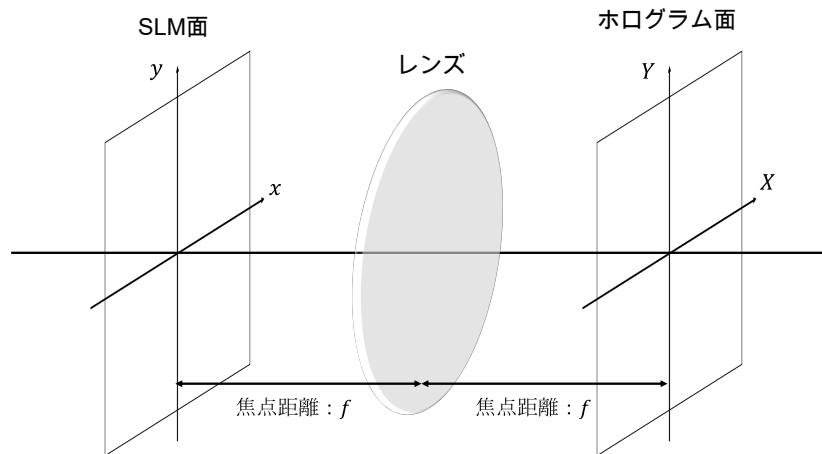


図 3.3 SLM 面からホログラム面への光伝搬モデル

ここで、式 (3.3) の右辺を展開すると、ホログラム面の光干渉強度分布  $I(X, Y)$  は

$$I(X, Y) = |U_{\text{sig}}(X, Y)|^2 + |U_{\text{ref}}(X, Y)|^2 + U_{\text{sig}}(X, Y)U_{\text{ref}}^*(X, Y) + U_{\text{sig}}^*(X, Y)U_{\text{ref}}(X, Y) \quad (3.4)$$

と表される。ここで、右辺第1項はホログラム面の信号光強度分布を表しており、右辺第2項はホログラム面の参照光強度分布を表している。また、右辺第3項と第4項の和は信号光と参照光による干渉パターンを表している。この時、ホログラム面の信号光と参照光はどちらも一様な強度分布をもつ平面波ではなく、SLM面に表示されるそれぞれのパターンに依存した回折格子を形成することに注意しなければならない。すなわち、式 (3.4) の右辺第3,4項だけでなく、右辺第1項と第2項もそれぞれ回折格子を形成し、再生時に回折光を発生させる要因となっている。しかし、この第1項と第2項は信号光と参照光の干渉によって形成されるものではないため、再生時に参照光を照射しても、元の信号光を再生するような回折は発生しない。したがって、信号情報の記録という点で考えると、式 (3.4) 右辺の展開項のうち、信号の再生に寄与する項は第3,4項のみであり、第1項、第2項はノイズ回折光を発生させる不要な項に相当する。

従来のコリニアホログラフィックメモリーのように、光書き込みによってホログラムを形成する記録過程では、SLMに信号パターン画像と参照パターン画像を同時に表示する限り、こうした不要な回折格子もホログラムに記録されてしまうことになる。この場合のホログラムの位相変調分布  $H_{\text{opt}}(X, Y)$  は

$$H_{\text{opt}}(X, Y) \propto |U_{\text{sig}}(X, Y) + U_{\text{ref}}(X, Y)|^2 \quad (3.5)$$

と表される。しかし本システムでは、任意の位相分布をもつ表面型ホログラムを作製できることから、式 (3.4) の第3,4項のみを用いてホログラムを設計可能であることに着目した。したがって、本システムで設計すべき表面型ホログラムの位相変調分布  $H_{\text{fab}}(X, Y)$  は

$$\begin{aligned} H_{\text{fab}}(X, Y) &\propto U_{\text{sig}}(X, Y)U_{\text{ref}}^*(X, Y) + U_{\text{sig}}^*(X, Y)U_{\text{ref}}(X, Y) \\ &\propto 2\Re[U_{\text{sig}}(X, Y)U_{\text{ref}}^*(X, Y)] \\ &\propto \Re[U_{\text{sig}}(X, Y)U_{\text{ref}}^*(X, Y)] \end{aligned} \quad (3.6)$$

と表される。ここで、 $\Re$  は実部を取る記号を表している。

### 3.4 再生特性の評価

これまでに述べた本システムの構成を用いて、信号画像がどのように再生されるかを評価するために、フレネル回折理論に基づく光波の伝搬計算によって、本システムで得られる再生信号画像を計算し、その再生特性の評価を行った。

#### 3.4.1 取得される再生信号画像の理論式

まず、本システムによって得られる再生信号画像の理論式を導出するために、図 3.4 に示すような再生光学系モデルを考える。再生時の参照パターン画像が表示される空間光変調器上の平面を SLM 面とし、この SLM 面に対して、対物レンズの後側焦点面をホログラム面とする。



ホログラム面には式 (3.6) によって計算された 2 次元の位相変調分布を持つ表面型ホログラムが配置されており、有限の幅を持つ矩形領域に制限されている。また、ここでは簡単のために多重されていない状態の単一のホログラムについて考える。さらに、ホログラム面にはこのホログラムサイズと同じ幅の矩形開口が光軸を中心として配置されている。この矩形開口によって、参照光の照射領域をホログラムサイズと一致させている。また、ホログラムによる回折後の対物レンズに関しては、前側焦点面をホログラム面とし、後側焦点面を再生像面とする。ここで、SLM 面の座標を  $(x, y)$ 、ホログラム面の座標を  $(X, Y)$  とすると、再生像面は SLM 面と結像関係になっているため、再生像面の座標は  $(-x, -y)$  と表すことができる。また、光の波長を  $\lambda$ 、2 つの対物レンズの焦点距離を共に  $f$  とする。この時、SLM 面の参照光の複素振幅分布を  $u_{\text{ref}}(x, y)$  とすると、ホログラム面まで伝搬し、表面型ホログラムによって回折する直前の参照光の複素振幅分布  $U_{\text{ref}}(X, Y)$  は、式 (3.2) と同様に表される。よって、ホログラムの位相変調分布を  $H(X, Y)$  とすると、ホログラム面におけるホログラムから回折した直後の回折光の光波の複素振幅分布  $U_{\text{dif}}(X, Y)$  は

$$U_{\text{dif}}(X, Y) = T(X, Y) U_{\text{ref}}(X, Y) e^{iT(X-\Delta X, Y-\Delta Y)H(X-\Delta X, Y-\Delta Y)} \quad (3.7)$$

と表される。ここで、 $T(X, Y)$  は矩形開口を表しており、ホログラム領域と参照光領域を制限する役割を果たしている。また、 $(\Delta X, \Delta Y)$  は有限の矩形領域に制限された表面型ホログラムの面内方向のシフト距離を表しており、 $(\Delta X, \Delta Y) = (0, 0)$  であるときに参照光照射領域とホログラム領域が完全に一致することを意味している。最後に、ホログラム面の回折光が再生像面に伝搬したときの光波の複素振幅分布  $u_{\text{dif}}(-x, -y)$  は

$$u_{\text{dif}}(-x, -y) = \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} U_{\text{dif}}(X, Y) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f}(xX + yY)\right] dXdY \quad (3.8)$$

と表される。したがって、実際に取得される再生像面における回折光の強度分布は  $|u_{\text{dif}}(-x, -y)|^2$  と表される。

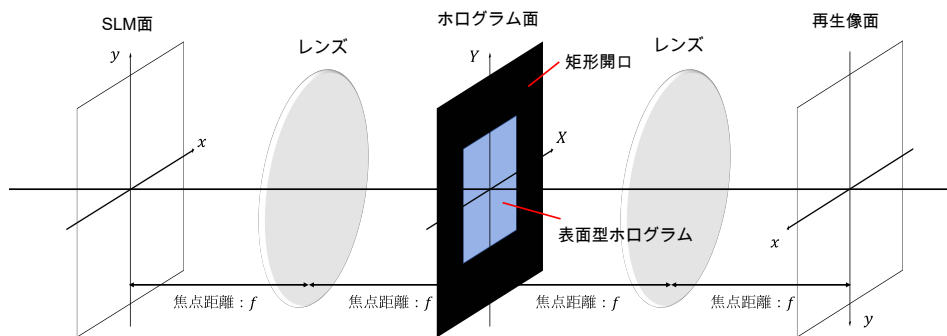


図 3.4 信号再生の光波伝搬モデル

### 3.4.2 再生信号画像の信号対ノイズ比

次に、3.3 節で述べたホログラムの設計方法が有効であることを確かめるために、光書き込みによって形成される従来のホログラムと、不要な回折格子を除去した本システムのホログラ

ムについて、前節で述べた再生過程の理論式に基づく数値計算を行い、得られた再生信号画像の信号対ノイズ比 (Signal to Noise Ratio; SNR) を評価した。

今回の数値計算では、強度変調された1枚の信号パターン画像の記録再生を行った。今回使用した信号・参照パターンを図3.5に示す。使用した信号パターンは500×500画素の領域に作成した。また、各輝点の強度は全て一定で1に規格化されており、各輝点の位相は0から $2\pi$ の範囲でランダムに与えられている。サンプルとなる信号画像パターンは、図3.5に示すように、51個のサブページによって構成されており、さらにサブページは32個のシンボルと位置合わせ用の1つのSync markによって構成されている。1つ1つのシンボルが情報の記録を担っており、デジタル情報の符号化にはページ方式で用いられる3:16 modulation coding になり、4×4画素のうち、互いに隣接しない3画素のみがON画素となるように配置されている。この符号化によって、信号画像パターンは1枚当たり1632 Byteの情報量を有することができる。また、光学系に関するパラメーターは表3.1に示した値を使用した。

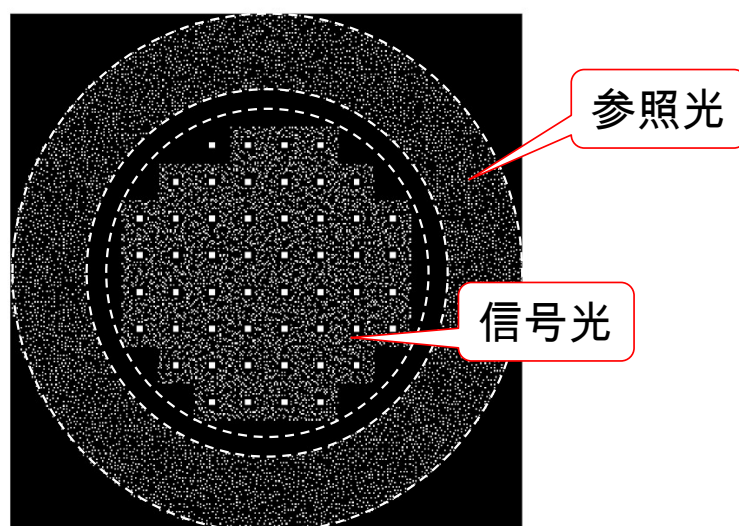


図 3.5 数値計算に使用した信号参照パターン

表 3.1 数値計算に使用した光学系のパラメーター

記録再生光の波長 [nm]	405
レンズの焦点距離 [mm]	4
SLM 画素ピッチ [ $\mu\text{m}$ ]	20
ホログラムサイズ [ $\mu\text{m}$ ]	162

また、再生信号の信号対ノイズ比の評価には、以下の定義を用いた [49].

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \frac{|\mu_{\text{ON}} - \mu_{\text{OFF}}|}{\sqrt{\sigma_{\text{ON}} + \sqrt{\sigma_{\text{OFF}}}}} \quad (3.9)$$

ここで、 $\mu_{\text{ON}}$  と  $\mu_{\text{OFF}}$  はそれぞれ ON であるべき画素と OFF であるべき画素の平均強度を表し、 $\sigma_{\text{ON}}$  と  $\sigma_{\text{OFF}}$  はそれぞれ ON であるべき画素と OFF であるべき画素の強度分散を表す。式 (3.5)、(3.5) によってホログラムの位相変調分布を計算する際、それぞれの比例定数はこの SNR が十分高くなるように最適化をして計算を行っている。

以上の数値計算条件の下、ホログラムのシフト距離が面内方向に共に 0 であるときの再生信号画像の計算結果を図 3.6 に示す。図 3.6(a) は再生すべき元の信号画像の強度分布を表している。図 3.6(b) は式 (3.5) によって計算された不要な回折格子を含むホログラムによる再生信号画像を表している。図 3.6(c) は式 (3.6) によって計算された不要な回折格子を含まないホログラムによる再生信号画像を表している。

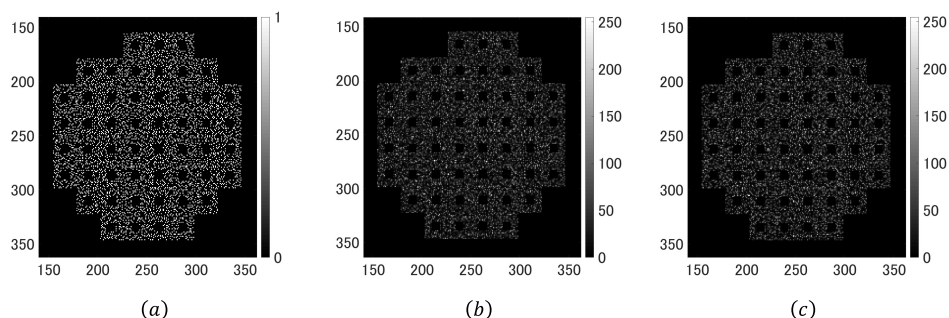


図 3.6 再生信号画像の数値計算結果。(a) 再生すべき元の信号画像の強度分布。(b) 不要な回折格子を含むホログラムによる再生信号画像。(c) 不要な回折格子を含まないホログラムによる再生信号画像。

また、図 3.7 は得られた再生信号画像の ON であるべき信号画素、OFF であるべき信号画素それぞれについての 256 階調のヒストグラムを表している。横軸が 256 階調に規格化された再生信号画像の強度を表しており、縦軸が該当する強度の ON であるべき信号画素の数または OFF であるべき信号画素の数の頻度を表している。図 3.7(a) は不要な回折格子を含むホログラムによる再生信号画像についてのヒストグラムを表しており、図 3.7(b) は不要な回折格子を含まないホログラムによる再生信号画像についてのヒストグラムを表している。

また、式 (3.9) によって計算される SNR については、不要な回折格子を含む場合の再生信号画像が -1.0 dB、不要な回折格子を含まない場合の再生信号画像が 2.3 dB となった。

SNR による評価の結果より、同じ信号・参照パターン画像を使用して信号再生を行う場合に、光書き込みを想定した不要な回折格子を含むホログラムの設計を行うよりも、式 (3.6) によるホログラムの設計を行う方が、本システムにおいて SNR の高い再生画像が得られることが確認できた。ただし、図 3.7 の結果から、不要な回折格子を含まないホログラムを設計する場合であっても、ON であるべき画素と OFF であるべき画素が一部区別できない部分が生じていることが確認できた。これは、表面型ホログラムのラマン＝ナス回折に由来するノイズ回折光が生じていることが主な原因である。これについては第 5 章で詳しく述べる。

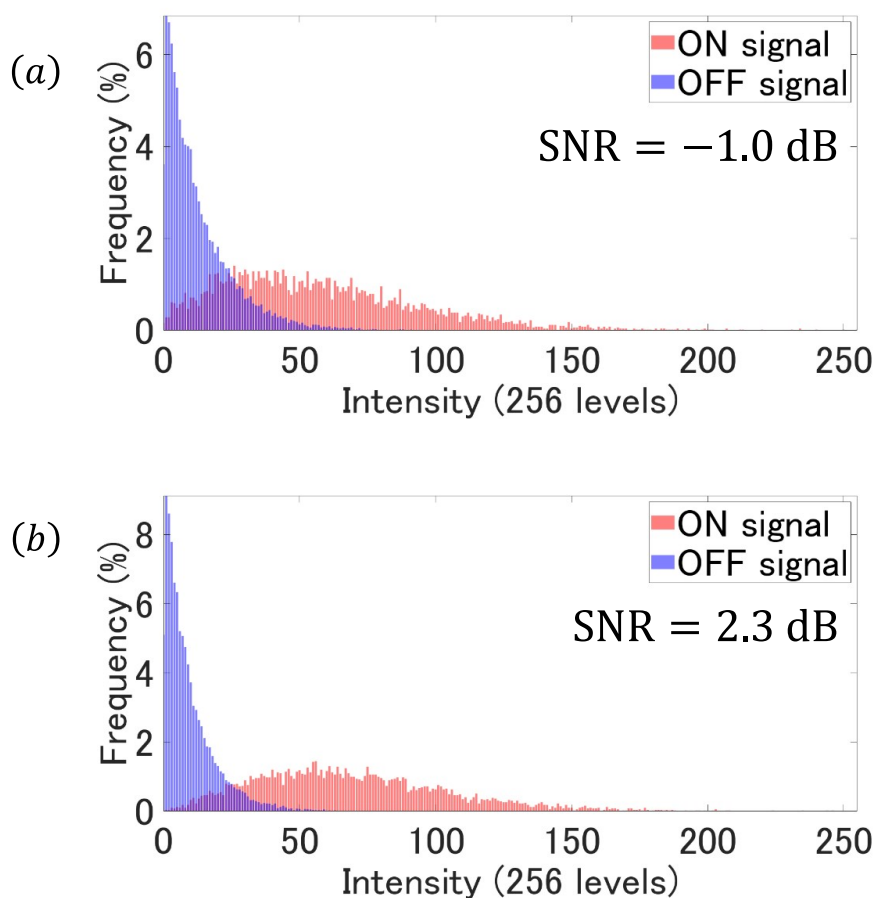


図 3.7 再生信号画像の数値計算結果. (a) 不要な回折格子を含むホログラムによる再生信号画像のヒストグラム. (b) 不要な回折格子を含まないホログラムによる再生信号画像のヒストグラム.

### 3.4.3 信号画像のシフト選択性の評価

続いて、ホログラムの多重性能に最も大きく関わるシフト選択性を評価するために、1枚の信号パターン画像を再生する単一ホログラムについて、ホログラムを1方向にシフトさせながら、得られる再生信号画像について、ONであるべき信号画素の平均強度の変化を数値計算によって評価した。

数値計算に使用した信号・参照パターンは図 3.5 と同様であり、光学系に関するパラメータも表 3.1 にまとめたものと同様の値を使用している。ホログラムのシフト範囲は、図 3.4 の  $X$  方向に対して  $-2 \mu\text{m}$  から  $+2 \mu\text{m}$  までを対象とし、 $10 \text{ nm}$  間隔で計算を行った。

以上の数値計算条件の下で得られた、ホログラムのシフト距離に対する、再生信号画像の ON であるべき信号画素の平均強度の関係を図 3.8 に示す。横軸がホログラムのシフト距離を表し、縦軸が再生信号画像における ON であるべき信号画素と OFF であるべき信号画素の平均強度を表している。この結果から、ホログラムのシフト距離が 0 のときをピークとして、ホログラムのシフトに伴い再生信号画像の平均強度が減少していく様子が確認できた。しか

し、従来のコリニアホログラフィックメモリの一般的なシフト選択性と比較すると、減少した信号の平均強度は  $\pm 210 \text{ nm}$  付近を境にして、それ以上ホログラムをシフトさせても 0 付近まで落ちず、ピーク強度に対して 0.1 倍程度のバイアスノイズが残ってしまうことが確認できた。このバイアスノイズは、隣り合うホログラムからの再生信号と重なってしまうため、多重性能を劣化させる要因となる。この現象は、本システムに特有の現象であり、表面型ホログラムのラマン=ナス回折に由来するノイズ回折光が生じていることが主な原因である。これについては第5章で詳しく述べる。

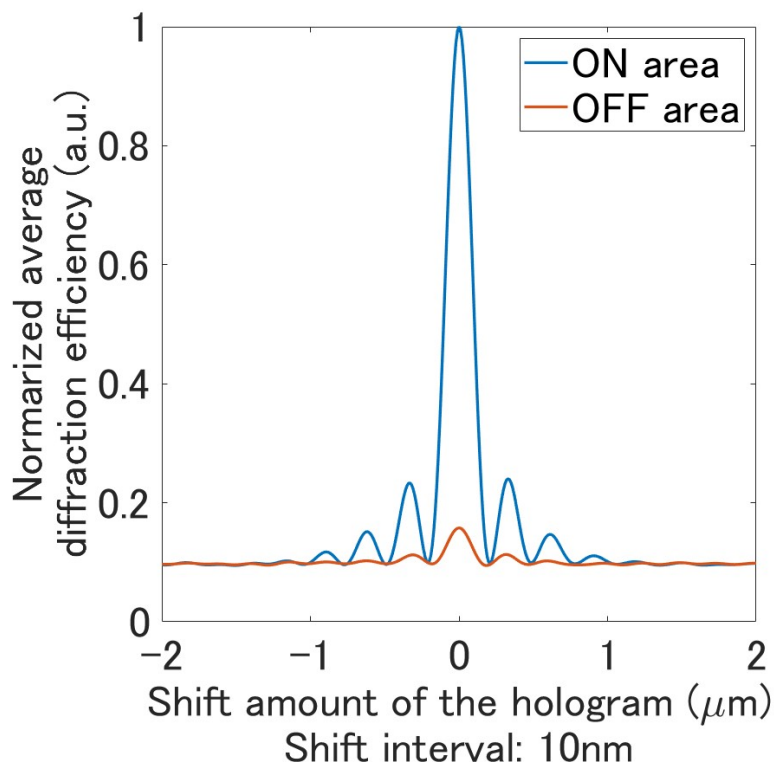


図 3.8 ホログラムのシフト距離に対する、再生信号画像の ON であるべき信号画素の平均強度の関係

### 3.5 本章のまとめ

光書き込み型の体積型ホログラムを用いる従来のホログラフィックメモりに代わり、非光書き込み型の表面型ホログラムを用いる新しいホログラフィックメモリのシステムを提案した。本システムは、任意の位相変調分布をもつホログラムを作製できることから、従来の光書き込みではホログラムに記録されてしまう不要な回折格子を含まないようなホログラムの設計方法を提案し、数値計算によって再生信号画像の信号対ノイズ比が向上することが確認された。また、本システムはコリニアホログラフィックメモリのシステムをベースとして、相関シフト多重方式による表面型ホログラムの多重記録を行うが、従来のコリニアホログラフィックメモリの一般的なシフト選択性とは異なり、本システムのシフト選択性には一定のバイアスノイズが残る結果となった。このバイアスノイズは、ホログラムの多重性能を劣化させる要

因となるため、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの大きな問題点であることが明らかとなった。

## 第 4 章

# 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの理論解析

前章で提案した表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーは、シフト選択性に一定のバイアスノイズが存在してしまうため、ホログラムの多重記録性能を大きく劣化させるという結果を示した。これは、従来のコリニアホログラフィックメモリーにはない本システムに特有の現象である。このことから、本システムが従来のコリニアホログラフィックメモリーの記録再生システムとは似て非なる記録再生特性を持つことが示される。本章では、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録再生システムを理解するために、従来のコリニアホログラフィックメモリーの解析モデルとして提案されている平面波展開モデルの考え方を用いて、最終的な再生信号の解析解の導出を行った。

### 4.1 平面波展開モデル

平面波展開モデル [50] は従来のコリニアホログラフィックメモリーの記録再生原理を解析するために提案されたモデルである。図 4.1 に示すように、SLM 面の各画素サイズを無視できるほど小さいとみなすことによって、表示される信号光、参照光を規則的に配列された点光源の集合とみなす。この時、それぞれの点から発散球面波が生じ、ホログラム面ではそれぞれ異なる入射角をもつ平面波となる。ホログラムに入射した平面波は、回折格子によって異なる角度に回折する平面波となり、イメージセンサー面で点に集光する。平面波の場合、波数ベクトルの向きがそのまま入射角または回折角に対応し、かつ像面における点の位置と 1:1 で対応する。このように、ホログラム面における信号光・参照光・回折光を波数ベクトルの向きが異なる複数の平面波に展開することで回折前後の波面の状態を書き表すというのが平面波展開モデルの基本的な考え方である。

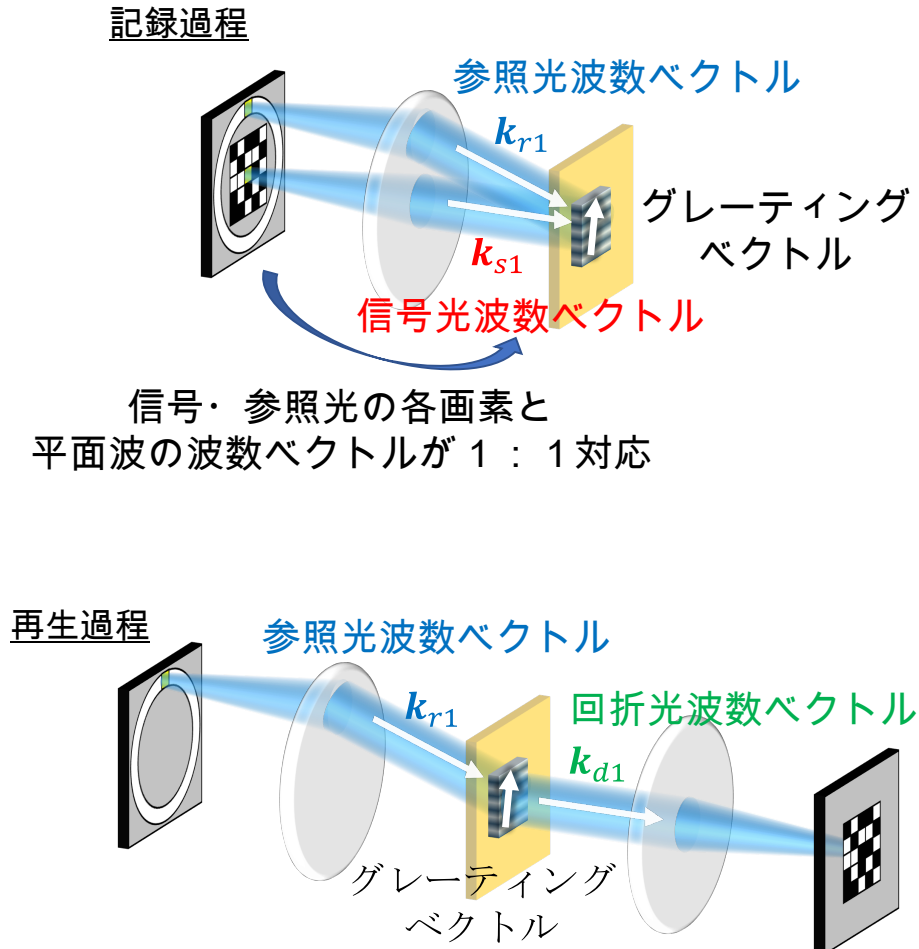


図 4.1 平面波展開モデル

## 4.2 単一信号光画素・単一参照光画素・単一ホログラムの場合の像面の回折光

### 4.2.1 表面型ホログラムの位相分布

平面波展開モデルの考え方を本システムに適用するために、まずは最も基本となる単一信号光画素・単一参照光画素・単一表面ホログラムの場合における像面の回折光の複素振幅分布を導出する。SLM面の座標をベクトル表記で  $\boldsymbol{x} = (x, y)$  と定義し、信号点の位置を  $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{\text{sig}}$ 、参照点の位置を  $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{\text{ref}}$  とする。この時、SLM面における信号点光源、参照点光源の複素振幅分布  $u_{\text{sig}}(\boldsymbol{x})$ 、 $u_{\text{ref}}(\boldsymbol{x})$  はそれぞれ

$$u_{\text{sig}}(\boldsymbol{x}) = \Delta S A_{\text{sig}} e^{i\varphi_{\text{sig}}} \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_{\text{sig}}) \quad (4.1)$$

$$u_{\text{ref}}(\boldsymbol{x}) = \Delta S A_{\text{ref}} e^{i\varphi_{\text{ref}}} \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_{\text{ref}}) \quad (4.2)$$

と表すことができる。ここで、 $\Delta S$  は点光源の微小面積を表している。 $A_{\text{sig}}$ 、 $\varphi_{\text{sig}}$  は信号点の振幅と位相を表しており、 $A_{\text{ref}}$ 、 $\varphi_{\text{ref}}$  は参照光の振幅と位相を表している。また、 $\delta(\boldsymbol{x})$  はデル



タ関数を表している。

このとき、ホログラム面の座標をベクトル表記で  $\mathbf{X} = (X, Y)$  と定義すると、式 (3.1)、式 (3.2) より、ホログラム面における信号光の複素振幅分布  $U_{\text{sig}}(\mathbf{X})$  と参照光の複素振幅分布  $U_{\text{ref}}(\mathbf{X})$  はそれぞれ

$$\begin{aligned} U_{\text{sig}}(\mathbf{X}) &= \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} u_{\text{sig}}(\mathbf{x}) \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}\mathbf{x} \cdot \mathbf{X}\right] d\mathbf{x} \\ &= \frac{\Delta S e^{i2fk}}{i\lambda f} A_{\text{sig}} e^{i\varphi_{\text{sig}}} \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}\mathbf{x}_{\text{sig}} \cdot \mathbf{X}\right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) &= \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} u_{\text{ref}}(\mathbf{x}) \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}\mathbf{x} \cdot \mathbf{X}\right] d\mathbf{x} \\ &= \frac{\Delta S e^{i2fk}}{i\lambda f} A_{\text{ref}} e^{i\varphi_{\text{ref}}} \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}\mathbf{x}_{\text{ref}} \cdot \mathbf{X}\right] \end{aligned} \quad (4.4)$$

と表される。式 (4.3)、(4.4) より、物体面上の信号光画素 1 点、参照光画素 1 点からの光は、それぞれホログラム面上では波数ベクトルの向きが異なる平面波として表されており、この時の波数ベクトルの面内成分は信号点および参照点の位置ベクトルに比例することが分かる。

ここで、ホログラム面に配置される開口サイズを  $D \times D$  とすると、式 (3.6) より、設計すべきホログラムの位相変調分布  $H(\mathbf{X})$  は

$$\begin{aligned} H(\mathbf{X}) &= \kappa \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) \Re[U_{\text{sig}}(\mathbf{X}) U_{\text{ref}}^*(\mathbf{X})] \\ &= \kappa \left(\frac{\Delta S}{\lambda f}\right)^2 A_{\text{sig}} A_{\text{ref}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) \cos\left[(\varphi_{\text{sig}} - \varphi_{\text{ref}}) - \frac{2\pi}{\lambda f}(\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot \mathbf{X}\right] \end{aligned} \quad (4.5)$$

と表される。ここで、ホログラム設計時のシステムパラメーターである  $\kappa$  に対して、

$$C_{\text{pha}} \equiv \kappa \left(\frac{\Delta S}{\lambda f}\right)^2 A_{\text{sig}} A_{\text{ref}} \quad (4.6)$$

となるように、 $C_{\text{pha}}$  をシステムパラメーターとして再定義する。このパラメーターのことを本論文では今後位相係数と呼ぶ。この時、最終的に設計すべきホログラムの位相変調分布  $H(\mathbf{X})$  は

$$H(\mathbf{X}) = C_{\text{pha}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) \cos\left[(\varphi_{\text{sig}} - \varphi_{\text{ref}}) - \frac{2\pi}{\lambda f}(\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot \mathbf{X}\right] \quad (4.7)$$

と表される。式 (4.7) より、2つの点光源によってホログラム面に形成される干渉パターンは、2次元の単一グレーティングとして表され、位相係数  $C_{\text{pha}}$  によって、そのグレーティングの振幅、すなわち位相変調の深さが決定することが分かる。

#### 4.2.2 ホログラム面の回折光

次に、ホログラムから回折した直後の回折光の複素振幅分布を導出する。ホログラムに入射する直前の読出光の複素振幅分布は式 (4.4) で導出した参照光のものと同一である。ここで、再生過程では記録媒体をシフトさせながら読出光を照射するので、再生時に記録媒体がベクト

ル表記を用いて原点から  $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} = (\Delta X_{\text{med}}, \Delta Y_{\text{med}})$  だけシフトしている場合を考えると、式 (3.7) より、ホログラムから回折した直後の回折光の複素振幅分布  $U_{\text{dif}}(\mathbf{X}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})$  は

$$U_{\text{dif}}(\mathbf{X}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) = \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) e^{iH(\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})} \quad (4.8)$$

と表される。ここで、右辺の位相項に着目して式 (4.7) を代入すると

$$e^{iH(\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})} = \exp\left\{iC_{\text{pha}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{D}\right) \cos\left[(\varphi_{\text{sig}} - \varphi_{\text{ref}}) - \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot (\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})\right]\right\} \quad (4.9)$$

と表される。式 (4.9) をさらに展開するために、

$$e^{i\epsilon \cos \theta} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(\epsilon) e^{in\theta} \quad (4.10)$$

となる関係式を適用する。ただし、 $J_n(\epsilon)$  は第1種ベッセル関数を表す。よって、式 (4.9) は

$$e^{iH(\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n \quad (4.11)$$

ただし、

$$g_n = i^n J_n\left[C_{\text{pha}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{D}\right)\right] e^{in(\varphi_{\text{sig}} - \varphi_{\text{ref}})} \exp\left[-in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot (\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})\right] \quad (4.12)$$

と表すことができる。したがって、式 (4.11) を式 (4.8) に代入することで、

$$U_{\text{dif}}(\mathbf{X}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) = \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n \quad (4.13)$$

が得られる。ここで、式 (4.13) の右辺第  $n$  項である  $U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) g_n$  は、ホログラム面における参照光  $U_{\text{ref}}(\mathbf{X})$  がホログラムに入射した際の、ラマン=ナス回折の  $n$  次回折光に対応する平面波の複素振幅分布を表している。よって式 (4.13) は、単一グレーティングである表面型ホログラムに対して、1つの点光源からの平面波を入射させた際に、それぞれの回折次数に対応する平面波が回折光として無数に発生し、それらが重ね合わさっていることを表している。

### 4.2.3 像面の回折光

最後に、像面に伝搬した回折光の複素振幅分布を導出する。像面の座標をベクトル表記で  $-\mathbf{x} = (-x, -y)$  とすると、式 (3.8) より、像面における回折光の複素振幅分布  $u_{\text{dif}}(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})$  は

$$\begin{aligned} u_{\text{dif}}(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) &= \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} U_{\text{dif}}(\mathbf{X}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{x} \cdot \mathbf{X}\right] d\mathbf{X} \\ &= \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) g_n \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{x} \cdot \mathbf{X}\right] d\mathbf{X} \quad (4.14) \end{aligned}$$

と表され、式 (4.4), 式 (4.11) を代入して整理すると、

$$\begin{aligned}
& u_{\text{dif}}(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) \\
&= -\frac{\Delta S e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} A_{\text{ref}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n e^{i\varphi_{\text{dif}}(nth)} \exp \left[ in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \\
&\quad \times \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X}}{D} \right) J_n \left[ C_{\text{pha}} \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{D} \right) \right] \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}}(nth)) \cdot \mathbf{X} \right] d\mathbf{X}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

と表される。ここで、 $\varphi_{\text{dif}}(nth)$ ,  $\mathbf{x}_{\text{dif}}(nth)$  はそれぞれ

$$\varphi_{\text{dif}}(nth) = n\varphi_{\text{sig}} - (n-1)\varphi_{\text{ref}} \tag{4.16}$$

$$\mathbf{x}_{\text{dif}}(nth) = n\mathbf{x}_{\text{sig}} - (n-1)\mathbf{x}_{\text{ref}} \tag{4.17}$$

と表される。

ここで、0次以外の  $n$  次回折光に相当する項、すなわち式 (4.15) 右辺において第  $n$  項 ( $n \neq 0$ ) に着目すると、その像面における複素振幅分布  $u_{\text{dif}}(nth)(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})$  は

$$\begin{aligned}
u_{\text{dif}}(nth)(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) &= -i^n \frac{\Delta S e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} A_{\text{ref}} e^{i\varphi_{\text{dif}}(nth)} \exp \left[ in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \\
&\quad \times \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X}}{D} \right) J_n \left[ C_{\text{pha}} \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{D} \right) \right] \\
&\quad \times \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}}(nth)) \cdot \mathbf{X} \right] d\mathbf{X}
\end{aligned} \tag{4.18}$$

と表される。次に、式 (4.18) 右辺の積分項を解くにあたり、まず、被積分関数内の第1種ベッセル関数の項に着目する。 $n \neq 0$  のとき

$$J_n(\epsilon) = \begin{cases} J_n(\epsilon) & (\epsilon \neq 0) \\ 0 & (\epsilon = 0) \end{cases} \tag{4.19}$$

であること、そして  $\text{rect}$  関数は矩形領域内では1、矩形領域外では0のどちらかしか取りえないことを考慮すると、結果的に式 (4.18) 右辺の第1種ベッセル関数の項は

$$J_n \left[ C_{\text{pha}} \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{D} \right) \right] = \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{D} \right) J_n(C_{\text{pha}}) \tag{4.20}$$

と表すことができる。この時、式 (4.20) を式 (4.18) に代入すると、

$$\begin{aligned}
& u_{\text{dif}}(nth)(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) \\
&= -i^n \frac{\Delta S e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} J_n(C_{\text{pha}}) A_{\text{ref}} e^{i\varphi_{\text{dif}}(nth)} \exp \left[ in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \\
&\quad \times \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X}}{D} \right) \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{D} \right) \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}}(nth)) \cdot \mathbf{X} \right] d\mathbf{X}
\end{aligned} \tag{4.21}$$

と表され、第1種ベッセル関数の項が積分の外に出る。次に、残された被積分関数に着目すると、この項は  $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}$  だけ離れた2つの同一矩形関数の積のフーリエ変換形となっている。ここで、

$$\text{rect} \left( \frac{\mathbf{X}}{D} \right) \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}}{D} \right) = \text{rect} \left( \frac{\Delta \mathbf{X}}{2D} \right) \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X} - \frac{\Delta \mathbf{X}}{2}}{D - |\Delta \mathbf{X}|} \right) \tag{4.22}$$

となる関係式を適用すると、式(4.21)は

$$\begin{aligned}
& u_{\text{dif}(nth)}(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) \\
&= -i^n \frac{\Delta S e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} J_n(C_{\text{pha}}) A_{\text{ref}} e^{i\varphi_{\text{dif}(nth)}} \exp \left[ in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \text{rect} \left( \frac{\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{2D} \right) \\
& \quad \times \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left( \frac{X - \frac{\Delta X_{\text{med}}}{2}}{D - |\Delta X_{\text{med}}|} \right) \text{rect} \left( \frac{Y - \frac{\Delta Y_{\text{med}}}{2}}{D - |\Delta Y_{\text{med}}|} \right) \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \cdot \mathbf{X} \right] d\mathbf{X}
\end{aligned} \tag{4.23}$$

と表され、rect関数のフーリエ変換はsinc関数になることから、最終的に像面の $n$ 次回折光の複素振幅分布 $u_{\text{dif}(nth)}(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})$ は

$$\begin{aligned}
& u_{\text{dif}(nth)}(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) \\
&= -i^n \frac{\Delta S e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} J_n(C_{\text{pha}}) A_{\text{ref}} e^{i\varphi_{\text{dif}(nth)}} \exp \left[ in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \\
& \quad \times \text{rect} \left( \frac{\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{2D} \right) (D - |\Delta X_{\text{med}}|) (D - |\Delta Y_{\text{med}}|) \\
& \quad \times \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta X_{\text{med}}|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \right] \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta Y_{\text{med}}|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \right] \\
& \quad \times \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \\
&= -i^n \frac{\Delta S D^2 e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} J_n(C_{\text{pha}}) A_{\text{ref}} e^{i\varphi_{\text{dif}(nth)}} \exp \left[ in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \\
& \quad \times \text{tri} \left( \frac{\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{D} \right) \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta X_{\text{med}}|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \right] \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta Y_{\text{med}}|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \right] \\
& \quad \times \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right]
\end{aligned} \tag{4.24}$$

と表される。ただし、第2式に現れるtri関数は三角形関数とも呼ばれ、

$$\text{tri}(\epsilon) \equiv \begin{cases} 1 - |\epsilon| & |\epsilon| < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4.25}$$

と定義される関数である。ここでは、

$$\text{tri} \left( \frac{\Delta X}{D} \right) = \text{rect} \left( \frac{\Delta X}{2D} \right) (D - |\Delta X|) \tag{4.26}$$

と式変形できることを用いている。

式(4.24)で得られた像面における $n$ 次回折光の複素振幅分布の解析解を、以下の7つの項

$(F_1, F_2, \dots, F_7)$  に分類し, 各項の物理的な意味を説明する.

$$F_1 = -i^n \frac{\Delta S A_{\text{ref}}}{\lambda^2 f^2} e^{i4fk} \quad (4.27)$$

$$F_2 = J_n(C_{\text{pha}}) \quad (4.28)$$

$$F_3 = e^{i\varphi_{\text{dif}(nth)}} \quad (4.29)$$

$$F_4 = \exp \left[ in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \quad (4.30)$$

$$F_5 = D^2 \text{tri} \left( \frac{\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}}{D} \right) \quad (4.31)$$

$$F_6 = \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta X_{\text{med}}|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \right] \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta Y_{\text{med}}|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \right] \quad (4.32)$$

$$F_7 = \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \quad (4.33)$$

まず,  $F_1$  は回折光の複素振幅定数である. 振幅については, 物体面上の各点の微小面積  $\Delta S$  と再生時に照射する参照光の振幅  $A_{\text{ref}}$  に比例する. また, 物体面から再生像面までのフレネル回折伝搬によって, 符号が反転し, 光源波長  $\lambda$  とレンズの焦点距離  $f$  に反比例する. 位相については, ラマン=ナス回折に起因する回折次数の違いによる位相変化  $i^n$  と, 物体面から再生像面までの伝搬距離  $4f$  による波面全体の位相変化が現れている.

$F_2$  は回折次数  $n$  とホログラムの位相係数  $C_{\text{pha}}$  に依存する振幅係数を表しており, 各次数の回折光の回折効率に相当している. また, 位相係数  $C_{\text{pha}}$  はホログラムの位相変調の深さを決める比例係数であることから, ホログラムを設計する際に任意に決定することができるパラメーターである. よって, このパラメーターをどのように決めるかが各次数の回折光の回折効率の決定に関わることになる.

$F_3$  は回折光の再生時の位相を表しており, 式 (4.16) より,  $n = 1$  のとき,  $\varphi_{\text{dif}(nth)} = \varphi_{\text{sig}}$  となり, 信号光の位相が再生される. このことから, 信号再生に寄与する回折光は 1 次回折光のみで, それ以外の次数の回折光は基本的に信号再生とは無関係であることが分かる.

$F_4, F_5, F_6$  はいずれも記録媒体のシフト距離  $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}$  に依存しており,  $F_4$  は記録媒体のシフトに伴う付加位相を表している. これは, 記録媒体のシフトに伴い, 読出光とグレーティングの相対的な位置関係がずれることに起因する.

また,  $F_5$  は記録媒体のシフトに依存する振幅係数であり, ホログラム面で読出光の照射領域とホログラムが重なっている領域の面積を表している. 例えば, 読出光の照射領域とホログラムが完全に重なっている場合, すなわち  $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} = 0$  のとき,  $F_5 = D^2$  となり, ホログラムサイズ  $D \times D$  の面積と等しくなる. また,  $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} = D$  のとき,  $F_5 = 0$  であり, これは読出光とホログラムがホログラム面上で空間的に完全に分離してしまい, 読出光が一切ホログラムに照射されなくなることで回折光の振幅が 0 になることを表している.

$F_6$  は, 再生像面の座標  $-\mathbf{x}$  に依存しており, 再生像面上で  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}$  に集光する回折平面波の空間的な sinc 関数状の広がりを表している. sinc 関数状の広がりとは, 読出光とホログラムの重なる領域が  $(D - |\Delta X|) \times (D - |\Delta Y|)$  の矩形領域であることに起因する.

最後の  $F_7$  は, ホログラム面において, 中心が原点からずれた位置にある矩形開口による回折光が像面に作る空間位相分布を表している. 読出光とホログラムの重なる矩形領域が開口に

相当し、その原点からのずれ量が記録媒体のシフト距離  $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}$  に対して  $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}/2$  だけずれることに起因する。

### 4.3 複数信号光画素・複数参照光画素・多重ホログラムの場合における記録再生過程

#### 4.3.1 多重された表面型ホログラムの位相分布

次に、複数信号光画素・複数参照光画素による信号参照パターンを用いて、ホログラムを多重記録した場合の記録再生過程の解析を行う。先程と同様に、物体面の座標をベクトル表記で  $\mathbf{x} = (x, y)$  と定義する。ここで、総信号点数を  $N_{\text{sig}}$ 、総参照点数を  $N_{\text{ref}}$  とすると、物体面における信号光、参照光の複素振幅分布  $u_{\text{sig}}(\mathbf{x})$ 、 $u_{\text{ref}}(\mathbf{x})$  はそれぞれ

$$u_{\text{sig}}(\mathbf{x}) = \Delta S A_{\text{sig}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sigma_{\text{sig}}(s) e^{i\varphi_{\text{sig}}(s)} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{sig}}(s)) \quad (4.34)$$

$$u_{\text{ref}}(\mathbf{x}) = \Delta S A_{\text{ref}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} e^{i\varphi_{\text{ref}}(r)} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \quad (4.35)$$

と表すことができる。ここで、 $\Delta S$  は点光源の微小面積を表しており、 $A_{\text{sig}}$  は各信号光画素の振幅、 $A_{\text{ref}}$  は各参照光画素の振幅を表している。また、 $\varphi_{\text{sig}}(s)$  は  $s$  番目 ( $s = 1, 2, \dots, N_{\text{sig}}$ ) の信号光画素の位相を表しており、 $\varphi_{\text{ref}}(r)$  は  $r$  番目 ( $r = 1, 2, \dots, N_{\text{ref}}$ ) の参照光画素の位相を表している。 $\sigma_{\text{sig}}(s)$  は  $s$  番目の信号光画素の振幅の ON/OFF を決定する変数であり、記録するデジタル情報に対して 0 または 1 のどちらかの値を取る。さらに、 $\mathbf{x}_{\text{sig}}(s)$  は  $s$  番目の信号光画素の座標を表しており、 $\mathbf{x}_{\text{ref}}(r)$  は  $r$  番目の参照光画素の座標を表している。ここで、ホログラムを多重する場合、信号光のパターンはページ毎に異なることに注意する必要がある。強度変調方式の場合は、各信号光画素の振幅の ON/OFF を反映する  $\sigma_{\text{sig}}(s)$  がページ毎に異なり、位相変調方式の場合は、各信号光画素の位相  $\varphi_{\text{sig}}(s)$  がページ毎に異なる。このことを考慮して、 $N_{\text{holo}}$  枚の多重されたホログラムの内、 $h$  番目 ( $h = 1, 2, \dots, N_{\text{holo}}$ ) の信号光の複素振幅分布  $u_{\text{sig}}(\mathbf{x}; h)$  を

$$u_{\text{sig}}(\mathbf{x}; h) = \Delta S A_{\text{sig}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sigma_{\text{sig}}(h, s) e^{i\varphi_{\text{sig}}(h, s)} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{sig}}(s)) \quad (4.36)$$

$$(4.37)$$

と表すことにする。ただし、強度変調方式の場合は常に  $\varphi_{\text{sig}}(h, s) = \varphi_{\text{sig}}(s)$  であるものとし、位相変調方式の場合は常に  $\sigma_{\text{sig}}(h, s) = 1$  であるものとする。

よって、ホログラム面の座標をベクトル表記で  $(\mathbf{X})$  とすると、 $h$  番目のページに対応する信

号光の複素振幅分布  $U_{\text{sig}}(\mathbf{X}; h)$  と参照光の複素振幅分布  $U_{\text{ref}}(\mathbf{X})$  はそれぞれ

$$\begin{aligned} U_{\text{sig}}(\mathbf{X}; h) &= \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} u_{\text{sig}}(\mathbf{x}; h) \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{x} \cdot \mathbf{X}\right] d\mathbf{x} \\ &= \frac{\Delta S e^{i2fk}}{i\lambda f} A_{\text{sig}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sigma_{\text{sig}}(h, s) e^{i\varphi_{\text{sig}}(h, s)} \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{x}_{\text{sig}}(s) \cdot \mathbf{X}\right] \end{aligned} \quad (4.38)$$

$$\begin{aligned} U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) &= \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} u_{\text{ref}}(\mathbf{x}) \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{x} \cdot \mathbf{X}\right] d\mathbf{x} \\ &= \frac{\Delta S e^{i2fk}}{i\lambda f} A_{\text{ref}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} e^{i\varphi_{\text{ref}}(r)} \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{x}_{\text{ref}}(r) \cdot \mathbf{X}\right] \end{aligned} \quad (4.39)$$

と表される. 式 (4.38), (4.39) より, ホログラム面上の信号光と参照光は, それぞれ物体面上の各点光源から照射された, 波数ベクトルの向きが異なる平面波の足し合わせとして表される.

次に, ホログラム面に配置される開口サイズを  $D \times D$  とすると, 式 (4.7) より,  $h$  番目 ( $h$  ページ目) のホログラムの位相変調分布  $H_{\text{page}}(\mathbf{X}; h)$  は

$$\begin{aligned} H_{\text{page}}(\mathbf{X}; h) &= C_{\text{pha}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \sigma_{\text{sig}}(h, s) \\ &\quad \times \cos\left[(\varphi_{\text{sig}}(h, s) - \varphi_{\text{ref}}(r)) - \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot \mathbf{X}\right] \end{aligned} \quad (4.40)$$

と表される. ただし, 位相係数  $C_{\text{pha}}$  は式 (4.6) で定義されるものと同じである. ここで, それぞれのページに対応するホログラムをシフト多重することを考えると, 各ページのホログラムはホログラム面において少しずつシフトした状態で重ね合わされる.  $h$  ページ目のホログラムの原点からのずれをベクトル表記を用いて  $\Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h) = (\Delta X_{\text{page}}(h), \Delta Y_{\text{page}}(h))$  と表すと, 最終的に計算すべき多重ホログラムの位相変調分布  $H_{\text{mul}}(\mathbf{X})$  は, 式 (4.40) より

$$\begin{aligned} H_{\text{mul}}(\mathbf{X}) &= \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} H_{\text{page}}(\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h); h) \\ &= C_{\text{pha}} \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \sigma_{\text{sig}}(h, s) \\ &\quad \times \cos\left[(\varphi_{\text{sig}}(h, s) - \varphi_{\text{ref}}(r)) - \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h))\right] \end{aligned} \quad (4.41)$$

と表される. 式 (4.41) より, シフト多重ホログラムはグレーティング成分の単純な足し合わせとして表されることが分かる.

### 4.3.2 ホログラム面の回折光

続いて, 再生過程の解析を行う. 再生時における記録媒体の原点からのシフト距離を, ベクトル表記を用いて  $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} = (\Delta X_{\text{med}}, \Delta Y_{\text{med}})$  とすると, ホログラムから回折した直後の回

折光の複素振幅分布  $U_{\text{dif}}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}})$  は、式 (4.8) と同様に

$$U_{\text{dif}}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) = \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) e^{iH_{\text{mul}}(\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}})} \quad (4.42)$$

と書き表され、右辺の位相項に式 (4.41) を代入すると、

$$\begin{aligned} & U_{\text{dif}}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) \\ &= \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) \exp\left\{iC_{\text{pha}} \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \sigma_{\text{sig}}(h, s)\right. \\ & \quad \left. \times \cos\left[\left(\varphi_{\text{sig}}(h, s) - \varphi_{\text{ref}}(r)\right) - \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h))\right]\right\} \\ &= \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) \prod_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \prod_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \prod_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \exp\left\{iC_{\text{pha}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \sigma_{\text{sig}}(h, s)\right. \\ & \quad \left. \times \cos\left[\left(\varphi_{\text{sig}}(h, s) - \varphi_{\text{ref}}(r)\right) - \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h))\right]\right\} \\ &= \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) \prod_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \prod_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \prod_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n(h, s, r) \end{aligned} \quad (4.43)$$

ただし、

$$\begin{aligned} g_n(h, s, r) &= i^n J_n \left[ C_{\text{pha}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \sigma_{\text{sig}}(h, s) \right] e^{in(\varphi_{\text{sig}}(h, s) - \varphi_{\text{ref}}(r))} \\ & \quad \times \exp\left[-in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h))\right] \end{aligned} \quad (4.44)$$

と表すことができる。

ここで、式 (4.43) 右辺を  $n, h, s, r$  に関して展開したときのそれぞれの項の意味について説明する。多重ホログラムは、 $h$  ページ目における  $s$  番目の信号光画素と  $r$  番目の参照光画素によって形成されるグレーティングを、全通り重ね合わせたものと考えることができ、その総数は  $N_{\text{holo}}N_{\text{sig}}N_{\text{ref}}$  通りある。よって、回折の線形性により、ホログラムからの回折光はこれらのグレーティング成分それぞれからの回折光の足し合わせで考えることができる。ここで重要な点は、それぞれのグレーティング成分は複数の回折次数の回折光を発生させるという点である。よって、例えば0次回折光と1次回折光のみを考えたとき、 $N_{\text{holo}}N_{\text{sig}}N_{\text{ref}}$  通りのグレーティング成分それぞれについて、2通りの回折次数を考える必要があるため、その場合の数は  $2^{N_{\text{holo}}N_{\text{sig}}N_{\text{ref}}}$  通りある。式 (4.43) 右辺の展開項の1つ1つは、上記の場合の数に相当する回折平面波にそれぞれ対応している。

ここで、 $h$  ページ目における  $s$  番目の信号光画素と  $r$  番目の参照光画素によって形成されるグレーティング成分からの  $n$  次回折光を考えると、その回折光の複素振幅分布  $U_{\text{dif}(nth)}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}; h, s, r)$  は

$$U_{\text{dif}(nth)}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}; h, s, r) = \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) \left( \prod_{h'=1}^{N_{\text{holo}}} \prod_{s'=1}^{N_{\text{sig}}} \prod_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} g_0(h', s', r') \right) \frac{g_n(h, s, r)}{g_0(h, s, r)} \quad (4.45)$$



と表すことができる。したがって、これらの回折光を  $h, s, r$  それぞれについて全て足し合わせた回折光の複素振幅分布  $U_{\text{dif}(nth)}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}})$  は

$$\begin{aligned} U_{\text{dif}(nth)}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) &= \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} U_{\text{dif}(nth)}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}; h, s, r) \\ &= \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) \left( \prod_{h'=1}^{N_{\text{holo}}} \prod_{s'=1}^{N_{\text{sig}}} \prod_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} g_0(h', s', r') \right) \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \frac{g_n(h, s, r)}{g_0(h, s, r)} \end{aligned} \quad (4.46)$$

と表される。ここで、式(4.44)より、

$$\begin{aligned} \frac{g_n(h, s, r)}{g_0(h, s, r)} &= i^n \frac{J_n \left[ C_{\text{pha}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \sigma_{\text{sig}}(h, s) \right]}{J_0 \left[ C_{\text{pha}} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \sigma_{\text{sig}}(h, s) \right]} e^{in(\varphi_{\text{sig}}(h, s) - \varphi_{\text{ref}}(r))} \\ &\quad \times \exp \left[ -in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)) \right] \end{aligned} \quad (4.47)$$

と表される。また、第1種ベッセル関数の分数項に着目すると、1または0のどちらかのみを取る変数  $\mu$  に対して、

$$\frac{J_n(\mu\epsilon)}{J_0(\mu\epsilon)} = \begin{cases} \mu \frac{J_n(\epsilon)}{J_0(\epsilon)} & (\mu = 1) \\ 0 & (\mu = 0) \end{cases} \quad (4.48)$$

となる関係を用いると、 $\text{rect}$  と  $\sigma_{\text{sig}}(h, s)$  は1または0のどちらかしか取り得ないことから、式(4.47)は

$$\begin{aligned} \frac{g_n(h, s, r)}{g_0(h, s, r)} &= i^n \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \sigma_{\text{sig}}(h, s) \frac{J_n(C_{\text{pha}})}{J_0(C_{\text{pha}})} e^{in(\varphi_{\text{sig}}(h, s) - \varphi_{\text{ref}}(r))} \\ &\quad \times \exp \left[ -in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)) \right] \end{aligned} \quad (4.49)$$

と表すことができる。これらのことから、式(4.46)は

$$\begin{aligned} &U_{\text{dif}(nth)}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) \\ &= \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) U_{\text{ref}}(\mathbf{X}) M_n(C_{\text{pha}}) \\ &\quad \times i^n \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \sigma_{\text{sig}}(h, s) e^{in(\varphi_{\text{sig}}(h, s) - \varphi_{\text{ref}}(r))} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \\ &\quad \times \exp \left[ -in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)) \right] \end{aligned} \quad (4.50)$$

ただし、

$$M_n(C_{\text{pha}}) = \left( \prod_{h'=1}^{N_{\text{holo}}} \prod_{s'=1}^{N_{\text{sig}}} \prod_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} g_0(h', s', r') \right) \frac{J_n(C_{\text{pha}})}{J_0(C_{\text{pha}})} \quad (4.51)$$

と表される。式(4.50)に現れる総和記号は、ホログラムに記録される全てのグレーティング成分による  $n$  次回折光の足し合わせを表しており、 $h$  番目のページに対応するホログラムにおい

て、 $s$  番目の信号点と  $r$  番目の参照点によってホログラムに形成されるグレーティング成分の組み合わせとして表される。また、式 (4.51) は、この多重ホログラムに平面波が照射された際に、これらのグレーティング成分の組み合わせごとに発生する回折光平面波一つ一つの振幅を決定する比例定数を表している。ここで、位相変調方式 ( $\sigma_{\text{sig}}(h, s) = 1$ ) かつ、ホログラム全体が一様に  $m$  多重されている場合を考えると、式 (4.44) より、

$$\begin{aligned} M_n(C_{\text{pha}}) &= \left( \prod_{h'=1}^{N_{\text{holo}}} \prod_{s'=1}^{N_{\text{sig}}} \prod_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} J_0 \left[ C_{\text{pha}} \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h')}{D} \right) \sigma_{\text{sig}}(h', s') \right] \right) \frac{J_n(C_{\text{pha}})}{J_0(C_{\text{pha}})} \\ &= [J_0(C_{\text{pha}})]^{mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}}} \frac{J_n(C_{\text{pha}})}{J_0(C_{\text{pha}})} \\ &= J_n(C_{\text{pha}}) [J_0(C_{\text{pha}})]^{mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}}-1} \end{aligned} \quad (4.52)$$

と表すことができる。この時、多重ホログラムからの回折平面波一つ一つの振幅は、対応する回折次数とホログラムの位相係数、そして参照光の照射領域（ホログラム面に配置される開口サイズ）内に含まれるグレーティング成分の総数を表す  $mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}}$  に依存することが分かる。

最後に、式 (4.39) を式 (4.50) に代入して整理すると、最終的なホログラム面の  $n$  次回折光  $U_{\text{dif}(nth)}(\mathbf{X}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})$  は

$$\begin{aligned} &U_{\text{dif}(nth)}(\mathbf{X}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) \\ &= i^n \frac{\Delta S e^{i2fk}}{i\lambda f} M_n(C_{\text{pha}}) A_{\text{ref}} \sum_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \left\{ \sigma_{\text{sig}}(h, s) e^{i\varphi_{\text{dif}(nth)}(h, s, r, r')} \right. \\ &\quad \times \exp \left[ in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)) \right] \\ &\quad \left. \times \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X}}{D} \right) \text{rect} \left( \frac{\mathbf{X} - \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D} \right) \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r') \cdot \mathbf{X} \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.53)$$

と表される。ただし、 $\varphi_{\text{dif}(nth)}(h, s, r, r')$ 、 $\mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')$  はそれぞれ

$$\varphi_{\text{dif}(nth)}(h, s, r, r') = n\varphi_{\text{sig}}(h, s) - n\varphi_{\text{ref}}(r) + \varphi_{\text{ref}}(r') \quad (4.54)$$

$$\mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r') = n\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - n\mathbf{x}_{\text{ref}}(r) + \mathbf{x}_{\text{ref}}(r') \quad (4.55)$$

を表している。式 (4.53) に現れる総和記号は、ホログラムから回折する  $n$  次の回折光平面波の足し合わせを表しており、 $h$  番目のページに対応するホログラムにおいて、 $s$  番目の信号点と  $r$  番目の参照点によってホログラムに形成されるグレーティング成分を、 $r'$  番目の参照点からの平面波で照射したときの回折平面波の組み合わせとして表される。また、総和記号内部第3項の位相については、 $s$  番目の信号点と  $r$  番目の参照点によって形成されたグレーティング成分が、ホログラムのシフト距離に比例してシフト方向に位相が変化する様子を表している。

### 4.3.3 像面の回折光

続いて、式 (4.53) で導かれた、ホログラムからの回折直後の  $n$  次回折光が像面に作る複素振幅分布を導出する。像面の座標をベクトル表記で  $-\mathbf{x} = (-x, -y)$  とすると、式 (3.8) より、

像面における回折光の複素振幅分布  $u_{\text{dif}(nth)}(-\mathbf{x}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}})$  は

$$\begin{aligned}
& u_{\text{dif}(nth)}(-\mathbf{x}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) \\
&= \frac{e^{i2fk}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} U_{\text{dif}(nth)}(\mathbf{X}; \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f}\mathbf{x} \cdot \mathbf{X}\right] d\mathbf{X} \\
&= -i^n \frac{\Delta S e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} A_{\text{ref}} M_n(C_{\text{pha}}) \\
&\quad \times \sum_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \left\{ \sigma_{\text{sig}}(h, s) e^{i\varphi_{\text{dif}(nth)}(h, s, r, r')} \right. \\
&\quad \times \exp\left[in\frac{2\pi}{\lambda f}(\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\Delta\mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h))\right] \\
&\quad \left. \times \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')) \cdot \mathbf{X}\right] d\mathbf{X} \right\} \\
& \tag{4.56}
\end{aligned}$$

と表される．ここで，式(4.56)右辺の積分項に着目すると，式(4.22)からの式展開と同様にして

$$\begin{aligned}
& \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X}}{D}\right) \text{rect}\left(\frac{\mathbf{X} - \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda f}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')) \cdot \mathbf{X}\right] d\mathbf{X} \\
&= D^2 \text{tri}\left(\frac{\Delta\mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D}\right) \\
&\quad \times \text{sinc}\left[\frac{D - |\Delta X_{\text{med}} + \Delta X_{\text{page}}(h)|}{\lambda f}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r'))\right] \\
&\quad \times \text{sinc}\left[\frac{D - |\Delta Y_{\text{med}} + \Delta Y_{\text{page}}(h)|}{\lambda f}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r'))\right] \\
&\quad \times \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda f}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')) \cdot (\Delta\mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h))\right] \\
& \tag{4.57}
\end{aligned}$$

と表すことができる．ここで，式(4.57)右辺の sinc 関数項は，像面における  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')$  を満たす位置にピークを持つ点の広がりを表している．このことから，複数信号光画素，複数参照光画素における再生信号の描像は， $s$  番目の信号点と  $r$  番目の参照点によって形成されたグレーティングに  $r'$  番目の参照点からの平面波が入射したときの  $n$  次回折光の位置  $\mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')$  をピークとする，sinc 関数状の広がりを持った回折スポットが， $(s, r, r')$  の組み合わせの数だけ存在していると解釈することができる．

式(4.56)，および式(4.57)によって導かれた像面における  $n$  次回折光の複素振幅分布の解析解を，前節の単一信号光画素・単一参照光画素・単一表面ホログラムの場合と同様に，以下

の7つの項 ( $F'_1, F'_2, \dots, F'_7$ ) に分類し、各項の物理的な意味を説明する。

$$F'_1 = -i^n \frac{\Delta S A_{\text{ref}}}{\lambda^2 f^2} e^{i4fk} \quad (4.58)$$

$$F'_2 = M_n (C_{\text{pha}}) \quad (4.59)$$

$$F'_3 = \sigma_{\text{sig}}(h, s) e^{i\varphi_{\text{dif}(nth)}(h, s, r, r')} \quad (4.60)$$

$$F'_4 = \exp \left[ in \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)) \right] \quad (4.61)$$

$$F'_5 = D^2 \text{tri} \left( \frac{\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D} \right) \quad (4.62)$$

$$F'_6 = \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta X_{\text{med}} + \Delta X_{\text{page}}(h)|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')) \right] \\ \times \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta Y_{\text{med}} + \Delta Y_{\text{page}}(h)|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')) \right] \quad (4.63)$$

$$F'_7 = \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')) \cdot (\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)) \right] \quad (4.64)$$

$F'_1$  はホログラムによって回折するあらゆる回折平面波の全てに共通する複素振幅定数であり、その物理的な意味は式 (4.27) と等しい。

$F'_2$  は  $n$  次回折光の振幅係数であり、ホログラムの位相係数  $C_{\text{pha}}$  に依存することを表している。位相変調方式（各ページの信号点が常に全て光っている）かつホログラム全体が一様な多重度で記録されている場合、式 (4.52) に示すように解析的に表すことができ、参照光の照射領域内に含まれるグレーティング成分の総数に依存している。これは、表面型ホログラムのラマン=ナス回折では、再生時の参照光の照射に対して、ホログラムに記録された全てのグレーティング成分から回折光が発生することに起因する。そのため、グレーティング成分の総数が多いほど展開される回折平面波の数も増え、結果として回折平面波一つ一つの振幅が小さくなる原因となる。

$F'_3$  は回折平面波の再生時の振幅と位相を表しており、記録信号の振幅の ON/OFF または位相の ON/OFF の再生に寄与している。式 (4.54) より、記録時と同じ参照点の組み合わせで回折する1次回折光（すなわち、 $n = 1$  かつ  $r = r'$ ）においては、 $\varphi_{\text{dif}(nth)}(h, s, r, r') = \varphi_{\text{sig}}(h, s)$  となり、 $h$  ページ目の信号パターンの  $s$  番目の信号点の位相が完全に再生される。したがって、 $n = 1$  かつ  $r = r'$  を満たす回折平面波は全て同位相で干渉し、信号点の再生に寄与することが分かる。

$F'_4$  は記録媒体のシフトに伴う付加位相を表している。物理的な意味は式 (4.30) と同じであるが、 $s$  番目の信号点と  $r$  番目の参照点の組み合わせによって記録されるグレーティングベクトルの面内成分 ( $2\pi/\lambda f$ )  $(\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r))$  が信号点と参照点の位置に依存して異なることから、記録媒体のシフトに伴う回折光の位相変化がグレーティング成分ごとに異なることを表している。例えば、信号点と参照点の距離が「近い」組み合わせで記録されたグレーティング成分の周期は長くなるため、記録媒体のシフト距離に対するグレーティングの位相変化量は比較的小さくなるが、逆に信号点と参照点の距離が「遠い」組み合わせで記録されたグレーティング成分の周期は短くなるため、記録媒体のシフト距離に対するグレーティングの位相変化量は比較的大きくなる。

$F'_5$  は記録媒体のシフトに依存する振幅係数であり、ホログラム面において、読出光の照射領域と  $h$  ページ目のホログラムが重なっている領域の面積を表している。物理的な意味は式 (4.31) と同じであるが、多重ホログラムの場合はホログラムのページ番号  $h$  に依存する。これは、再生時の記録媒体のシフト距離  $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}$  が同じであっても、ページ毎にホログラムの位置は異なっているため、ページ毎に読出光の照射領域と重なる面積が異なることに起因している。

$F'_6$  は、再生像面上で  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')$  に集光する回折平面波の空間的な sinc 関数状の広がりを表している。グレーティング成分と再生時の参照点、そして回折次数の組み合わせによって発生する回折平面波は、再生像面上のあらゆる位置に集光するが、その回折スポットの広がり、読出光と各ページのホログラムが重なる領域のサイズによって一意に決定される。この広がり、物理的な意味は式 (4.32) の場合と同等である。

最後の  $F'_7$  は、ホログラム面において、中心が原点からずれた位置にある矩形開口による回折光が像面に作る空間位相分布を表している。物理的な意味は式 (4.33) と同じであるが、それぞれの回折スポット、ホログラムページごとに異なる空間位相分布を表す。

#### 4.3.4 シフト選択性

複数参照光画素による信号の記録再生では、再生時に記録媒体のシフトに伴って再生信号光の強度が減少する。このようなシフト選択性の解析解を先ほど導出した像面の回折光の式から導出する。まず、式 (4.57) で表された像面における  $n$  次回折光のうち、信号再生に寄与する 1 次回折光について考える。式 (4.56)、式 (4.57) に  $n = 1$  を代入すると、像面における 1 次回折光の複素振幅分布  $u_{\text{dif}(1\text{st})}(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})$  は

$$\begin{aligned}
& u_{\text{dif}(1\text{st})}(-\mathbf{x}; \Delta \mathbf{X}_{\text{med}}) \\
&= -i \frac{\Delta S e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} A_{\text{ref}} M_1 (C_{\text{pha}}) \\
&\quad \times \sum_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sig}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{ref}}} \left\{ \sigma_{\text{sig}}(h, s) e^{i\varphi_{\text{dif}(1\text{st})}(h, s, r, r')} \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r)) \cdot (\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)) \right] \right\} \\
&\quad \times D^2 \text{tri} \left( \frac{\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D} \right) \\
&\quad \times \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(1\text{st})}(s, r, r')) \right] \\
&\quad \times \text{sinc} \left[ \frac{D - |\Delta Y_{\text{med}} + \Delta Y_{\text{page}}(h)|}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(1\text{st})}(s, r, r')) \right] \\
&\quad \times \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda f} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{dif}(1\text{st})}(s, r, r')) \cdot (\Delta \mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)) \right] \Bigg\} \quad (4.65)
\end{aligned}$$

と表される。ここで、得られた像面全体の複素振幅分布のうち、 $s_0$  番目の信号光画素の再生位置に相当する  $-\mathbf{x} = -\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0)$  の複素振幅  $u_{\text{dif}(1\text{st})}(-\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0); \Delta \mathbf{X}_{\text{med}})$  に着目すると、その位置に回折スポットのピーク中心が来るような  $(s, r, r')$  の組み合わせの条件は  $\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0) = \mathbf{x}_{\text{dif}(1\text{st})}(s, r, r')$  を満たす場合、すなわち式 (4.55) より  $\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0) = \mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r) + \mathbf{x}_{\text{ref}}(r')$  を満たす場合であることが分かる。この条件は  $s = s_0, r = r'$  の場合に常に満たされる。したがって、式 (4.65) 右辺の総和記号で表される複数の項のなかで、 $s = s_0, r = r'$  に対応する項

のみを書き表したときの  $-\mathbf{x} = -\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0)$  における複素振幅を  $u_{\text{reconst}}(-\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0); \Delta\mathbf{X}_{\text{med}})$  とすると,

$$\begin{aligned}
& u_{\text{reconst}}(-\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0); \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) \\
&= -i \frac{\Delta S D^2 e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} A_{\text{ref}} M_1(C_{\text{pha}}) \\
&\quad \times \sum_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \left\{ \sigma_{\text{sig}}(h, s_0) e^{i\varphi_{\text{sig}}(h, s_0)} \text{tri} \left( \frac{\Delta\mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)}{D} \right) \right. \\
&\quad \left. \times \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r')) \cdot (\Delta\mathbf{X}_{\text{med}} + \Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)) \right] \right\} \\
&= -i \frac{\Delta S D^2 e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} A_{\text{ref}} M_1(C_{\text{pha}}) \\
&\quad \times \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sigma_{\text{sig}}(h, s_0) e^{i\varphi_{\text{sig}}(h, s_0)} \delta(\Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h) + \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} - \Delta\mathbf{X}) \right\} \\
&\quad \times \left\{ \text{tri} \left( \frac{\Delta\mathbf{X}}{D} \right) \sum_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r')) \cdot \Delta\mathbf{X} \right] \right\} d\Delta\mathbf{X} \\
&= W_{\text{data}}(\Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) * W_{\text{psf}}(\Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) \tag{4.66}
\end{aligned}$$

と畳み込みの形で書き表すことができる。ただし,

$$W_{\text{data}}(\Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) = \sum_{h=1}^{N_{\text{holo}}} \sigma_{\text{sig}}(h, s_0) e^{i\varphi_{\text{sig}}(h, s_0)} \delta(\Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h) + \Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) \tag{4.67}$$

$$\begin{aligned}
W_{\text{psf}}(\Delta\mathbf{X}_{\text{med}}) &= -i \frac{\Delta S D^2 e^{i4fk}}{\lambda^2 f^2} A_{\text{ref}} M_1(C_{\text{pha}}) \\
&\quad \times \text{tri} \left( \frac{\Delta\mathbf{X}_{\text{med}}}{D} \right) \sum_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r')) \cdot \Delta\mathbf{X}_{\text{med}} \right] \tag{4.68}
\end{aligned}$$

と表される。ここで式(4.67)は、再生時の記録媒体のシフト距離  $\Delta\mathbf{X}_{\text{med}}$  に対して、ホログラムの記録間隔  $\Delta\mathbf{X}_{\text{page}}$  で並ぶ楕関数を表しており、 $\Delta\mathbf{X}_{\text{med}}$  が  $-\Delta\mathbf{X}_{\text{page}}(h)$  と等しくなるときに対応するページのホログラムによる信号の再生が行われることを表している。また、信号の ON/OFF の情報を含む変数（強度変調方式であれば  $\sigma_{\text{sig}}(h, s_0)$ 、位相変調方式であれば  $\varphi_{\text{sig}}(h, s_0)$ ）が存在することから、 $s_0$  番目の信号点における、ページごとの ON/OFF 情報そのものを表している。一方で、式(4.68)は、再生時の記録媒体のシフト距離に対する広がり、すなわちインパルス応答を表す関数である。式(4.68)の総和項は、 $N_{\text{ref}}$  点の参照光画素によるそれぞれの回折光が像面で干渉することを意味しており、この項がシフト選択性の起源となっている。例として、物体面における参照光画素が  $x$  方向に間隔  $p_x$  で等間隔に並んでいる場合を考えると、 $r'$  番目の物体面の参照光画素の位置  $\mathbf{x}_{\text{ref}}(r')$  は

$$\mathbf{x}_{\text{ref}}(r') = \begin{pmatrix} x_{\text{ref}}(1) + p_x(r' - 1) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{4.69}$$

と表されるので、式 (4.68) の総和項は

$$\begin{aligned}
& \sum_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r')) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \\
&= \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda f} x_{\text{ref}}(1) \Delta X_{\text{med}} \right] \sum_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda f} p_x (r' - 1) \Delta X_{\text{med}} \right] \\
&= \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda f} x_{\text{ref}}(1) \Delta X_{\text{med}} \right] \\
&\quad \times \left\{ \frac{\sin \left( \frac{\pi}{\lambda f} p_x N_{\text{ref}} \Delta X_{\text{med}} \right)}{\sin \left( \frac{\pi}{\lambda f} p_x \Delta X_{\text{med}} \right)} \exp \left[ -i \frac{\pi}{\lambda f} p_x (N_{\text{ref}} - 1) \Delta X_{\text{med}} \right] \right\} \\
&= \frac{\sin \left( \frac{\pi}{\lambda f} p_x N_{\text{ref}} \Delta X_{\text{med}} \right)}{\sin \left( \frac{\pi}{\lambda f} p_x \Delta X_{\text{med}} \right)} \\
&\quad \times \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} \left( x_{\text{sig}}(s_0) - x_{\text{ref}}(1) - \frac{p_x (N_{\text{ref}} - 1)}{2} \right) \Delta X_{\text{med}} \right] \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} y_{\text{sig}}(s_0) \cdot \Delta Y_{\text{med}} \right] \tag{4.70}
\end{aligned}$$

と表すことができる。よって、両辺で絶対値をとって2乗することにより、強度として表すと

$$\left| \sum_{r'=1}^{N_{\text{ref}}} \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda f} (\mathbf{x}_{\text{sig}}(s_0) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(r')) \cdot \Delta \mathbf{X}_{\text{med}} \right] \right|^2 = \frac{\sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda f} p_x N_{\text{ref}} \Delta X_{\text{med}} \right)}{\sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda f} p_x \Delta X_{\text{med}} \right)} \tag{4.71}$$

と表され、 $\Delta X_{\text{med}}$  方向における記録媒体の原点からのシフト距離に応じて強度が変化する項が現れ、この項がまさにシフト選択性そのものの解析解を表している。式 (4.71) で表されるシフト選択性の概略図を図 4.2 に示す。この図に示すように、シフト選択性は周期的にピークを繰り返しており、その間隔は式 (4.71) 右辺の分母が 0 になる周期  $\lambda f/p_x$  に依存する。また、各ピークの幅は式 (4.71) 右辺の分子の周期によって依存し、first null point(ピークから最初にゼロに落ちる位置) までのシフト距離は  $\lambda f/N_{\text{ref}}p_x$  に依存する。この時、 $\Delta Y_{\text{med}}$  方向に対してシフト選択性が現れないのは、式 (4.69) において  $y$  方向に参照光画素が連続して配列されていないことに由来している。この場合、記録媒体を  $Y$  方向にシフトさせたとしても、それぞれの参照光画素による回折光が全て同じだけ位相シフトするため、記録媒体のシフト距離によって干渉強度が変化することはない。

#### 4.4 本章のまとめ

本章では、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリの記録再生過程を平面波展開モデルの考え方をを用いて理論的に解析を行った。まず、本システムで登場したパラメーターを整理すると、

- ・光源波長： $\lambda$
- ・焦点距離： $f$
- ・信号点数： $N_{\text{sig}}$
- ・参照点数： $N_{\text{ref}}$

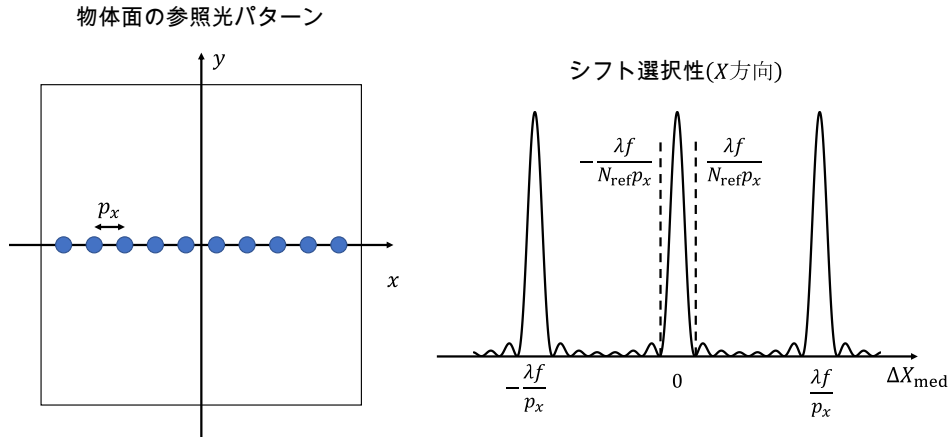


図 4.2 参照光パターンとシフト選択性

- ・多重ホログラム枚数： $N_{\text{holo}}$
- ・ $s$  番目の信号光画素の存在する位置，位相： $\mathbf{x}_{\text{sig}}(s), \varphi_{\text{sig}}(s)$
- ・ $r$  番目の参照光画素の存在する位置，位相： $\mathbf{x}_{\text{ref}}(r), \varphi_{\text{ref}}(r)$
- ・ $h$  ページ目のホログラムの原点からのシフト距離： $\Delta \mathbf{X}_{\text{page}}(h)$
- ・ $h$  ページ目の信号画像における  $s$  番目の信号点の振幅の ON/OFF： $\sigma(h, s)$
- ・ホログラムの位相係数： $C_{\text{pha}}$
- ・回折次数： $n$
- ・ホログラムサイズ： $D$
- ・再生時の記録媒体の原点からのシフト距離： $\Delta \mathbf{X}_{\text{med}}$
- ・信号光画素，参照光画素の微小面積： $\Delta S$
- ・参照光画素の振幅： $A_{\text{ref}}$

である．これらのパラメータの設定はシステム的设计において高い汎用性を有しており，特に信号パターン，参照パターンに関しては微小点の集合と捉えていることからあらゆる信号・参照パターンについて，本章の理論が適用できる．そして，本章で導出した記録過程の解析解，及び最終的な像面における回折光の複素振幅分布は，全て上記のパラメータを使って解析的に導出されているため，上記のパラメータの変化が最終的な像面の回折光分布にどのような影響を与えるかについて見通しが良くなった．

また，再生の過程では，あらゆる回折次数の回折光が現れる様子や，ある信号光画素と参照光画素の組み合わせによって形成されるグレーティングに対して，無関係の参照光画素による回折が発生する様子を式として表すことができた．さらに，再生信号に寄与する回折光が，シフト選択性を生じさせている様子も定式化することができた．

これらの解析結果は，表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリのシステムパラメータと最終的な再生信号画像との定性的な関係を明らかにするものであり，本システムにおける記録再生原理や記録再生特性を直感的に理解する上で，見通しの良い非常に役に立つ解析モデルである．



## 第5章

# ラマン=ナス回折に起因する再生信号のノイズ発生メカニズムとその抑制手法

前章では、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録再生システムについて解析を導出したことで、システムパラメーターが最終的な再生信号に与える影響を明らかにすることができた。本章では、このシステム解析によって得られた知見を基に、第3章の数値計算によって確認された再生信号のノイズ発生メカニズムを解明する。さらに、このノイズを理論的に抑制するための解決策について述べ、その有効性を数値計算と原理検証実験によって確認する。

### 5.1 ラマン=ナス回折に起因する回折スポットの縮退

体積型ホログラムのブラッグ回折の場合は、ある波数ベクトルをもった入射平面波に対して、ホログラムに記録された全てのグレーティング成分の内、ブラッグ条件を満たすグレーティング成分からの回折しか発生しない。そしてこの時発生する回折は、1次回折のみである。それに対して、表面型ホログラムのラマン=ナス回折の場合は、ある波数ベクトルをもった入射平面波に対して、ホログラムに記録された全てのグレーティング成分から無条件に回折が発生する。さらに、各グレーティング成分について、1次回折以外にも複数の高次回折が発生する。

以上を踏まえ、前章で用いた平面波展開モデルの考え方に基づいて本システムにおける再生像面における回折パターンについて考える。本システムでは、ホログラムの計算過程において、信号光画素と参照光画素の全ての組み合わせの数に相当するグレーティング成分がホログラム内に記録されると考えることができる。そして、参照光のみを照射する再生過程においては、ある参照光画素からの入射平面波に対して、これらのグレーティング成分全てから回折平面波が同時に発生する。さらに、これら一つ一つのグレーティング成分からの回折についても、各回折次数に相当する回折角をもった平面波が同時に発生する。これら一つ一つの回折平面波のコヒーレントな足し合わせが、最終的な表面型ホログラムからの回折光であると考えられる。このことを踏まえると、これら全ての回折平面波は「 $s$  番目の信号光画素と  $r$  番目の

参照光画素のペアによって形成されるグレーティング成分を  $r'$  番目の参照光画素で読み出したときの  $n$  次回折光」に区分して展開することができ、これら  $(n, s, r, r')$  の組み合わせの数だけ回折平面波が存在していると考えることができる。これらの回折平面波は、それぞれ再生像面で空間的に異なる位置に集光し、その集光位置  $\mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')$  は前章で導いた式 (4.55) より、 $\mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r') = n\mathbf{x}_{\text{sig}}(s) - n\mathbf{x}_{\text{ref}}(r) + \mathbf{x}_{\text{ref}}(r')$  と表される。この式より、再生像面における各回折平面波の集光位置  $\mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r')$  の中で、 $s$  番目の信号画素の位置  $\mathbf{x}_{\text{sig}}(s)$  に集光する回折平面波は  $\mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r') = \mathbf{x}_{\text{sig}}(s)$  を満たすような  $(n, s, r, r')$  の組み合わせを持つ回折平面波であることが分かる。これは  $n = 1$  かつ  $r = r'$  という条件を満たす場合に必ず成立する。この条件は、 $s$  番目の信号光画素と  $r$  番目の参照光画素によって形成されたグレーティング成分に対して、同じ  $r$  番目の参照光画素からの平面波を入射したときの 1 次回折光を表しており、まさにこの回折平面波が元の  $s$  番目の信号光画素の再生に寄与している。この条件を満たす回折平面波の数は参照光画素の数だけ存在し、それらが全て  $s$  番目の信号光画素の位置  $\mathbf{x}_{\text{sig}}(s)$  に集光して干渉することによって、この再生信号画素の強度が決定される。

以上を踏まえて、使用する信号・参照パターンの各点の位置と、再生時における再生像面上の回折パターンの各スポットの位置の関係を、図 5.1(a) に示すような信号点 1 点、参照点 4 点の場合を例として示す。図 5.2 に示すように、物体面の座標  $x$  とホログラム面上の波数空間座標  $k$  は比例関係にあるため、ある信号点と参照点の組み合わせについて、その位置ベクトルの差とグレーティングベクトルは比例の関係にある。したがって、記録する表面型ホログラムには、図 5.1(b) に示すような 4 種類のグレーティングベクトルで表されるグレーティング成分がそれぞれ記録されることになる。このとき、再生時に再生像面上に現れる回折パターンのうち、 $\pm 1$  次の回折光についてのみを表すと、図 5.1(c) に示すような回折パターンが最終的に現れることになる。ここで、実線が  $+1$  次回折光、破線が  $-1$  次回折光を表している。図 5.1(c) に示すように、記録時と同じ参照点で再生したときの  $+1$  次回折光が元の信号点の位置に回折し、同位相で重なり合うことによって信号点が再生される。一方で、信号点以外の位置に集光する回折スポットが複数存在しており、これらは信号再生に寄与しないノイズ回折光となる。

次に、本システムで問題となる、回折スポットの縮退について述べる。上述した本システムの記録再生メカニズムにおいて問題となるのは、 $s$  番目の信号画素の位置  $\mathbf{x}_{\text{sig}}(s)$  に集光する回折スポット、すなわち  $\mathbf{x}_{\text{dif}(nth)}(s, r, r') = \mathbf{x}_{\text{sig}}(s)$  を満たすような  $(n, s, r, r')$  の組み合わせを持つ回折スポットのうち、 $n \neq 1$  または  $r \neq r'$  であるような回折スポットが存在する場合である。このような状況が成り立つ簡単な例として、図 5.3 のような信号・参照パターンを考える。このパターンの内、信号光画素 2 点、参照光画素 2 点に着目し、それぞれ  $s_1, s_2$  番目、 $r_1, r_2$  番目と番号を割り振る。この時、再生像面では「 $s_1$  番目の信号光画素と  $r_1$  番目の参照光画素によって形成されたグレーティング成分を  $r_1$  番目の参照光画素で読み出した時の 1 次回折光の平面波」が  $s_1$  番目の信号光画素の位置に集光される。この回折スポットを「回折 1」とする。これは  $s_1$  番目の信号光画素の再生に寄与している回折スポットである。一方で、「 $s_2$  番目の信号光画素と  $r_1$  番目の参照光画素によって形成されたグレーティング成分を  $r_2$  番目の参照光画素で読み出した時の  $-1$  次回折光の平面波」も  $s_1$  番目の信号光画素の位置と同じ位置に集光されてしまっている。この回折スポットを「回折 2」とする。これは、 $s_1$  番目の信号光画素の再生に寄与しないノイズ回折平面波による回折スポットであり、再生像面で

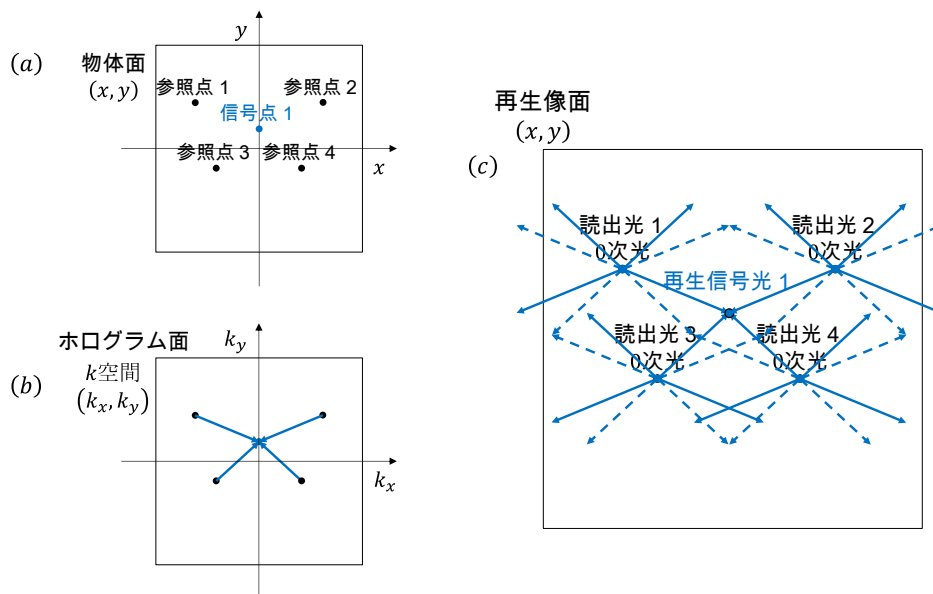


図 5.1 回折パターン在具体例

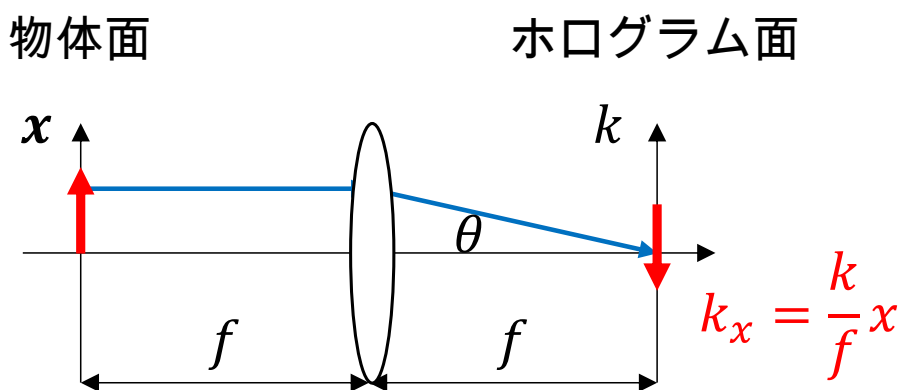


図 5.2 物体面の位置ベクトルとホログラム面の波数空間座標の関係

信号再生に寄与する回折スポットと干渉するため、再生信号を劣化させてしまう。これが、ソフト選択性のコントラストの低下、すなわちバイアスノイズを発生させる原因となる。このように、ラマン=ナス回折に起因する回折スポットの縮退は、信号・参照パターンの取り方に依存して決定される。

## 5.2 高次回折光によるノイズ

表面型ホログラムのラマン=ナス回折によって発生する回折平面波の中には、信号光の再生に寄与する1次回折光以外にも、ノイズとなるあらゆる回折次数の回折光が存在している。このノイズとなる回折光は、目的の信号画像を再生する上で必ず付随するものであり、表面型ホログラムを用いる上では原理的に避けることはできない。ここでは、これらの高次回折光の回折効率に着目し、再生信号に対するノイズの影響の大きさについて述べる。

ホログラム回折直後の  $n$  次回折光の複素振幅分布は前章で導出した式 (4.50) によって表さ

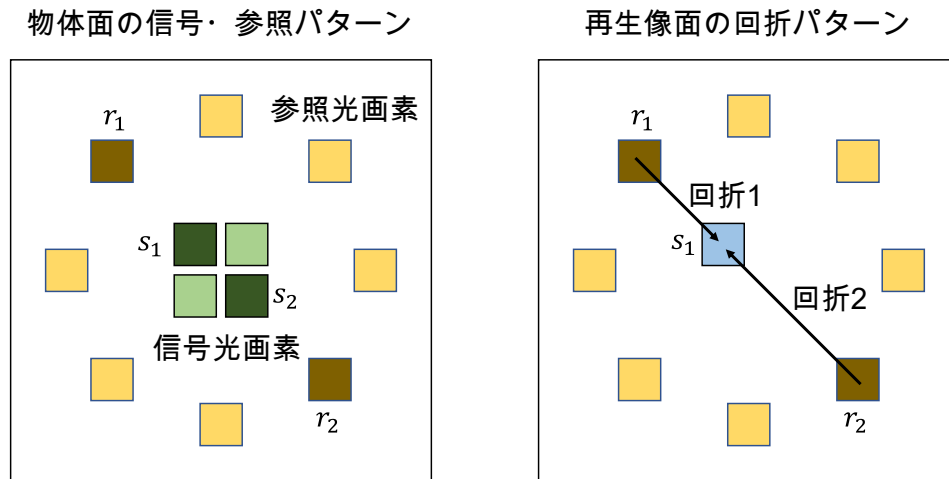


図 5.3 回折スポットの縮退の様子

れる．ここで，回折次数  $n$  に依存する振幅係数  $M_n(C_{\text{pha}})$  に着目すると，強度を取った時の係数  $|M_n(C_{\text{pha}})|^2$  がまさに回折次数ごとの回折光の回折効率を表している．ここで式 (4.52) で表されるように，位相変調方式，すなわち全信号点が輝点でホログラムの多重度  $m$  が常に一定であるような場合を考えると，信号光画素数  $N_{\text{sig}}$ ，参照光画素数  $N_{\text{ref}}$  において 1 次回折光 ( $n = 1$ ) の回折効率は  $M_1(C_{\text{pha}}) = J_1(C_{\text{pha}})[J_0(C_{\text{pha}})]^{mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}}-1}$  に比例する．ここで，例として  $mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}} - 1$  が 500, 1000, 1500, 2000 において，1 次回折光の回折効率係数  $M_1(C_{\text{pha}})$  の位相係数  $C_{\text{pha}}$  依存性を図 5.4 に示す．このグラフから， $mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}} - 1$  が増加するほど  $M_1(C_{\text{pha}})$  のピークが位相係数の小さくなる方にシフトし，ピークの高さが減少する様子が確認できる． $mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}}$  はホログラムの単位面積当たりに含まれるグレーティング成分の総数に相当し，この値が大きいくほど，より多くのグレーティング成分からの回折が発生することになる．この時，ホログラムに入射する光の光量は一定であるから，グレーティング成分の総数が多いほど，回折平面波一つ当たりには分配される光量が落ちてしまうことになる．

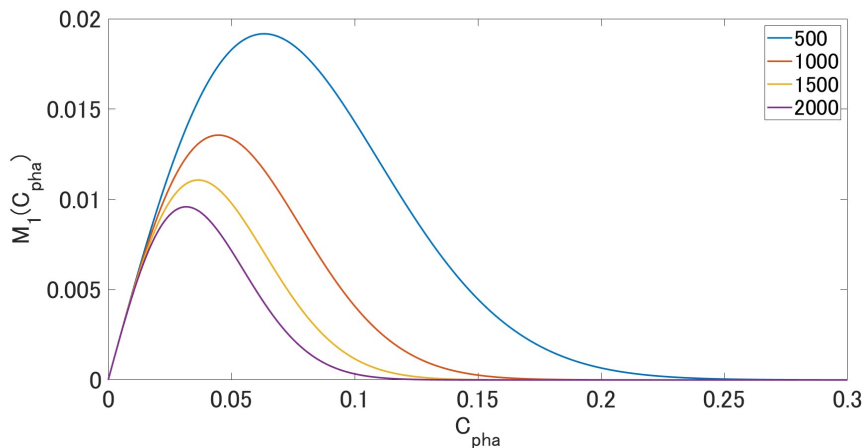


図 5.4 ホログラム位相係数と 1 次回折光の回折効率係数の関係

一方で，図 5.4 において，1 次回折光の回折効率がピークになる位相係数の値に着目す

ると、グレーティング総数  $mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}}$  の増加に伴い 0 に近い値を取るようになる。このような位相係数の範囲で、縦軸に 1 次回折光に対するその他の高次回折光の回折効率の比  $|M_n(C_{\text{pha}})/M_1(C_{\text{pha}})|^2$  をとると、図 5.5 に示すようなグラフが得られる。この図では、 $mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}} - 1 = 500$  における 1 次回折光の回折効率に対する 2 次回折光, 3 次回折光, 4 次回折光の回折効率の比を計算している。この図より、1 次回折光と比較して 2 次回折光の回折効率は  $10^{-3}$  から  $10^{-5}$  程度小さく、3 次回折光の回折効率は  $10^{-7}$  から  $10^{-9}$  程度小さく、4 次回折光の回折効率に至っては  $10^{-10}$  から  $10^{-15}$  程度小さい割合になることが分かる。このことから、グレーティング総数  $mN_{\text{sig}}N_{\text{ref}}$  が十分大きい範囲であれば、1 次回折光の回折効率が大きくなるように位相係数を決めると、おのずと他の高次回折光の回折効率は無視できるほど小さくなるということが分かる。

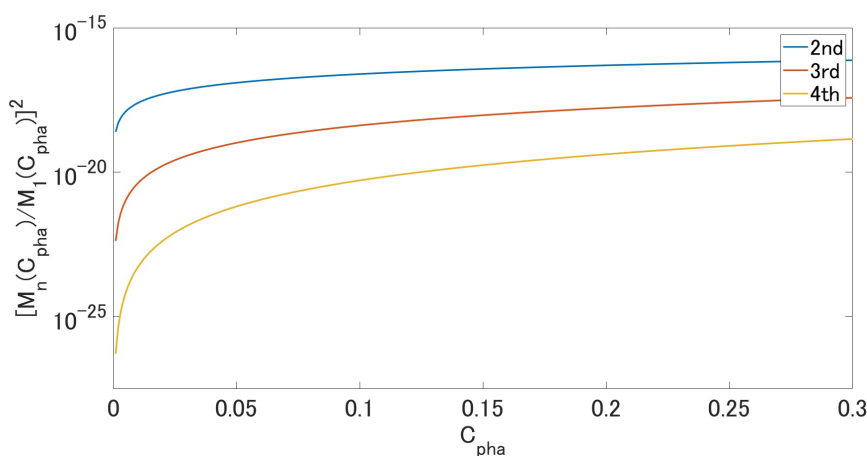


図 5.5 ホログラム位相係数と 1 次回折光に対する  $n$  次回折光の回折効率の比

次に、具体的な信号参照パターンを用いて信号の記録再生を行った場合の、像面における各回折次数の回折光強度分布を計算し、比較を行った。使用した信号、参照パターンは図 5.6 に示すように、中心の円形領域からの光を信号光、外側のリング状の領域からの光を参照光として用いた。また、ホログラムは単一の場合（多重度 1）で計算を行った。図 5.7 に  $-2$  次回折光、 $-1$  次回折光、 $0$  次回折光、 $+1$  次回折光、 $+2$  次回折光、 $+3$  次回折光の像面における強度分布を比較した結果を示す。まず、信号再生に寄与する  $+1$  次回折光の強度分布に着目すると、中心の円形領域に記録した信号パターンが  $10^0$  オーダーの強い強度で現れていることが確認された。また、 $0$  次回折光の強度分布では、参照光のリング状の領域がそのまま像面に現れていることが確認できた。そして、 $-2$  次回折光、 $+2$  次回折光については、強度分布が全体的に  $10^{-3}$  から  $10^{-4}$  のオーダーで現れていることがわかる。また、 $+3$  次回折光は  $10^{-5}$  オーダーの強度分布となっていることが分かる。この結果から、 $\pm 2$  次以上の回折光の強度分布が信号再生に寄与する  $+1$  次回折光と比較して十分小さいものであることが示された。ただし、 $-1$  次回折光の強度分布は  $10^{-1}$  程度のオーダーの強度分布で像面に広がっているため、再生信号にとって無視できない大きさのノイズになっていることが示された。これは、 $J_{-1}(C_{\text{pha}}) = -J_1(C_{\text{pha}})$  より、 $|M_{-1}(C_{\text{pha}})|^2 = |M_1(C_{\text{pha}})|^2$  となることから、原理的に回折効率は 1 次回折光と同じになるためである。

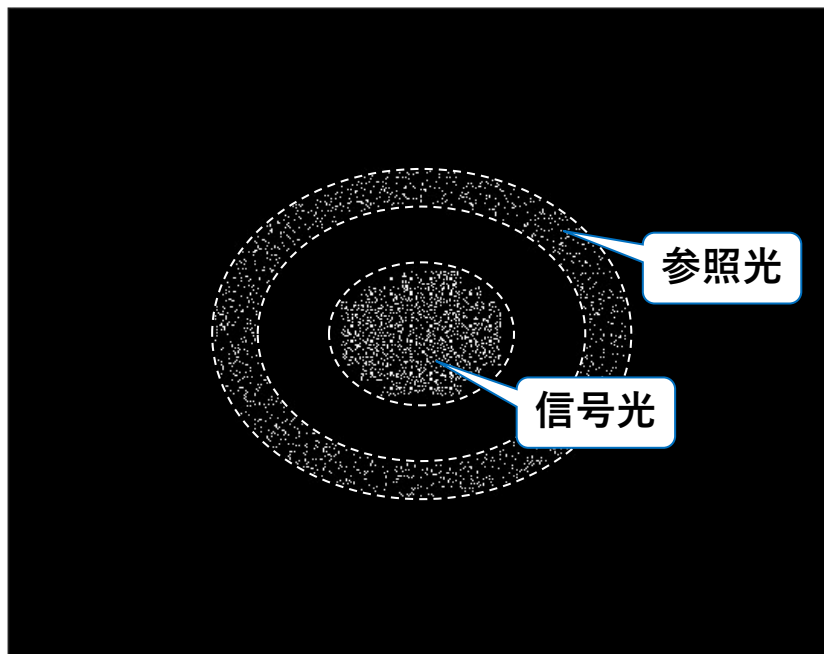


図 5.6 使用した信号・参照パターン

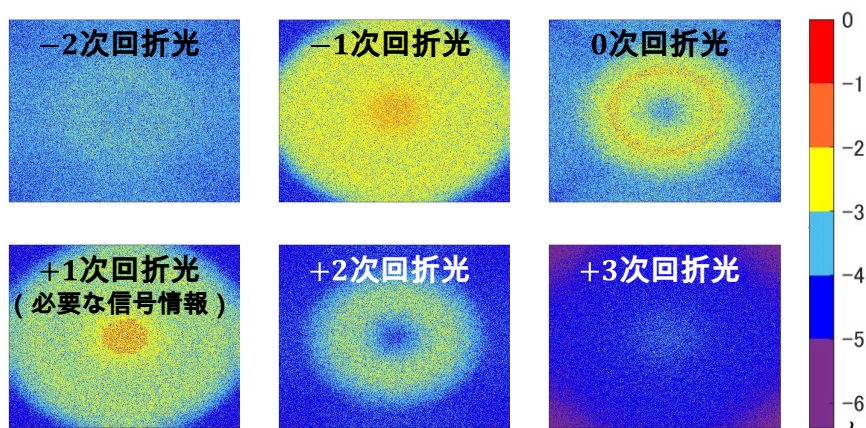


図 5.7 回折次数別の像面における回折光の強度分布. (a) -2 次回折光, (b) -1 次回折光, (c) 0 次回折光, (d) +1 次回折光, (e) +2 次回折光, (f) +3 次回折光

### 5.3 II 字型信号・参照パターンを用いたノイズの抑制

ここまでに、第3章の数値計算によって確認された再生信号のシフト選択性のバイアスノイズの原因について、表面型ホログラムのラマン=ナス回折に起因する回折スポットの縮退によるものであることを示し、これは信号・参照パターンに依存することを示した。また、各回折次数に相当する平面波については、ホログラムの位相係数  $C_{\text{pha}}$  を1次回折光の回折効率が最大になるように決めたときに、 $\pm 2$  次以上の回折光の回折効率が十分小さくなることを示した。

以上のことから、 $\pm 1$  次の回折平面波についてだけでも、信号再生に寄与する回折スポットと縮退が発生しないような信号・参照パターンを工夫することによって、シフト選択性のバイアスノイズの大部分を抑制できると考えられる。

### 5.3.1 II字型信号・参照パターン

上記の考察を基に、本研究では上記の条件を満たしつつ、信号光画素と参照光画素の数をできる限り多くとるような信号・参照パターンとして新たに図 5.8 に示すような II 字型の信号・参照パターンを提案した。この信号・参照パターンでは、1 方向に配列された信号光画素列が一定の間隔を空けて平行に 2 列存在している。参照光画素は、信号光画素列とは垂直方向に 1 列に並んで配列されており、その両端は信号光画素列の片側の端に位置している。II 字型信号・参照パターンは参照光画素が 1 方向にしか配列されていないため、この方向に対するシフト選択性しか有していないが、全ての再生信号画素において、ラマン=ナス回折に起因するノイズ回折平面波の集光位置が重ならないような回折パターンを実現することができる。

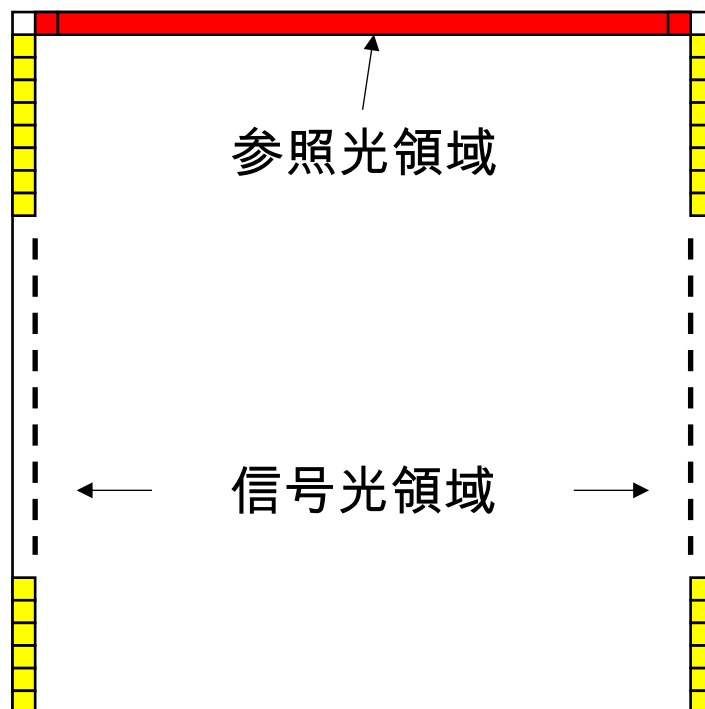


図 5.8 II 字型信号・参照パターン

### 5.3.2 数値計算によるシフト選択性の評価

上述した II 字型信号・参照パターンの、ラマン=ナス回折に起因するシフト選択性のバイアスノイズの抑制に対する有効性を評価するために、フレネル回折理論による光波の伝搬計算を用いた再生信号のシフト選択性の数値計算を行った。

今回の数値計算では、強度変調された 1 枚の信号パターン画像の記録再生を行った。図 5.9 に示すように、使用した II 字型信号・参照パターンは  $120 \times 120$  画素の領域に作成した。画像

の左右両端に信号光画素が垂直方向に1列ずつ配列されており、画像の上端に参照光画素が水平方向に1列に配列されている。また、使用した信号・参照パターン各輝点の強度は全て1に規格化されており、信号光画素のON画素とOFF画素については、ON:OFF比が1:1になるようにランダムに配置されている。各輝点の位相については、信号光画素・参照光画素ともに0から $2\pi$ の範囲でランダムに与えられている。光学系に関するその他のパラメータは表5.1に示した値を使用した。また、ホログラムのシフト範囲は、 $-5\ \mu\text{m}$ から $+5\ \mu\text{m}$ までを対象として計算を行った。

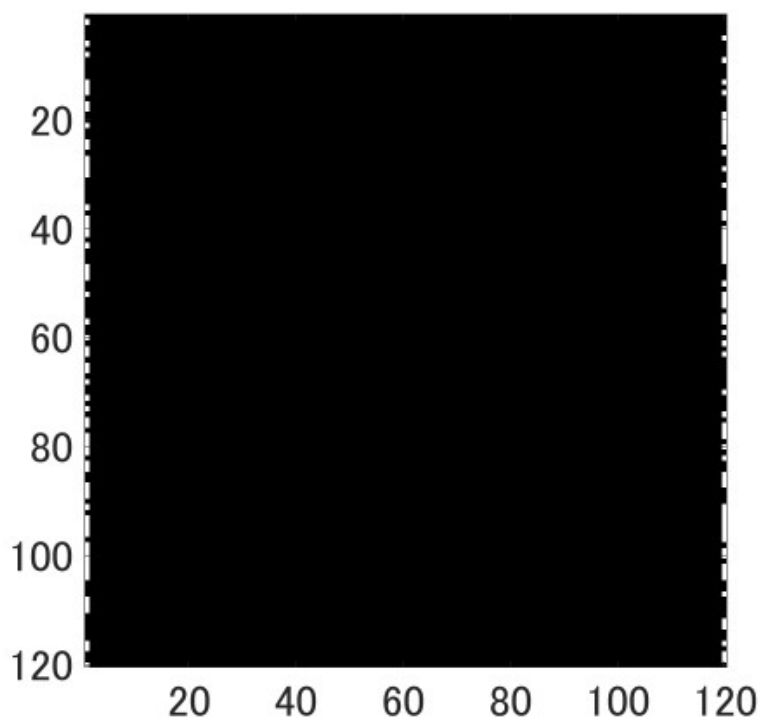


図 5.9 数値計算に使用した  $\Pi$  字型信号・参照パターン

表 5.1 数値計算に使用した光学系のパラメータ

記録再生光の波長 [nm]	405
レンズの焦点距離 [mm]	2
SLM 画素ピッチ [ $\mu\text{m}$ ]	20
ホログラムサイズ [ $\mu\text{m}$ ]	81

以上の数値計算条件の下、ホログラムのシフト距離に対する、再生信号画像のONであるべき信号画素の平均強度の関係を図5.10に示す。横軸がホログラムのシフト距離を表し、縦軸が再生信号画像におけるONであるべき信号画素の平均強度を表している。この結果から、従来のコリニアホログラフィックメモリーで使用する一般的な信号・参照パターンを用いた場合のシフト選択性(図3.8参照)と比較して、バイアスノイズが大きく抑制されることが確認できた。



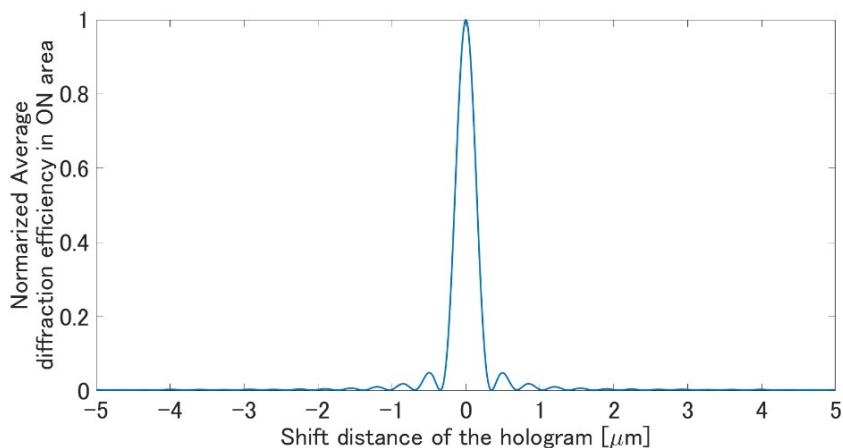


図 5.10 ホログラムのシフト距離に対する，再生信号画像の ON であるべき信号画素の平均強度の関係

### 5.3.3 原理検証実験によるシフト選択性の評価

次に，II 字型信号・参照パターンによって，本システムのシフト選択性のバイアスノイズが抑制されることを，実際の光学系を用いた原理検証実験によって確かめた。

図 5.11 に本実験で使用した光学系の概要図を示し，表 5.2 に実験パラメータを示す。SLM1 から Object plane までの 4f 光学系にて，位相変調型の SLM とフーリエ面の空間フィルタリングを組み合わせた空間的な複素振幅変調方式 [51] を用いて Object plane に読み出し光用の参照光を生成した。Object plane, SLM2, イメージセンサー面は 4f 光学系を成しており，SLM2 に設計した表面型ホログラムの位相変調分布を表示している。ホログラムのシフトについては，任意の距離シフトした後のホログラムの位相変調分布を再計算し，SLM2 に入力する画像データを切り替えることによって行った。

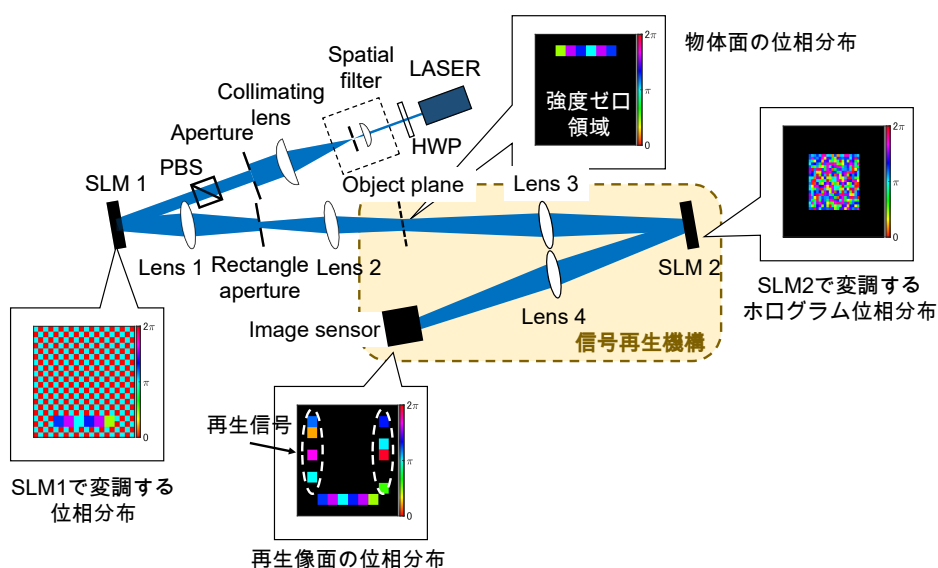


図 5.11 実験光学系の概要図

表 5.2 実験パラメーター

光源波長 [nm]	405
レンズ 1,2 の焦点距離 [mm]	250
レンズ 3,4 の焦点距離 [mm]	500
SLM1,2 の画素ピッチ [ $\mu\text{m}$ ]	20
ホログラムサイズ [mm]	$2.5 \times 2.5$
設計すべきホログラムの最大空間周波数 [lp/mm]	25

また、使用した信号・参照パターン画像を図 5.12 に示す。図 5.12(a) が従来のコリニア方式における信号・参照パターンを表しており、図 5.12(b) が II 字型信号・参照パターンを表している。いずれも  $31 \times 31$  画素の領域に作成されており、実際の長さは  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  となっている。また、信号光画素及び参照光画素のピッチは  $160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$ 、すなわち SLM の  $8 \times 8$  画素を 1 画素として使用している。緑色の画素が ON 信号光画素、青色の画素が OFF 信号光画素、赤色の画素が参照光画素を表している。白色の画素は信号光画素でも参照光画素でもなく、強度がゼロの画素を表している。SLM1 に表示する読み出し用の参照パターン画像には、上記の白色の画素領域に高周波パターン（4 画素周期のチェックパターン）が表示されており、フーリエ面の矩形開口でフィルタリングしている。

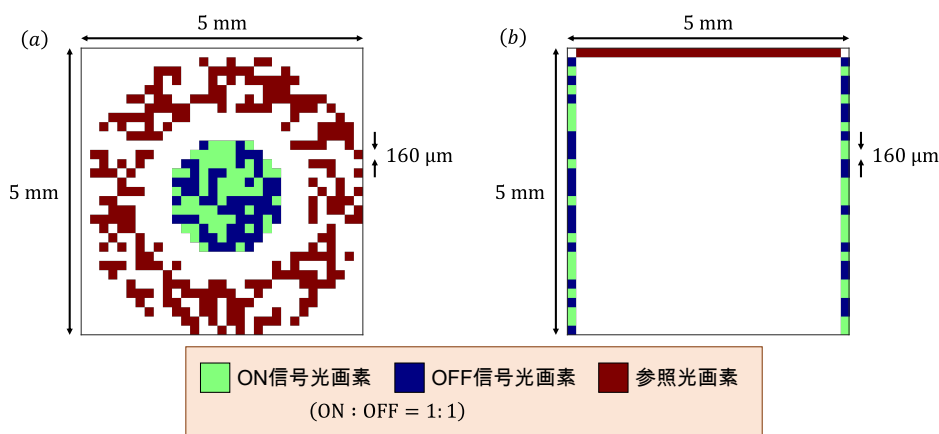


図 5.12 実験に使用した信号・参照パターン。(a) 従来のコリニア方式における信号・参照パターン。(b) II 字型信号・参照パターン。

以上の条件の下、ホログラムのシフト距離に対する、再生信号画像の ON であるべき信号画素の平均強度の関係を図 5.13 に示す。図 5.13(a) が従来のコリニア方式における信号・参照パターンの場合を表しており、図 5.13(b) が II 字型信号・参照パターンの場合を表している。どちらも横軸がホログラムのシフト距離を表し、縦軸が再生信号画像における ON であるべき信号画素の規格化した平均強度を表している。ホログラムのシフト範囲は、 $-1 \text{ mm}$  から  $+1 \text{ mm}$  までを対象として  $5 \mu\text{m}$  間隔で測定を行った。ここで、数値シミュレーションに関しては、図 5.11 に示した光学系と表 5.2 に示した実験パラメーターを用いて、フレネル伝搬計算による数値シミュレーションを行った結果を示している。

このグラフより、実験結果と数値シミュレーション結果どちらにおいても、従来のコリニア

方式における信号・参照パターンを用いた場合と比較して、提案手法であるII字型信号・参照パターンを用いた場合の方が、ホログラムシフト時のバイアスノイズが抑制されている様子が確認できた。また、実験結果と数値シミュレーション結果では、バイアスノイズの抑制割合に違いが見られたものの、両パターンにおいて、シフト選択性のサイドピークの位置がよく一致していることから、数値シミュレーションの妥当性が示された。このバイアスノイズの抑制割合の違いについては、図5.11内のSLM1に表示された、ON信号領域に相当する低周波成分とOFF信号領域に相当する高周波成分が、SLM表面の波面の歪み等で完全に再現されていなかったため、フーリエ面に設置されたRectangle apertureによる空間フィルタリングが正しく機能していなかったことが原因であると考えられる。

これらの結果により、提案手法であるII字型信号・参照パターンが、ラマン=ナス回折による本システムのノイズの抑制に有効であることが示され、表面型ホログラムの多重性能の向上に大きく貢献することが示された。

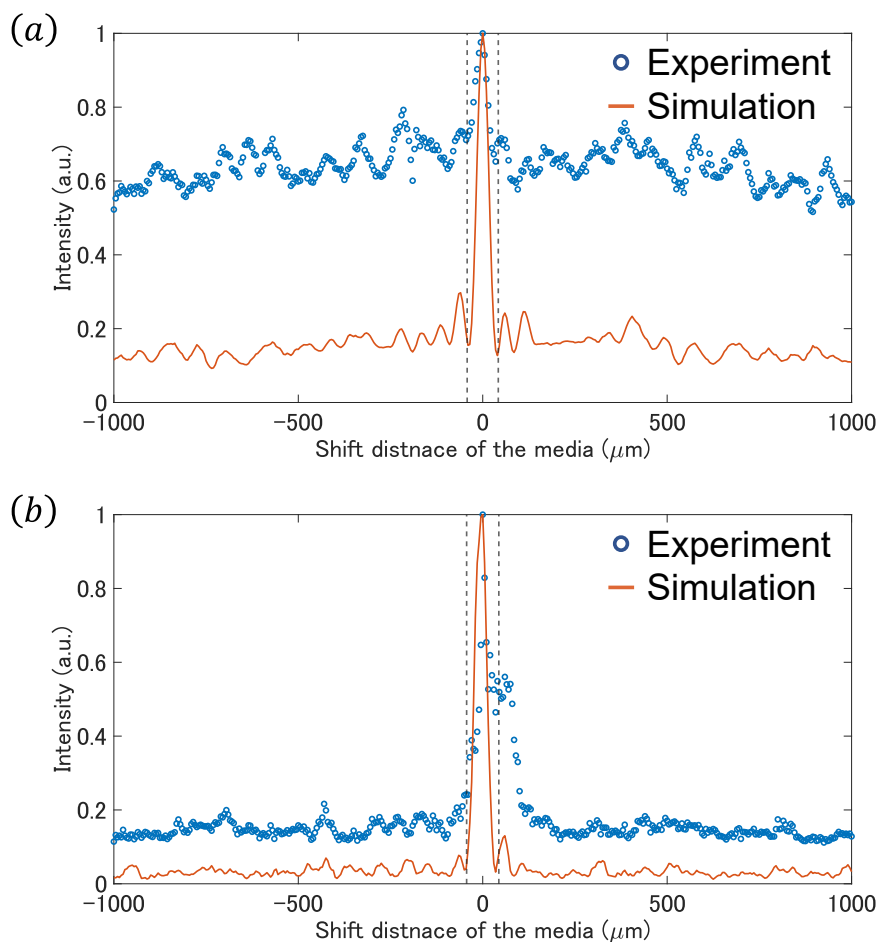


図 5.13 シフト選択性の実験結果. (a) 従来のコリニア方式における信号・参照パターン. (b)II字型信号・参照パターン.

## 5.4 本章のまとめ

表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーにおける，表面型ホログラムのラマン=ナス回折に起因した再生信号のノイズについて，信号・参照パターンと回折スポットの縮退の関係，およびホログラムの位相係数と高次回折光の回折効率の関係に着目し，そのノイズ発生メカニズムを解析し，抑制する手法を提案した。

信号・参照パターンと回折スポットの縮退の関係については，前章で構築した本システムの解析モデルによる解析を行った。その結果，信号再生に寄与しないノイズ回折光が，用いる信号・参照パターン次第で再生すべき信号光と像面で空間的に重なり，干渉することが原因であることを明らかにした。

次に，以上の解析結果を踏まえて，このノイズの抑制手法の考案を行った。まず，ラマン=ナス回折では，ホログラムの位相変調量の深さを適切に設定することで，高次回折になるほど回折効率が小さくなることに着目し，ノイズの支配的な要因となる回折次数の評価を行った。数値計算による比較を行った結果，信号再生に寄与する  $\pm 1$  次回折光強度に対して， $\pm 2$  次以上の回折光強度はほぼ無視できる大きさであることが確認されたことから， $\pm 1$  次のノイズ回折光の重なりを回避することが重要であることが示された。この方針に基づき， $\pm 1$  次のノイズ回折光が，再生すべき信号画像と一切重ならず，また，信号点数と参照点数が最大数となるよう効率良く配置された，「 $\Pi$ 字型信号・参照パターン」を新たに提案した。

最後に，提案した $\Pi$ 字型信号・参照パターンの有用性を確認するために，再生信号のシフト選択性の評価を行った。従来コリニアシステムで一般的に用いられていた信号・参照パターンと比較すると，シフト選択性のバイアスノイズが大きく抑制されることが数値シミュレーションによって確認された。また，原理検証実験を行い，数値シミュレーションと矛盾しない結果が得られたことから， $\Pi$ 字型信号・参照パターンが本システムにおけるホログラムの多重記録に対して有効であることが確認できた。

## 第 6 章

# 時系列信号の記録再生特性の解析と定量的評価

前章では、II 字型信号・参照パターンによって、表面型ホログラムのラマン＝ナス回折に起因するノイズが抑制されること示した。この信号・参照パターンを用いることによって、本システムのコンセプトである、表面型ホログラムの多重記録再生による時系列信号の再生が期待できるようになった。本章では、位相変調方式における時系列信号の記録再生を想定した表面型ホログラムのシフト多重記録を行い、再生信号の信号対ノイズ比の定量的評価を行った。その際、第 4 章で得られた本システムの解析結果に基づき、システムパラメータと信号対ノイズ比との定性的な関係を明らかにし、その定量的な評価を行った。また、表面型ホログラムの作製精度と信号対ノイズ比の関係についても評価を行った。

### 6.1 記録再生システムの構成

II 字型信号・参照パターンを用いた表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーにおける時系列信号の記録再生システムの概要を図 6.1 に示す。

図 6.1 に示した本システムの記録再生方法について述べる。最初に情報の符号化とホログラムの設計過程について述べる。まず信号パターンの信号画素数（チャンネル数）分の時系列信号をランダムに生成し、各チャンネルに割り当てることによって、各ページの信号パターンの ON/OFF を決定する。次に、ON 画素の位相を  $\pi$ 、OFF 画素の位相を 0 とし各ページの位相信号パターンを生成する。ただし、各信号画素の振幅は ON 画素、OFF 画素によらず常に一定とし、信号画素が存在しない領域の振幅は 0 とする。一方で参照パターンの各画素の位相にはランダム位相が付加されており、全ての参照光画素の振幅も常に一定とする。その後、各ページの信号パターンと参照パターンによる表面型ホログラムをそれぞれ計算し、高周波領域をフィルタリングして有限の矩形領域に制限した後、一定の多重間隔で 1 方向にシフト多重する計算を行うことによって、最終的に設計すべき多重ホログラムの位相変調分布を計算する。この時、II 字型信号・参照パターンでは、参照光画素が配列されている 1 方向にしかシフト選択性が現れないことから、シフト多重はこの方向にのみ行い、垂直方向に対してはホログラムサイズ  $D$  だけ離して隣り合わせにホログラムを配列する。

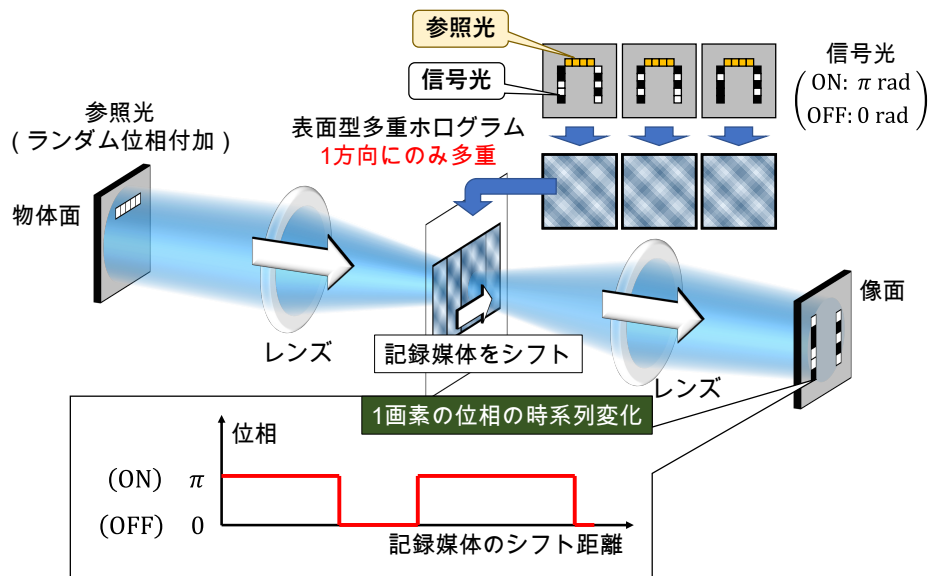


図 6.1 II 字型信号・参照パターンを用いた表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーによる時系列信号の記録再生システム

次に、時系列信号の再生過程について述べる。上述の手順で設計された多重ホログラムを図 6.1 に示すような  $4f$  光学系のホログラム面に配置し、物体面から参照光を照射する。そして、ホログラムからの回折によって得られる再生像面の回折パターンをイメージセンサーによって取得し、再生信号の各チャンネルの位相をそれぞれ取得する。この時、多重ホログラムを多重されている 1 方向に徐々にシフトさせていき、各チャンネルの位相の時系列変化を取得することによって、元の時系列信号を再生する。この時、ホログラムの多重間隔  $L$  と同じ距離だけシフトさせるごとに位相信号が切り替わることになる。

## 6.2 本システムのシステムパラメーターと記録再生特性の関係

上述した本システムの記録再生特性を評価するにあたり、本システムの記録密度、データ転送レート、及び再生信号のクロストークノイズについて、システムパラメーターとの関係を定式化し、考慮すべきパラメーターの整理を行った。

### 6.2.1 記録密度・データ転送レートの定式化

まずは本システムの記録密度  $\rho$  について考える。図 6.2 に示すように、信号パターンのチャンネル数が  $N_{\text{ch}}$  である時、信号パターン画像の各画素には 2 値の位相情報 (1bit の情報量) が割り当てられているため、1 ページ当たりの情報量は  $N_{\text{ch}}$  bit となる。よって、ホログラム面ではホログラム 1 枚当たりの占有面積  $D^2$  に対して、 $N_{\text{ch}}$  bit の情報量が記録されていることになる。さらに、ホログラムは 1 方向にのみ間隔  $L$  でシフト多重されているため、ホログラムの多重度 (同一領域内に重なっているホログラムの枚数) は  $D/L$  と表される。したがって、

設計する表面型シフト多重ホログラムの記録密度  $\rho$  は

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{N_{\text{ch}}}{D^2} \times \frac{D}{L} \\ &= \frac{N_{\text{ch}}}{DL} \end{aligned} \tag{6.1}$$

と表される.

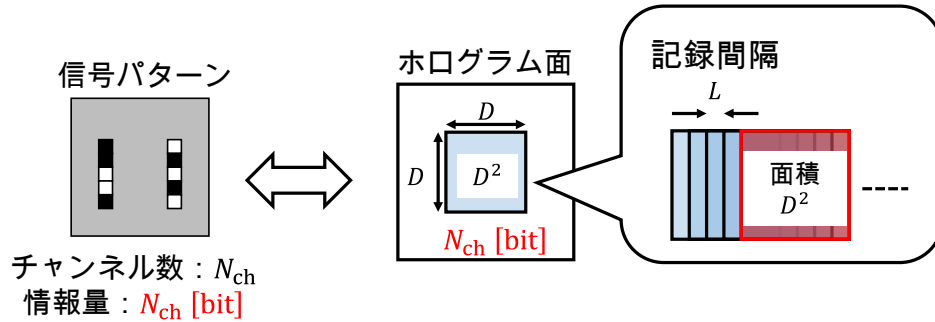


図 6.2 本システムにおけるホログラムのシフト多重の様子

次に、データ転送レート  $R$  について考える. 図 6.3 に示すように、ホログラムの多重間隔が  $L$  であるとき、再生時にホログラムを  $L$  シフトさせるごとに時系列信号が切り替わる. この時、チャンネル数  $N_{\text{ch}}$  だけ時系列信号を同時に取得することができるため、データ転送レートはチャンネル数  $N_{\text{ch}}$  に比例する. また、再生時におけるホログラムのシフトスピードが同じ場合、 $L$  が短いほど時系列信号の切り替わるスピードが速くなるため、データ転送レートはホログラムの多重間隔  $L$  に反比例する. 他にも、再生時のメディアのシフトスピードと読み出し機構の並列数、及び符号化の際のコードレート（物理的に記録される情報量に対する実際の信号情報量の割合）にも比例するが、これらの要因は他の記録再生特性とは独立であるため、今回は定数とおく. したがって、本システムのデータ転送レート  $R$  は

$$R = C_{\text{dtr}} \frac{N_{\text{ch}}}{L} \tag{6.2}$$

と表される. ここで、 $C_{\text{dtr}}$  はデータ転送レートに関する比例定数を表す.

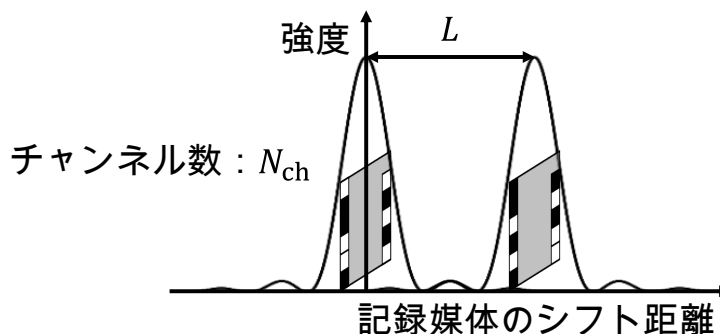


図 6.3 本システムにおける時系列信号再生の様子

式 (6.1), (6.2) より、本システムにおける記録密度  $\rho$  とデータ転送レート  $R$  は、チャンネル数  $N_{\text{ch}}$ 、ホログラムサイズ  $D$ 、ホログラム多重間隔  $L$  によって表されることが示された. 次

に、後の評価を行いやすくするため、これら3つのパラメーターを独立なシステムパラメーターを用いて表す。

**チャンネル数： $N_{ch}$**

チャンネル数は、信号パターン1枚当たりのON画素とOFF画素の総数であり、図6.4に示すように、II字型の場合は信号光画素が1方向に2列のみ配列されているため、その1列当たりの長さは、レンズによって制限される物体面上の入射瞳円に内接する、正方形の1辺の長さと同じ。この時、レンズの焦点距離を $f$ 、レンズの開口数を $NA$ とすると、物体面上の入射瞳円の直径は $2fNA$ と表されるため、物体面の画素ピッチを $p_{obj}$ とする時、本システムにおけるチャンネル数 $N_{ch}$ は

$$N_{ch} = 2 \times \frac{\sqrt{2}fNA}{p_{obj}} \quad (6.3)$$

と表される。

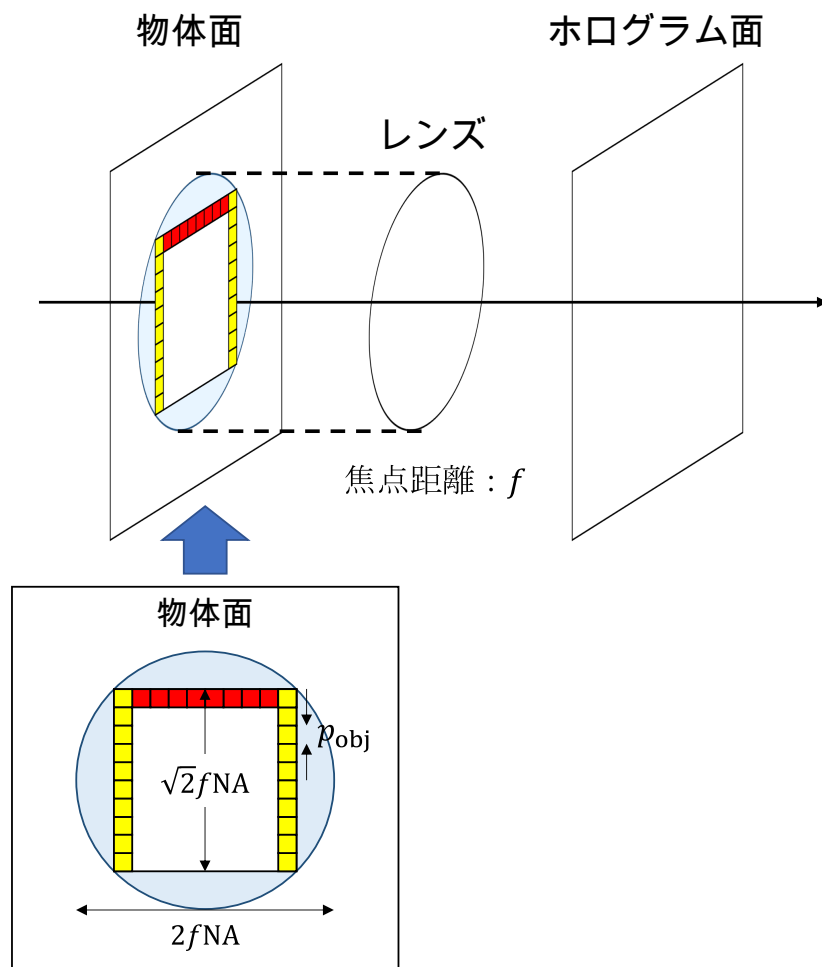


図6.4 物体面における信号・参照パターンと入射瞳領域の関係



**ホログラムサイズ： $D$** 

ホログラムサイズは、計算された表面型ホログラムの高周波成分をどの程度フィルタリングするかによって決定される。この時、再生信号画像の隣り合うチャンネル同士が最低限解像可能である条件として、再生信号画像の最大空間周波数成分を含む必要がある。よって、再生信号画像のホログラム面における最大空間周波数領域  $D_0$  に対して、どの程度の高周波成分を含んだホログラムサイズ  $D$  を設計するかという割合パラメータを新たな独立パラメータとして定義するのが望ましい。この割合パラメータをホログラムのナイキストレートと呼び、 $\alpha$  と定義すると、

$$\alpha \equiv \frac{D}{D_0} \quad (6.4)$$

と表される。 $\alpha$  が小さいほど高周波成分をフィルタリングし、ホログラムサイズを小さくすることを意味している。ただし、再生信号画像の隣り合うチャンネル同士が最低限解像可能であるためには  $\alpha \geq 1$  を満たす必要がある。

ここで、光源波長を  $\lambda$ 、レンズの焦点距離を  $f$ 、物体面の画素ピッチを  $p_{\text{obj}}$  とすると、 $D_0$  は

$$D_0 = \frac{\lambda f}{p_{\text{obj}}} \quad (6.5)$$

と表されるため、設計するホログラム1枚当たりのサイズ  $D$  は、ナイキストレート  $\alpha$  を用いて

$$\begin{aligned} D &= \alpha D_0 \\ &= \alpha \frac{\lambda f}{p_{\text{obj}}} \end{aligned} \quad (6.6)$$

と表される。

**ホログラム多重間隔： $L$** 

シフト多重方式における信号の再生では、ホログラムのシフトに伴って、あるページの再生信号強度が減少する一方で、隣接するページの再生信号強度が増加することによって、信号の切り替わりが起こる。よって、この再生信号のシフト選択性における、強度がピークから最初にゼロになる位置までのシフト距離  $L_0$  を基準とした割合パラメータによって、設計するホログラムの多重間隔  $L$  を決めることが望ましい。この割合パラメータをホログラムのシフトピッチレートと呼び、 $\beta$  と定義すると、

$$\beta \equiv \frac{L}{L_0} \quad (6.7)$$

と表される。 $\beta$  が小さいほど各ホログラムを近距離でシフト多重することを意味している。

ここで、II字型信号・参照パターンの場合、参照光画素は1列に配列されており、その画素数を  $N_{\text{ref}}$  とすると、第4章で導いた、参照光画素が1列に配列されている場合のシフト選択性の解析解である式(4.71)より、 $L_0$  は

$$L_0 = \frac{\lambda f}{N_{\text{ref}} p_{\text{obj}}} \quad (6.8)$$

と表される。ただし、 $\lambda$  は光源波長、 $f$  はレンズの焦点距離を表す。ここで、右辺分母の  $N_{\text{ref}}p_{\text{obj}}$  は参照光画素列の長さを表し、それはレンズによって制限される物体面上の入射瞳円に内接する正方形領域の1辺に相当する。この時、レンズの開口数を NA とすると、物体面上の入射瞳円の直径は  $2f\text{NA}$  と表されるため、それに内接する正方形領域の1辺の長さは  $\sqrt{2}f\text{NA}$  と表される。よって、 $L_0$  は

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{\lambda f}{\sqrt{2}f\text{NA}} \\ &= \frac{\lambda}{\sqrt{2}\text{NA}} \end{aligned} \quad (6.9)$$

と表される。したがって、ホログラムの多重間隔  $L$  は、ホログラムのシフトピッチレート  $\beta$  を用いると

$$\begin{aligned} L &= \beta L_0 \\ &= \beta \frac{\lambda}{\sqrt{2}\text{NA}} \end{aligned} \quad (6.10)$$

と表される。

以上の式 (6.3), (6.6), (6.10) で表された関係式を用いて、式 (6.1), (6.2) で表される記録密度とデータ転送レートを表すと、

$$\rho = \frac{4}{\alpha\beta} \left( \frac{\text{NA}}{\lambda} \right)^2 \quad (6.11)$$

$$R = C_{\text{dtr}} \frac{\sqrt{2}N_{\text{ch}}}{\beta} \left( \frac{\text{NA}}{\lambda} \right) \quad (6.12)$$

と表すことができる。式 (6.11) より、本システムの記録密度は  $\text{NA}/\lambda$  の二乗に比例する形で表されることが分かる。この定数は2次元の回折限界を表す定数であり、従来の光ディスクの記録密度にも現れる。すなわち、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーと従来の光ディスクが「表面（2次元）に情報を記録し、光を使って読み出す」という点において共通していることを意味している。本システムの記録密度が従来の光ディスクと異なる点は、 $4/\alpha\beta$  で表される比例係数に由来する部分である。独立パラメーターである  $\alpha$  と  $\beta$  は共に多重ホログラムの設計に関わるパラメーターであり、上述したように  $\alpha$  はホログラム1枚当たりのサイズ、そして  $\beta$  はホログラムの多重間隔を決定する。つまり、記録密度がホログラム1枚当たりのサイズ及びホログラムの多重間隔に反比例して大きくなることを表している。これは物理的な描像ともよく一致する。記録密度にチャンネル数が依存しないことに関しては、チャンネル数の増加によってホログラム面における最大空間周波数領域も広がることに由来する（ホログラム1枚当たりに含まれる情報量が増えると同時にホログラム1枚当たりの占有面積も広がることになり、結果的に記録密度が変化しない）。また、 $\alpha$  は最低でも1であり、 $\beta$  のオーダーもせいぜい  $10^{-1}$  程度であろうと考えられることから、本システムの記録密度を決定する支配的要因は2次元の回折限界を表す定数項であり、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録密度が従来の光ディスクと同程度になることを表している。逆に従来の光ディスクとの比較という点では、独立なシステムパラメーターである  $\alpha$  と  $\beta$  をどこまで小さくできるかが本システムの記録密度を評価する上で重要な点となることが分かる。

一方で、式 (6.12) より、データ転送レートについても回折限界を表す  $NA/\lambda$  の一乗に比例する形で表されることが分かる。これは式 (6.9) で表されるように、シフト選択性のピークから最初にゼロに落ちるまでの距離  $L_0$  が回折限界に反比例することに由来している。従来の光ディスクのデータ転送レートについても、スポットサイズが回折限界と反比例することからこの項が現れる。これは、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーと従来の光ディスクが「時系列信号の信号長（ホログラムの多重間隔またはピット間隔）が、回折限界によって決まる広がり（シフト選択性またはスポットサイズ）に比例している」という点で共通していることを意味している。この項および比例定数  $C_{\text{dtr}}$  は従来の光ディスクにおける時系列信号の再生と共通する部分であるが、 $N_{\text{ch}}/\beta$  で表される比例係数に関しては本システムの大きな特徴となる部分である。特にチャンネル数  $N_{\text{ch}}$  に比例するという点は、従来の光ディスクと比較して、原理的にはそのまま  $N_{\text{ch}}$  倍のデータ転送レートを有していることになるため、高いデータ転送レートが期待できることを意味している。よって、 $N_{\text{ch}}$  をどこまで大きくできるか、 $\beta$  をどこまで小さくできるかが本システムのデータ転送レートを評価する上で重要な点となることが分かる。

## 6.2.2 クロストークノイズとシステムパラメーターの関係

前節では、本システムの記録密度  $\rho$  とデータ転送レート  $R$  が、信号パターンのチャンネル数  $N_{\text{ch}}$ 、及び設計するホログラムのナイキストレート  $\alpha$  とシフトピッチレート  $\beta$  によって表されることが示された。これら3つのシステムパラメーターは互いに独立であることから、本システムにおける時系列信号の記録再生特性の評価を行う上では、これらのシステムパラメーターに注目すればよいことが分かる。一方で、これらのパラメーターは再生信号のクロストークノイズにも影響を与えるため、再生信号のSNRを変化させるパラメーターでもある。メモリーとして再生信号には記録情報を正しく読み出せるだけの十分なSNRが必要となる。したがって、上述のシステムパラメーターと本システムのクロストークノイズの関係を明らかにするために、時系列信号の再生において考慮すべきクロストークノイズを分類し、システムパラメーターによる定式化を行った。

図 6.5 に示すように、クロストークノイズは、再生像面における回折スポットの空間的な広がりによるノイズ（ページ内クロストークノイズ）と、再生時のホログラムシフトにおけるシフト選択性の時間的な広がりによるノイズ（ページ間クロストークノイズ）の2つに大別することができる。

### ページ内クロストーク

再生像面における各回折スポットの空間的な広がりの式は、第4章の式 (4.57) に示した再生像面における  $n$  次回折光の複素振幅分布のうち、sinc 関数で表される項に相当する。ホログラムサイズを  $D$  とし、ホログラムのシフト距離が0である時、再生像面 ( $-\mathbf{x}$ ) においてピークの位置を原点とするこの空間的な広がり  $S_{\text{intra}}$  は

$$S_{\text{intra}} = \text{sinc}^2\left(\frac{D}{\lambda f}\mathbf{x}\right) \quad (6.13)$$

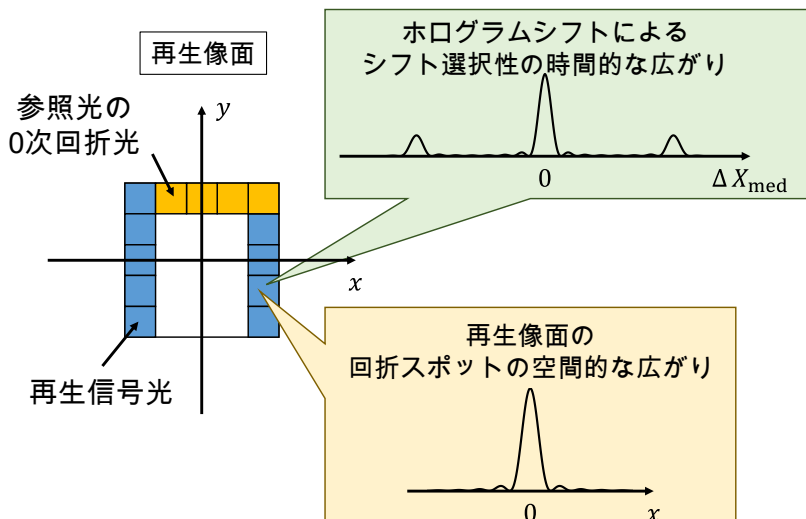


図 6.5 ページ内クロストークノイズとページ間クロストークノイズ

と表され、式 (6.6) より、ホログラムのナイキストレート  $\alpha$  を用いると、

$$S_{intra} = \text{sinc}^2 \left( \frac{\alpha}{p_{obj}} x \right) \tag{6.14}$$

と表される。よって、図 6.6 に示すように、ホログラムのナイキストレート  $\alpha$  が大きいほど、再生像面における各回折スポットの空間的な広がり小さくなり、したがってページ内クロストークノイズの影響も小さくなることが分かる。

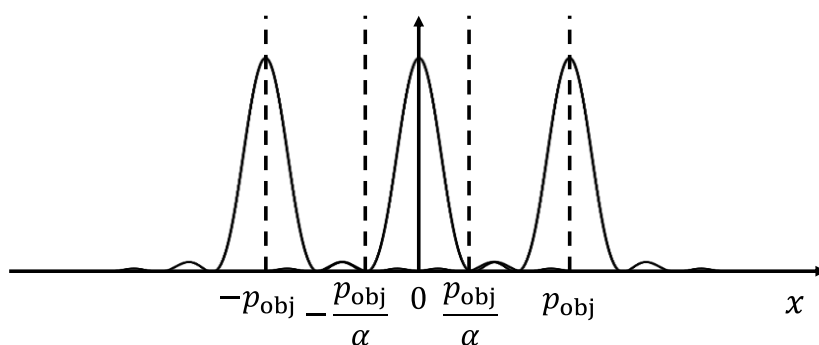


図 6.6 再生像面における回折スポットの空間的な広がり。図は再生像面の  $x$  方向についてのみ示しているが、 $y$  方向に対しても同様である。

### ページ間クロストーク

再生時のホログラムシフトにおけるシフト選択性の時間的な広がり式は第 4 章の式 (4.68) に示した、 $\Delta X_{med}$  に依存する項に相当する。ホログラムサイズを  $D$ 、物体面の画素ピッチを  $p_{obj}$ 、参照光画素数を  $N_{ref}$  とすると、ホログラムのシフト距離  $\Delta X_{med}$  に対して、ピークの位

置を原点とするこの時間的な広がり  $S_{\text{inter}}$  は

$$S_{\text{inter}} = \left[ \text{tri} \left( \frac{\Delta X_{\text{med}}}{D} \right) \frac{\sin \left( \frac{\pi}{\lambda_f} p_x N_{\text{ref}} \Delta X_{\text{med}} \right)}{\sin \left( \frac{\pi}{\lambda_f} p_x \Delta X_{\text{med}} \right)} \right]^2 \quad (6.15)$$

と表され、式 (6.6), (6.3), (6.9) の関係を用いると、

$$S_{\text{inter}} = \left[ \text{tri} \left( \frac{1}{\alpha N_{\text{ref}}} \frac{\Delta X_{\text{med}}}{L_0} \right) \frac{\sin \left( \pi \frac{\Delta X_{\text{med}}}{L_0} \right)}{\sin \left( \pi \frac{1}{N_{\text{ref}}} \frac{\Delta X_{\text{med}}}{L_0} \right)} \right]^2 \quad (6.16)$$

と表される．よって、図 6.7 に示すように、ホログラムのナイキストレート  $\alpha$  が大きいほど、式 (6.16) の中括弧内第 1 項の三角形関数の幅が大きくなり、シフト選択性のセカンドピークに起因するクロストークノイズの影響が大きくなる事が分かる．また、図 6.8 に示すように、ホログラムのシフトピッチレート  $\beta$  が大きいほど、隣り合うピーク同士の間隔が長くなるため、クロストークノイズの影響は小さくなる．さらに、図 6.9 に示すように、参照光画素数  $N_{\text{ref}}$  が大きいほど、三角形関数の幅と原点のピークからセカンドピークまでの間隔は長くなるものの、ピーク幅と隣り合うピーク同士の間隔に変化はないため、クロストークノイズの影響に大きな差は生じない．

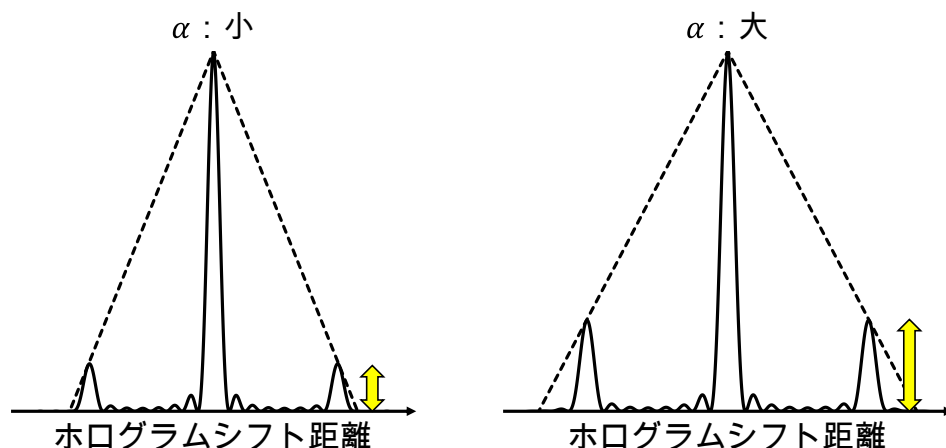


図 6.7 ホログラムのナイキストレート  $\alpha$  とページ間クロストークの変化

### 6.3 信号対ノイズ比による記録再生特性の定量的評価

次に、前節で述べた記録密度・データ転送レート、及びクロストークノイズのシステムパラメータ依存性について、数値計算による定量的な信号対ノイズ比の評価を行った。

まずは、チャンネル数  $N_{\text{ch}}$  を固定し、全く同じ信号・参照パターンを用いた時系列信号の記録再生について、異なるホログラムのナイキストレート  $\alpha$  とシフトピッチレート  $\beta$  によって多重ホログラムの設計を行った。表 6.1 に示した数値計算条件に基づき、チャンネル数  $N_{\text{ch}}$  は 240 点での計算を行った。ここで、 $\alpha$  は 1 から 1.5 まで 0.1 ずつ変化させ、 $\beta$  は 0.3 から 1.5 ま

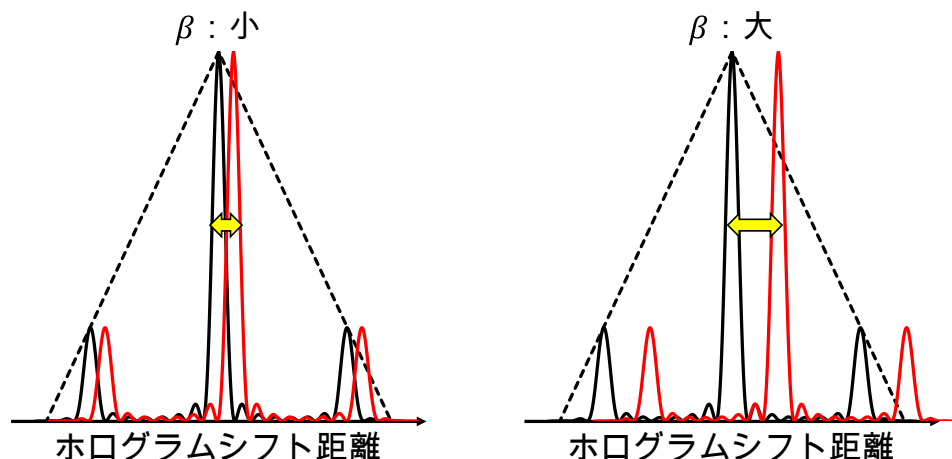


図 6.8 ホログラムのシフトピッチレート  $\beta$  とページ間クロストークの変化

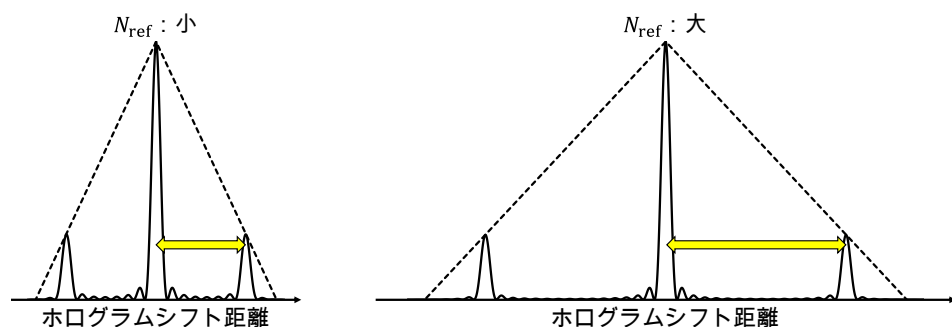


図 6.9 参照光画素数  $N_{ref}$  とページ間クロストークの変化. II 字型信号・参照パターンにおいて, 参照光画素数は信号光画素数の 1/2 に相当する.

で 0.1 ずつ変化させた. 再生像面フレネル回折理論によって, 再生像面における回折光の複素振幅分布を計算し, 各チャンネルの位相変化を計算した. また, 各チャンネルにおける時系列位相信号に関しては, シフト選択性のピークから最初にゼロに落ちるまでの距離の 1/10 の間隔で計算していき, 各ページのピーク付近の位相平均を取った. なお, 時系列位相信号の信号対ノイズ比の評価には, 以下の定義を用いた.

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\pi}{\sqrt{\sigma_{on}^2 + \sigma_{off}^2}} \right) \quad (6.17)$$

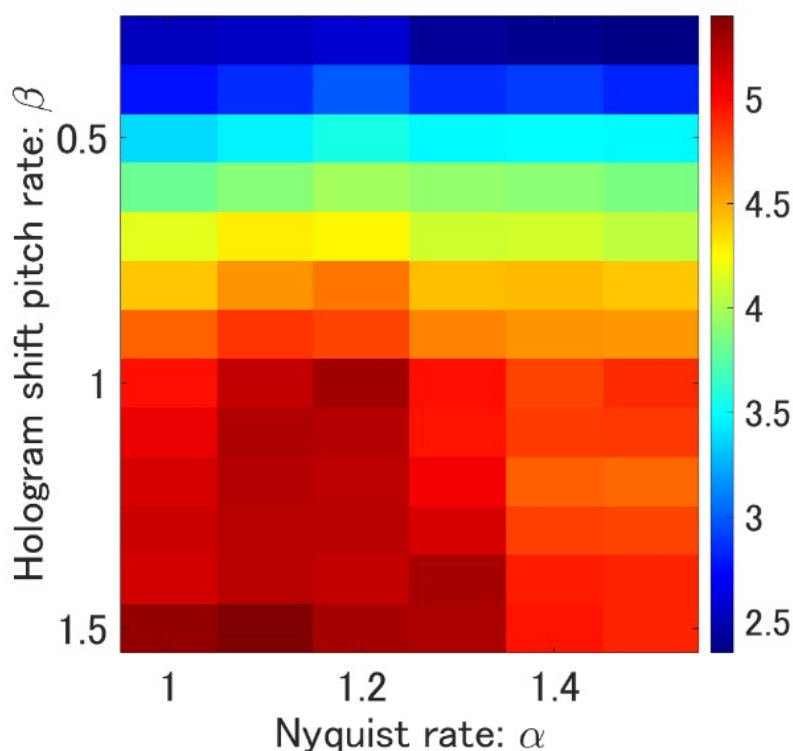
ここで,  $\sigma_{on}$  は, 再生対象となる時系列信号の範囲における, ON であるべき位相信号の標準偏差を表し,  $\sigma_{off}$  は, 再生対象となる時系列信号の範囲における, OFF であるべき位相信号の標準偏差を表している.

上記条件によって得られる SNR の  $\alpha, \beta$  依存性を図 6.10 に示す. ナイキストレート  $\alpha$  が大きい領域では, ページ内クロストークの影響が小さくなる一方で, ページ間クロストーク, 特にシフト選択性のセカンドピークに起因するノイズの影響が大きくなる. 数値計算結果では,  $\alpha$  が 1 に近い領域で SNR が高くなることから, ページ内クロストークの影響よりもページ間クロストークの影響の方が強く影響していると考えられる. また,  $\beta$  が小さい領域で SNR が

表 6.1 数値計算に使用した光学系のパラメーター

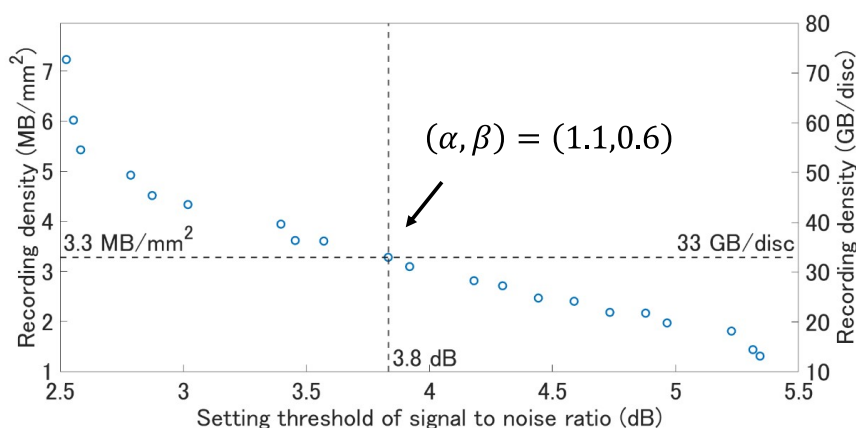
記録再生光の波長 [nm]	405
レンズの開口数	0.85
レンズの焦点距離 [mm]	2
物体面の画素ピッチ [ $\mu\text{m}$ ]	20

下がるのは、ページ間クロストークの影響が大きくなるためであると解釈できる。

図 6.10 SNR の  $\alpha\beta$  依存性 ( $N_{\text{ch}} = 240$ )

次に、図 6.10 を基に許容できる SNR に対する、到達可能な記録密度の関係を図 6.11 に示す。横軸が許容可能な SNR を表し、縦軸が到達可能な記録密度を表す。この結果から、例えば、Blu-ray と同等の記録密度  $3.3\text{MB}/\text{mm}^2$  を実現するには、3.8 dB 以下の SNR が許容できる必要があるということが分かる。この 3.8 dB は十分許容可能な SNR であると考えられるため、本システムは Blu-ray と同等の記録密度が期待できると考えられる。

次に、チャンネル数を 120, 160, 240, 480 に変えたときの許容可能な SNR と到達可能な記録密度の関係を図 6.12 に示す。この図に示すように、今回数値計算を行った範囲ではチャンネル数を変えても時系列信号に大きな変化は見られなかった。これは、チャンネル数の変化量に対して記録密度の変化量が小さいということを意味している。この理由としては、図 6.9 に示すように、チャンネル数（参照光画素数の 2 倍）を変化させてもシフト選択性のセカンドピークの現れる位置が変化するだけで、ピーク幅と記録間隔の關係に相対的な変化がないからであると考えられる。データ転送レートは理論的にチャンネル数に比例することから、こ

図 6.11 許容可能な SNR と到達可能な記録密度の関係 ( $N_{ch} = 240$ )

の結果は、記録密度を大きく低下させることなく、さらなるデータ転送レートの向上が期待できることを示している。また、今回の数値計算で確認されたチャンネル数 480 点の場合におけるデータ転送レートを概算すると、再生時の記録媒体のシフトスピードが 30m/s（これは 6 倍速 Blu-ray Disc の転送速度における、ディスクの最外周速度に相当する）であるとき、Blu-ray Disc と同等の記録密度  $3.3\text{MB}/\text{mm}^2$  に相当するシフトピッチレート  $\beta = 0.6$  において、9GB/s（チャンネル当たりのデータ転送レートは 19MB/s）に相当する。6 倍速 Blu-ray Disc のデータ転送レートが 27MB/s、比較的転送速度の速い磁気テープ（規格：LTO-8）においても 0.4GB/s であることから、本システムがホログラフィックメモリーのチャンネル並列性を活かした高いデータ転送レートを有することが期待できる。

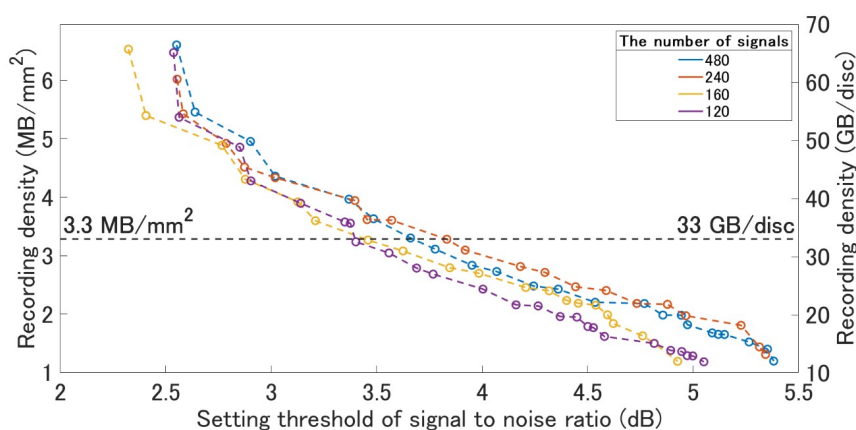


図 6.12 許容可能な SNR と到達可能な記録密度の関係

#### 6.4 表面型ホログラムの作製精度と記録再生特性の関係

最後に、ホログラムの構造作製精度と記録再生特性の関係について数値計算による評価を行った。理論式によって計算される理論的な位相変調分布に対して、実際に構造作製によって



設計される表面型ホログラムは離散的な位相変調分布を取る．ここでは，構造作製によって離散化されるホログラムの空間分解能と位相変調の諧調数に関して，SNR による記録再生特性の比較を行った．

まず，構造作製の空間分解能を制限した場合の再生特性の比較を行った．チャンネル数  $N_{\text{ch}} = 240$  において，前節の評価方法と同様にホログラムのナイキストレート  $\alpha$  と  $\beta$  をそれぞれ変化させ，許容できる SNR と到達可能な記録密度の関係を比較した．この時，設計すべきホログラムにおける最大空間周波数に相当するグレーティングの成分の周期が 338 nm であり，それに対してホログラムの画素ピッチがそれぞれ 21 nm, 42 nm, 84 nm, 126 nm, 168 nm である場合について計算を行った結果を図 6.13 に示す．グラフ全体が左に位置している程，SNR 許容値に対する到達可能な記録密度が低くなる（記録性能が悪くなる）ことを表しており，ホログラムの画素ピッチが小さくなるほど記録性能が向上する様子が確認できた．この時，画素ピッチが 21 nm である場合と 42 nm である場合については，再生特性がほぼ変わらなくなっている（飽和している）ことから，本システムにおいて，理論的なホログラムの位相変調分布を再現する上で 40 nm 程度，すなわち最大空間周波数に相当するグレーティングの成分の周期に対して 4 倍程度の分解能を持つことが必要であることが見積もられた．

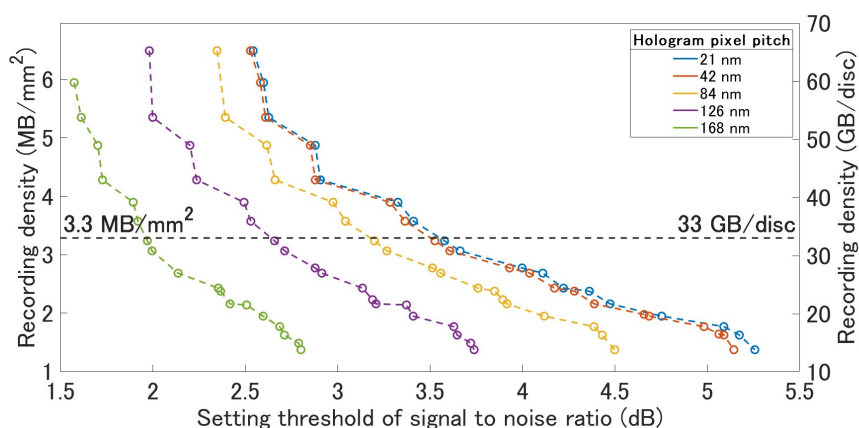


図 6.13 許容可能な SNR と到達可能な記録密度の関係における，ホログラム表面構造の空間分解能の違いによる比較

次に，構造作製した表面型ホログラムの位相変調の諧調数を制限した場合の再生特性の比較を行った．チャンネル数  $N_{\text{ch}} = 240$  において，前節の評価方法と同様にホログラムのナイキストレート  $\alpha$  と  $\beta$  をそれぞれ変化させ，許容できる SNR と到達可能な記録密度の関係を比較した．空間分解能については，最大空間周波数に相当するグレーティングの成分の周期 338 nm に対してホログラムの画素ピッチを 21 nm とした．この時，設計したホログラムの諧調数が 2 諧調，4 諧調，8 諧調，制限なし（コンピューターで計算可能な浮動小数点 16 桁まで）において計算を行った結果を図 6.14 に示す．この図より，2 諧調を除いてほぼ制限しない場合と同等の再生特性が得られる様子が確認できた．このことから，本システムにおいて，理論的なホログラムの位相変調分布を再現する上で少なくとも諧調数は 4 諧調以上にすればよいことが確認できた．

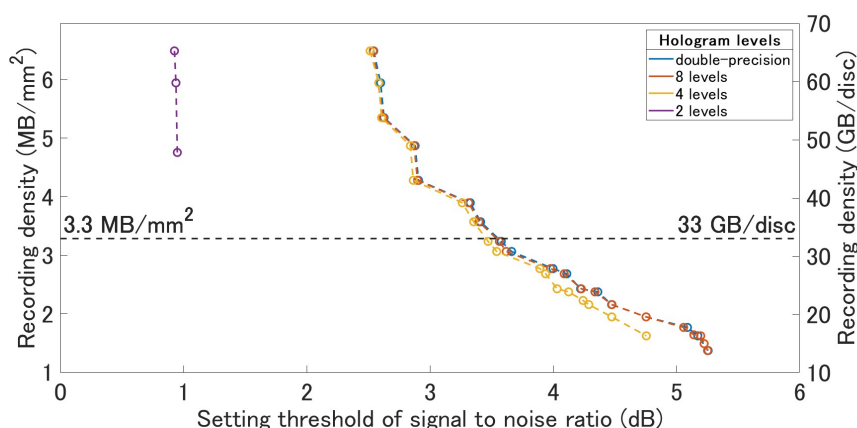


図 6.14 許容可能な SNR と到達可能な記録密度の関係における、ホログラム表面構造の諧調数の違いによる比較

## 6.5 本章のまとめ

本章では、前章で提案した II 字型信号・参照パターンを表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーに適用した場合における時系列信号の記録再生特性の評価を行った。

まず、本システムのシステムパラメーターを整理し、記録密度とデータ転送レートがチャンネル数、ホログラムのナイキストレートとシフトピッチレートに依存することを明らかにした。また、本システムのクロストークノイズについて、ページ内クロストークとページ間クロストークに分けて、それぞれの空間的、時間的な広がりについて、上述したシステムパラメーターとの関係性を議論した。

これらの定性的な関係をふまえて、システムパラメーターの変化に伴う記録再生特性の変化について、SNR による定量的な評価を行い、許容可能な SNR に対する到達可能な記録密度、及びその時のデータ転送レートをフレネル回折理論による数値計算によって見積もった。その結果、Blu-ray と同等の記録密度  $3.3\text{MB}/\text{mm}^2$  に到達するためには、本システムにおいて  $3.8\text{dB}$  以下の SNR が許容可能である必要があることが示された。これは、現実的に達成することが期待できる条件であると考えられ、本システムが従来の光ディスクと同等の記録密度を有することが期待できる。一方でデータ転送レートについては、比例関係にあるチャンネル数を 120 点から 480 点まで変えた場合でも、信号対ノイズ比にほぼ変化が見られないことが定量的に確認できた。この結果から、記録密度を大きく低下させることなく、さらなるデータ転送レートの向上が期待できることが示された。これについては、チャンネル数を変化させてもシフト選択性のセカンドピークの現れる位置が変化するだけで、ピーク幅と記録間隔の関係に相対的な変化がないことが理由であると考えられる。チャンネル数が 480 点の場合における本システムの理論的なデータ転送レートは、再生時の記録媒体のシフトスピードが  $30\text{m}/\text{s}$ 、記録密度  $3.3\text{MB}/\text{mm}^2$  である場合に、 $9\text{GB}/\text{s}$  に相当することが示された。これは 6 倍速 Blu-ray Disc の約 300 倍、磁気テープ（規格：LTO-8）の約 20 倍に到達する見込みがあることを意味しており、本システムがホログラフィックメモリーのチャンネル並列性を活かした高いデータ

転送レートを有することが期待できることが示された。

最後に、表面型ホログラムを構造作製する際の空間的な位相変調分布の離散化によって再生特性がどのように変化するののかについて、数値計算による定量的な評価を行った。その結果、構造作製の空間分解能としては、最大空間周波数に相当するグレーティング成分の周期に対して、4倍程度の空間分解能が必要であることが示された。また、ホログラムの各画素における位相変調諧調数については、4諧調以上の位相変調で作製すれば、理論的なホログラムの再生特性とほぼ同等の再生特性が得られることが示された。

## 第7章

# 総括

本研究は、従来の体積型ホログラフィックメモリの原理的な欠点として挙げられる、記録媒体の変形に伴う再生信号の劣化、及び記録媒体の複製の困難さ、記録媒体の記録特性の空間的な不均一さや不安定さに対して、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリというこれまでとは原理的に異なる特性を持つ新しいシステムを提案し、その記録再生特性を明らかにすることを目的として行った。

それに従い、本研究では、記録再生システムの提案と再生信号の評価（第3章）、本システムの記録再生原理の解析（第4章）、ラマン=ナス回折による本システムのノイズ発生メカニズムの解明とその抑制手法の提案（第5章）、ノイズ抑制に有効なII字型信号・参照パターンを用いた時系列信号の記録再生とその特性評価（第6章）を行った。

### 7.1 本研究のまとめ

以下に、本研究の各過程で得られた成果をまとめる。

#### 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリの記録再生システムの提案

表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリの記録再生システムのシステム構成と記録再生方法について提案し、再生信号の評価を行った。

ホログラムの設計方法については、従来の光書き込みではホログラムに記録されてしまう不要な回折格子を含まないようなホログラムの設計方法を提案し、数値計算によって再生信号画像の信号対ノイズ比が向上することが確認された。

また、数値計算によって再生信号を計算した結果、従来のコリニアホログラフィックメモリの一般的なシフト選択性とは異なり、本システムのシフト選択性には一定のバイアスノイズが残る結果となった。このバイアスノイズは、ホログラムの多重性能を劣化させる要因となるため、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリの大きな問題点であることが明らかとなった。

### 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリの理論解析

表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリの記録再生原理を平面波展開モデルの考え方をを用いて理論的に解析した。

平面波展開モデルの考え方に基づくと、従来のコリニアホログラフィックメモリは参照光とグレーティング成分がブラッグマッチする組み合わせからの回折のみを考えればよいのに対し、本システムでは、1つの参照光に対して、表面型ホログラムに含まれる全てのグレーティング成分による回折が発生し、さらに+1次以外の回折次数をもつ回折も発生するため、信号再生に寄与する回折光以外にも信号に寄与しない複数の回折光についても考慮しなければならないことが分かった。

この解析結果によって、本システムの記録再生特性を解明する上での見通しが良くなった。

### ラムン=ナス回折に起因する再生信号のノイズ発生メカニズムとその抑制手法

表面型ホログラムのラムン=ナス回折に起因した再生信号のノイズについて、回折成分の縮退と高次回折光の位相係数という観点からその発生メカニズムを明らかにした。

その理論的な解析結果を基に、シフト選択性のバイアスノイズを効率的に抑制するためのII字型信号・参照パターンを提案した。

数値計算、および原理検証実験の結果より、II字型信号・参照パターンがシフト選択性のバイアスノイズの抑制に有効であることが確認できた。

### 時系列信号の記録再生特性の解析と定量的評価

II字型信号・参照パターンを表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリに適用した場合における時系列信号の記録再生特性の評価を行った。

まず、システムパラメーターを整理し、記録密度とデータ転送レート、及びクロストークノイズの関係をチャンネル数、及びホログラムのナイキストレートとシフトピッチレートによって記述できることを明らかにした。

次に、信号対ノイズ比による再生特性の定量的評価を行い、本システムが従来の光ディスクと同等の記録密度を有することが示された。また、データ転送レートについては、その比例関係にあるチャンネル数の変化に対して、再生特性が変化があまり見られないことから、記録密度を犠牲にすることなく高いデータ転送レートが期待できることが示された。

最後に、表面型ホログラムを構造作製する際の空間的な位相変調分布の離散化によって再生特性がどのように変化するかについて、数値計算による定量的な評価を行った。その結果、構造作製の空間分解能としては、最大空間周波数に相当するグレーティング成分の周期に対して、4倍程度の空間分解能が必要であることが示された。また、ホログラムの各画素における位相変調諸調数については、4諧調以上の位相変調で作製すれば、理論的なホログラムの再生特性とほぼ同等の再生特性が得られることが示された。

## 7.2 今後の展望

本研究では、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリの記録再生原理、記録再生特性の解明に対して、理論解析によるアプローチで研究を行った。本研究の成果より、本システムの記録再生における原理・メカニズムの物理的な描像、そしてパラメーターとの物理的な関係性について解明することができた。本研究で得られた理論的な知見は、表面型ホログラムを用いた光メモリの将来的な実用化・応用に向け、信号対ノイズ比の向上などのシステムのさらなる最適化を行う上での指針として役立つことが期待される。本研究では、再生像面の回折光から得られる生の再生信号に対して信号対ノイズ比の評価を行うことで記録密度とデータ転送レートの見積りを行ったが、最終的な記録密度とデータ転送レートの値は、再生信号の信号対ノイズ比がどこまで許容できるかによって決定されるため、信号処理などのソフトウェア技術や構造作製技術などのシステムの最適化によって、さらなる記録密度・データ転送レートの向上が期待できる。

また、表面型ホログラムは体積型ホログラムとは異なり、構造作製による設計が容易に可能である点に注目すると、メタサーフェスホログラムを応用したホログラフィックメモリへの応用が期待できる。本研究では位相変調型の表面型ホログラムを用いたホログラフィックメモリのシステムについて研究を行ったが、メタサーフェスを用いることで位相変調以外にも、振幅・偏光状態といった、さらなる光学特性の変調を同時に行うことができるようになり、表面型ホログラムを用いたホログラフィックメモリならではの新たな記録再生特性を持つシステムの実現が期待できる。

## 参考文献

- [1] Welsh, H. F., and H. Lukolf. Managing Requirements Knowledge, International Workshop on. IEEE Computer Society, 1952.
- [2] P. J. van Heerden, *Appl. Opt.* 2, 393-400 (1963).
- [3] F. S. Chen, J. T. LaMaccia, D. B. Frazer, *Appl. Phys. Lett.*, 13, 223 (1968)
- [4] C. Gu and P. Yeh, *Opt. Lett.*, 16, 1572 (1991)
- [5] Hesselink, Lambertus, et al. *Science* 282.5391 (1998): 1089-1094.
- [6] Liu, Hongpeng, et al. *Optics Express* 18.7 (2010): 6447-6454.
- [7] Ortuño, Manuel, et al. *Optics Express* 15.19 (2007): 12425-12435.
- [8] Rhee, Uhssock, et al. *Optical Engineering* 32.8 (1993): 1839-1847.
- [9] Orlov, Sergei S., et al. *Applied optics* 43.25 (2004): 4902-4914.
- [10] A. Pu and D. Psaltis, *Appl. Opt.*,35, 2389-2398 (1996)
- [11] Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan, and Jun Li. *Applied optics* 44.13 (2005): 2575-2579.
- [12] N. Suzuki and Y. Tomita, *Opt. Express*, 14, 712-719 (2006)
- [13] M. Toishi, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, 3438-3447 (2007)
- [14] M.R. Glesson, et al., *J. Appl. Phys.*, 102, 023108-1-023108-9 (2007)
- [15] X. Liang, X. Xu, S. Solaniki, M. Li, R. B. A. Tanjung and T. -C. Chomg, *Int. Workshop on Holographic Memory, Tahara, Japan* (2008), paper 21P8.
- [16] H. Shyuan, J.-P. Liu and W.-C. Su, *Int. Workshop on Holographic Memory, Tahara, Japan* (2008), paper 22P5.
- [17] Dai, Foster, and Claire Gu. *Optics letters* 22.23 (1997): 1802-1804.
- [18] Yasuda, Shin, et al. *Optics letters* 31.11 (2006): 1639-1641.
- [19] Burr, Geoffrey W., et al. *Optics Letters* 23.4 (1998): 289-291.
- [20] Gabor, Dennis. *nature* 161 (1948): 777-778.
- [21] Chen, Cheng, et al. *Optics Express* 28.25 (2020): 38355-38365.
- [22] Huang, Lingling, et al. *Nature communications* 4.1 (2013): 1-8.
- [23] Ye, Weimin, et al. *Nature communications* 7.1 (2016): 1-7.
- [24] Ren, Haoran, et al. *Nature communications* 10.1 (2019): 1-8.
- [25] Pei Yang, Rui Yang, Yachao Li, and Li Bai, *Opt. Express* 28, 5200-5211 (2020)
- [26] Zaperty, Weronika, Tomasz Kozacki, and Małgorzata Kujawińska. *Journal of Display Technology* 12.12 (2016): 1724-1731.
- [27] Lin, Shu-Feng, et al. *Optics and Lasers in Engineering* 126 (2020): 105895.

- [28] A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levinstein, and K. Nassau, *Appl. Phys. Lett.* 9, 72 (1966)
- [29] D. von der Linde, A. M. Glass, and K. F. Rodgers, *Appl. Phys. Lett.* 25,155 (1974)
- [30] L. Dhar, et al., *Opt. Lett.* 23, 1710-1712 (1998).
- [31] An, Xin, and Demetri Psaltis. *Optics letters* 20.18 (1995): 1913-1915.
- [32] D. L. Staebler, J. J. Amodei, and W. Philips, in *Digest of Seventh International Quantum Electronics Conference (Joint Council on Quantum Electronics, Montreal, 1972)*, p. 611.
- [33] Fai H. Mok, *Opt. Lett.* 18, 915-917 (1993)
- [34] A. Hoskins, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 47, 7, 5912-5914 (2008)
- [35] Ochiai, Takanori, et al. *Optics letters* 38.5 (2013): 748-750.
- [36] Rakuljic, George A., Victor Leyva, and Amnon Yariv. *Optics letters* 17.20 (1992): 1471-1473.
- [37] G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, *Opt. Lett.* 17, 1471 (1992).
- [38] S. Yin, H. Zhou, F. Zhao, M. Wen, Y. Zang, J. Zhang, and F. T. S. Yu, *Opt. Commun.* 101, 317 (1993).
- [39] Wang, Chen, et al. *Applied Optics* 60.31 (2021): 9706-9712.
- [40] Sun, Ching-Cherng, et al. *Optics Express* 15.26 (2007): 18111-18118.
- [41] K. Tanaka, et al., *Opt. Data Storage Conf.*, Buena Vista, Florida (2009), paper TuC3.
- [42] K. Kimura, *Opt. Lett.*, 30, 878-880 (2005)
- [43] Y. Kaneko, et al., *Joint Int. Symp. on Opt. Memories and Opt. Data Storage*, Honolulu, Hawaii, July (2005), paper MP22.
- [44] I. Yamaguchi, and T. Zhang, *Opt. Lett.* 22, 1268-1270 (1997).
- [45] Le, Anh Tuan, and Kiyomichi Araki. 2008 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems. IEEE, 2008.
- [46] 川崎 正人. 時系列信号方式コリニアホログラフィックメモリーの記録再生特性. 東京大学大学院工学系研究科修士論文 (2013).
- [47] 大森 遼. 位相変調型時系列コリニアホログラフィックメモリーの研究. 東京大学大学院工学系研究科修士論文 (2018).
- [48] 金 東錫. 位相変調型時系列信号方式コリニアホログラフィックメモリーの再生信号特性の解析. 東京大学大学院工学系研究科修士論文 (2019).
- [49] Q. Gao and R. Kostuk, *Appl. Opt.*, 37, 929-936 (1998)
- [50] Shimura, Tsutomu, et al. "Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function." *Optics letters* 31.9 (2006): 1208-1210.
- [51] Bagnoud, Vincent, and Jonathan D. Zuegel. "Independent phase and amplitude control of a laser beam by use of a single-phase-only spatial light modulator." *Optics letters* 29.3 (2004): 295-297.



# 研究業績

## ■原著論文・学術雑誌論文

1. Soki Hirayama, Ryushi Fujimura, Shinsuke Umegaki, Yoshito Y. Tanaka and Tsutomu Shimura  
“**Theoretical Study of a Surface Collinear Holographic Memory**”  
*Photonics, MDPI* 6, 70 (2019).

## ■学会発表（国際会議）

[口頭発表・査読あり]

1. Soki Hirayama, Ryushi Fujimura, Shinsuke Umegaki, Yoshito Y. Tanaka and Tsutomu Shimura  
“**Noise Analysis of a Surface Collinear Holographic Memory**”  
International Workshop on Holography and related technologies 2019 (IWH2019).  
7a-6, Penang School of Toyohashi Tech, Penang, Malaysia (Nov. 2019).
2. Soki Hirayama, Ryushi Fujimura, Yoshito Y. Tanaka and Tsutomu Shimura  
“**Improvement of multiplicity in surface collinear holographic memory using,  $\Pi$ (Pi)-shaped signal and reference pattern**”  
International Workshop on Holography and related technologies 2020 (IWH2020).  
IWH-13, Hybrid (Sun Moon Lake Hotel, Nantou, Taiwan) (Oct. 2020).

[ポスター発表・査読あり]

1. Soki Hirayama and Shinichi Komatsu  
“**Two-step digital holography by phase shifting based on polarization**”  
21st Microoptics Conference (MOC2016). 13C-16, David Brower Center, Berkeley, CA, USA (Oct. 2016).

## ■学会発表（国内会議）

[口頭発表・査読なし]

1. 平山颯紀, 藤村隆史, 遠藤政男, 田中嘉人, 志村努, “表面型ホログラフィックメモリー”,

- 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 10p-W331-10, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2019 年 3 月.
2. 平山颯紀, 藤村隆史, 梅垣真佑, 田中嘉人, 志村努, “表面型ホログラフィックメモリーにおけるノイズ解析”, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-E319-12, 北海道大学札幌キャンパス, 2019 年 9 月.
  3. 平山颯紀, 藤村隆史, 田中嘉人, 志村努, “グレーティングの重複を除いた表面型ホログラフィックメモリーにおける記録再生特性の評価”, 第 67 回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-B415-1, 上智大学四谷キャンパス, 2020 年 3 月 (中止, 発表成立扱い, 講演奨励賞受賞記念講演).
  4. 平山颯紀, 藤村隆史, 田中嘉人, 志村努, “表面型コリニアホログラフィックメモリーにおける II 字型信号参照パターンを用いた多重性能向上”, 日本光学会年次学術講演会 (OPJ2020), 14a-D3, オンライン, 2020 年 11 月.
  5. 平山颯紀, 藤村隆史, 田中嘉人, 志村努, “表面型シフト多重ホログラフィックメモリーにおける時系列信号の記録再生特性の評価”, 第 68 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-Z28-12, オンライン, 2021 年 3 月.
  6. 平山颯紀, 藤村隆史, 田中嘉人, 志村努, “表面型シフト多重ホログラフィックメモリーにおける記録再生特性の数値解析と定量的評価”, 日本光学会年次学術講演会 (OPJ2021), 28p-C5, ハイブリッド (国立オリンピック記念青少年総合センター), 2021 年 10 月.

## ■特許

[公開中]

1. 志村努, 平山颯紀, 藤村隆史, “ホログラムの設計方法、ホログラム再生装置及びホログラム記録媒体”, 出願番号: 2020-032351, 公開番号: 2021-135417 (出願日: 2020 年 2 月 27 日, 公開日: 2021 年 9 月 13 日).

## ■受賞

1. 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会 講演奨励賞 (2019.09).

## ■奨学金・助成金

1. 一般財団法人 生産技術研究奨励会 “2019 年度第 2 回国際研究集会派遣助成” 165,000 円 (2019.11).

# 謝辞

本論文は、東京大学生産技術研究所にて、志村努教授のご指導の下、東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻の博士課程における研究成果をまとめたものです。本研究を進めるにあたり、非常に多くの方のご指導・助言・お力添えをいただきました。ここに深く感謝を申し上げます。

指導教員である志村努教授には、基礎知識や結果に対する理論的な考察、研究の進め方、研究発表、論文の作成、研究者としての姿勢など、研究活動におけるあらゆる面で丁寧にご指導賜りました。日々のミーティングでは、時間を惜しまず私が納得するまで議論に付き合ってくださいました。心より感謝申し上げます。

芦原聡教授には、光応用工学特別研究会などの場で研究内容に関する貴重なご指摘・ご助言をいただきました。普段の研究生活の中でも私の研究について真剣にアドバイスをくださったり、進捗や健康状態についても度々気にかけてくださるなど、大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

宇都宮大学の藤村隆史准教授には、日々のミーティングで結果に対する解釈や斬新な発想は、研究を進める上で大いに役立ちました。また、私がなかなか理解できなかった物事に対しては、私の理解が進むように大変分かりやすい説明をして下さるなど、大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

近藤高志教授、山下真司教授、高橋哲教授には、本博士論文の副査をご担当いただきました。本博士論文の審査において、数多くの有益なご指摘を賜り、本博士論文をより良いものにすることができました。心より感謝申し上げます。

田中嘉人助教には、日々のミーティングで研究を進める上での考え方や研究発表の方法、研究者としての姿勢など、多くの助言をいただきまして大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

遠藤政男特任研究員には日々のミーティングで大変お世話になりました。光学系に関する豊富な知識で様々なアドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。

梅垣真佑シニア研究員には、日々のミーティングで鋭いご指摘と貴重なご助言をいただきました。発表に関するアドバイスや論文の添削など、大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

技術職員の鎌田久美子氏、秘書の立花佳美氏には、事務手続きや研究室の生活面でたくさんのご支援をいただきました。研究に専念することができたのは両氏のお力添えあってこそです。心より感謝申し上げます。

志村研究室の紫垣政信氏には、光学系の設計や機器の制御など、さまざまな面で大変お世話

になりました。ホログラフィックメモリーに関する多くの情報を共有していただき、また研究の相談や日常会話などをしてくださったおかげで、大変楽しく研究生生活を送ることができました。心より感謝申し上げます。

志村研究室の Kim Dongsok 氏, Luo Xin 氏, 新原寛太氏, 古山昂樹氏, 佐藤秀樹氏には、ホログラフィックメモリーのミーティングなどで、研究に関する多くのアドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。

志村研究室の Wu An'an 氏, 福原竜馬氏, 木村友哉氏, 坂間俊亮氏, Won Jihee 氏, 宇都隆宏氏とは、普段会話することも多く、研究に関することや他愛ない会話など、日々の研究生生活を非常に楽しく有意義に送ることができました。心より感謝申し上げます。

芦原研究室の皆様とは、日々の研究生生活やな光応用工学特別研究会などで一緒に活動することも多く、熱心に研究に取り組む姿勢を学ばせていただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、私に博士課程で学びを得る機会を与え、そして私の健康面を支え続けてくれた家族に深く感謝申し上げます。

2022年1月 平山 颯紀